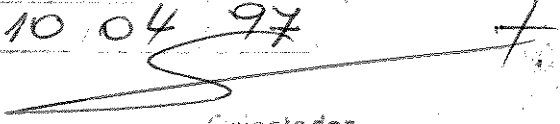


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

Modelos de Otimização Equivalentes Para Minimização de Perdas Através do FPO Newton

por Leonardo Nepomuceno
orientador Anésio dos Santos Júnior

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por LEONARDO NEPOMUCENO
e aprovada pela Comissão
Julgadora em 10/04/97

Orientador

Tese submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

maio 1997

9708541



UNIDADE BC
N.º CHAMADA: J/Unicamp
N352m
V. E
TOMBO BC/ 31198
PROC. 283/97
C ☐ D ☒
PREÇO R\$11,00
DATA 25/07/97
N.º CPD

CM-00 099667-E

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

N352m

Nepomuceno, Leonardo✕

Modelos de otimização equivalente para minimização de perdas através do FPO Newton / Leonardo Nepomuceno. --Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Anésio dos Santos Júnior. ✕

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Otimização matemática. ✕ 2. Energia elétrica - Transmissão. ✕ 3. Sistemas de energia elétrica - Controle. ✕

I. Santos Júnior, Anésio dos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Ao Processo

Este trabalho teve suporte financeiro da **CAPES** e **FAPESP** através do projeto temático de equipe sobre o Planejamento e Operação de Sistemas de Energia Elétrica com Predominância de Geração Hidroelétrica .

Resumo

Os estudos de otimização "on-line" realizados nos centros de controle têm apresentado algumas deficiências, apontadas na literatura, que têm limitado suas aplicações práticas na operação dos sistemas de potência. O presente trabalho enfoca uma destas deficiências, qual seja, a representação das áreas externas (modelos de equivalentes externos) durante estudos com ferramentas de otimização reativa através de um Fluxo de Carga Ótimo tipo Newton. Tradicionalmente, os modelos de equivalentes externos e as ferramentas de otimização foram desenvolvidos separadamente. Este trabalho enfoca o uso de ferramentas de otimização reativa acopladas a modelos de representação de áreas não observáveis, propondo e discutindo conceitos envolvidos. Para isso, inicialmente alguns modelos equivalentes clássicos, utilizados nos estudos de Análise de Segurança Estática, são reavaliados no contexto dos estudos de otimização. Para a avaliação dos modelos equivalentes em estudos de otimização é proposta uma Metodologia de Análise. Dadas as deficiências apresentadas pelos modelos clássicos, é proposto um enfoque de otimização para modelos equivalentes de representação das áreas externas. Os modelos são formulados como problemas de otimização com as áreas externas representadas de forma explícita (sem redução). A representação das áreas externas é feita conjuntamente com o modelo da otimização da parte interna do sistema através de um problema denominado Fluxo de Carga Ótimo Equivalente (FCOE). São propostos ainda modelos Híbridos que sintetizam, em uma metodologia unificadora, o modelo reduzido Ward Estendido e as ferramentas tipo FCOE propostas. São propostas três formas de ajustes (casamento na fronteira) dos modelos Híbridos com a parte interna do sistema. Os erros de representação das áreas externas têm sido bastante reduzidos com a utilização dos modelos híbridos e das ferramentas tipo FCOE, conforme resultados apresentados e discutidos. O presente trabalho contribui, desta forma, no sentido de viabilizar os estudos de otimização reativa levando em conta a interação com áreas não observáveis pelos centros de controle.

Abstract

On-line optimization studies performed on control centers present some deficiencies, pointed-out in literature, limiting the scope of their practical applications in power system operation. This work focuses on one of such deficiencies: the representation of external areas (external equivalent models) during studies with reactive optimization tools such as a Newton Optimal Power Flow. External equivalent models and optimization tools have been traditionally developed separately. This work focuses on the use of reactive optimization tools coupled to models representing external non-observable areas, proposing and discussing related concepts. For such a purpose, some classical equivalent models are evaluated in the context of optimization studies. An Analysis Methodology is proposed to evaluate equivalent models in optimization studies. Given the deficiencies presented by classical models, an optimization approach to equivalent models is proposed. The models are formulated as optimization problems having the external area represented explicitly (with no reduction). The representation of such external models is obtained simultaneously with internal optimization solution, through a problem named Equivalent Optimal Power Flow (FCOE). Hybrid models, synthetizing the Extended Ward models and the FCOE tool in an unifying approach are analysed. Three alternative ways of coupling (boundary matching) Hybrid models to the internal system are proposed. Errors on representation of external areas have been considerably reduced with the use of Hybrid models and FCOE type tools, as pointed-out in the results presented and discussed. In such a perspective, this work contributes to afford on-line reactive optimization studies in control centers.

Agradecimentos

Lembrar as pessoas que contribuíram para a realização de uma tese é uma tarefa no mínimo delicada. Várias pessoas interferem diretamente no caminho, entre elas os familiares, os amigos mais próximos, os colegas de departamento, o orientador, etc. Os créditos desse trabalho devem ser divididos entre estas pessoas maravilhosas com quem eu tenho convivido. Posso me alegrar em dizer que tem sido muito proveitosa esta estada aqui na UNICAMP, onde me sinto sempre em casa.

Trabalhar com o Anésio tem sido um privilégio, não só por se tratar de um profissional impecável mas também pela forma humana com que ele conduz os seus trabalhos. Às vezes, sua sala era como a sala de um psicoterapeuta e eu o analisado. Foram 6 anos de trabalho muito harmônico.

Aos meus pais Vicente e Lourdes que moldaram minha personalidade e são presença constante nos meus trabalhos, muito obrigado por tudo.

Aos meus super-amigos Paulão, Caixeta, Carla, Vandoel, Cássio, Dino, Gelson, Reinaldo, que aguentaram aquela conversa de que o programa não convergia ... que o gradiente não zerava, etc.

À turma dos "intelectuais" do segundo ano colegial do Colégio Estadual Prof. Zama Maciel de Patos de Minas, pela inspiração.

À Lilian e ao Norberto, muito obrigado por tudo.

Aos colegas do DENSIS muito obrigado pelo apoio e pelas discussões.

E finalmente, devo agradecer à CAPES e à FAPESP, entidades que deram apoio financeiro a este trabalho.

Conteúdo

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CONTEÚDO	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
1 Introdução	1
1.1 O Ambiente da Operação	1
1.2 Modelos Equivalentes e Otimização Reativa	2
1.3 Contextualização do Problema no Panorama Brasileiro	5
1.4 Divisão do Trabalho	6
2 Modelos de Representação das Partes Externas	8
2.1 Revisão Histórico-Bibliográfica	8
2.2 Divisões do Sistema de Potência	9
2.3 Modelos Equivalentes Reduzidos Tipo Ward	11
2.4 Modelo Ward Estendido	13

2.5	Modelos Baseados em Fluxo de Carga	16
2.6	Modelos Baseados em Estimacão de Estado	18
2.7	Áreas de Amortecimento	21
3	FPO Reativo e Técnicas de Solução	23
3.1	O FPO e suas Aplicações	23
3.2	FPO Reativo - Problema de Mínicas Perdas	25
3.2.1	Função Objetivo - Perdas na Transmissão	25
3.2.2	Restrições do Problema	26
3.2.3	Restrições de Desigualdade	27
3.3	Técnicas de Solução: Newton, Penalidades e Parametrização	28
3.3.1	Tratamento das Restrições em Variáveis	28
3.3.2	Problema do FPO Modificado	29
3.3.3	Solução da FASE I Pelo Método de Newton	30
3.3.4	Restrições de Desigualdade	31
3.3.5	Política de Penalidades	33
4	Modelos Equivalentes e Estudos de Otimização On-Line	34
4.1	Introdução	34
4.2	Implementação Prática de um FPO On-line	36
4.3	Modelo WE e Otimização Reativa	37
4.3.1	Comparando os Modelos WE para Otimização	39
4.4	Um Modelo Reduzido [49]	40
4.4.1	Descrição do Modelo Reduzido	41
4.4.2	Casamento na Fronteira Diferenciado	43
4.5	Modelos Reduzidos & Não reduzidos	46
4.6	Conclusões	46

5	Proposta de Uma Metodologia de Análise	48
5.1	Avaliação de Processos de Otimização Equivalentes	48
5.1.1	Cenários Padrões de Otimização	49
5.2	Metodologia de Análise de Modelos Equivalentes	54
5.2.1	Primeiro Nível de Análise - Avaliação do Processo de Otimização Equivalente	54
5.2.2	Segundo Nível de Análise - Resposta do Equivalente a Alterações em Controles	56
6	Modelos de Otimização Equivalentes	60
6.1	Introdução	60
6.2	Modelo de Otimização Equivalente	61
6.3	Áreas de Amortecimento Interfaceando o FCOE com Modelos Reduzidos . .	64
6.4	Fronteiras e Áreas de Amortecimento	65
6.5	Casamento na Fronteira Geográfica F do Sistema Interno	67
6.6	Casamento na Fronteira em Duas Etapas	68
6.7	Casamento Independente: Ativos (série)/Reativos (shunt)	69
7	Modelamento Externo: Dados, Restrições e Variação em Controles Fictícios	72
7.1	FCOE na Análise de Respostas Externas	72
7.1.1	Efeito de Erros na Representação de Tensões Controladas Externas .	73
7.1.2	Efeitos de Erros na Representação de Taps Externos	75
7.1.3	Efeito de Erros na Previsão dos Níveis Externos de Carga/Geração .	76
7.2	Restrições e Controles Fictícios Externos	76
7.3	Generalizando os Processos de Otimização de Referência e Equivalente . . .	80
7.4	Estudos com Áreas de Amortecimento	81
7.5	Conclusões	82

8	Resultados e Comparações	88
8.1	Introdução	88
8.2	Estudos de Otimização no Sistema Completo	89
8.2.1	Solução Básica Inicial - SB0	89
8.2.2	Otimização de Referência - II	91
8.2.3	Otimização de Referência - GG	91
8.2.4	Otimização de Referência - IG	91
8.3	Estudos de Otimização Equivalente	93
8.3.1	Otimização Equivalente com o modelo WE	94
8.3.2	Otimizações Equivalentes com Modelos FCOE	95
8.3.3	Otimizações Equivalentes com Modelos Híbridos	97
8.4	Análise Comparativa dos Modelos Externos	99
8.4.1	Primeiro Nível de Análise	99
8.4.2	Segundo Nível de Análise	108
8.5	Conclusões	113
9	Conclusões	115
	BIBLIOGRAFIA	120
a	Estruturação da Matriz W	125
b	Avaliando Alterações na Fase II	129
c	Sistema Sul-Sudeste Brasileiro	131

Lista de Figuras

1.1	Reações Externas a Alterações Internas	2
2.1	Divisão Geográfica do Sistema	9
2.2	Divisão do Sistema Baseado Na Estimação	10
2.3	Modelo WE	15
2.4	Modelo WE com Shunts Fictícios	16
2.5	Modelo Externo Baseado em Estimação	19
2.6	Zonas de Amortecimento	21
3.1	Caminho Percorrido	32
4.1	Modelo Reduzido para Otimização	44
5.1	Exemplo de Política de Penalidades	50
5.2	Visão do Processo de Otimização	56
5.3	Primeiro Nível de Análise - Diagrama	57
5.4	Resposta a Alterações em Controles	58
5.5	Avaliação de Perdas e Restrições Internas	59
6.1	Divisão de um Sistema-Exemplo	65
6.2	Fronteira Móvel	66
6.3	Casamento em Uma Etapa	68

6.4	Casamento em Duas Etapa-Primeira Etapa	69
6.5	Casamento em Duas Etapa-Segunda Etapa	70
6.6	Casamento Independente - Primeira Etapa	71
6.7	Casamento Independente - Segunda Etapa	71
7.1	Influência dos Controles de Tensão Externos	74
7.2	Influência dos Taps de Transformadores Externos	75
7.3	Influência das Cargas/Gerações Externas	77
7.4	Controles Fictícios e Restrições Externas	79
7.5	Influência das Cargas e Gerações Externas com Restrições Externas Consi- deradas	84
7.6	Influência dos Controles de Tensão Externos com Restrições Externas Con- sideradas	85
7.7	Influência dos Taps com Restrições Externas Consideradas	86
7.8	Influência das Áreas de Amortecimento	87
8.1	Comparação Entre as Referências	95
8.2	Estudo II - Comparação Entre os Modelos	103
8.3	Estudo IG - Comparação Entre os Modelos	106
8.4	Estudo GG - Comparação Entre os Modelos	109
a.1	Estrutura da Matriz Lagrangeana.	126
a.2	Sistema exemplo	127
a.3	Estrutura da Matriz Lagrangeana para o sistema teste	128
b.1	Alterações nos Passos de Parametrização	130
c.1	Sistema Sul-Sudeste - Divisão por Áreas	132

Lista de Tabelas

4.1	WE - Erros nas Tensões Internas	38
4.2	WE - Erros nos Fluxos de Potência Internos	39
8.1	Solução Básica Inicial - SB0	90
8.2	Otimização de Referência - II	92
8.3	Otimização de Referência - GG	93
8.4	Otimização de Referência - IG	94
8.5	Otimização Equivalente com WE	96
8.6	Otimização Equivalente -FCOE _{II}	97
8.7	Otimização Equivalente -FCOE _{IG}	98
8.8	Otimização Equivalente -FCOE _{GG}	99
8.9	Otimização Equivalente - BUF _{II}	100
8.10	Otimização Equivalente - BUF _{IG}	101
8.11	Otimização Equivalente -BUF _{GG}	102
8.12	Modelo WE - Caso II - Maiores Erros nos Controles	104
8.13	Modelo BUF _{II} - Maiores Erros nos Controles	104
8.14	Modelo FCOE _{II} - Maiores Erros nos Controles	105
8.15	Estudo II - Valores Médios	105
8.16	Modelo WE - Caso IG - Maiores Erros nos Controles	107
8.17	Modelo BUF _{IG} - Maiores Erros nos Controles	107

8.18 Modelo $FCOE_{IG}$ - Maiores Erros nos Controles 108

8.19 Estudo IG - Valores Médios 108

8.20 Modelo WE - Caso GG - Maiores Erros nos Controles 110

8.21 Modelo BUF_{GG} - Maiores Erros nos Controles 110

8.22 Modelo $FCOE_{GG}$ - Maiores Erros nos Controles 111

8.23 Estudo GG - Valores Médios 111

8.24 Segundo Nível - Estudo II 112

8.25 Segundo Nível - Estudo IG 112

8.26 Segundo Nível - Estudo GG 113

c.1 Sistema Sul-Sudeste - Características Básicas 131

Capítulo 1

Introdução

1.1 O Ambiente da Operação

Os sistemas elétricos de potência constituem uma estrutura complexa de unidades interligadas de forma a gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica necessária ao mundo moderno. Para que esta energia chegue aos pontos de consumo com níveis de qualidade e produtividade compatíveis, são necessários estudos diários envolvendo o planejamento, operação e manutenção dos sistemas. Tais estudos são realizados nos sistemas de potência de forma hierarquizada, com modelos específicos para cada nível considerado. De uma forma bastante genérica o planejamento se subdivide nos planejamentos a longo, médio, curto prazo, pré-despacho e operação dos sistemas. Esta cadeia de planejamento envolve desde modelos energéticos até modelos de operação do sistema elétrico em tempo real.

Este trabalho enfoca diretamente os aspectos de operação em tempo real dos sistemas de potência no que diz respeito à representação de suas partes não observáveis por um determinado centro de controle. Desde que foram propostos por Dy Liacco [9] os centros de controle têm se desenvolvido buscando cada vez mais compatibilizar aspectos de segurança e confiabilidade com os critérios econômicos.

Os estudos em tempo real estão baseados em processos de aquisições periódicas de dados nos centros de controle. Assim, em intervalos de tempo, dados analógicos associados ao "status" atual do sistema são enviados ao centro de controle. Estes dados são tratados através de filtragem e eliminação de erros por uma ferramenta denominada Estimador de Estado. A estimação do estado atualizado fornece as bases para a maioria dos estudos realizados na operação dos sistemas, tais como: análise de segurança estática, ferramentas envolvendo fluxo de carga ótimo, fluxo de carga do despachante, etc.

Alguns estudos realizados a partir do estado atual, dado pelo estimador, simulam alterações no sistema no sentido de especular sobre possíveis consequências de tais ocorrências. Nos estudos de análise de contingência, por exemplo, é simulada a retirada de alguns elementos para se especular o nível de segurança que o sistema apresentaria no caso destas ocorrências. Outro exemplo são os estudos de otimização, que propõem alterações em determinados controles de modo que o sistema possa vir a operar de forma mais otimizada do ponto de vista de um determinado critério e ainda obedecendo a determinadas restrições.

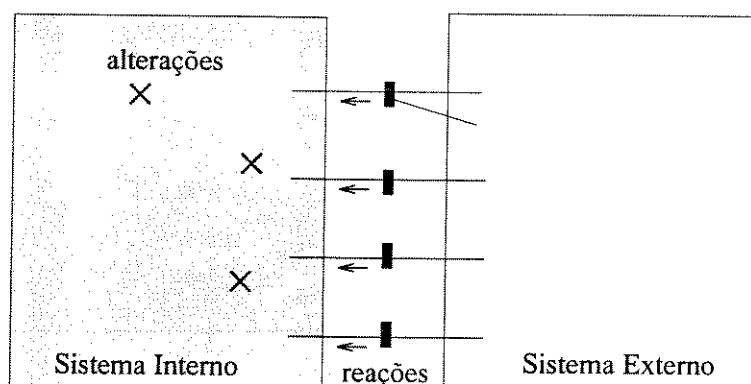


Figura 1.1: Reações Externas a Alterações Internas

Todos os estudos, realizados a partir do estado estimado, que propõem ou calculam prováveis alterações no sistema têm uma característica em comum: para que sejam confiáveis é necessário que as reações dos sistemas vizinhos (externos), também sejam modeladas. Entretanto, a estimação de estado fornece informações relativas apenas o estado atual do sistema interno. É necessário, portanto, que nestes estudos a resposta dos sistemas externos sejam modeladas. Os modelos de resposta externa são denominados modelos Equivalentes Externos, e têm sido utilizados como parte integrante dos centros de controle. Note-se que nestes estudos não se necessita saber qual o estado atual do sistema externo, mas qual a reação deste sistema na parte interna, que é de interesse. Os modelos equivalentes externos são portanto ferramentas auxiliares imprescindíveis a todas as demais ferramentas que necessitam das respostas externas a determinadas simulações de alterações.

1.2 Modelos Equivalentes e Otimização Reativa

Os modelos equivalentes foram primeiramente desenvolvidos para auxiliar a ferramenta de análise de segurança. Nestes casos, tais modelos devem ser capazes de representar a reação da parte externa a alterações tais como contingências de linhas, transforma-

dores, geradores, etc. Para tal, alguns modelos foram propostos, sendo que na literatura, pode-se destacar basicamente três linhas de modelagem: os modelos reduzidos, os modelos não reduzidos e os modelos baseados em estimação de estado. Todas estas linhas de modelagem foram implementadas em centros de controle [48], com diferentes variações, e têm fornecido resultados considerados satisfatórios para os estudos de Análise de Segurança. Os modelos mais expressivos associados às linhas de pesquisa citadas são: nos modelos reduzidos o modelo Ward Estendido (WE) [23], nos modelos não reduzidos aquele proposto em [26], nos modelos baseados em estimação de estado aquele proposto em [25]. Uma comparação entre os modelos WE e os não reduzidos é dada em [29], onde se mostra que o modelo equivalente não reduzido é mais preciso que o WE para estudos de Análise de Segurança. Entretanto, o esforço computacional de manutenção dos modelos não reduzidos é bastante maior. Para os estudos de análise de segurança o modelo WE possui uma boa relação de compromisso entre a precisão e esforço computacional.

Apesar de serem razoavelmente eficientes nos casos de Análise de Segurança, os modelos equivalentes reduzidos apresentam erros considerados inaceitáveis nos casos em que se deseja fazer um estudo de otimização no sistema interno. Em um processo de otimização, são feitas iterativamente alterações nos controles internos do sistema de forma a se atingir o ponto ótimo. A função dos modelos equivalentes neste caso é a de fornecer uma resposta a mais próxima possível daquela que o sistema externo real forneceria. A hipótese da deficiência de representação das respostas externas dos modelos equivalentes durante estudos de otimização foi levantada na referência [21]. Na referência [46] são feitos estudos envolvendo o sistema sul-sudeste brasileiro, confirmando que o modelo WE não representa com precisão aceitável as respostas do sistemas externos durante estudos de otimização reativa na parte interna.

Apesar de a deficiência dos modelos equivalentes ter sido diagnosticada em 1988 [21], nenhum modelo havia sido proposto no sentido de suprir tal deficiência, até que em 1995 propôs-se um modelo equivalente [49], baseado no modelo WE, que apresenta uma boa resposta para os processos de otimização associados ao problema ativo. Entretanto, as dificuldades mais significativas de representação dos equivalentes são aquelas associadas à parte reativa da resposta, não avaliadas no estudo feito em [49].

Este trabalho tem como objetivos básicos a análise e desenvolvimento de modelos equivalentes capazes de auxiliar os processos de otimização reativa no sistema interno. Os estudos apresentados neste trabalho foram iniciados quando primeiramente avaliou-se o grau de representatividade dos equivalentes externos nos casos de alterações em controles. Na referência [32] mostrou-se que as alterações em variáveis de controle reativa (taps de transformadores e tensões de barras controladas) espalhadas pelo sistema interno, exigem do modelo equivalente um maior nível de capacidade de resposta, se comparadas às alterações

”pontuais” ocorridas durante estudos de análise de segurança estática. Uma extensão do modelo WE também foi proposta a fim de melhorar a resposta do equivalente para tais alterações.

No atual trabalho o problema de equivalentes externos foi estudado e analisado com uma ferramenta de otimização reativa. Desenvolveu-se uma rotina de Fluxo de Carga Ótimo Newton [40], [44], uma vez que a análise de resposta do equivalente exige uma ferramenta de otimização que contemple as não linearidades do problema. Esta ferramenta foi desenvolvida com o auxílio de técnicas de esparsidade a fim de que sistemas reais pudessem ser avaliados. O sistema sul-sudeste brasileiro (810 barras) tem sido o sistema teste mais estudado. Um dos objetivos básicos do trabalho aqui apresentado é a quantificação da resposta dos modelos equivalentes no caso dos estudos de otimização reativa. O problema de otimização escolhido foi o de minimização das perdas do sistema. Tal problema consiste basicamente em se definirem os controles reativos (tensões em barras de tensão controlada e os taps de transformadores) que minimizem as perdas internas do sistema, satisfazendo as restrições em variáveis controladas e dependentes e ainda as restrições funcionais em geração de potência reativa nas barras com controle de tensão. O tratamento das restrições funcionais foi feito com técnicas de parametrização conforme [44].

A representação das partes externas durante estudos de otimização ainda carece da definição de conceitos de forma a delimitar melhor o problema nos centros de controle. Neste trabalho o problema de otimização é formulado como um modelo de Fluxo de Carga Ótimo Equivalente (FCOE). A parte externa é representada no FCOE, de forma explícita (não reduzida) e resolvida conjuntamente com o processo de otimização reativa. Mostra-se que a qualidade de resposta do modelo equivalente FCOE é significativamente melhorada em relação à resposta apresentada pelo modelo WE. Mostra-se ainda que tal resposta depende da representação dos controles externos, que não podem ser modelados pelos equivalentes reduzidos. O artigo [47] rediscute portanto os paradigmas dos modelos reduzidos/não reduzidos no contexto dos estudos de otimização.

O modelo equivalente proposto é suficientemente robusto para compor representações híbridas do sistema externo juntamente com o WE. Esta abordagem permite a unificação dos modelos FCOE e WE generalizando o problema de equivalentes externos para estudos de otimização e análise de segurança.

Outra questão tratada é a não existência de metodologias de análise de desempenho de modelos equivalentes para estudos de otimização. São propostas algumas referências de comparação para análise de desempenho de modelos equivalentes para otimização reativa. Isso possibilitou o desenvolvimento de uma metodologia original para análise de tal desempenho. Nos estudos de análise de segurança, a resposta do modelo equivalente a uma

dada contingência é comparada com aquela apresentada pela mesma contingência no sistema completo (referência). Aqui trata-se de um problema mais complexo. O problema de otimização não apresenta uma única solução mas muitas soluções aceitáveis, dependendo das exigências impostas sobre o processo de otimização. A fixação de referências de comparação entre o sistema completo e equivalenciado é importante para que não se comparem dois processos de otimização incompatíveis. Estes conceitos são discutidos em [47] e no capítulo 5 deste trabalho onde se propõe uma metodologia de análise de modelos equivalentes para otimização reativa.

1.3 Contextualização do Problema no Panorama Brasileiro

O problema de representação das partes externas a uma dada concessionária tem sido motivo de constantes desenvolvimentos. O problema originou-se basicamente associado à função de Análise de Segurança Estática. O objetivo dos modelos equivalentes nestes casos, é o de dar maior confiabilidade de representação das respostas externas durante estes estudos. Neste sentido, como uma ferramenta de apoio à Análise de segurança estática, os objetivos secundários do equivalente são os de prover maior segurança ao sistema.

Os estudos de otimização "on-line" têm por objetivo calcular os controles internos "ótimos" que, ao serem implementados, conduzem o sistema a um ponto de operação mais aprimorado no sentido da factibilização de seus limites físicos e operacionais atingindo-se determinados objetivos. Os modelos equivalentes devem ser projetados com vistas a proporcionar o cálculo dos controles internos os mais precisos possíveis. Nestes casos portanto, como uma ferramenta auxiliar ao cálculo de controles internos "ótimos", os modelos equivalentes possuem funções secundárias bem mais importantes, quais sejam: a viabilização de estudos de otimização on-line, o que corresponde a melhorias tanto de pontos de operação (melhorias técnicas), quanto de critérios econômicos (função objetivo minimizada).

No panorama econômico-financeiro mundial, o que se percebe é uma tendência aos chamados processos globalizantes nos quais ficam claras as necessidades cada vez mais crescentes de otimização de recursos. O Brasil, como parte integrante deste processo deve ser capaz de manter o seu setor elétrico em níveis competitivos. Neste contexto, o setor elétrico brasileiro vem passando por um processo de privatização, abrindo-se à iniciativa privada. Isto corresponde dizer que todas as relações contratuais entre concessionárias devem ser bem mais específicas, no tocante aos intercâmbios de recursos técnicos e operacionais. Além disso, a competitividade, entre as concessionárias, decorrente deste processo vai gerar certamente a necessidade de modelos externos mais robustos. O gerenciamento e operação devem estar baseados em modelos que representem melhor os sistemas. Nesse sentido, os

processos de otimização devem possuir papel importante na busca de melhor uso de recursos e de melhorias operacionais. Além disso, os modelos equivalentes devem possuir um papel destacado na representação das empresas vizinhas e no modelamento de dados externos trocados entre concessionárias, etc.

A representação de modelos equivalentes das concessionárias vizinhas é de fundamental importância para que se possa ter uma noção exata da influência destas áreas em um dado sistema interno. Os modelos equivalentes são hoje essenciais a todos os estudos que necessitam de resposta externa, tais como : estudos otimização, análise de segurança, etc. Tais estudos devem ser parte integrante dos centros de controle de sistemas que pretendam se tornar competitivos no setor elétrico brasileiro.

No planejamento, e principalmente no ambiente da operação dos sistemas, os modelos equivalentes são portanto imprescindíveis para que uma dada concessionária possa, no modelamento da parte externa, obter níveis de segurança e de operacionalidade competitivos. A questão da representação de áreas externas e os estudos de otimização reativa, alvos de pesquisa deste projeto, estão portanto diretamente relacionados ao processo de desenvolvimento atual do setor elétrico brasileiro, justificando também neste contexto, suas apreciações por parte deste trabalho.

1.4 Divisão do Trabalho

Este trabalho enfoca as interrelações entre duas técnicas de modelagem ainda em desenvolvimento, que são os modelos de otimização on-line, em especial os processos de otimização reativa, e os modelos equivalentes externos. Como não existem ainda metodologias consistentes que englobem os problemas de forma mais efetiva, achou-se mais didático apresentar os modelos separadamente.

No capítulo 2 são apresentados os modelos de equivalentes externos clássicos, utilizados em estudos de análise de segurança estática, que foram propostos na década de 80 e têm sido mais utilizados nas concessionárias de energia elétrica [48].

No capítulo 3 é apresentado o fluxo de carga ótimo destacando-se o problema reativo de minimização de perdas que será utilizado neste trabalho. O enfoque deste capítulo é na definição de uma ferramenta que possibilite a avaliação das respostas de modelos equivalentes durante estudos de otimização. A metodologia de solução do FCO adotada pode ser sucintamente descrita como sendo um método de Newton em que as restrições em variáveis são tratadas com técnicas de penalidades e as restrições funcionais (em geração de potência reativa nas barras controladas) são tratadas com técnicas de parametrização.

No capítulo 4 são discutidos aspectos que interrelacionam os modelos estudados no capítulo 2 e 3 e são propostas definições de alguns conceitos que os envolvem. Avaliam-se as deficiências dos modelos equivalentes quando aplicados a estudos de otimização no sistema interno. São feitas algumas considerações sobre a utilização dos modelos equivalentes WE em estudos de otimização. É descrito um modelo equivalente proposto na literatura para a representação da resposta externa durante a solução de um problema de otimização ativa no sistema interno.

No capítulo 5 é proposta uma metodologia original de avaliação de modelos equivalentes durante estudos de otimização reativa. Esta metodologia propõe a avaliação da resposta dos equivalentes em dois níveis: "produção" de controles equivalentes ótimos e qualidade da solução elétrica obtida (ou impacto obtido) na implementação destes controles.

No capítulo 6, o problema de representação de áreas externas em estudos de otimização reativa é formulado como um modelo unificado denominado Fluxo de Carga Ótimo Equivalente (FCOE), onde se propõe que a representação de áreas externas seja constituída por modelos de otimização. As áreas de amortecimento são redefinidas com base nos modelos propostos. Algumas formas de casamento entre os modelos são propostas. No capítulo 7 alguns aspectos importantes do modelo FCOE são avaliados. Mostra-se que o FCOE é uma ferramenta eficiente para a avaliação de toda a sorte de erros de representação das áreas externas durante estudos de otimização.

No capítulo 8 são feitos estudos finais comparando-se alguns modelos descritos e propostos neste trabalho de acordo com a metodologia de análise proposta no capítulo 5. O capítulo 9 apresenta as conclusões finais do trabalho.

Capítulo 2

Modelos de Representação das Partes Externas

2.1 Revisão Histórico-Bibliográfica

A grande maioria dos equivalentes externos mais comumente encontrados nas concessionárias de energia do Brasil e exterior, foram desenvolvidos tendo-se em mente uma ferramenta de auxílio aos estudos de Análise de Segurança Estática. Neste caso, os modelos equivalentes devem ter uma performance próxima daquela obtida com o sistema completo no caso de contingências de linha, transformadores, ou geradores. Os modelos equivalentes concebidos com este enfoque, aqui denominados modelos equivalentes clássicos, serão abordados neste capítulo.

Durante a década de 80 alguns modelos de equivalentes externos propostos tiveram aplicação direta nas concessionárias e passaram a ser parte integrante das ferramentas necessárias à operação dos sistemas de potência. De uma forma genérica os equivalentes clássicos tiveram duas abordagens distintas: os modelos reduzidos, baseados na redução das matrizes admitância ou jacobiana e os modelos não reduzidos, que representam de forma explícita (através de modelos de fluxo de carga e/ou estimação de estado) as partes externas do sistema. Modelos mistos, contendo partes representadas por modelos não reduzidos (através da definição de áreas de amortecimento) e partes representadas por modelos reduzidos, também foram propostos.

Dos modelos reduzidos, podem-se destacar o modelo REI proposto por Tinney [22] e os modelos tipo Ward [8], em especial o modelo Ward Estendido proposto por Monticelli e outros [23] que têm tido ampla aplicação nos estudos de Análise de Segurança Estática. Nas referências [10] e [11] é feita uma análise comparativa dos modelos equivalen-

tes com ênfase no problema de Análise de Segurança. Nesta seção serão descritos de forma sucinta os modelos não reduzidos e o modelo WE, que do ponto de vista de Análise de Segurança têm sido implementados com sucesso nas concessionárias segundo relatado na literatura. Também são discutidos os aspectos de modelagem e implementação das zonas de amortecimento.

2.2 Divisões do Sistema de Potência

Apesar de parecer um conceito simples, a divisão do sistema tem suscitado interpretações diferentes na literatura. A referência [28] faz uma diferenciação dos conceitos de interno/externo que nos parece a forma mais correta de abordar a questão. Existem, na realidade duas formas básicas de se definirem os sistemas interno/externo. A primeira, e mais intuitiva, consiste em considerar tais sistemas de forma *geográfica*: o sistema interno coincide, neste caso, com o próprio sistema sob controle de determinada concessionária. O sistema externo corresponde, assim, aos sistemas aos quais tal concessionária está diretamente interligada. A fronteira é neste caso definida como as barras do sistema externo diretamente conectadas a alguma barra do sistema interno, por onde fluem os intercâmbios de potência. Neste caso são definidos os sistemas G-interno e G-externo e G-fronteira, que são mostrados na figura 2.1

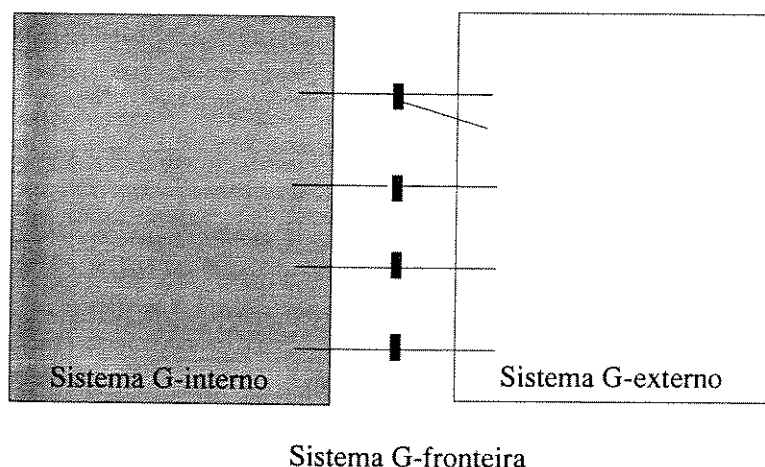


Figura 2.1: Divisão Geográfica do Sistema

Uma outra forma de se definirem os sistemas interno/externo é dada através do processo de estimação de estado. Neste caso, o sistema interno é definido como sendo a parte "observável" do sistema com relação ao estimador de estado de um determinado centro de controle do sistema. O sistema externo, conseqüentemente fica definido com sendo

composto pelas barras sobre as quais não se tem informações para compor um modelo de estimação. A fronteira fica definida como sendo composta das barras externas que possuem ligação direta com as barras internas. Os sistemas são definidos como E-interno, E-externo e E-fronteira. Se todo o sistema interno, e apenas ele, é observável, os sistemas G-interno e E-interno coincidem. É possível que alguma parte do sistema interno se torne não observável, por exemplo por falta temporária de informações em determinada área. Neste caso, algumas barras do sistema G-interno podem se tornar E-externas. Além disso, barras do sistema G-externo podem ser consideradas pertencentes ao sistema E-interno caso existam informações suficientes nesta área de modo que tais barras possam se tornar observáveis e portanto pertencentes ao sistema E-interno. A figura 2.2 ilustra a divisão do sistema tendo como base o processo de estimação.

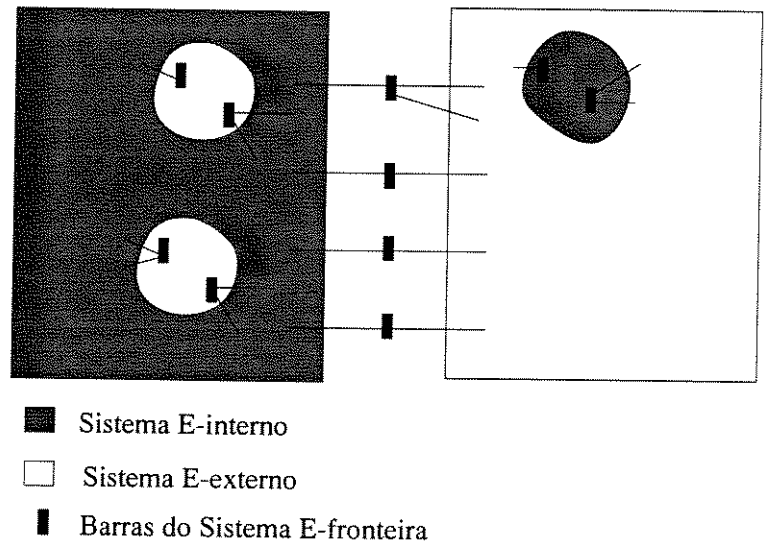


Figura 2.2: Divisão do Sistema Baseado Na Estimação

A grande maioria dos modelos equivalentes utilizados, que serão abordados a seguir, utiliza informações da estimação de estado da parte E-interna para atualizar continuamente os seus modelos, em um processo denominado Casamento na Fronteira. Este processo é extremamente importante para que o equivalente tenha uma boa performance. Por esta razão, do ponto de vista dos modelos de representação da parte externa é mais conveniente se considerar a divisão do sistema com base no critério de observabilidade. Para fins de simplificação, no decorrer deste trabalho serão utilizados simplesmente os termos interno/fronteira/externo para se designar os conceitos E-interno/E-fronteira/E-externo.

2.3 Modelos Equivalentes Reduzidos Tipo Ward

Os modelos equivalentes reduzidos tipo Ward [7] [8] são baseados na eliminação de Gauss das equações circuitais da parte externa do sistema. Se particionarmos o sistema, conforme anteriormente discutido, nos sistemas (i) interno, (f) fronteira e (e) externo pode-se escrever as equações correspondentes à lei de Kirchhoff das correntes, da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_e \\ \dot{I}_f \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ee} & Y_{ef} & 0 \\ Y_{fe} & Y_{ff} & Y_{fi} \\ 0 & Y_{if} & Y_{ii} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_e \\ \dot{V}_f \\ \dot{V}_i \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

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 equivalentes reduzidos se baseiam na eliminação de Gauss das equações associadas à parte externa do sistema. Se, a partir de 2.1 eliminarmos as equações relacionadas à parte externa, as equações resultantes geram um conjunto de equações equivalentes às equações 2.1, porém constituídas apenas de elementos interno/fronteira, conforme mostra a equação 2.2

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_f^* \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ff}^* & Y_{fi} \\ Y_{if} & Y_{ii} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_f \\ \dot{V}_i \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde:

$$\dot{I}_f^* = \dot{I}_f - Y_{fe} * Y_{ee}^{-1} * \dot{I}_e \quad (2.3)$$

$$Y_{ff}^* = Y_{ff} - Y_{fe} * Y_{ee}^{-1} * Y_{ef} \quad (2.4)$$

Com a eliminação das equações externas há alteração nas injeções de correntes $\dot{I}_f$ e na rede Y_{ff} da fronteira que passam a ter valores calculados respectivamente pelas equações 2.3 e 2.4. A equação 2.3 mostra um termo de injeção na fronteira já existente $\dot{I}_f$ somado a um segundo termo que representa as projeções das correntes externas na fronteira,

chamadas injeções equivalentes. A matriz de admitância nodal na fronteira fica alterada sendo também acrescida do termo $-Y_{fe} * Y_{ee}^{-1} * Y_{ef}$ que representa a rede externa que foi refletida na fronteira através de uma rede equivalente.

As injeções equivalentes e a rede equivalente dadas conforme 2.3 e 2.4 constituem a base de vários modelos equivalentes reduzidos já propostos na literatura. A rede equivalente na fronteira pode ser facilmente obtida, através de eliminação de Gauss nos elementos externos desta matriz. Como a matriz admitância não depende do estado do sistema externo, este cálculo pode ser realizado off-line, sendo atualizado com uma novo processo de eliminação sempre que a rede externa for alterada. Já as injeções equivalentes são diretamente dependentes do estado externo atual. Elas representam as injeções equivalentes que a fronteira "enxerga" 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 2.3 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 exterior [26].

A fim de suprir esta falta de informações atualizadas sobre as cargas/gerações externas, algumas propostas de representação foram feitas, nas quais as cargas e gerações foram modeladas como: admitância constante, corrente constante, etc; todas baseadas em informações de um caso básico para a parte externa. Para aplicações realizadas em tempo real, estes modelos são ajustados ao ponto operacional atual através de um processo denominado casamento na fronteira. Este processo consiste em calcular injeções de potência, denominadas injeções de potência equivalentes, que fazem com que o estado do sistema interno atual não seja alterado. Isto é feito simplesmente rodando-se um fluxo de carga do sistema interno/fronteira/equivalente no qual se consideram as tensões fasoriais na fronteira constantes. As injeções equivalentes calculadas são inseridas na fronteira, casando o modelo equivalente ao ponto operacional interno atual. O processo de casamento é imprescindível para um boa resposta dos modelos equivalentes.

Entretanto, tais propostas apresentavam algumas deficiências básicas, que limitavam a utilização prática de modelos equivalentes reduzidos em estudos de análise de segurança, citadas a seguir:

- A rede equivalente na fronteira dada pela matriz Y_{ff}^* possui impedâncias negativas, decorrentes do processo de eliminação de Gauss;
- Os elementos da rede equivalente apresentam uma baixa relação X/R ;
- A fronteira apresenta elementos shunts que são anormalmente altos;

- Os modelos propostos não representam de forma conveniente as respostas reativas da parte externa (de mais difícil modelagem devido às suas características de não linearidade) representadas principalmente pelas barras de tensão controladas externas.

As "impedâncias não usuais" dadas nos três primeiros itens acima causam problemas de mal condicionamento numérico nos estudos de fluxo de carga, inviabilizando, às vezes, tais estudos. O quarto item está associado à uma má representação da resposta, ou seja, um problema de modelagem em si. O modelo equivalente Ward Estendido (WE) apresenta soluções para as deficiências citadas acima, focalizando principalmente na deficiência dada no quarto item. Este modelo será descrito a seguir.

2.4 Modelo Ward Estendido

O modelo WE surgiu de melhorias associadas a alguns problemas que aparecem nos modelos **Ward** citados anteriormente, que limitavam a precisão e estabilidade numérica dos modelos reduzidos. Primeiramente, percebeu-se que as "impedâncias não usuais" eram decorrentes da inclusão dos elementos shunts externos na matriz admitância. Os elementos shunts externos possuem um efeito local e portanto não devem ser refletidos na fronteira.

Percebe-se desta análise 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. Assim, o modelo WE considera as reações externas para a parte ativa e reativa 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:

- Rede vista pela fronteira por onde circulam os fluxos de ativos, representada pela matriz admitância Y . A matriz Y é formada sem levar em conta os elementos shunts externos.

- Rede vista pela fronteira através da qual ocorre a reação reativa, representada pela matriz admitância Y' . Esta matriz é utilizada para representar o feito reativo externo.

As matrizes admitâncias Y e Y' são utilizadas respectivamente nas partes ativa e reativa do modelo com vistas a suprir as deficiências citadas anteriormente. A rede equivalente na fronteira dada pela eliminação de Gauss da Matriz Y não apresenta impedâncias não usuais. Esta rede é usada pelo modelo WE para representar a rede equivalente externa. Falta representar o efeito de reação reativa externo. Tal efeito corresponde à representação das reações das barras PV externas e shunts externos. O efeito dos shunts externos é localizado, entretanto as barras PV externas têm uma reação reativa considerável às alterações internas conforme é mostrado em [16].

O efeito de reação das barras PV externas é representado no modelo WE através do conceito de admitâncias fictícias. Estas admitâncias são calculadas de forma a representar a distância elétrica entre as barras de fronteira e as barras PV externas. Isto é feito através de um artifício em que todas as barras PV externas na matriz Y' são aterradas. Quando a matriz Y' sofre o processo de redução de seus elementos externos, as admitâncias que são refletidas na fronteira podem ser diretamente associadas a este conceito de distância elétrica. No modelo WE as admitâncias fictícias são inseridas na fronteira a fim de representar o efeito de reação reativa externa. A inserção das admitâncias fictícias se dá através das barras PV fictícias conforme mostra a figura 2.3. Veja que a tensão das barras PV fictícias são especificadas com os valores obtidos de um caso básico. O valor de injeção de potência para as barras PV fictícias é nulo para que tais barras não contribuam com nenhuma parcela de resposta ativa.

O modelo WE representado na figura 2.3 é formado por três componentes, quais sejam: ramos equivalentes, admitâncias fictícias e injeções equivalentes. As injeções equivalentes são injeções de potência inseridas na fronteira de modo que o estado interno atual, fornecido pelo estimador de estado, não seja alterado. Estas injeções são calculadas no processo denominado casamento na fronteira. Neste processo um fluxo de carga é executado, no qual as barras de fronteira são tratadas como barras "slack". Na solução deste fluxo de carga as injeções equivalentes são dadas como sendo os valores de potência ativa e reativa que devem ser adicionados de modo a não alterar o estado atual da fronteira.

O modelo WE constituído por estes três elementos possui uma resposta incremental. Ao ocorrer uma alteração, tal como contingência de linha ou transformador, a reação do equivalente ocorre a partir do ponto operacional básico. A alteração faz com que as tensões das barras de fronteira saiam do valor do caso básico. Haverá portanto uma diferença de tensão entre as barras de fronteira e as barras PVs fictícias. Logo, as barras

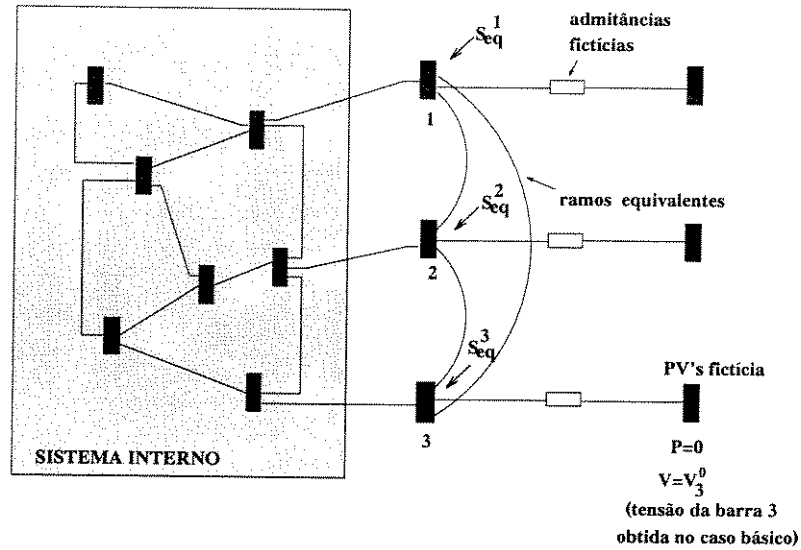


Figura 2.3: Modelo WE

PVs fictícias tenderão a suprir (ou consumir) potência reativa na fronteira. Este reativo terá uma ação aproximada daquela que as barras PV externas teriam na fronteira, já que as admitâncias fictícias têm a noção de distância elétrica entre a fronteira e as PV externas. No modelo WE há portanto um desacoplamento entre as respostas ativa e reativa do sistema. A resposta incremental reativa é modelada pelas admitâncias fictícias e a resposta incremental ativa é dada através dos ramos equivalentes. Ambas as respostas são ajustadas ao ponto operacional atual através das injeções equivalentes dadas pelo processo de casamento na fronteira.

Outra variação do modelo WE também proposta na referência [23] considera as admitâncias shunt diretamente conectadas às barras de fronteira, conforme mostra a figura 2.4.

Neste caso a resposta reativa é fornecida diretamente pelos elementos shunts fictícios. É importante lembrar que as admitâncias fictícias calculadas para este modelo são correspondentes à metade dos valores utilizados no modelo WE com PV fictícia. Isto é demonstrado na referência [16]. Para análise de segurança estática os modelos WE com PV e shunts fictícios mostrados acima têm performances bastante aproximadas.

A utilização dos modelos WE com shunt e PV fictícia em estudos de otimização é feita no capítulo 4, mostrando que neste caso a resposta dos modelos pode ser bastante diferenciada.

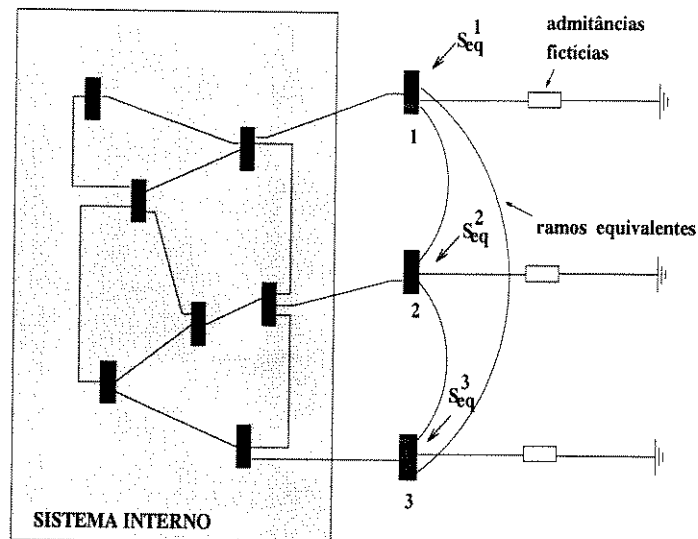


Figura 2.4: Modelo WE com Shunts Fictícios

2.5 Modelos Baseados em Fluxo de Carga

Nestes tipos de modelo a rede externa é representada através de modelos de fluxo de carga [26]. Neste caso não são utilizados processos de redução de circuitos para a representação da parte externa. A rede externa explícita é utilizada, sendo representada através de equações algébricas aproximadas.

Os modelos de fluxo de carga da área externa exigem informações em tempo real que nem sempre são disponíveis nos centros de controle. As informações necessárias à formulação de um fluxo de carga compreendem:

- Dados de carga ativa e reativa nas barras de carga;
- Dados de geração de potência ativa nas unidades geradoras;
- Perfil de tensão nas barras de tensão controlada;
- Estado de interligação do sistema (topologia);
- Valores de taps de transformadores, etc.

As cargas/gerações externas, por exemplo, não são conhecidas, ou ainda os valores atuais das tensões controladas externas, etc. É necessário portanto prover algum esquema aproximado de definição destas informações. A referência [25] define uma estratégia

na qual os dados externos necessários à modelagem do fluxo de carga são aproximados a partir de um caso básico, da seguinte forma:

- A definição das cargas é dada por Fatores de Distribuição de Carga (FDC), a partir de um perfil de carga do caso básico do sistema completo. Os fatores de distribuição de carga definem a carga do sistema externo como sendo uma função da carga total do sistema interno. Nesse caso, está se assumindo que o sistema externo tem o mesmo ciclo de carga que o sistema interno. A carga interna é sempre atualizada por previsores de carga, atualizando por conseguinte o perfil de carga externo.
- Utilizando-se a previsão de carga externa conforme acima, as gerações de potência ativa dos geradores são determinadas através de um modelo de despacho econômico.
- O perfil de tensão das barras de tensão controlada são determinados através de curvas que descrevem a tensão como uma função do carregamento da barra.
- O estado de interligação utilizado é o do caso básico. Alterações na rede que tenham maior influência no sistema interno podem ser informadas por telefone ou por troca de informações on-line.
- Taps de transformadores são fixados nos seus valores básicos.

Com estas aproximações é possível se criar um modelo de fluxo de carga do sistema externo. Para acoplar este modelo ao sistema interno/fronteira, é fundamental utilizar-se o processo de casamento na fronteira. As barras de fronteira são então tratadas como barras "slack" e um fluxo de carga é executado, fornecendo a solução de fluxo de carga para a rede externa sem alterar a solução interna atual.

A qualidade da solução externa obtida pode ser avaliada comparando-se as injeções da fronteira calculadas pelo casamento com os valores anteriormente calculados pelos fatores de distribuição e despacho econômico. Quanto maior este "mismatch" nas injeções da fronteira maiores os erros de aproximação da rede externa feitos anteriormente. Os valores dos "mismatches" são portanto indicativos da qualidade da modelagem externa.

Na operação on-line, os valores de injeções reativas MVAR podem ainda ser atualizados após cada solução externa continuamente fixando-se estes valores com o últimos valores calculados. Neste modo de ajuste os valores de "mismatches" geralmente são diminuídos.

Os métodos baseados em fluxo de carga têm algumas deficiências apontadas na referência [25] que são resumidas a seguir:

- Os erros nos "mismatches" podem ser intoleravelmente altos, prejudicando os estudos posteriores feitos com este modelo externo. As maiores fontes de erro detectadas foram os erros associados a má representação da topologia externa;
- Há dificuldade de detectar e localizar as regiões externas onde os erros estão ocorrendo;
- Esta modelagem exige um esforço computacional considerável de manutenção e atualização dos dados externos.

Na referência [29] os modelos baseados em fluxo de carga e o modelo WE são comparados para estudos de análise de segurança. Algumas conclusões apontadas no artigo são resumidas a seguir:

- Os erros associados às cargas e gerações externas não são expressivos nos modelos baseados em fluxo de carga. Nestes modelos a topologia externa é o fator principal de erros;
- Os modelos WE produzem resultados menos precisos que os modelos de fluxo de carga.

Apesar de ser menos preciso nos estudos de análise de segurança, o modelo WE não necessita do esforço de manutenção de bancos de dados externos e tem uma precisão geralmente aceitável para tais estudos. Nos casos em que a precisão não é boa, podem ser adotados esquemas nos quais parte do sistema externo é tratado de forma não reduzida (zonas de amortecimento) e parte é representada pelo modelo WE. Neste sentido, para estudos de análise de segurança o modelo WE apresenta uma boa relação de compromisso entre o esforço computacional e a precisão de resposta.

2.6 Modelos Baseados em Estimação de Estado

Nos modelos baseados em estimação de estado usam-se basicamente as mesmas informações utilizadas nos modelos de fluxo de carga para criar-se um modelo de estimação da parte externa. Estima-se o estado externo, baseado em informações aproximadas. Logicamente, o estado externo estimado é apenas aproximado, e sua utilização é feita simplesmente no sentido de fornecer as reações externas.

Os métodos de estimação de estado não foram abordados nos estudos propostos neste trabalho, entretanto é importante ressaltar as suas aplicações práticas, já que bons

resultados para estudos de análise de segurança têm sido obtidos com modelos externos baseados em estimação.

A referência [25] propõem um modelo baseado em estimação que apresenta bons resultados, que posteriormente foram confirmados em testes de campo na concessionária FP&L, na Flórida. Apesar de não ter sido implementado no atual trabalho, o modelo traz alguns aspectos de representação externa importantes e que devem ser enfocados.

As barras que possuem ligações entre os sistemas interno e externo são definidas conforme a seguir:

- b_i : fronteira da solução interna (para o solução do sistema interno a barra de fronteira entra pelo sistema externo);
- b_e : fronteira da solução externa (para o solução do sistema externo a barra de fronteira entra pelo sistema interno).

As definições de b_e e b_i são ilustradas na figura 2.5. Primeiramente uma estimação interna é feita, sendo que inclusive as barras da fronteira b_i são estimadas.

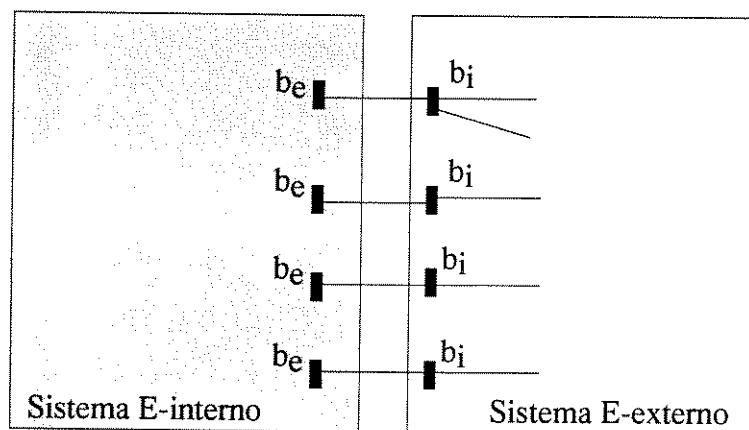


Figura 2.5: Modelo Externo Baseado em Estimação

O modelo proposto em [25] move a fronteira do sistema externo para a primeira vizinhança para dentro do sistema interno, conforme mostra a figura 2.5. Portanto, a fronteira do sistema externo será dada por b_e . É necessária uma estratégia de definição do conjunto de medidas, e os pesos associados a cada medida, a fim de se fazer a estimação externa:

- As injeções de potência das barras b_e e as tensões e ângulos das barras b_i e b_e são

disponíveis da solução da estimação interna. Estes valores são utilizados com altos valores de confiança para a estimação externa;

- Os dados de telemedição de injeção, fluxos em linha e tensões disponíveis também são acrescentados ao conjunto (somente dados do sistema E-externo);
- São acrescentadas ao conjunto todas as tensões das barras de tensão controladas;
- Todas as tensões das demais barras (sem telemedição ou não controladas) são acrescentadas, sendo calculadas através de fatores de distribuição e despacho econômico.

As medidas citadas acima são suficientes para se fazer uma estimação externa do sistema. Os pesos associados à confiabilidade de cada uma das medidas devem ser estipulados mediante experiência. Estes pesos permitem uma flexibilidade maior no tratamento dos dados externos, se comparado ao método de fluxo de carga.

Outro aspecto importante deste método é a capacidade de identificação dos locais efetivos de erros externos. Isto pode ser feito comparando-se as injeções de potência estipulada e estimada em cada barra externa. Nos métodos de fluxos de carga todos os erros são refletidos na fronteira, dificultando sua identificação. No método de estimação os erros em cada barra são calculados, facilitando inclusive a identificação de erros grosseiros.

As informações na fronteira não são tratadas como igualdades estritas no problema de estimação proposto em [25]. As informações da fronteira são tratadas com medidas com alto valor de confiança. Isto dá a flexibilidade de se ajustar o grau de confiança da solução da estimação interna na fronteira. Nos resultados apresentados o método baseado em estimação reduz significativamente os "mismatches" de potência na fronteira.

A referência [28] propõe um modelo de estimação em que a estimação dos sistemas interno e externo é feita em apenas uma etapa. Apesar de os processos de estimação serem realizados em conjunto, o modelo de estimação externo não afeta o cálculo da estimação interna.

Entretanto, métodos de estimação têm causado problemas recorrentes quando utilizados para compor modelos externos, conforme mostra a referência [45]. Estes erros são associados às aproximações nos dados dos modelos externos. A referência apresenta uma metodologia de construção de modelos externos e fornece algumas diretrizes em tópicos específicos tais como: topologia, troca de dados, dados analógicos, etc.

2.7 Áreas de Amortecimento

As áreas ou zonas de amortecimento se constituem em um meio termo entre a representação explícita da rede externa e sua eliminação completa. Neste tipo de abordagem, parte da rede geograficamente externa denominada área de amortecimento, é representada explicitamente. O restante do sistema externo é reduzido até a nova fronteira redefinida entre a zona de amortecimento e o restante do sistema externo. A figura 2.6 ilustra a definição das áreas de amortecimento.

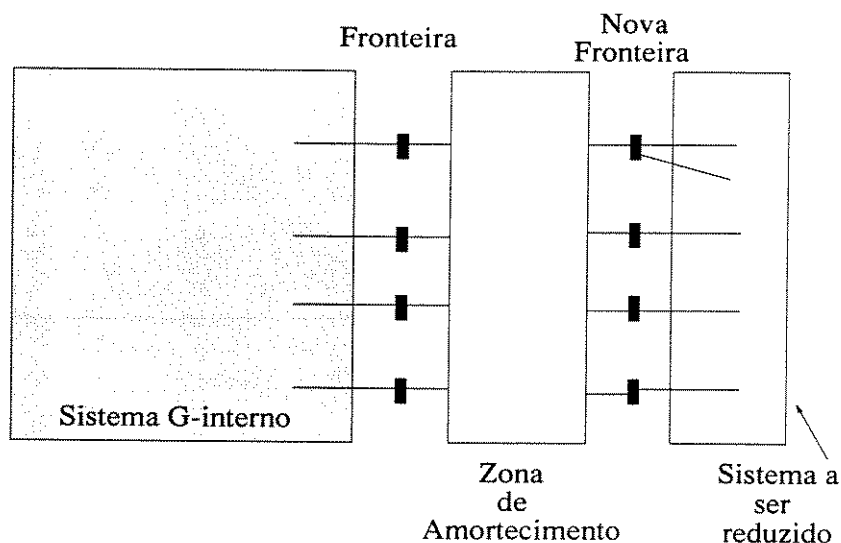


Figura 2.6: Zonas de Amortecimento

O sistema externo fica portanto dividido em dois sub-sistemas, que ao serem acoplados ao sistema interno/fronteira devem propiciar a resposta às alterações no sistema interno. Discutiu-se anteriormente que o casamento entre os sistemas interno/fronteira e modelo externo é imprescindível para uma boa representação das reações externas. Como o sistema externo é dado por dois subsistemas o processo de casamento pode ser em duas etapas, considerando-se as duas fronteiras definidas. Há na verdade formas diferentes de se fazer este casamento. Não fica claro na literatura qual é o processo que tem sido utilizado. Este trabalho apresenta pelo menos 3 formas em que o sistema externo é acoplado ao sistema interno/fronteira sem alterar o ponto operacional interno. Estes processos serão abordados no capítulo 6, onde os modelos de áreas de amortecimento são redefinidos com um enfoque em estudos de otimização. A definição de fronteiras, feita de forma sucinta aqui também é reanalisada.

A representação das zonas de amortecimento tem sido uma boa estratégia de

modelagem devido a incorporar o que os métodos reduzidos e não reduzidos têm de melhor. As áreas de amortecimento permitem a utilização de dados trocados on-line entre concessionárias. Estes dados podem ser incluídos na zona de amortecimento sem maiores alterações, sendo esta parte modelada via fluxo de carga ou métodos de estimação. As boas características dos métodos não reduzidos são portanto aproveitadas. As partes não importantes do sistema externo podem então ser reduzidas a um modelo equivalente como o WE. As dificuldades de esforço computacional de manutenção de grandes bancos de dados de todo o sistema externo são neste caso minoradas, uma vez que apenas os dados associados à área de amortecimento devem ser atualizados.

As áreas de amortecimento têm sido bastante utilizadas, tornando viável a utilização dos modelos equivalentes reduzidos, quando estes por si só não apresentam uma boa performance.

Capítulo 3

FPO Reativo e Técnicas de Solução

3.1 O FPO e suas Aplicações

Nos centros de controle são cada vez mais importantes as funções avançadas responsáveis pela definição de controles ótimos restritos ao espaço definido pelos limites operacionais, físicos e de segurança do sistema. Todas estas funções têm sido tradicionalmente englobadas na literatura sob o título de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) ou ainda Fluxo de Carga Ótimo (FCO). Uma grande variedade de problemas de FPO tem sido formulada, sendo associada a cada um uma terminologia diferenciada (controle ótimo de tensão, despacho econômico, etc) mas que podem ser agrupados em um problema único. O problema de FPO foi primeiramente proposto por Carpentier [33] em 1962.

O problema de FPO reativo pode ser entendido como uma extensão do problema de fluxo de carga no qual algumas variáveis, denominadas variáveis de controle, que são fixadas no fluxo de carga, são ajustadas iterativamente para variarem dentro de determinados limites físicos e operativos, de forma a se atingir um determinado objetivo. As demais variáveis ficam automaticamente determinadas se as variáveis de controle são conhecidas. Matematicamente tem-se o problema de otimização mostrado em 3.1.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min & C(\mathbf{x}) \\ \text{s. a} & \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{x}^{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{max} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

onde:

- $\mathbf{x}$: variáveis de otimização do modelo compostas pelas magnitudes e ângulos das tensões nodais, taps de transformadores, etc;
- $C(\mathbf{x})$: é a função objetivo a ser otimizada;
- $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$: são as restrições de igualdade do problema, representando as equações de atendimento da demanda (equações de fluxo de carga);
- $\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$: são as restrições funcionais de desigualdade;
- $\mathbf{x}^{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{max}$ são as restrições canalizadas nas variáveis de otimização.

Desde a sua proposição inicial o grande problema do FPO vem sendo a adequação do modelo proposto com as características do problema "real", bem mais complexo e de difícil solução computacional. A solução do problema real passa portanto por simplificações e pela busca de metodologias de solução adequadas.

Uma das primeiras metodologias de solução do problema de FPO foi proposta por Dommel e Tinney em [34]. Tal metodologia consiste na utilização de técnicas de gradiente reduzido [2]. O método adotado apresenta vários problemas sobre o processo de convergência e não suporta a solução de sistemas de dimensões reais. Na referência [37] utiliza-se a matriz Hessiana (segunda ordem) em contraposição à matriz de primeira ordem do método Dommel-Tinney. Alguns problemas também foram identificados nesta metodologia especialmente na solução da parte reativa.

Os métodos ditos de segunda ordem começaram a ser explorados com vistas a solução da parte reativa do problema. Alguns métodos de programação quadrática sucessiva (SQP) obtiveram bons resultados para sistemas reais tais como [38] [39].

As técnicas de solução do FPO mais genérico e que parecem mais promissoras, especialmente para a solução dos problemas reativos foram introduzidas por Sun et al em [40] e que consiste na utilização do método de Newton para a resolução do problema. Algumas variações nesta metodologia vêm sendo propostas tais como [41], [42] onde Sun apresenta melhorias à metodologia inicial, discutindo outros aspectos tais como infactibilidade, controles discretos, mínimo número de controles, etc. Um dos problemas clássicos do método de Newton tem sido a identificação do conjunto de restrições ativas, ou seja as restrições que estarão ativas ao final do processo de otimização. Na referências[43] é proposta uma metodologia baseada na lagrangeana aumentada que trata as restrições de desigualdade e evita os aspectos de definição do conjunto ativo.

Ultimamente a ferramenta de FPO vem sendo considerada de uma forma mais geral. Como os conceitos de segurança e otimização são geralmente conflitantes, estes têm

sido tratados atualmente de forma a serem englobados em um modelo único [51], denominado Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança, onde se tem um problema de FPO formulado com restrições de segurança pós-contingência.

Os problemas de FPO podem ser basicamente subdivididos nos subproblemas ativo e reativo. No problema ativo são calculados controles associados ao fluxo de potência ativo que minimizam algum critério associado à potência ativa, tal como os custos de geração. A classe de subproblemas ativo tem sido melhor resolvida por métodos que utilizam a Programação Linear (PL). A aplicação de técnicas LP ao problema de FPO foi proposta por Stott em [35] e [36]. O problema ativo não é abordado aqui pois foge ao escopo deste trabalho.

No problema reativo são calculados os controles reativos que minimizam algum critério associado à potência reativa. O problema de minimização de perdas abordado neste trabalho é um problema reativo clássico. Esta classe de problemas tem sido melhor resolvida por métodos de segunda ordem tais como o método de Newton utilizado neste trabalho.

A ferramenta de FPO foi desenvolvida neste trabalho com vistas à avaliação de modelos equivalentes durante estudos de otimização. O problema reativo de mínimas perdas foi o escolhido para os estudos com os modelos equivalentes pelo fato de atuarem diretamente nos controles reativos, que propiciam por parte do equivalente uma resposta reativa (de mais difícil modelagem) mais acentuada. O modelo de FPO adotado consiste basicamente na utilização do método de Newton, onde as restrições canalizadas nas variáveis são tratadas com técnicas de penalidades e as restrições funcionais (em injeções de potência reativa) são tratadas com técnicas de parametrização.

3.2 FPO Reativo - Problema de Mínimas Perdas

Os elementos básicos que compõem o problema de FPO de mínimas perdas adotado aqui, quais sejam, as funções objetivo, os controles, as restrições de igualdade e desigualdade utilizados, serão descritos a seguir. Posto o problema de mínimas perdas e seus elementos, será apresentada a metodologia de solução do FPO adotada.

3.2.1 Função Objetivo - Perdas na Transmissão

As funções objetivo utilizadas no FPO são valores escalares que expressam uma determinada melhoria que se deseja alcançar no sistema. As variáveis de controle são atualizadas no processo de otimização de forma a se alcançar tal objetivo. É conveniente

lembrar que existe um compromisso entre a escolha dos controles e o objetivo a ser atingido. Nesse sentido diz-se que um problema de FPO deve estar bem formulado. Não se deve, por exemplo, tentar minimizar custo de geração utilizando-se somente variáveis de controle tais como as tensões de barras com controle.

A maioria das funções objetivo utilizadas são dadas por somatórios de alguns termos. Um conceito importante no FPO é o da separabilidade de uma função objetivo. Diz-se que uma função objetivo é separável [42] quando ela pode ser expressa como um somatório de quantidades, cada uma das quais sendo função de apenas uma variável. O método de Newton é robusto para tratar funções objetivos quaisquer. Os métodos baseados em programação linear, foram prioritariamente desenvolvidos para o tratamento de funções objetivo separáveis.

A função objetivo de perdas de potência ativa, associada ao problema reativo do FPO, é não separável. A expressão das perdas de potência ativa em função das variáveis de otimização é apresentada pela equação 3.2.

$$C(t, \theta, V) = \sum_{kl \in \Omega} g_{kl} [V_k^2 + V_l^2 - 2V_k V_l \cos(\theta_k - \theta_l)] \quad (3.2)$$

onde:

- Ω - conjunto das ligações elétricas da rede;
- g_{kl} - condutância da ligação elétrica kl da rede;
- V_k, V_l - magnitudes de tensão das barras k e l ;
- θ_k, θ_l - fases de tensão das barras k e l .

Os controles tradicionalmente utilizados na solução do problema de mínimas perdas, são geralmente as tensões em barras controladas e os taps de transformadores.

3.2.2 Restrições do Problema

Para que o problema de FPO tenha um alcance prático, sendo efetivamente uma ferramenta aplicável, é necessário que a solução proporcionada por esta ferramenta leve em consideração determinados limites práticos do sistema tais como limites físicos (fluxo de potência ativa em linhas, etc) ou ainda limites operacionais (limites de canalização nas variáveis do problema, etc). As restrições utilizadas na formulação do problema de fluxo de potência ótimo são consideradas a seguir.

Restrições de Igualdade

As restrições de igualdade representam restrições que devem ser extritamente atendidas. São compostas basicamente das equações de atendimento das cargas que são representadas através de 3.3 e 3.4. Estas equações representam as especificações de balanço de potência nas barras do sistema.

$$P_k(t, \theta, V) - P_k^{esp} = 0 \quad \text{para as barras de carga e geração} \quad (3.3)$$

$$Q_k(t, \theta, V) - Q_k^{esp} = 0 \quad \text{para as barras de carga} \quad (3.4)$$

onde:

- $P_k(t, \theta, V) \Rightarrow$ injeção líquida de potência ativa calculada;
- $Q_k(t, \theta, V) \Rightarrow$ injeção líquida de potência reativa calculada.

3.2.3 Restrições de Desigualdade

São restrições que permitem a uma grandeza certa variação dentro de determinados limites do sistema. Os limites podem ser de natureza física ou operacional. Os limites que são respeitados na formulação do problema de FPO adotado aqui são enumerados a seguir. Estes limites compõem o conjunto de restrições de desigualdade dados pelas inequações $\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ e $\mathbf{x}^{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{max}$.

- Faixas de operação dos taps de transformadores

$$t_j^{min} \leq t_j \leq t_j^{max} \quad (3.5)$$

- Faixas permitidas para as tensões nas barras

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.6)$$

- Faixas permitidas para as fontes de reativos nas barras com controle de tensão

$$Q_k^{min} \leq Q_k(t, \theta, V) \leq Q_k^{max} \quad (3.7)$$

Os elementos citados nos itens anteriores foram utilizados para compor o problema de FPO utilizado para a validação dos modelos equivalentes. O método de Newton utilizado para a solução deste problema será abordado a seguir.

3.3 Técnicas de Solução: Newton, Penalidades e Parametrização

A técnica utilizada para a resolução do problema do FPO analisada neste ítem consiste na junção dos conhecidos métodos de Lagrange e de Newton. Através da abordagem lagrangeana, obtêm-se as condições necessárias de otimalidade para um problema de otimização irrestrito associado ao FPO. Através do método de Newton são obtidas por aproximações quadráticas correções iterativas sobre as variáveis de decisão até que as condições de otimalidade estejam satisfeitas.

O processo de solução do problema de FPO é particionado em três fases (conforme [44]) de solução. A primeira fase consiste em resolver o problema modificado (incorporando as penalidades na função objetivo) irrestrito (sem considerar as restrições funcionais). As restrições funcionais são consideradas através de técnicas de parametrização na segunda fase. A terceira fase consiste em um processo de relaxação das restrições funcionais com multiplicadores de lagrange negativos. As três fases do processo são detalhadas nos ítems a seguir.

3.3.1 Tratamento das Restrições em Variáveis

No problema de FPO representado em 3.1, as restrições canalizadas em variáveis têm sido tratadas classicamente por penalidades quadráticas que são incorporadas à função objetivo. Isto é feito a fim de manter a factibilidade nas variáveis e também a fim de assegurar um bom condicionamento da matriz Hessiana. O problema original é desta forma transformado no problema modificado FPOM dado por:

$$\text{FPOM} \begin{cases} \min & C(\mathbf{x}) + C_v(\mathbf{x}) + C_{tap}(\mathbf{x}) \\ \text{s. a} & \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \end{cases} \quad (3.8)$$

sendo que:

$$C_v(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} P_v (V_i - V^{rl})^2 \quad (3.9)$$

$$C_{tap}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^T \frac{1}{2} P_{tap} (t_i - t^{rl})^2 \quad (3.10)$$

onde:

- N número de barras do sistema;
- T número de transformadores com controle de taps do sistema;
- V^{rl} valor de referência ou limite violado da magnitude de tensão;
- t^{rl} valor de referência ou limite violado dos taps de transformadores;
- P_v é a penalidade associada à restrição canalizada nas tensões;
- P_{tap} é a penalidade associada à restrição canalizada nos taps de transformadores.

3.3.2 Problema do FPO Modificado

O problema modificado associado a 3.8 é resolvido em duas fases. Na FASE I calcula-se uma solução inicial do problema modificado relaxado (sem considerar as restrições de desigualdade). As restrições de desigualdade são levadas em conta em uma FASE II, através do método da continuação.

O problema de FPOM relaxado resolvido na FASE I é descrito em 3.11. A solução deste subproblema fornece um ponto de solução inicial x_0 .

$$\text{FASE I} \begin{cases} \min & C(\mathbf{x}) + C_v(\mathbf{x}) + C_{tap}(\mathbf{x}) \\ \text{s. a} & \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (3.11)$$

A função lagrangeana do problema modificado FPOM relaxado utilizada na FASE I é dada por 3.12. Os termos λ são os multiplicadores de Lagrange associados às restrições. As funções de penalidades quadráticas nas tensões e nos taps aumentam a função lagrangeana.

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda) = C(\mathbf{x}) + \lambda' \mathbf{g}(\mathbf{x}) + C_v(\mathbf{x}) + C_{tap}(\mathbf{x}) \quad (3.12)$$

A condição necessária de otimalidade irrestrita corresponde a estacionariedade da Lagrangeana, conforme equação 3.13.

$$\nabla \mathcal{L} = \mathbf{0} \quad (3.13)$$

Em termos de suas componentes, tem-se

$$\nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda) = \nabla C(\mathbf{x}) + \nabla \mathbf{C}_v(\mathbf{x}) + \nabla \mathbf{C}_{tap}(\mathbf{x}) + \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})'\lambda = \mathbf{0} \quad (3.14)$$

$$\nabla_{\lambda}\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.15)$$

onde $\nabla \mathbf{g}$ é a matriz jacobiana de $\mathbf{g}(\mathbf{x})$.

Para resolver o problema relaxado da FASE I é utilizado o método de Newton descrito a seguir e que corresponde a uma linearização nas equações do gradiente da lagrangeana 3.14 e 3.15.

3.3.3 Solução da FASE I Pelo Método de Newton

Seja $(\mathbf{x}, \lambda)$ um dado estado inicial não-ótimo. Suponha que o estado $(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}, \lambda + \delta\lambda)$ satisfaz a condição de estacionariedade. Expandindo a equação (3.13) em Série de Taylor e linearizando-a, obtem-se

$$\nabla\mathcal{L}(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}, \lambda + \delta\lambda) \approx \nabla\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\partial}{\partial\mathbf{x}}(\nabla\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda))\delta\mathbf{x} + \frac{\partial}{\partial\lambda}(\nabla\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda))\delta\lambda = \mathbf{0} \quad (3.16)$$

Podemos reescrever a equação (3.16) explicitando suas componentes em um formato matricial, ou seja

$$\left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\mathbf{x}\partial\mathbf{x}} & \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\mathbf{x}\partial\lambda} \\ \hline \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\lambda\partial\mathbf{x}} & \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\lambda\partial\lambda} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \delta\mathbf{x} \\ \delta\lambda \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{c} \nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{L} \\ \nabla_{\lambda}\mathcal{L} \end{array} \right] \quad (3.17)$$

onde a matriz

$$\left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\mathbf{x}\partial\mathbf{x}} & \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\mathbf{x}\partial\lambda} \\ \hline \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\lambda\partial\mathbf{x}} & \frac{\partial^2\mathcal{L}}{\partial\lambda\partial\lambda} \end{array} \right] = \mathbf{W}$$

é conhecida como matriz Lagrangeana ou ainda como matriz Hessiana/Jacobiana. O tratamento eficiente desta matriz é fundamental para uma implementação prática de FPO. Uma forma de armazenamento eficiente e que permite explorar a esparsidade intrínseca desta

matriz é fornecida em [40]. No apêndice a. mostra-se a estrutura esparsa desta matriz para um sistema exemplo. A submatriz $\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}}$ é denominada matriz Hessiana.

Através da equação (3.17) calculam-se as correções sobre as variáveis do problema até que a condição (3.13) esteja satisfeita. Em uma iteração ν , a atualização das variáveis é dada por

$$(\mathbf{x}, \lambda)^{\nu+1} = (\mathbf{x}, \lambda)^{\nu} + (\delta \mathbf{x}, \delta \lambda) \quad (3.18)$$

Algoritmo de Newton - FASE I

O algoritmo de solução do método de Newton do problema modificado relaxado dado em 3.8 consiste basicamente nos seguintes passos:

1. inicialização das variáveis $\mathbf{x}^0$ e λ^0
2. resolução da equação 3.17 por um método de resolução de sistemas lineares.
3. atualização de $\mathbf{x}$ e λ
4. análise de aceitabilidade como solução do problema 3.8:
 - aceitável: fim FASE I
 - não aceitável: volta ao passo 2.

3.3.4 Restrições de Desigualdade

A partir da solução inicial dada por $\mathbf{x}_0$ obtida no final da FASE I, as restrições de desigualdades infactíveis são incorporadas ao problema através de funções homotopia parametrizadas em γ , definidas como:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \gamma) = \mathbf{h}(\mathbf{x}) - (1 - \gamma)\mathbf{h}(\mathbf{x}_0) \quad (3.19)$$

Estas funções são impostas ao problema como igualdades estritas parametrizadas. A solução do problema modificado FPOM se constitui em uma série de problemas parametrizados (FASE II) conforme apresentado em 3.20.

$$\text{FASE II} \begin{cases} \min & \mathbf{C}(\mathbf{x}) & + & \mathbf{C}_v(\mathbf{x}) + \mathbf{C}_{tap}(\mathbf{x}) \\ \text{s. a} & \mathbf{g}(\mathbf{x}) & = & \mathbf{0} \\ & \mathbf{H}(\mathbf{x}, \gamma) & = & \mathbf{0} \end{cases} \quad (3.20)$$

Estes problemas são resolvidos excursionando-se o parâmetro γ de 0 a 1, o que equivale a percorrer o caminho definido pelos pontos (x, γ) tais que $\mathbf{H}(x, \gamma) = \mathbf{0}$. Isto é feito através do método preditor-corretor da seguinte forma:

- o passo preditor incrementa γ , fazendo com que $\mathbf{H}(x, \gamma)$ se torne infactível;
- o passo corretor através de iterações Newton factibiliza $\mathbf{H}(x, \gamma)$ diminuindo a relaxação das restrições de desigualdade que foram parametrizadas.

A figura 3.1 ilustra o caminho percorrido até a obtenção da solução.

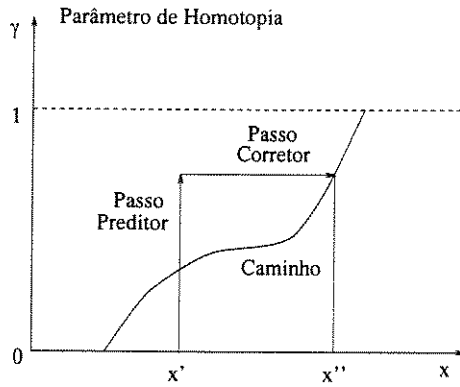


Figura 3.1: Caminho Percorrido

O algoritmo de Newton descrito para a solução da FASE I é também utilizado na FASE II, sendo que neste último caso a função lagrangeana é redefinida para incorporar também as funções homotopia.

A cada passo corretor Newton, um novo conjunto de restrições ativas é recalculado. Se houver alguma alteração neste conjunto as funções homotopia das novas violações são incluídas em $\mathbf{H}(x, \gamma)$ e o problema é reparametrizado reiniciando-se com $\gamma = 0$. A solução da FASE II é atingida quando $\gamma = 1$ e não houver mais nenhuma violação.

A técnica de parametrização das restrições funcionais é especialmente importante em casos onde a introdução de determinada restrição provoca instabilidade numérica no processo de otimização. A técnica de parametrização permite que tal restrição seja introduzida de forma mais suave não prejudicando o processo. No apêndice b. mostram-se alguns exemplos onde a parametrização torna o processo de otimização estável, permitindo a convergência.

Uma fase final de relaxação (FASE III) analisa o sinal dos multiplicadores de Lagrange das restrições de desigualdades ativas, relaxando (retirando de $\mathbf{H}(x, \gamma)$) aquelas

com multiplicadores negativos. O conjunto ativo composto pelas restrições que estão nos seus respectivos limites pode então ser definido.

3.3.5 Política de Penalidades

Durante a solução das FASES I e II os valores das penalidades aplicadas às restrições canalizadas não são fixos. Eles variam de acordo com uma determinada política que deve ser avaliada para cada sistema, liberando ou prendendo determinadas variáveis. A definição de uma política de penalidades eficaz está associada com testes exaustivos com o sistema de forma que se tenha uma otimização adequada. Neste sentido diz-se que um problema de FPO tem um espaço de soluções possíveis.

É importante salientar que políticas de penalidade diferentes podem levar a soluções diferentes. Políticas de penalidade podem ser específicas para cada tipo de variável. Por exemplo, pode-se liberar mais as tensões controladas no início do processo de otimização (através de heurísticas) segurando mais as tensões das barras de carga, ou vice-versa.

Como uma política de penalidades pode definir uma solução de um processo de otimização e como o objetivo deste trabalho é comparar soluções de processos de otimização (com e sem equivalente), é necessário estar atento para se adotar as mesmas políticas de penalidades em ambos os processos. Esta e outras questões associadas a referências de comparação serão avaliadas no capítulo 5.

Capítulo 4

Modelos Equivalentes e Estudos de Otimização On-Line

4.1 Introdução

Conforme já mencionado em capítulos anteriores, os modelos equivalentes foram propostos primeiramente para auxiliar os estudos de análise de segurança estática feitos on-line, representando a resposta externa a alterações de contingência. Outras ferramentas (como as baseadas no fluxo de carga ótimo) que vieram sendo desenvolvidas nas concessionárias, e que também necessitam das respostas externas a determinadas alterações, acabaram por utilizar os mesmos modelos de equivalentes clássicos que eram utilizados nos estudos de análise de segurança.

Entretanto, a natureza das alterações ocorridas durante estudos de FPO em um determinado sistema é diferente daquela apresentada nos estudos de análise de segurança. As alterações ocorridas durante os estudos de otimização são espalhadas pelo sistema interno, bastante diversas daquelas alterações "pontuais" de contingência de linha, transformadores, etc, que ocorrem nos estudos de análise de contingência. Isto é constatado na referência [32], onde se mostra que as alterações em controles reativos (taps de transformadores e tensões em barras controladas) espalhadas pelo sistema interno (tais como aquelas que ocorrem em estudos de otimização) provocam por parte do sistema externo reações bem mais significativas, se comparadas aos estudos de análise de segurança. Além disso, nos estudos de FPO os erros são cumulativos de iteração para iteração. Isto é, a cada alteração são feitas atualizações nos controles internos no sentido de atingir o ponto ótimo, e a função do equivalente é responder convenientemente a tais alterações. No decorrer do processo de otimização os erros de resposta vão, portanto, se acumulando.

A hipótese de que os modelos equivalentes clássicos causam erros significativos quando utilizados em estudos de otimização foi levantada por Tinney na referência [21]. Alguns estudos foram feitos de forma a tentar suportar tal hipótese, mas nenhum resultado com sistemas reais é apresentado na referência. Na referência [46] são feitos estudos de otimização no subsistema interno do sistema sul-sudeste brasileiro (810 barras), representando a parte externa através do modelo WE. Os resultados apresentados nesta referência confirmam a hipótese feita por Tinney, mostrando que o modelo WE apresenta uma resposta ativa satisfatória, entretanto a resposta reativa apresenta erros percentuais superiores ao aceitável. Logicamente, a resposta de modelos equivalentes em geral depende de uma série de fatores tais como o número de barras de fronteira, ou a proximidade dos controles internos da fronteira, ou ainda de como o sistema está dividido, mas resultados como os apresentados nesta referência vêm mostrar que os modelos equivalentes clássicos, quando aplicados a estudos que não os de análise de segurança, devem ser reavaliados com o enfoque específico destes estudos.

Apesar de a hipótese de Tinney ter sido levantada em 1988, nenhum modelo equivalente específico para estudos de otimização havia sido proposto, até 1995, quando se propôs o modelo descrito em [49]. Nesta referência foram feitos estudos de otimização associados ao problema de fluxo de potência ótimo ativo (minimização dos custos de geração) comparando-se a performance do modelo proposto na referência e o modelo WE. A referência mostra que o equivalente proposto é mais preciso que o WE, comparando os processos de otimização do sistema completo, com os processos de otimização dos sistemas equivalenciados respectivamente com o equivalente WE e o modelo proposto naquela referência.

Os controles alterados durante processos de otimização ativa são basicamente controles ativos. As alterações nestes controles produzem por parte do sistema externo respostas também basicamente ativas. Tradicionalmente, as respostas dos equivalentes a alterações na parte ativa são de mais fácil modelagem devido a sua natureza mais linear. Portanto os estudos feitos em [49] não enfocam o problema crucial dos modelos equivalentes que é aquele associado à representação das respostas às alterações em variáveis reativas.

O problema de otimização focado neste trabalho, e descrito no capítulo anterior, é o problema de minimização das perdas do sistema. Este é basicamente um problema de otimização reativa. A solução do problema propõe alterações em taps de transformadores e tensões em barras controladas. Estas alterações produzem por parte do sistema externo reações reativas bem mais significativas, permitindo a análise das respostas de mais difícil modelagem por parte do equivalente que são aquelas associadas às alterações nos controles reativos.

Neste capítulo serão avaliados conceitos relativos à utilização conjunta dos mo-

delos equivalentes externos e de fluxo de potência ótimo. Para tal, alguns dos modelos equivalentes clássicos descritos no capítulo 2 serão reavaliados para os estudos de otimização. Entre estes modelos avalia-se primeiramente o modelo WE e suas aplicações em estudos de otimização. Mostra-se aqui que as duas versões do modelo WE descritas no capítulo 2 podem possuir soluções bastante diferenciadas dependendo do uso que faça dos modelos.

Os modelos baseados em fluxo de carga ótimo são enfocados no capítulo 6 onde se propõe um modelo equivalente não reduzido para otimização reativa. Mostra-se nesse capítulo que os modelos baseados em fluxo de carga podem ser interpretados como uma particularização do modelo proposto. Na verdade, o modelo baseado em fluxo de carga pode ser interpretado como a restrição de igualdade do modelo descrito no capítulo 6, na qual são especificadas as variáveis reativas de controle.

A avaliação dos modelos baseados em estimação de estado foge ao escopo do presente trabalho e não será feita numericamente aqui. Entretanto cabe lembrar que esta técnica tem sido bastante utilizada em Análise de Segurança Estática e é potencialmente uma técnica bastante viável em estudos de otimização.

Alguns aspectos importantes associados à implementação de um FPO em tempo real são discutidos na seção 4.2. A metodologia proposta em [49], que propõe um modelo equivalente para estudos de otimização on-line, será descrita na seção 4.4 com considerações críticas. Os paradigmas envolvendo modelos equivalentes com e sem redução são levantados e discutidos na seção 4.5, no contexto dos estudos de otimização. Algumas conclusões são apresentadas ao final do capítulo. O objetivo básico deste capítulo é portanto avaliar o estado da arte dos principais modelos equivalentes utilizados em otimização, propondo e discutindo as formas de utilização destes modelos.

4.2 Implementação Prática de um FPO On-line

O FPO para utilização on-line ainda é uma ferramenta em desenvolvimento nos centros de controle, sendo motivo de pesquisas constantes. No caso de estudos off-line onde as exigências de tempo/esforço computacional são mais flexíveis e onde não se tem as questões associadas ao tempo real, a implementação de métodos bastante robustos, tais como o método de Newton já é plenamente viável.

Para estudos em tempo real, entretanto, é necessário se salientar alguns pontos que têm dificultado a implementação prática de um FPO on-line. A referência [21] fala de algumas deficiências básicas do FPO on-line. Esta e outras deficiências apontadas na literatura, bem como algumas formas de tratá-las são citadas a seguir:

- O número de ações de controle produzidas pela ferramenta é às vezes muito elevado. Isto muitas vezes inviabiliza o processo de implementação destes controles. Seria melhor que o FPO produzisse ações de controle mais setorizadas, facilitando a implementação prática destes controles. A referência [42] fornece algumas estratégias que podem levar a utilização apenas dos controles mais importantes.
- Deve haver uma concatenação na implementação dos controles. Estudos que sejam capazes de identificar possíveis problemas advindos da sequência em que os controles são implementados são ainda necessários.
- Os modelos de representação das redes externas causam erros no processo de otimização. Esta questão foi levantada na referência [21], onde se mostrou um exemplo, em um sistema pequeno, no qual o modelo WE não apresentou erros considerados razoáveis. Na referência [46] mostra-se a deficiência do modelo WE em estudos de otimização com o sistema sul-sudeste brasileiro. Neste caso confirma-se para sistemas reais a hipótese feita em [21]
- Alguns controles utilizados no FPO têm características discretas, tais como os taps de transformadores e bancos de capacitores. O tratamento destas variáveis como se fossem variáveis contínuas fazendo-se, ao final do cálculo, arredondamentos pode não gerar soluções satisfatórias. Na referência [53] mostra-se que tal aproximação não traz problemas no caso dos taps de transformadores, entretanto, pode gerar soluções ruins no caso dos bancos de capacitores. Uma heurística que tenta tratar este problema no caso dos bancos de capacitores é dada na referência [52].

Este trabalho pretende equacionar uma destas deficiências básicas, qual seja a representação das partes externas durante tais estudos de otimização. Logicamente, para que o FPO possa ter uma aplicação mais efetiva nos centros de controle algumas questões citadas acima ainda necessitam de um tratamento mais adequado. Essas questões, ainda não resolvidas, e que são importantes para aplicações práticas não foram considerados neste trabalho. Entretanto, procurou-se um modelo de FPO que permitisse explorar as não linearidades das respostas externas, necessárias à avaliação de modelos equivalentes.

4.3 Modelo WE e Otimização Reativa

A análise de modelos equivalentes em estudos de otimização carece da definição de determinados conceitos que facilitem a compreensão do problema. Define-se um processo de otimização equivalente como um processo de otimização de um sistema constituído pelo subsistema interno completo acoplado a um modelo equivalente qualquer. Os controles internos calculados por tal processo são denominados controles equivalentes.

Os processos de otimização do sistema completo, em que a parte externa é perfeitamente conhecida, são denominados processos de otimização de referência. A priori, a representatividade de modelos equivalentes utilizados em estudos de otimização equivalente pode portanto ser avaliada comparando-se os processos de otimização equivalente e de referência. Entretanto, no capítulo 5 discute-se uma metodologia mais eficaz de análise da representatividade dos modelos equivalentes.

Os modelos WE descritos no capítulo 2 tiveram uma boa aceitação em aplicações on-line em diversos centros de controle. Apesar de serem bastante eficientes em estudos de análise de segurança estática sua aplicação em estudos de otimização pode levar a erros considerados inaceitáveis conforme se mostra na referência [32]. Nesta referência foram feitos estudos com o sistema sul-sudeste brasileiro (810 barras), particionando-o nos sistemas interno, fronteira e externo e fazendo estudos de otimização nos sistemas com (otimização equivalente) e sem (otimização de referência) o equivalente WE. Os processos de otimização com e sem o equivalente WE foram comparados. Alguns resultados extraídos do artigo [32] são reeditados aqui para que se tenha uma noção do nível de erro de resposta do modelo WE em estudos de otimização reativa.

Na tabela 4.1 dada a seguir comparam-se os estados otimizados decorrentes dos dois processos de otimização. A tabela mostra os 3 maiores erros obtidos (para as barras de controle e barras de carga) quando se comparam as tensões internas calculadas respectivamente nos processos de otimização de referência e equivalente. Também é fornecido o erro global médio que corresponde aos erros médios calculados para todas as barras internas ao sistema.

Tabela 4.1: WE - Erros nas Tensões Internas

Tensões Internas	Barra	WE	Sistema Completo	erro %	erro médio global %
Barras de Controle	1435	0.9339	0.9993	6.53	1.32
	1255	1.0453	0.9719	7.33	
	1431	1.0184	0.9355	8.28	
Barras de Carga	1302	1.0242	1.0027	2.14	0.45
	1483	1.0596	1.0380	2.15	
	1484	1.0423	1.0001	4.22	

A tabela 4.2 mostra os 3 maiores erros de fluxo de potência ativa e reativa na parte interna no sistema quando comparamos a solução dos dois processos de otimização. Percebe-se claramente a deficiência de resposta de potência reativa. Os erros médios calculados sobre os fluxos internos de potência reativa são da ordem de 9%. Note-se que há ramos em que mesmo o sentido do fluxo de potência é invertido, fornecendo erros inaceitáveis para

o equivalente. Percebe-se ainda que o problema de resposta não acontece na parte ativa que é de mais fácil modelagem.

Tabela 4.2: WE - Erros nos Fluxos de Potência Internos

Fluxos Internos	Ramo	WE	Sistema Completo	erro %	erro médio global %
Potência Ativa (MW)	1136-1356	747.14	751.61	4.46	0.71
	1486-1253	-157.91	-162.39	4.47	
	1279-1276	-50.38	-43.39	15.7	
Potência Reativa (Mvar)	1248-1245	1.76	8.32	101.4	9.0
	1452-1183	-93.79	33.88	201.4	
	1162-1104	-133.31	-7.06	1788.0	

É importante ressaltar que a comparação entre dois estados otimizados não é a mais conveniente para avaliar a resposta dos modelos equivalentes, uma vez que os controles calculados com e sem equivalentes são diferentes. Isto será discutido no capítulo 5 onde se introduz uma metodologia de análise de modelos equivalentes em estudos de otimização on-line. O modelo WE será reavaliado segundo tal metodologia no capítulo 8. A comparação acima, entretanto, dá uma idéia de como um modelo equivalente pode "distorcer" o cálculo dos controles.

Algumas medidas podem ser tomadas a fim de minimizar os erros de resposta de modelos equivalentes. Uma destas medidas seria considerar modelos com áreas de amortecimento onde se tenha bons níveis de informação externo. Estas áreas devem proporcionar uma melhor resposta no caso dos modelos equivalentes WE. Isto é o que tem sido verificado para estudos de análise de segurança estática.

4.3.1 Comparando os Modelos WE para Otimização

Nos estudos de análise de segurança estática os modelos WE com PV e shunt fictícios dados respectivamente nas figuras 2.3 e 2.4 têm soluções bastante aproximadas, conforme se discutiu no capítulo 2. Nos estudos de otimização isto nem sempre é verdade.

Ao utilizar-se o modelo com PV fictícia durante um processo de otimização tem-se duas opções: liberar ou não os controles destas barras durante este processo. Da experiência com os sistemas estudados percebeu-se que a utilização das tensões das barras PV fictícias como controle do processo de otimização não produz resultados satisfatórios. As respostas dos modelos com PV fictícia, nestes casos, é sempre inferior aos casos em que se utiliza o modelo WE com shunt. De fato, no modelo WE as barras fictícias representam

todas as barras controladas externas. É evidente que cada barra controlada externa é independente no processo de otimização. Considerá-las de forma única, que é o que se faz quando se liberam as tensões destas barras, certamente não é razoável. A versão do modelo WE com PV fictícia em que se liberam os controles de tensão de tais barras foi abandonada em virtude dos resultados muito ruins.

Se as tensões na barras PV fictícias não são liberadas, a resposta dos modelos WE utilizando-se respectivamente os elementos shunt e as PV fictícia são muito aproximadas. O modelo WE utilizado no decorrer deste trabalho utiliza a versão com shunts fictícios.

A referência [21], que levantou a questão da deficiência dos modelos equivalentes em estudos de otimização, também sugere algumas variações sobre o modelo equivalente WE que visam a melhoria de resposta. O modelo a ser descrito a seguir é baseado no enfoque proposto em tal referência e é, até o presente trabalho, o único modelo equivalente especificamente pensado para estudos de otimização.

4.4 Um Modelo Reduzido [49]

A referência [49] traz uma metodologia de modelagem que será descrita e analisada de forma conceitual nesta seção. O modelo proposto nesta referência é basicamente um modelo reduzido, bastante similar ao modelo WE. Entretanto, nesta modelagem a matriz utilizada para o processo de redução é a matriz jacobiana/hessiana (usada no processo de fluxo de carga ótimo Newton) e não a matriz admitância. Como no modelo WE, são eliminados os elementos associados às barras externas desta matriz. Os elementos que são refletidos na fronteira pela eliminação não se equivalem conceitualmente a parâmetros de circuito, uma vez que as matrizes jacobiana/hessiana são compostas de derivadas de primeira e segunda ordem da função lagrangeana. A referência [49] propõe um esquema de interpretação destes termos refletidos na fronteira como parâmetros de circuito, já que para aplicações práticas isto é bastante conveniente. Outros modelos, como por exemplo aqueles baseados em reduções na matriz jacobiana, não tiveram aceitação prática justamente pelo fato de não estarem associados a parâmetros de circuito.

O modelo descrito nesta seção possui também uma forma de casamento na fronteira que é diferenciada dos outros modelos. Neste, além do casamento tradicional, utilizando injeções de potência para manter o estado interno básico inalterado, também são introduzidos elementos que mantêm nulas as componentes do gradiente da lagrangeana relativas às variáveis das barras da fronteira de um caso básico de fluxo de carga ótimo. A descrição matemática do modelo é dada na seção 4.4.1 e o processo de casamento é descrito na seção 4.4.2.

4.4.1 Descrição do Modelo Reduzido

O modelo aqui descrito é baseado em uma linearização da condição de estacionariedade da lagrangeana do problema de fluxo de potência ótimo em torno de um ponto básico de operação. A equação relativa a essa condição é expressa como:

$$[\mathbf{W}] \begin{bmatrix} \delta \mathbf{x} \\ \delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L} \\ \nabla_{\lambda} \mathcal{L} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}} & | & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \mathbf{x} \partial \lambda} \\ \text{---} & + & \text{---} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \lambda \partial \mathbf{x}} & | & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \lambda \partial \lambda} \end{bmatrix} = \mathbf{W} \rightarrow \text{Matriz Hessiana da Função Lagrangeana}$$

$$\begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L} \\ \text{---} \\ \nabla_{\lambda} \mathcal{L} \end{bmatrix} = \mathbf{G} \rightarrow \text{Vetor Gradiente da Função Lagrangeana}$$

De forma análoga ao modelo WE a matriz Hessiana da Função Lagrangeana $\mathbf{W}$ e o vetor gradiente são particionados nos seus elementos interno (i), fronteira (f) e externo (e), conforme mostram as relação 4.2.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{ee} & \mathbf{W}_{ef} & 0 \\ \mathbf{W}_{fe} & \mathbf{W}_{ff} & \mathbf{W}_{fi} \\ 0 & \mathbf{W}_{if} & \mathbf{W}_{ii} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_e \\ \mathbf{G}_f \\ \mathbf{G}_i \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Como geralmente ocorre nos métodos baseados em redução de circuitos, a parte associada aos elementos externos da matriz é reduzida por eliminação de Gauss, sendo refletida na fronteira. A matriz reduzida obtida é dada em 4.3.

$$\mathbf{W}' = \begin{bmatrix} \mathbf{W}'_{ff} & \mathbf{W}_{fi} \\ \mathbf{W}_{if} & \mathbf{W}_{ii} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

No processo de redução os elementos interno-fronteira da matriz não se alteram. A matriz reduzida $\mathbf{W}'$ contém elementos em suas submatrizes $\mathbf{W}'_{ff}$ que foram refletidos na fronteira que são calculados por:

$$\mathbf{W}'_{ff} = \mathbf{W}_{ff} - \mathbf{W}_{fe} \mathbf{W}_{ee}^{-1} \mathbf{W}_{ef} \quad (4.4)$$

Uma comparação entre este processo de redução e aquele já descrito para o modelo WE é importante. No caso do WE, a equação 2.2 que modela o sistema com as barras externas eliminadas tem uma interpretação em termos de circuito direta. As equações 2.3 e 2.4 são diretamente associadas respectivamente aos conceitos de injeção equivalente e ramos equivalentes na fronteira. Conceitos que podem ser diretamente manipulados por outras ferramentas computacionais tais como o fluxo de carga, etc. A eliminação da matrix $\mathbf{W}$ na equação 4.1 por sua vez, não tem uma associação direta com elementos de circuito que possam ser manipulados por outras ferramentas, o que limita consideravelmente a utilização de um modelo equivalente reduzido desta natureza. De fato, os modelos baseados na matriz de sensibilidade não tiveram aceitação nas concessionárias de energia exatamente pelo fato de utilizarem elementos outros que não os de circuito, mesmo apresentando resultados mais precisos que o modelo WE conforme mostra a referência [12].

O modelo analisado nesta seção propõe uma forma de converter os termos que aparecem refletidos na matrix $\mathbf{W}'_{ff}$ ("fill in") em parâmetros de circuito da forma descrita a seguir. Seja por exemplo o elemento "fill in" que aparece entre as barras de fronteira i e j após a eliminação. Para se modelar este "fill in" como um ramo série deve-se admitir na fronteira um elemento de circuito associado a uma admitância $g_{ij} + jb_{ij}$. Quando esse elemento de circuito é considerado na fronteira, estabelece-se uma nova matrix $\mathbf{W}''_{ff}$ cujos termos $\mathbf{W}''_{ij}$ dependem de $g_{ij} + jb_{ij}$. Logicamente este termo não casa exatamente com o termo "fill in" original $\mathbf{W}'_{ij}$. O problema é, portanto, como encontrar os ramos equivalentes na fronteira que possuam uma matrix $\mathbf{W}$ na fronteira o mais próxima possível de $\mathbf{W}'_{ff}$. Para a resolução deste problema propõe-se um método de mínimos quadrados para estimar os ramos ij que produzam a matrix $\mathbf{W}$ a mais próxima possível de $\mathbf{W}'_{ff}$. Ou seja:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Min} & ||\mathbf{W}'_{ij} - \mathbf{W}''_{ij}(p)|| \\ \text{onde} & p = [g_{ij}; b_{ij}] \end{array} \right. \quad (4.5)$$

O problema acima é resolvido para todos os elementos "fill in" obtidos na matrix reduzida. A resolução destes problemas fornece portanto todos os ramos série equivalentes na fronteira.

Como o modelo WE, o modelo aqui descrito também calcula impedâncias shunt fictícias de forma a melhorar sua resposta reativa. O processo de cálculo é análogo ao descrito anteriormente para os ramos equivalentes. Suponha-se primeiramente que os ramos série equivalentes já estão calculados conforme descrito acima. Suponha-se ainda a inserção

de uma admitância shunt fictícia dada por Y_{fic}^i na barra de fronteira i . Ao calcularmos o elemento da diagonal da hessiana correspondente a tal barra teremos um certo termo $\mathbf{W}''_{ii}$. Este valor certamente não será igual ao valor original da diagonal da matriz dado por $\mathbf{W}'_{ii}$. Deve-se analogamente estimar através um problema de mínimos quadrados qual o valor das admitâncias shunt fictícias de fronteira que produzem valores na diagonal na matriz W os mais próximos possíveis de $\mathbf{W}'_{ii}$. Ou seja:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \quad ||\mathbf{W}'_{ii} - \mathbf{W}''_{ii}(p)|| \\ \text{onde} \\ p = [Y_{fic}^i] \end{array} \right. \quad (4.6)$$

O problema é resolvido para cada uma das diagonais associadas às barras de fronteira, produzindo ao final todas as admitâncias fictícias Y_{fic} na fronteira. Como no modelo WE estas admitâncias podem ser inseridas na fronteira também através de barras PV fictícias.

4.4.2 Casamento na Fronteira Diferenciado

O objetivo do casamento na fronteira é ajustar a solução da rede reduzida de forma que esta seja idêntica à solução ótima básica da rede completa. Seja uma solução ótima básica da rede completa dada. Se a partir desta rede, reduzirmos a parte externa conforme descrito anteriormente e acoplarmos os ramos equivalentes e admitâncias equivalentes à fronteira, haverá, em relação às variáveis das barras de fronteira, componentes não nulas do gradiente. Estas componentes são devidas a variações nos parâmetros de rede da fronteira antes e depois da redução. O casamento na fronteira relativo aos modelos equivalentes tradicionais garante que o balanço de potência ativa e reativa esteja satisfeito, mas não leva em conta as variações no gradiente.

Para que essas componentes do gradiente na fronteira permaneçam nulas, mesmo após a inserção dos elementos do modelo equivalente, é proposta a inserção de elementos de corrente constantes ativa (I_p) e reativa (I_q) na fronteira que façam com que o gradiente seja anulado. Para incrementar ainda mais a resposta reativa é proposta ainda a inserção de elementos shunt em cada barra de fronteira do tipo gsh_f e bsh_f . O problema de mínimos quadrados que estima os valores de I_p , I_q , gsh_f e bsh_f é dado a seguir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \quad ||\mathbf{W}'_{ii} - \mathbf{W}''_{ii}(p)|| \\ \text{s.a.} \quad \frac{\partial \mathcal{L}(p)}{\partial v_i} = 0 \\ \quad \quad \frac{\partial \mathcal{L}(p)}{\partial \theta_i} = 0 \\ \text{onde} \quad p = [gsh_i, bsh_i, Ip_i, Iq_i] \end{array} \right. \quad (4.7)$$

No problema acima $\mathbf{W}'_{ii}$ é o termo da diagonal da matriz $\mathbf{W}'$ associada à barra de fronteira i a ser alcançado. $\mathbf{W}''_{ii}(p)$ é o bloco da diagonal contendo todos os elementos de circuitos já calculados anteriormente mais as contribuições dos elementos shunt gsh_i e bsh_i e ainda as contribuições das corrente constantes Ip_i e Iq_i . O problema é restrito ao atendimento das condições de estacionariedade do gradiente em relação às tensões e ângulos das barras de fronteira.

Finalmente , o modelo proposto na referência [49] descrito nesta seção é mostrado na figura 4.1.

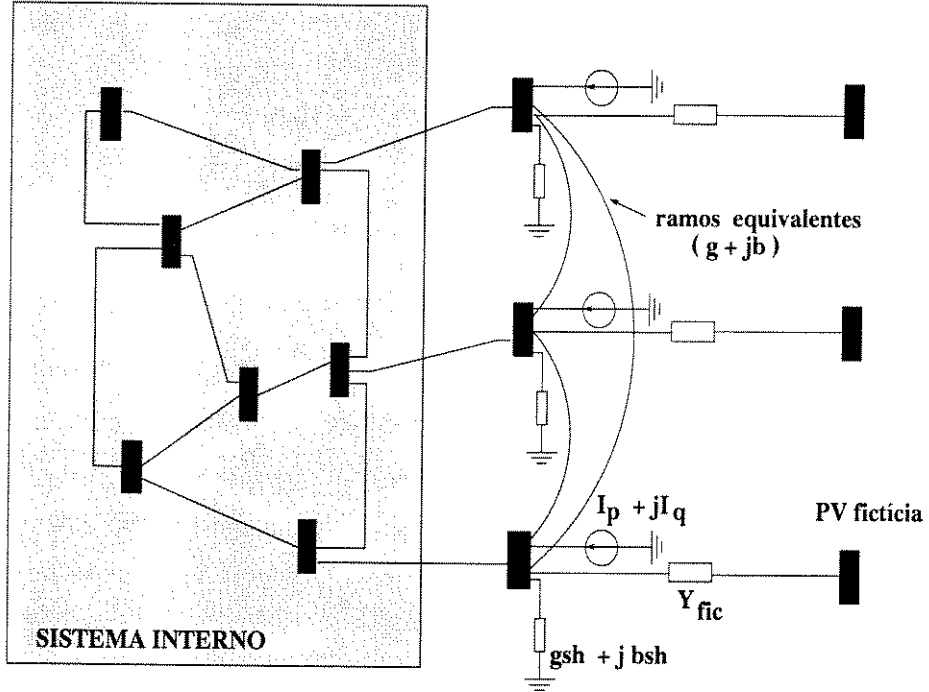


Figura 4.1: Modelo Reduzido para Otimização

Algumas variações do modelo WE já publicadas na literatura [14] também consideram elementos de respostas lineares tais como as injeções de corrente constantes e também

a inclusão de elementos shunts de resposta reativa. Portanto, o modelo descrito estruturalmente se aproxima bastante do modelo WE. Algumas comparações a nível teórico entre o modelo descrito e o modelo WE podem ser feitas. Dois pontos básicos diferenciam o modelo descrito do modelo WE:

- Os parâmetros de rede tais como os ramos equivalentes e admitâncias fictícias calculados pelo modelo descrito tendem a ser, pelo menos teoricamente, mais representativos para fins de reação externa, uma vez que o seu cálculo é baseado em matrizes de sensibilidade de segunda ordem.
- O casamento respeitando as condições de otimalidade na fronteira deve certamente melhorar a resposta do modelo.

Segundo a referência [49] os resultados obtidos com este modelo confirmam que o mesmo apresenta uma melhor resposta se comparado ao WE para ambos os estudos: análise de segurança e estudos de otimização. Os estudos de otimização realizados em [49] são o que se chama na literatura de problema ativo: minimização do custo de geração. As variáveis de controle deste problema são os despachos de potência ativa das unidades geradoras. Tais alterações devem produzir por parte do equivalente externo respostas basicamente ativas. Entretanto, sabe-se que tradicionalmente as respostas de mais difícil modelagem são aquelas associadas à parte reativa, não avaliadas no artigo. Neste trabalho pretende-se realizar estudos de FPO reativo a fim de que se possa tratar efetivamente o problema crucial do equivalente: a representação das respostas às alterações em variáveis de controle reativas que ocorrem durante estudos de otimização reativa no sistema interno.

Um ponto chave do modelo descrito até aqui, e que a nosso ver limita a sua aplicação no ambiente on-line da operação, é o seu processo de atualização. *Todo o cálculo dos parâmetros do modelo se baseia na solução de um fluxo de potência ótimo básico do sistema completo.* No ambiente da operação não se dispõe de fluxos de carga ótimos que vão sendo atualizados de forma que se possa consequentemente atualizar e zerar os gradientes na fronteira com relação a tais FPO. Dispõe-se apenas de casamentos que levem em consideração o estado básico atual fornecido pelo estimador. O processo de atualização do modelo equivalente aqui avaliado fica portanto dificultado no ambiente da operação.

Os mesmos problemas de representação citados na referência [21] tais como a representação de restrições e de funções e variáveis da parte externa ainda não são enfocados por este modelo, que por ser de natureza reduzida não dá acesso à manipulação de variáveis e funções do subsistema externo. Na seção a seguir, pretende-se rediscutir a questão da redução/não redução dos modelos equivalentes. Este foi um tema amplamente discutido na década de 80 quando se avaliava a representação das áreas externas para estudos de

análise de segurança estática. O tema é retomado aqui porém no contexto dos estudos de otimização, onde a representação de outros atributos externos tais como função objetivo, restrições de todo tipo, penalidades, etc, são acrescentados ao problema clássico de modelagem da resposta externa.

4.5 Modelos Reduzidos & Não reduzidos

A questão da redução de circuito foi tema bastante explorado na década de 80. Dois enfoques básicos de modelos equivalentes foram alvo de pesquisa: os modelos equivalentes reduzidos, destacando-se o modelo WE e os modelos não reduzidos. Os modelos eram utilizados para representar as áreas externas durante estudos de análise de segurança.

Conforme se constata na referência [29], o modelo WE é menos preciso do que o modelo não reduzido descrito em [26], se bem que sua resposta é considerada satisfatória em [11]. Entretanto, alguns pontos fizeram com que o modelo WE tivessem uma maior aplicação em estudos de análise de segurança: facilidade de atualização, menor esforço computacional, menor esforço de atualização da base de dados externos, e uma precisão aceitável. De fato, para estudos de análise de segurança o modelo WE possui uma boa relação de compromisso entre a precisão e o esforço computacional.

É necessário rever estes pontos no contexto do ambiente tecnológico atual e ainda no contexto dos estudos de otimização. No contexto tecnológico deve-se dar uma maior atenção à precisão, uma vez que os processadores digitais estão cada vez mais sofisticados e velozes. Tem-se ainda que as técnicas de transmissão e processamento da informação têm sido cada vez mais aprimoradas. Existe portanto uma tendência cada vez maior de utilização das informações externas para se compor modelos externos bem mais precisos. Os equivalentes reduzidos não são capazes de incorporar tais informações externas intrinsicamente aos seus modelos. No contexto dos estudos de otimização os modelos reduzidos não são capazes de lidar com atributos externos importantes tais como restrições, funções objetivo, controles, penalidades, etc.

Este trabalho pretende retomar a discussão redução/não redução aplicada aos modelos equivalentes no contexto dos estudos de otimização.

4.6 Conclusões

Procurou-se neste capítulo avaliar os aspectos de interrelação entre os modelos equivalentes e os estudos de otimização.

Mostrou-se, através de resultados numéricos com o sistema sul-sudeste brasileiro, que a resposta do modelo WE não possui uma precisão aceitável, especialmente no tocante a sua parcela reativa, quando são feitos estudos de otimização equivalente com este modelo. O resultado confirma a hipótese de deficiência levantada por Tinney no seu artigo que trata das deficiências do FCO.

Mostrou-se ainda que os modelos WE com shunts e PV fictícias quando usados em otimização podem ter respostas bastante diferenciadas. O artifício de liberar os controles das barras PV a fim de representar possíveis variações em controles externos não produz boas respostas.

Avaliou-se criticamente o modelo equivalente proposto por Hao e Papalexopoulos [49] para estudo de otimização ativa, que tem apresentado melhores resultados quando comparados ao WE. Um aspecto negativo do modelo é seu processo de atualização baseado em uma solução básica de FCO para o sistema completo. No ambiente da operação não se dispõe de soluções de FCO (para o sistema completo) atualizadas "on-line", o que limita sua utilização prática.

Foram discutidos aspectos de redução/não redução de rede como forma de representação de modelos externos em estudos de otimização. Os modelos equivalentes reduzidos não têm a capacidade de lidar com atributos externos tais como restrições, função objetivo, penalidades, etc. Dadas estas limitações dos equivalentes reduzidos, estes geram invariavelmente estudos de otimização menos precisos e representativos conforme analisado em capítulos a seguir.

Capítulo 5

Proposta de Uma Metodologia de Análise

5.1 Avaliação de Processos de Otimização Equivalentes

A avaliação de desempenho dos modelos equivalentes em estudos de otimização requer uma metodologia de análise que possa quantificar o grau de representatividade destes modelos. A metodologia de análise tradicional, foi concebida tendo-se em mente a representatividade destes modelos para os estudos de Análise de Segurança Estática. Esta metodologia consiste em analisar o estado obtido com a saída de determinado componente do sistema (linha, transformador ou gerador) fazendo-se duas simulações: uma com sistema completo, e outra com a parte externa sendo representada por um modelo equivalente qualquer. Logicamente, um modelo equivalente é tanto mais preciso quanto mais a sua resposta se aproximar da resposta obtida com o sistema completo (referência). A fixação de uma referência é um artifício para validação dos modelos equivalentes. Isto implica que a resposta do modelo é boa ou não para aquele determinado nível de carga/geração de referência.

Analogamente, o que se pretende quando um modelo equivalente é utilizado durante um estudo de otimização é que este modelo tenha uma performance semelhante àquela obtida com o mesmo estudo de otimização no sistema completo. No caso dos estudos de otimização entretanto há alguns pontos que necessitam ser avaliados. Primeiramente, é necessário lembrar que o FPO, não é um problema rígido, com solução única como o fluxo de carga. Isso faz com que existam várias soluções possíveis para um mesmo problema de FPO. Estes cenários possíveis devem ser analisados pelo operador de forma a escolher a opção que seja mais conveniente para a operação. É possível portanto, se fixar não uma, mas várias referências de otimização, cada uma associada a um determinado cenário. Para que a análise do modelo equivalente seja coerente, é preciso que a comparação entre a solução obtida com o modelo equivalente e com o sistema completo seja feita para o mesmo cenário

específico.

Além disso, deve-se lembrar que o cálculo dos controles internos é a finalidade principal dos estudos de otimização. A metodologia de análise, discutida a seguir, avalia primeiramente a precisão do cálculo dos controles internos com o modelo equivalente, levando em conta, a seguir, o impacto da implementação destes controles no sistema interno, como formas de avaliar o desempenho de um modelo equivalente. A abordagem metodológica é feita, portanto, em dois níveis.

A seguir serão definidos os cenários padrões de otimização que fornecerão as soluções de referência para análise dos modelos equivalentes. Será ainda apresentada a metodologia de análise de desempenho de modelos de otimização equivalentes.

5.1.1 Cenários Padrões de Otimização

A avaliação da precisão de um determinado modelo equivalente requer a fixação de determinados padrões de referência conhecidos. Assim, pode-se dizer que determinado modelo se aproxima de tal padrão de referência com um certo nível de precisão. O FPO possui múltiplas soluções, sendo possível portanto se adotarem diferentes soluções para um mesmo problema, o que implica na possibilidade de se definirem diferentes referências. É necessário garantir que a otimização equivalente e a otimização do sistema completo estão sendo processadas dentro do mesmo cenário.

O problema de FPO associado a uma rede de transmissão genérica pode ser formulado, conforme já mencionado, por:

$$\text{FPO} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Min} & C(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x} & \\ s.a. : & \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\max} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

O que se chama aqui padrão de otimização está associado à metodologia de solução que se utiliza para resolver tal problema. Conforme já discutido no capítulo 3, o problema acima é resolvido, neste trabalho, pelo método de Newton. Utiliza-se também uma política de penalidades, a fim de tratar as restrições canalizadas nas variáveis. As restrições funcionais são tratadas com técnicas de parametrização. A seguir serão discutidos alguns aspectos do método, que permitem atuar sobre o processo de solução do FPO e que

contribuem para a definição de padrões de otimização, tais como : a política de penalidades, parâmetros e os controles utilizados. É importante reiterar que estes aspectos estão diretamente ligados ao método de otimização utilizado, e que eles devem ser reavaliados para os diferentes métodos de solução do FPO.

A política de penalidades adotada pré-define um determinado padrão de otimização. Por exemplo pode ser adotada uma política de penalidades que libera mais as tensões das barras de carga, segurando mais as tensões em barras controladas conforme mostrado no caso (a) da figura 5.1.

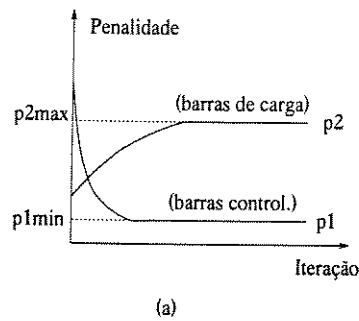


Figura 5.1: Exemplo de Política de Penalidades

Um caso extremo seria adotarmos penalidades "infinitas". Este é um artifício bastante utilizado no caso em que se deseja fixar tensões nas barras de controle e taps de transformadores. Esta propriedade exemplifica como as soluções dos processos de otimização podem ser radicalmente afetadas pela fixação de determinados parâmetros que definem diferentes cenários de otimização.

Outro fator que pode influir no processo de otimização é o parâmetro das funções homotopia usado no tratamento das restrições funcionais. Mostra-se no apêndice b. que, às vezes, para determinados valores deste parâmetro a introdução das restrições funcionais como igualdade explícita no problema de FPO se dá de forma brusca, prejudicando a convergência do processo. É necessário nestes casos aumentar o valor do parâmetro para que a introdução da restrição se dê de forma mais suave. Para que os processos de otimização de referência e equivalente sejam avaliados de forma coerente é conveniente que os mesmos valores de parâmetro sejam utilizados.

Outro aspecto importante é a consideração de quais variáveis de controle serão atualizadas no processo de otimização. É fundamental que os processos de otimização, de referência e equivalente, utilizem os mesmos controles na parte interna do sistema.

Considerando os aspectos de definição dos controles, dois cenários padrões de otimização (ou referências) no sistema completo são definidos. Estes dois tipos de compor-

tamento, que se mostraram bastante distintos nos testes, denominados otimização interna e otimização global são definidos a seguir.

Otimização Interna

No processo de otimização interna FPOI consideram-se os seguintes pontos que definem o padrão de otimização:

- Função objetivo considerada apenas no sistema interno;
- Os controles são os taps de transformadores internos e tensões em barras controladas internas;
- Somente as restrições funcionais internas são consideradas;
- Equações de fluxo de carga dos sistemas interno e externo

Este processo de otimização é assim definido visto que contempla uma situação que ocorre na prática de um centro de controle: um dado centro de controle está interessado em minimizar apenas as suas perdas, e utilizando para isso apenas os seus controles (visto que um dado centro não tem acesso aos controles de outros centros), e factibilizando apenas as suas restrições. É conveniente para a concessionária ainda que esta leve em consideração não só o atendimento de sua demanda mas também o atendimento da demanda das áreas externas. Este processo de otimização é dado abaixo, particionando o problema de otimização em suas partes interna (i), fronteira (f) e externa (e).

$$\text{FPOI} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Min} & C_i(\mathbf{x}_i) \\ \mathbf{x}_i & \\ s.a. : & \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{x}_i^{\min} \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^{\max} \\ & \mathbf{g}_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{g}_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Entretanto, na prática da operação não se dispõe de dados externos que possam satisfazer as equações de fluxo de carga on-line do sistema externo. É exatamente por essa razão que se torna necessária a utilização de modelos equivalentes que possam representar tais equações. No caso de utilizar-se um modelo equivalente para representar a área externa,

pode-se definir o problema de otimização interna equivalente (FPOIeq), conforme 5.3. As equações na fronteira também têm o superíndice (eq) para explicitar que as equações são afetadas pelo modelo equivalente.

$$\text{FPOIeq} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Min} & C_i(\mathbf{x}_i) \\ \mathbf{x}_i & \\ s.a. : & \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{x}_i^{\min} \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^{\max} \\ & \mathbf{g}_f^{eq}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{g}_e^{eq}(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (5.3)$$

Otimização Global

No processo de otimização global FPOG consideram-se os seguintes pontos que definem o padrão de otimização:

- A função objetivo considerada na otimização é dada pelas perdas sistema totais (interno e externo)
- Os controles no processo de otimização são todos os taps de transformadores controlados e todas tensões em barras controladas.
- Todas as restrições funcionais são consideradas.
- Todas as equações de fluxo de carga devem ser satisfeitas.

Este processo de otimização também corresponde a uma situação prática: neste caso supõem-se que um sistema supervisor opera os sistemas interno e externo minimizando as perdas globais através dos controles globais e factibilizando globalmente as retrições. Particionando o problema de FPO como acima, pode-se definir o FPOG matematicamente como:

$$\text{FPOG} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Min}_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e} & \{ \mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{C}_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) + \mathbf{C}_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) \} \\ \\ \text{s.a. :} & \begin{array}{l} \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_i^{\min} \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^{\max} \\ \\ \mathbf{g}_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_f^{\min} \leq \mathbf{x}_f \leq \mathbf{x}_f^{\max} \\ \\ \mathbf{g}_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_e^{\min} \leq \mathbf{x}_e \leq \mathbf{x}_e^{\max} \end{array} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Foram relacionados neste ítem alguns pontos que definem padrões de otimização de modo que se possam comparar, de forma coerente, as otimizações equivalentes com as referências adequadas. De uma forma mais geral, qualquer fator que interfira na solução do problema de FPO proposto deve ser levado em consideração. Os pontos discutidos anteriormente estão resumidos a seguir. Nos processos de otimização de referência e equivalente considera-se:

- A mesma divisão do problema do FPO em três fases de otimização conforme discutido no capítulo 3;
- as mesmas restrições canalizadas nas variáveis controladas e dependentes da parte interna do sistema;
- os mesmos controles internos;
- a mesma política de penalidades para as variáveis internas em todas as fases do processo de otimização;
- as mesmas restrições funcionais do sistema interno;
- os mesmos parâmetros das funções homotopia associadas às restrições funcionais.

Dado que estão fixados os padrões de otimização, pode-se partir para a análise de desempenho dos modelos equivalentes utilizados em estudos de otimização.

5.2 Metodologia de Análise de Modelos Equivalentes

Em um primeiro nível de análise procura-se sistematizar a avaliação do cálculo dos controles internos utilizando-se os modelos equivalentes. Em um segundo nível procura-se quantificar o nível de resposta dos modelos equivalentes com relação à implementação destes controles. A metodologia proposta é aplicável à análise de qualquer modelo equivalente utilizado em estudos de otimização e tem sido utilizada neste trabalho para a validação dos modelos equivalentes aqui estudados. Esta metodologia é mais adequada para aplicações "on-line" do FPO reativo, uma vez que é tomado como ponto de partida para as otimizações (do sistema completo ou com equivalente) o ponto operacional básico. Na prática tal ponto operacional básico é fornecido por um processo de estimação de estado.

5.2.1 Primeiro Nível de Análise - Avaliação do Processo de Otimização Equivalente

A tarefa de um modelo equivalente FPO é mais abrangente do que aquela de um modelo equivalente FC. Um modelo equivalente FPO deve ser capaz de, não apenas reagir a alterações na parte interna dos sistemas, mas também produzir ações de controle equivalentes aceitáveis para o sistema interno. Isto significa que os controles produzidos pela otimização equivalente devem se aproximar daqueles produzidos pela otimização de referência. O objetivo, neste nível de análise, é propor uma metodologia que seja capaz de avaliar o grau de precisão dos controles equivalentes em relação aos controles de referência.

Seja um ponto operacional básico definido por $\mathbf{x}_i^0$ e $\mathbf{x}_e^0$ respectivamente para as áreas interna e externa. A parcela $\mathbf{x}_i^0$ deste ponto é fornecida on-line pela função de estimação de estado. Pode-se destacar os controles atuais dados por $\mathbf{u}_i^0$ e $\mathbf{u}_e^0$ como subconjuntos deste ponto.

A partir do ponto básico é possível executar um processo de otimização de referência com um padrão de otimização pré-definido. Este processo de otimização nos fornecerá uma estratégia de solução cujos controles dados por $\mathbf{u}_i^*$ e $\mathbf{u}_e^*$ minimizam determinado critério de otimização. Os desvios nos controles em relação ao estado básico atual é definido por:

$$\Delta \mathbf{u}_i^{\text{ref}} = \mathbf{u}_i^* - \mathbf{u}_i^0 \quad (5.5)$$

O vetor de desvios, calculados conforme acima, permite analisar o grau de alteração de cada controle a ser implementado no sistema. Quanto maior o valor do $\Delta \mathbf{u}^{\text{ref}}$ de um sistema maior será o impacto na implementação destes controles.

De forma análoga, se a parte externa é representada por um modelo equivalente é possível calcular os controles equivalentes produzidos pelo modelo equivalente, utilizando-se o mesmo padrão de otimização utilizado na otimização de referência. Neste caso interessam aos centros de controles apenas os controles internos $\mathbf{u}_i^{\text{eq}*}$, pelo fato de que os controles externos não são acessíveis a um dado centro de controle, mesmo porque, alguns equivalentes nem representam os controles externos. Os desvios de controle equivalentes são representados no vetor dado por 5.6.

$$\Delta \mathbf{u}_i^{\text{eq}*} = \mathbf{u}_i^{\text{eq}*} - \mathbf{u}_i^0 \quad (5.6)$$

Os controles equivalentes são então analisados comparando-se os erros percentuais para cada controle interno (c) calculado pela otimização equivalente e de referência, conforme mostrado na equação 5.7.

$$Erroc = \frac{|\mathbf{u}_c^{\text{ref}} - \mathbf{u}_c^{\text{eq}*}|}{\mathbf{u}_c^{\text{eq}*}} * 100 \quad (5.7)$$

As normas dos vetores de desvio $\Delta \mathbf{u}_i^{\text{eq}*}$ e $\Delta \mathbf{u}_i^{\text{ref}}$ também são bons parâmetros de comparação entre os controles equivalentes e de referência. Estas podem ser calculadas durante os processos de otimização e permitem visualizar a evolução das suas alterações incrementais no decorrer do processo de otimização. Outro critério pode ser o próprio valor da função objetivo que também evolui durante o processo de otimização. Estes dois índices escalares foram utilizados para a análise dos processos de otimização equivalentes em relação ao padrão correspondente. A figura 5.2 ilustra o uso desses índices escalares, onde se mostra a evolução da norma dos desvios dos controles de tensão $|\Delta u|_v$ e de taps $|\Delta u|_{\text{tap}}$ internos, para os processos de otimização equivalente e de referência. A evolução das perdas internas para os processos também são mostradas na figura.

O primeiro nível de análise pode ser resumido pelo diagrama da figura 5.3. Neste nível de análise toda a ênfase é dada ao processo de cálculo dos controles internos. O restante do estado não é avaliado (como alternativa de validação do modelo equivalente) uma vez que os controles calculados respectivamente pelas otimizações de referência e equivalentes são diferentes. Isto faz com que a comparação entre os estados originários das otimizações de referência e equivalente seja prejudicada. Para avaliar a resposta dos modelos equivalentes para uma mesma alteração nos controles internos propõe-se um segundo nível de análise. Neste nível são feitas simulações de implementação dos controles obtidos com o modelo equivalente, no sistema completo e equivalenciado. O segundo nível de análise é discutido a seguir.

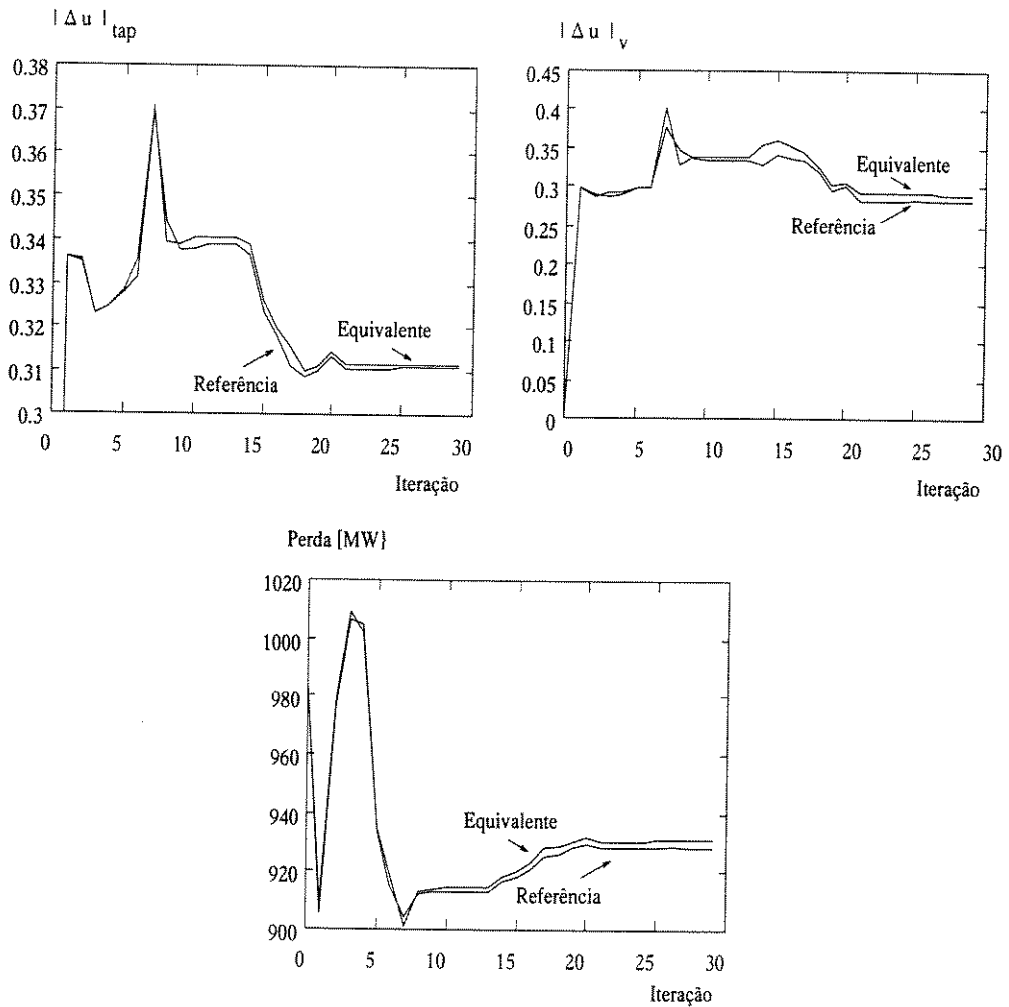


Figura 5.2: Visão do Processo de Otimização

5.2.2 Segundo Nível de Análise - Resposta do Equivalente a Alterações em Controles

O objetivo básico da otimização equivalente on-line é o cálculo dos controles que levam o sistema em estudo a um ponto operacional melhorado do ponto de vista da função objetivo, do perfil de tensão, e ainda do atendimento das restrições do problema de FPO. Isso quer dizer que a implementação dos controles equivalentes no sistema interno tenderá a equilibrar o sistema tendo em vista os fatores citados acima.

O estado interno x^{eq*} obtido da otimização equivalente leva em consideração as restrições nas variáveis controladas e dependentes e ainda as restrições funcionais de geração

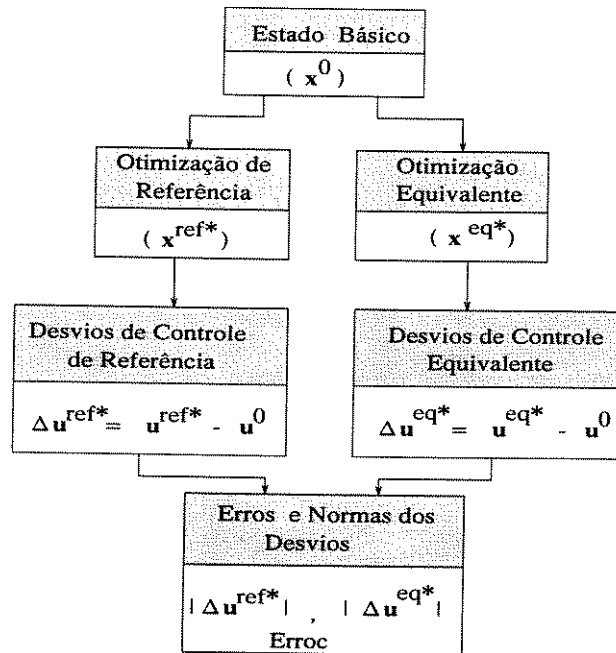


Figura 5.3: Primeiro Nível de Análise - Diagrama

de potência reativa em barras de tensão controladas. Entretanto, os controles equivalentes são calculados levando-se em conta uma rede externa equivalente. Ao se implementarem estes controles no sistema interno, não se garante que as restrições internas (que foram consideradas no problema de FPOeq) sejam ainda mantidas, mesmo aquelas tratadas de forma estrita. Isto quer dizer que o estado x^{eq*} obtido da otimização equivalente pode dar uma falsa noção das restrições no sistema interno. Ou ainda, as restrições internas do problema de FPOeq também são "restrições equivalentes", isto é, há um certo erro de avaliação implícito nestas restrições.

Propõe-se então a adoção de uma etapa de simulação das alterações nos controles equivalentes no sistema completo a fim de que se possa ter uma noção exata do impacto da implementação destes controles no que diz respeito à solução elétrica do sistema, à função objetivo e às restrições. Esta simulação é feita através da execução de um fluxo de carga no qual são consideradas as alterações nos controles internos de tensão e taps de transformadores. Os mesmos controles internos são também simulados representando agora o sistema externo através de um equivalente.

Algumas questões de representatividade podem vir à tona ao avaliarmos os resultados das simulações. Uma primeira questão analisada é a capacidade de resposta dos modelos equivalentes à implementação desses controles no sistema interno. Neste caso,

implementa-se uma determinada estratégia de controle representando a parte externa respectivamente através de:

- sistema completo
- modelo FCOE
- modelo WE

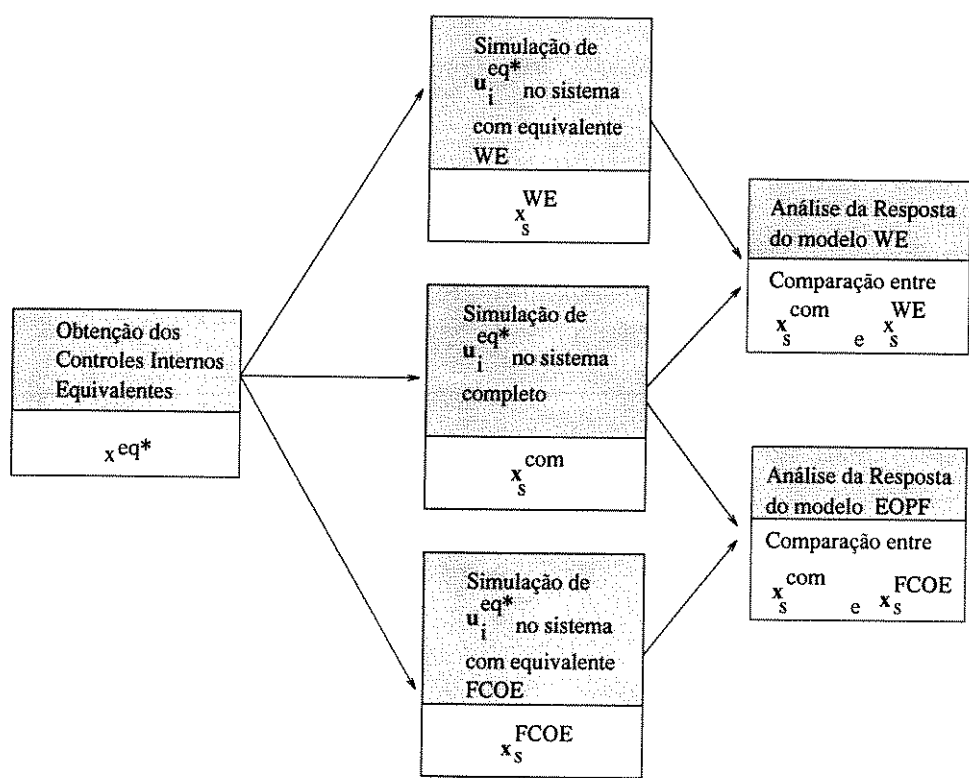


Figura 5.4: Resposta a Alterações em Controles

Esta análise esta mostrada na figura 5.4. Na figura, os estados obtidos da simulação (s) dos controles internos advindos de um processo de otimização equivalente qualquer nos sistemas completo, com equivalente WE e com o modelo FCOE são dados respectivamente por x_s^{com} , x_s^{WE} , x_s^{FCOE} . O modelo de FCOE utilizado nas simulações corresponde exatamente aos modelos externos de fluxo de carga propostos na referência [26], uma vez que nestas simulações apenas o atendimento das restrições de igualdade é satisfeito.

A resposta dos modelos equivalentes tem sido extensamente avaliada para alterações como contingências de linhas, transformadores etc. Na figura 5.4 pretende-se anali-

sar a capacidade de resposta dos modelos equivalentes citados acima com relação à implementação de controles advindos de estudos de otimização equivalentes. As respostas dos modelos equivalentes são, desta forma, comparadas para um mesmo conjunto de controles internos simulados. A referência [32] analisa a capacidade de resposta de modelos equivalentes a alterações percentuais em controles internos. Neste trabalho procura-se utilizar as alterações propostas por um modelo equivalente.

Outro ponto importante que pode ser avaliado a partir da simulação é a capacidade que os modelos equivalentes possuem de representação das perdas e das restrições internas, conforme já mencionado. Isso pode ser avaliado comparando-se, do ponto de vista das perdas e restrições internas, o estado otimizado equivalente x^{eq*} e o estado obtido da simulação dos controles internos u_i^{eq*} . Esta análise é mostrada esquematicamente na figura 5.5.

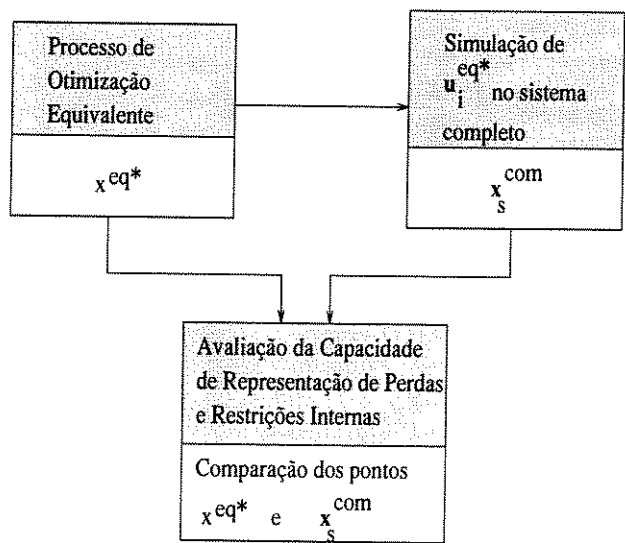


Figura 5.5: Avaliação de Perdas e Restrições Internas

Assim, um equivalente é mais representativo se as perdas e restrições internas calculadas durante o processo de otimização equivalente forem próximas daquelas que se obtém quando os controles calculados por este equivalente são simulados no sistema completo. Pode-se analisar, neste nível, se os controles equivalentes produzidos realmente terão o efeito que se deseja: produção de um estado mais otimizado (do ponto de vista da função objetivo analisada), com um melhor perfil de tensão, e com as restrições funcionais atendidas.

Com os dois níveis de análise propostos, os processo de produção dos controles equivalentes e simulação são avaliados separadamente.

Capítulo 6

Modelos de Otimização Equivalentes

6.1 Introdução

As áreas externas têm sido representadas através de modelos de estimação de estado, de modelos de fluxo de carga não reduzidos e de modelos equivalentes reduzidos, dentre outros conforme se discutiu no capítulo 2.

Nos modelos de estimação de estado [25], o que se faz é incluir algumas barras do sistema externo no processo de estimação de estado do sistema interno. A estimação da parte externa não deve "contaminar" nestes casos, o estado estimado para a parte interna do sistema. Alguns modelos levam em consideração este fato, fazendo-se uma estimação em duas etapas distintas. Outros resolvem a questão dando à parte externa pesos menores, implicando que os dados obtidos na estimação externa tenham um menor grau de confiabilidade no processo de estimação. As medidas externas necessárias ao modelamento do processo de estimação são obtidas através das mais variadas fontes de informação.

Nos modelos externos baseados no fluxo de carga, basicamente as mesmas informações são utilizadas para se compor um modelo de fluxo de carga equivalente onde as barras externas são representadas de forma explícita. Para que o estado estimado da parte interna não seja "contaminado" pelo modelo externo faz-se comumente o ajuste na fronteira (casamento na fronteira). Isto é feito considerando-se as barras de fronteira como barras slack e calculando-se as injeções de potência equivalentes ativa e reativa que mantêm constante o estado interno. A diferença básica entre os modelos de estimação de estado e de fluxo de carga é que o primeiro é capaz de tratar e filtrar erros externos através do processo de estimação produzindo desta forma um modelo mais preciso da parte externa. Os modelos de fluxo de carga em geral não têm a capacidade de tratar informações importantes tais como limites nos fluxos de intercâmbio, etc.

Neste capítulo pretende-se introduzir a representação do sistema externo através de um modelo de otimização, denominado modelo de otimização equivalente. Este modelo, descrito a seguir, utiliza basicamente as mesmas informações externas citadas acima para compor um modelo de otimização da parte externa do sistema. As barras externas são representadas explicitamente como nos modelos de fluxo de carga, entretanto com todos os atributos e restrições de um modelo de otimização, tais como consideração de limites em variáveis e restrições funcionais. Neste modelo, a otimização da parte interna do sistema é processada conjuntamente com a representação do sistema externo.

6.2 Modelo de Otimização Equivalente

A proposta de modelo equivalente discutida nesta seção consiste na construção de um problema de otimização no qual os sistemas externos são representados de forma explícita através de restrições aproximadas. A modelagem externa explícita (já implementada através de modelos de fluxo de carga e estimação) através de um modelo de fluxo de carga ótimo tem as potencialidades e flexibilidades inerentes aos modelos de FPO, quais sejam:

- possibilidade de alteração em controles externos como artifício matemático de representação de reações externas;
- possibilidade de representação aproximada da função objetivo e das restrições externas;
- capacidade de geração de múltiplas soluções aceitáveis através da definição de políticas de penalidade associadas aos controles externos;
- tem a capacidade de representação de intercâmbios.

O modelo da parte externa é definido conjuntamente com o problema de otimização da parte interna, constituindo o Fluxo de Carga Ótimo Equivalente (FCOE). Matematicamente, este problema é definido, particionando-se o problema de otimização do sistema completo de acordo com as variáveis associadas aos sistemas interno (i), fronteira (f) e externo (e), conforme mostrado em 6.1.

$$\text{Partição} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Min}_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e} & \{C_i(\mathbf{x}_i) + C_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) + C_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e)\} \\ \\ s.a. : & \begin{array}{l} \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) = 0 \\ \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) \leq 0 \\ \mathbf{x}_i^{\min} \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^{\max} \\ \\ \mathbf{g}_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = 0 \\ \mathbf{h}_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) \leq 0 \\ \mathbf{x}_f^{\min} \leq \mathbf{x}_f \leq \mathbf{x}_f^{\max} \\ \\ \mathbf{g}_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = 0 \\ \mathbf{h}_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) \leq 0 \\ \mathbf{x}_e^{\min} \leq \mathbf{x}_e \leq \mathbf{x}_e^{\max} \end{array} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

Para resolver o problema particionado 6.1 é necessário se fazer uma série de hipóteses com relação a determinadas variáveis externas e dados externos não disponíveis em tempo real. Tais aproximações são basicamente aquelas adotadas para os modelos de estimação ou modelos de fluxo de carga. Os dados externos necessários à formulação do modelo equivalente externo que está contido no modelo particionado em 6.1 são basicamente a estimativa de:

- Dados de carga ativa e reativa nas barras de carga;
- Dados de geração de potência ativa nas unidades geradoras;
- Perfil de tensão nas barras de tensão controlada;
- Estado de interligação do sistema (topologia);
- Valores de taps fixos de transformadores;
- Limites em variáveis;
- Limites em restrições funcionais.

Estas são basicamente as informações necessárias a se compor um modelo de otimização que represente a parte externa. Adotando-se algum critério de definição destes dados de forma aproximada, pode-se formular o problema FCOE conforme dado em 6.2.

$$\text{FCOE} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Min}_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e} & \{C_i(\mathbf{x}_i) + C_f(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) + C_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e)\} \\ \\ \text{s.a. :} & \begin{array}{l} \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_i^{\min} \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^{\max} \\ \\ \mathbf{g}_f^{eq}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_f^{eq}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_f^{\min} \leq \mathbf{x}_f \leq \mathbf{x}_f^{\max} \\ \\ \mathbf{g}_e^{eq}(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_e^{eq}(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_e^{\min} \leq \mathbf{x}_e \leq \mathbf{x}_e^{\max} \end{array} \end{array} \right. \quad (6.2)$$

O problema é bastante similar à solução do problema particionado, com exceção de que no problema FCOE as equações de atendimento de potência ativa e reativa na fronteira ($\mathbf{g}_f^{eq}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0}$) são as injeções equivalentes calculadas através do processo de casamento. Como nos demais modelos não reduzidos, as restrições equivalentes da parte externa possuem erros associados as necessárias aproximações. A atualização dos modelos equivalentes é tradicionalmente feita através da equação ($\mathbf{g}_f^{eq}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0}$), não alterando a informação que é bastante confiável da estimação da parte interna.

Resumindo, o FCOE é um problema de otimização particionado em termos de suas variáveis e restrições e atualizado constantemente (com a mesma frequência do estimador de estado) através do processo de casamento na fronteira. As restrições do modelo externo são portanto atendidas conjuntamente com a solução da otimização da parte interna, através da resolução do FCOE.

Alguns dos pontos citados acima, tais como o perfil de tensão das barras externas por exemplo, podem ser usados apenas como valores iniciais, uma vez que o processo de solução do FCOE pode permitir que estes valores sejam alterados durante o processo de otimização. As estratégias que definem as aproximações nos dados citados acima a serem usadas em um modelo de otimização são basicamente aquelas já discutidas no capítulo 2 para os modelos baseados em fluxo de carga e estimação. Estas estratégias não constituem o objetivo deste trabalho. Nos estudos apresentados neste trabalho, as aproximações nas variáveis externas (cargas/gerações, tensões controladas e os taps de transformadores) são simuladas.

Os modelos clássicos baseados em fluxo de carga estudados no capítulo 2 estão englobados na modelagem do FCOE. Na verdade, estes modelos se constituem em restrições de igualdade do problema de otimização FCOE, dados pelas equações de fluxo de carga $\mathbf{g}_f^{eq}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0}$ e $\mathbf{g}_e(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_e) = \mathbf{0}$. A avaliação destes modelos é feita indiretamente neste trabalho uma vez que as restrições de igualdades estão sempre satisfeitas na solução do FCOE.

O problema apresentado em 6.2 é o mais genérico possível, sendo que toda a sorte de restrições em variáveis funcionais, e todo tipo de funções objetivo, podem ser consideradas. Logicamente, não são exploradas neste trabalho todas as potencialidades do modelo proposto, que é potencialmente aplicável para qualquer estudo de otimização. O problema de minimização das perdas foi o escolhido em função de suas exigências sobre o processo de otimização reativa.

Definido o modelo equivalente, é possível considerar ainda muitas formas de utilização deste modelo usando-se o conceito de áreas de amortecimento. As áreas de amortecimento que compreendem partes com representação explícita e partes reduzidas serão definidas a seguir através de modelos híbridos descritos nas seções seguintes. Serão enfocados também algumas formas de junção entre os modelos equivalentes entre si e a junção destes ao subsistema interno/fronteira.

6.3 Áreas de Amortecimento Interfaceando o FCOE com Modelos Reduzidos

A utilização das áreas de amortecimento ("buffer zones") em estudos de Análise de Segurança Estática, foi uma alternativa que possibilitou o aproveitamento das informações das barras externas mais próximas da fronteira e que possuíam um impacto de reação maior no sistema interno. Tais informações só podem ser levadas em consideração no caso de se representar, tais barras, de forma explícita.

A representação híbrida (constituída por tais barras externas sendo representadas de forma explícita e as demais representadas por um modelo equivalente reduzido) tem sido uma boa opção, nos estudos de análise de segurança, tornando viável a aplicação de modelos reduzidos, na representação de algumas partes do sistema externo. Esta alternativa tem sido utilizada nos casos em que tais modelos não apresentam bons resultados.

O conceito de áreas de amortecimento é rediscutido nesta seção com enfoque nos estudos de otimização. O modelo das áreas externas representadas de forma explícita (áreas de amortecimento) é constituído por um conjunto de restrições do mesmo modelo

de otimização FCOE proposto na seção anterior. O modelo híbrido é redefinido, sendo constituído portanto de duas partes: a parte explícita (conjunto de restrições), e a parte reduzida (modelo equivalente WE).

Com a escolha de algumas barras externas para compor a área de amortecimento, a fronteira com o modelo reduzido passa a ser móvel, ou seja, a cada conjunto de barras externas escolhidas para compor a área de amortecimento, tem-se uma nova fronteira virtual conectada ao modelo reduzido atual. O casamento do modelo equivalente na fronteira precisa ser adaptado a existência desta fronteira virtual móvel e da fronteira efetiva e limítrofe do sistema observável. Para contemplar tal fato são propostas nesta seção três formas básicas de se casar o modelo híbrido ao ponto operacional interno.

6.4 Fronteiras e Áreas de Amortecimento

São definidas aqui a fronteira efetiva limítrofe do sistema interno e a fronteira virtual móvel que conecta a área de amortecimento com o modelo reduzido. A fim de tornar operacional o uso dos termos relativos às fronteiras, serão exemplificados estes conceitos básicos. Seja um sistema-exemplo, dividido de forma geográfica conforme descrito na seção, explicitando as barras do sistema externo e fronteira conforme mostrado na figura 6.1.

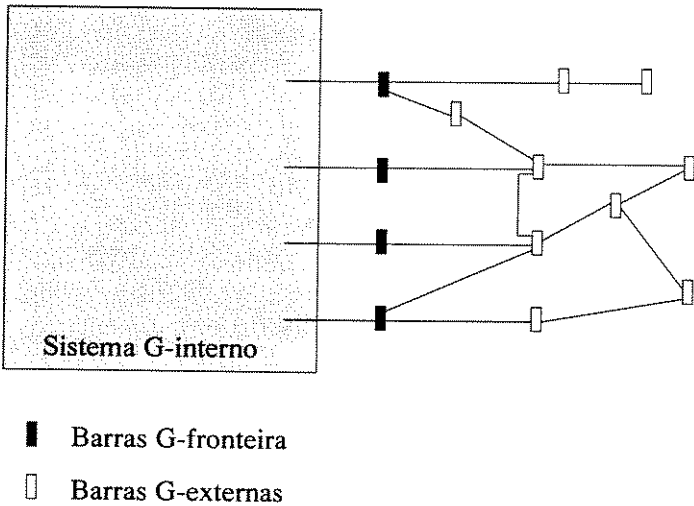


Figura 6.1: Divisão de um Sistema-Exemplo

Se neste sistema-exemplo escolhermos de forma arbitrária algumas barras externas para compor a área de amortecimento teríamos a configuração mostrada na figura 6.2

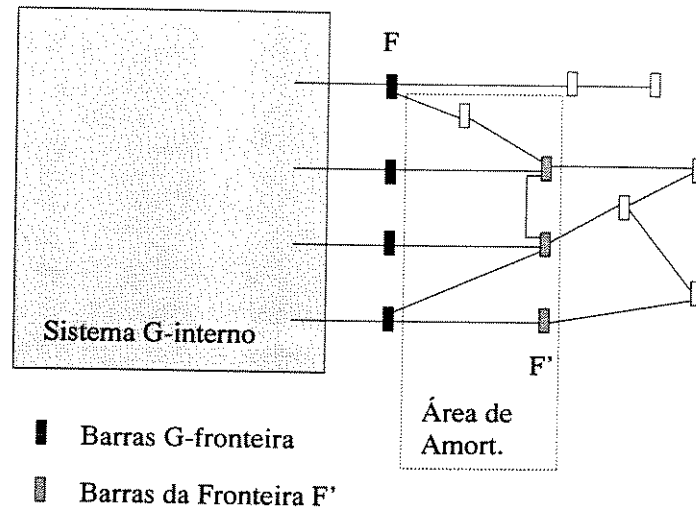


Figura 6.2: Fronteira Móvel

As barras externas escolhidas para compor a área de amortecimento serão representadas explicitamente no modelo otimização equivalente. As demais barras externas serão representadas através do modelo equivalente reduzido WE. Algumas definições de fronteira são necessárias:

- A fronteira geográfica F (efetiva) é definida pelas barras G-fronteira;
- A fronteira F' é definida pelas barras da área de amortecimento que se interligam às barras externas que serão eliminadas;
- A fronteira F'' (virtual) é definida por todas as barras que se conectam às barras do sistema externo que serão eliminadas

No sistema-exemplo a fronteira virtual móvel F'' é composta pela própria fronteira F' e uma das barras da fronteira geográfica F conforme mostrado na figura 6.2. Nota-se ainda que de acordo com a área de amortecimento escolhida, as fronteiras F' e F'' podem se mover no sistema externo de acordo com as conveniências de modelagem para uma dada aplicação. Note-se que a fronteira F' entre a área de amortecimento e o restante do sistema externo nem sempre é suficiente para se acoplar o modelo equivalente reduzido. Este deve sempre ser acoplado à fronteira F'' pois só esta contempla todas as barras que constituem a área de resposta do modelo.

Uma situação limite seria não utilizar uma área de amortecimento. Neste caso a fronteira F'' coincide com a própria fronteira F . O modelo equivalente neste caso seria

acoplado portanto diretamente na fronteira geográfica F do sistema. Uma outra situação limite seria escolher todas as barras G-externas para compor a área de amortecimento. Nesta situação não haveria nenhum sistema a ser reduzido e, portanto, não haveria o modelo equivalente reduzido. Neste caso, a modelagem do sistema externo seria dada pelo modelo de otimização equivalente FCOE conforme proposto na seção anterior.

Entre estas duas situações limites é possível compor soluções híbridas com modelos FCOE e WE de acordo com a escolha de áreas de amortecimento. Nestes casos faz-se necessário definir como será processado o casamento na fronteira, e antes disso, quais e como as fronteiras definidas anteriormente devem ser usadas neste processo, que é de extrema importância para manter os níveis de resposta dos modelos externos. São propostas e analisadas a seguir 3 formas básicas de se fazer o casamento nas fronteiras usando-se os modelos equivalentes híbridos. Na primeira proposta, o modelo híbrido é ajustado ao sistema interno/fronteira observável, em uma única etapa utilizando-se a fronteira geográfica F. Em uma segunda opção, o casamento se dá em duas etapas: uma em que a área de amortecimento é ajustada com o subsistema interno/fronteira (na fronteira F) e uma outra em que se casa o modelo WE ao subsistema interno/fronteira/área de amortecimento (na fronteira virtual F"). Em uma terceira opção, o casamento também é feito em duas etapas, porém de forma "desacoplada", conforme será definido no item 6.7.

6.5 Casamento na Fronteira Geográfica F do Sistema Interno

Uma primeira hipótese de casamento na fronteira é ajustar o modelo híbrido ao subsistema interno/fronteira na fronteira geográfica F. Tal casamento é feito de forma clássica: as barras de fronteira são setadas como barras "slack" executa-se um fluxo de carga envolvendo o sistema formado pelos subsistemas interno/fronteira/área de amortecimento/modelo WE. Assim são calculadas na fronteira F as injeções de potência equivalentes. O modelo híbrido resultante, com injeções equivalentes, é mostrado na figura 6.3 para o sistema-exemplo anterior.

Note que as barras da área de amortecimento são representadas de forma explícita e as barras externas foram reduzidas e estão representadas através de admitâncias fictícias pelo modelo WE. Conforme discutido no capítulo 2, o modelo WE possui duas formas básicas de representação: com PV's fictícias ou com shunts fictícios. Se o casamento for feito da forma aqui descrita não é possível utilizar-se o modelo WE com PVs fictícias, pois neste caso seria necessário conhecer as tensões básicas de todas as barras com as quais se conecta o modelo WE. Seria portanto necessário conhecerem-se as tensões de todas as barras da fronteira F". Como a estimação de estado é feita geralmente apenas para a parte

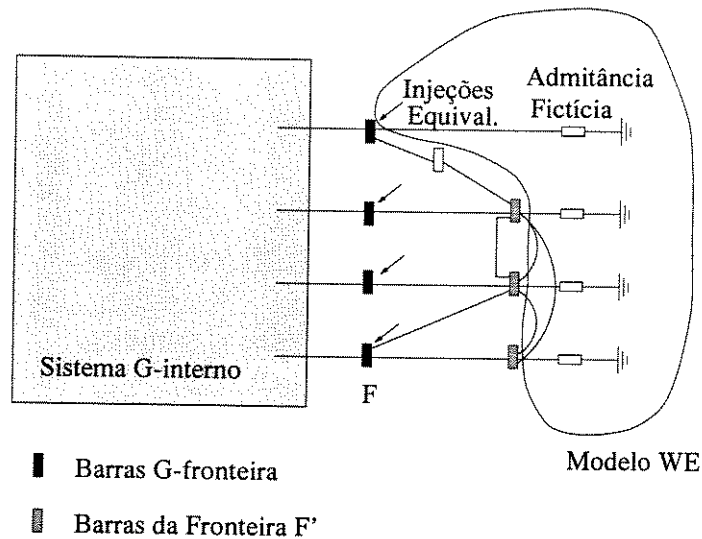


Figura 6.3: Casamento em Uma Etapa

interna do sistema, só se tem o estado atual destas barras, não se conhecendo portanto o estado atual das barras de amortecimento.

Com a utilização de estimadores de estado que estimem também o estado da área de amortecimento, pode-se redefinir o problema da seguinte forma: a área observável passa então a ser dada pelo sistema E-interno constituído pelo sistema G-interno, pela fronteira F e pela área de amortecimento. Neste caso, como se tem estimado todo o estado atual do sistema E-interno, pode-se acoplar o modelo reduzido WE à fronteira F" utilizando qualquer umas de suas variações de modelagem. Note-se que é condição necessária que toda a área de amortecimento seja estimada.

6.6 Casamento na Fronteira em Duas Etapas

Uma outra forma de se realizar o casamento do modelo híbrido consiste em ajustar, em uma primeira etapa, a área de amortecimento ao conjunto formado pelos sistemas interno/fronteira. Monta-se, para tal, o subsistema formado pelos sistemas interno/fronteira/área de amortecimento. Fixando-se as tensões das barras da fronteira F' (tratadas como "slack") calculam-se, através de uma rotina de fluxo de carga, injeções equivalentes na fronteira F. Após a execução de tal rotina todo o estado do subsistema interno/fronteira/área de amortecimento é conhecido.

As injeções equivalentes inseridas na fronteira F, conforme mostrado na figura

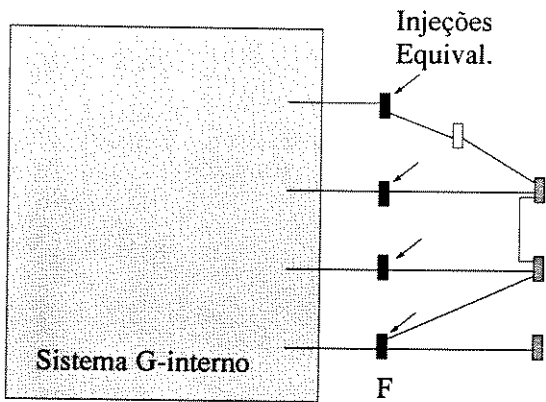


Figura 6.4: Casamento em Duas Etapas-Primeira Etapa

6.4, para o sistema-exemplo, acoplam a área de amortecimento ao estado atual do sistema interno/fronteira. Para inserirmos o modelo WE na fronteira F” é necessário calcular as injeções equivalentes que acoplam este modelo ao estado básico calculado na primeira etapa. Monta-se, para tanto, o sistema formado pelos subsistemas interno/fronteira/área de amortecimento/modelo WE conforme mostrado na figura 6.4. As barras da fronteira F” são consideradas como "slack" e as injeções equivalentes na fronteira F” são calculadas através de um rotina de fluxo de carga.

Note-se que algumas barras da fronteira F, que também pertencem à fronteira F”, têm suas injeções de fronteira recalculadas. As injeções equivalentes na fronteira F calculadas na primeira etapa também são levadas em consideração nesta segunda etapa. O modelo WE pode ser utilizado em qualquer uma de suas variações, visto que após a fase 1 o estado completo do subsistema interno/fronteira/área de amortecimento é conhecido. O modelo resultante do casamento em duas etapas é ilustrada na figura 6.5. É importante salientar que nenhuma das etapas de cálculo altera o estado operacional interno.

6.7 Casamento Independente: Ativos (série)/Reativos (shunt)

Nesta outra forma de casamento na fronteira usa-se um conceito de desacoplamento que é intrínscio ao modelo WE. Conforme mostrado no capítulo 2, o modelo WE parte do presuposto de desacoplamento entre as respostas ativas e reativas para calcular os seus parâmetros de rede que são os ramos série equivalentes, calculados na parte ativa e as admitâncias shunt fictícias, calculadas na parte reativa.

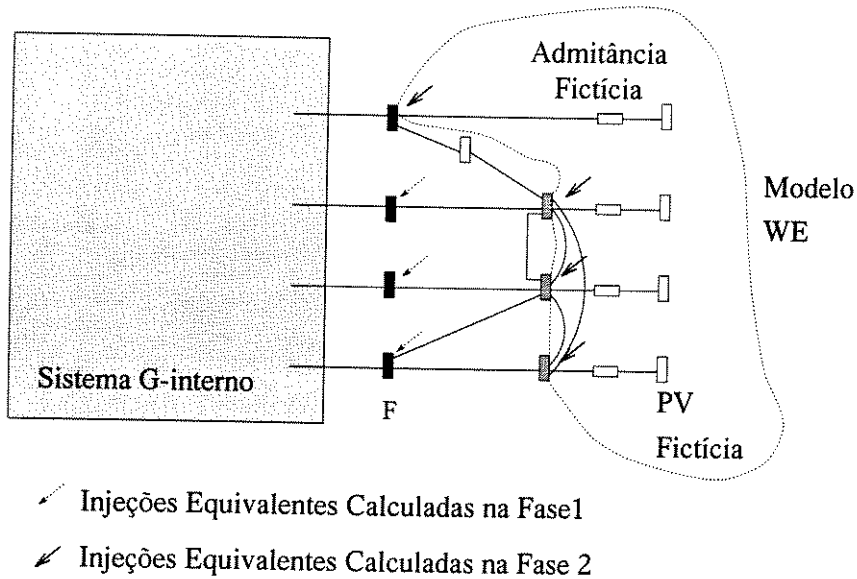


Figura 6.5: Casamento em Duas Etapa-Segunda Etapa

Nesta proposta de casamento, o subsistema área de amortecimento/ramos série equivalentes do modelo WE é casado na fronteira geográfica F, conforme mostrado na figura 6.6 em uma primeira etapa. Isto é feito fixando-se as tensões nas barras da fronteira F e calculando-se injeções de potência (ativa e reativa) equivalentes nesta fronteira.

Ao final da segunda etapa, como mostrado na figura 6.7, as admitâncias fictícias são inseridas na fronteira F" e é feito um segundo casamento. Neste caso são calculadas somente injeções equivalentes reativas na fronteira, necessárias a ajustar o subsistema utilizado no casamento da fase 1 (já com as injeções equivalentes introduzidas neste subsistema) com as admitâncias fictícias introduzidas. O mesmo processo de se considerar a nova fronteira como slack, calculando as injeções reativas equivalentes é utilizado.

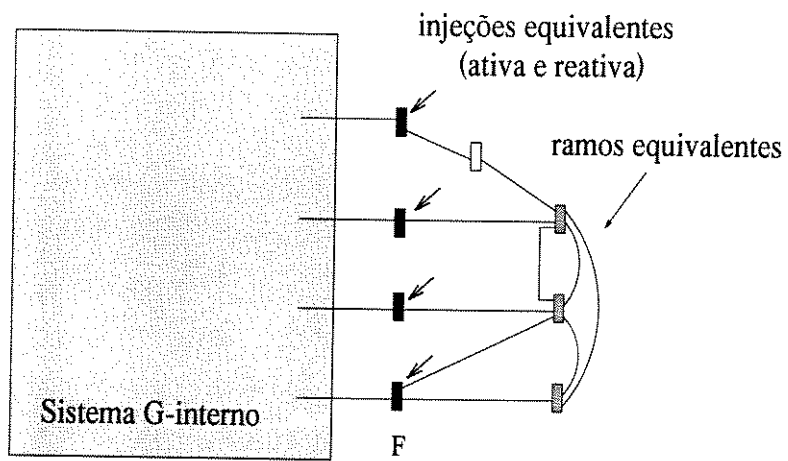
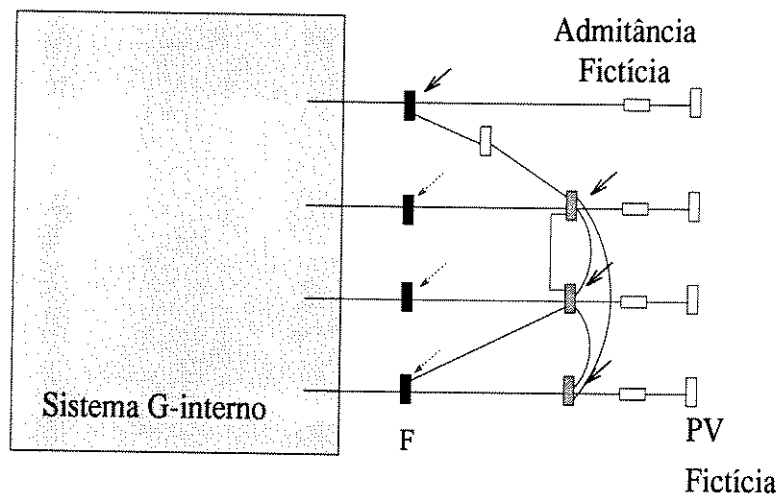


Figura 6.6: Casamento Independente - Primeira Etapa



- ↗ Injeções Equivalentes Calculadas na Fase 1
- ↘ Injeções Reativas Equivalentes Calculadas na Fase 2

Figura 6.7: Casamento Independente - Segunda Etapa

Capítulo 7

Modelamento Externo: Dados, Restrições e Variação em Controles Fictícios

Neste capítulo uma rotina de FCOE é utilizada como ferramenta de análise das respostas associadas a erros ou imprecisões na modelagem do sistema externo. O objetivo é avaliar as imprecisões na representação de variáveis externas que causam problemas significativos na modelagem das áreas externas durante os estudos de otimização.

É também sintetizado o resultado de experiências com simulação computacional que permitiram a consolidação da melhor maneira de representação dos controles e restrições externas. Dessa forma, é apresentada uma versão do modelo FCOE que mostra os melhores resultados na representação da reação reativa externa.

Como consequência, foi possível uma generalização de referências e de diferentes enfoques para o FCOE. O uso de cada um destes enfoques vai depender do nível de informações disponíveis nos centros de controle a respeito do sistema externo.

Concluindo o capítulo, são apresentados alguns resultados de estudos realizados utilizando-se modelos híbridos, FCOE & WE, onde se destaca a influência do uso de áreas de amortecimento.

7.1 FCOE na Análise de Respostas Externas

As rotinas de Fluxo de Carga Ótimo Equivalente podem ser utilizadas como ferramentas de análise de respostas dos sistemas externos a alterações de quaisquer natureza. Na verdade, uma rotina de FCOE pode ser utilizada com a representação exata da parte externa. Basta, para isso, que todos os erros associados a esta área (que são simulados na

parte externa com a finalidade de avaliar o FCOE) não sejam considerados. Neste caso, a resposta do modelo equivalente será idêntica àquela fornecida pela otimização de referência. Se, entretanto, for simulado um determinado erro em uma variável externa importante para a resposta externa, pode-se saber qual a relevância da representação aproximada de tal variável na resposta do equivalente durante estudos de otimização.

O modelo FCOE pode, portanto, ser utilizado com uma ferramenta de análise de resposta de equivalentes, separando efeitos de respostas associados a determinadas variáveis da parte externa. Existe uma analogia direta entre os modelos de fluxo de carga equivalentes [16] (usados na avaliação das respostas externas às alterações de contingência de linhas, transformadores, etc) e os modelos de fluxo de carga ótimo equivalente (usados na avaliação das respostas externas durante estudos de otimização).

Destacam-se algumas variáveis, cujos erros de estimação ou previsão, podem alterar diretamente a resposta da parte externa do sistema, quando de um processo de otimização equivalente. O efeito de resposta associado a cada uma destas imprecisões em variáveis será analisado a seguir, fornecendo um quadro das reações dos sistemas externos de uma forma geral. É conveniente ressaltar que neste ítem não se pretende avaliar o desempenho de modelos de representação da parte externa, tais como o modelo WE ou o FCOE. O que se pretende aqui é simular erros de estimação ou previsão de variáveis externas avaliando o seu grau de influência na capacidade de reação de equivalentes externos.

As aproximações nas seguintes variáveis externas foram identificadas como geradoras de erro no cálculo dos controles internos. Os efeitos de representação aproximada de cada uma destas variáveis externas serão analisados a seguir. Estas variáveis são:

- tensões em barras controladas;
- taps de transformadores com controle;
- nível carga/geração;

7.1.1 Efeito de Erros na Representação de Tensões Controladas Externas

Neste estudo pretende-se avaliar a sensibilidade dos sistemas internos, no que diz respeito ao cálculo de seus controles, quando se consideram imprecisões na previsão dos controles externos de tensão. O estudo realizado consiste em simular erros nos controles externos de tensão de 1%, 2%, 3%, 4% e 5% das tensões com relação ao caso básico, na preparação do FCOE. A seguir executam-se processos de otimização que serão comparados à otimização de referência. Para este estudo considerou-se a otimização interna como sendo a referência. Para manter a coerência de comparação, nos estudos de otimização onde

foram simulados os erros nos controles externos de tensão, consideraram-se apenas as perdas internas e variações nos controles internos (o que corresponderia à otimização equivalente interna).

O comportamento dos controles e das perdas internas durante os processos de otimização equivalentes e de referência (Ref) são mostrados na figura 7.1. Percebe-se que o cálculo dos controles internos (incluindo-se ambos, os taps e os controles de tensão) é relativamente afetado por imprecisões na previsão das tensões controladas externas. Este fato ressalta uma dificuldade adicional de representação dos processos de otimização equivalente, visto que no ambiente da operação as previsões ou estimação dos controles externos nem sempre estão atualizadas.

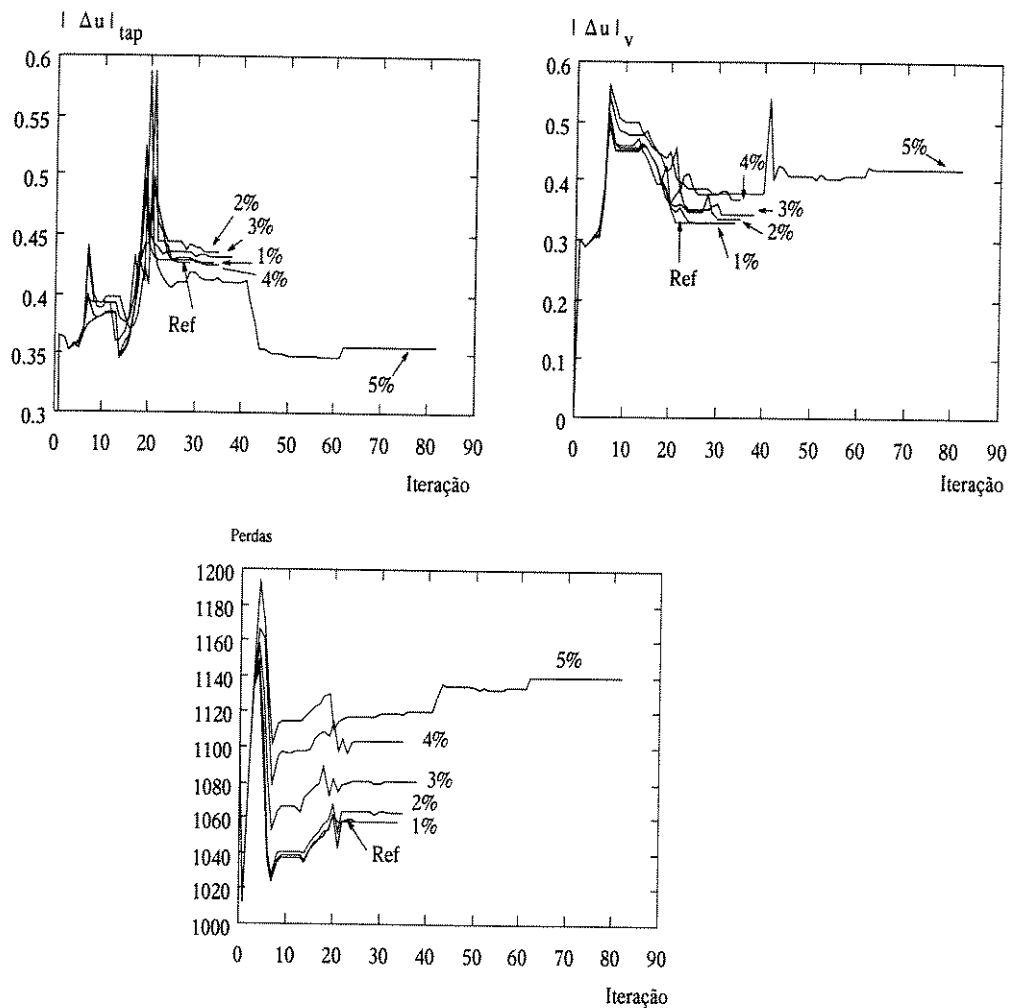


Figura 7.1: Influência dos Controles de Tensão Externos

7.1.2 Efeitos de Erros na Representação de Taps Externos

Neste ítem pretende-se avaliar o grau de influência que as imprecisões associadas aos taps de transformadores externos possuem no cálculo dos controles internos. Para tal, todos os dados externos foram considerados plenamente conhecidos e simularam-se erros nos taps de 1%, 2%, 3%, 4 %, 5%, e ainda considerando todos os taps externos em 1 pu. Os resultados estão mostrados na figura 7.2.

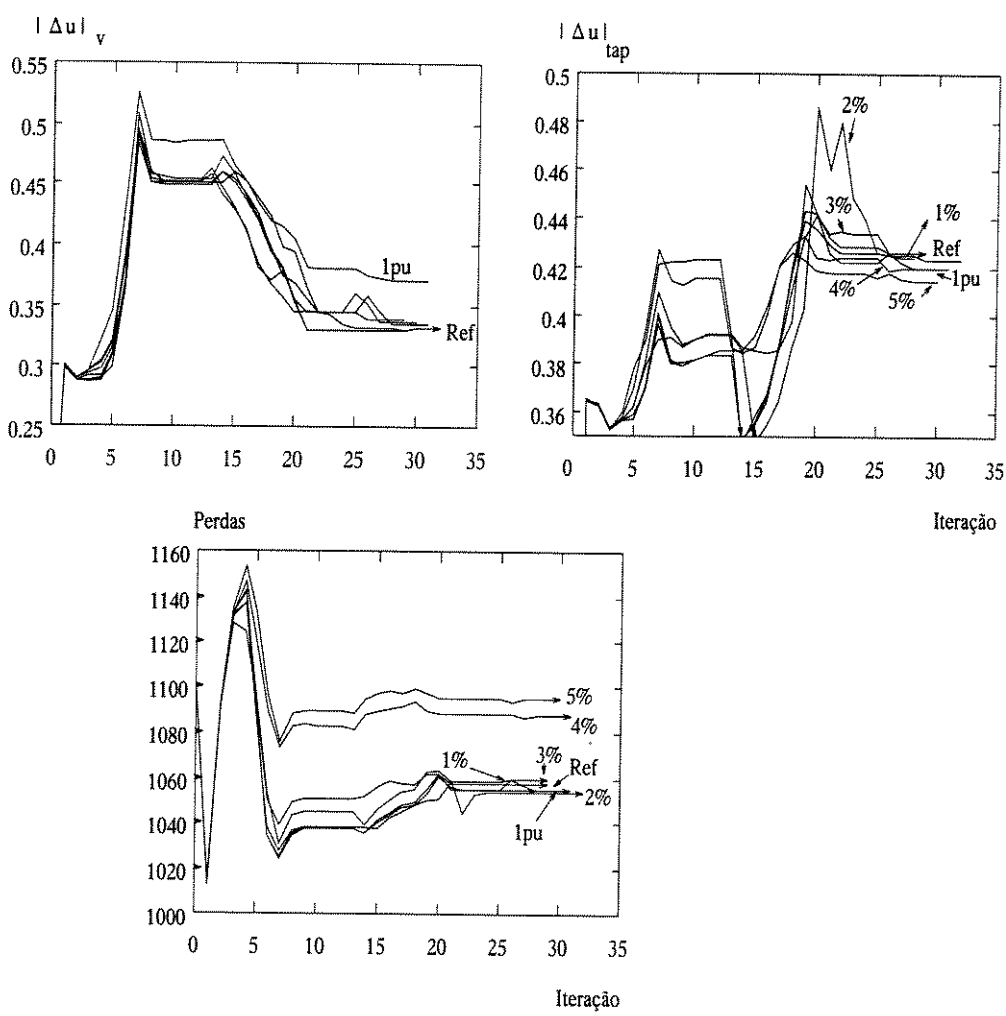


Figura 7.2: Influência dos Taps de Transformadores Externos

Não há, na literatura, estudos quantificando o grau de influência dos taps de transformadores em estudos de Análise de Segurança Estática. Nos resultados apresentados na figura 7.2 mostra-se que, em estudos de otimização, o grau de dependência em relação

aos taps é menor que aquele apresentado para as tensões. Os controles calculados com erros nos taps são relativamente próximos daqueles obtidos com as informações corretas. Nos casos em que todos os taps são setados em 1 pu, esses erros são mais significativos. Entretanto, pode-se dispor de informações sobre valores mais usuais (nominais) de determinados transformadores. Além disso, os taps não têm uma faixa de variação tão grande. Uma variação correspondente a 5% significa uma variação às vezes superior aos limites operacionais máximos ou mínimos nos taps.

7.1.3 Efeito de Erros na Previsão dos Níveis Externos de Carga/Geração

Pretende-se avaliar aqui a precisão do cálculo dos controles quando ocorrem erros de avaliação das cargas/gerações externas nos estudos de otimização equivalentes. Serão analisados estudos de otimização em que as informações associadas às cargas/gerações externas são consideradas respectivamente como 0%, 40%, 50%, 60%, 80% dos valores corretos e comparados a otimização de referência (100% de informação). Os resultados estão mostrados na figura 7.3. Todos os processos analisados foram considerados como problemas de otimização interno.

O cálculo dos controles por processos de otimização equivalentes são significativamente afetados por erros associados à previsão das cargas/gerações externas. No caso da Análise de Segurança Estática, a resposta do Fluxo de Carga Equivalente não é significativamente afetada por imprecisões na representação da cargas/gerações [16], até mesmo nos casos onde se considera 0% das informações sobre as mesmas.

7.2 Restrições e Controles Fictícios Externos

O quadro geral montado anteriormente, mostra que o nível de complexidade de resposta de modelos de otimização equivalentes é bem maior do que aquele exigido por estudos de análise de segurança. Nos estudos de análise de segurança, pode-se falar em resposta de um modelo equivalente a determinadas alterações, tais como contingência de linha transformadores, etc. Em estudos de otimização as alterações são iterativas e topologicamente distribuídas, isto é, a cada iteração tem-se determinadas alterações nas variáveis. A cada iteração do processo de otimização é exigido do equivalente uma certa resposta incremental que fatalmente apresenta um nível de erro em relação a otimização de referência. Os erros de resposta do modelo de otimização equivalente são, portanto, cumulativos durante o processo otimização. Nesse sentido se diz, neste trabalho, que o equivalente deve ser capaz de "produzir" ações de controle internas e não simplesmente

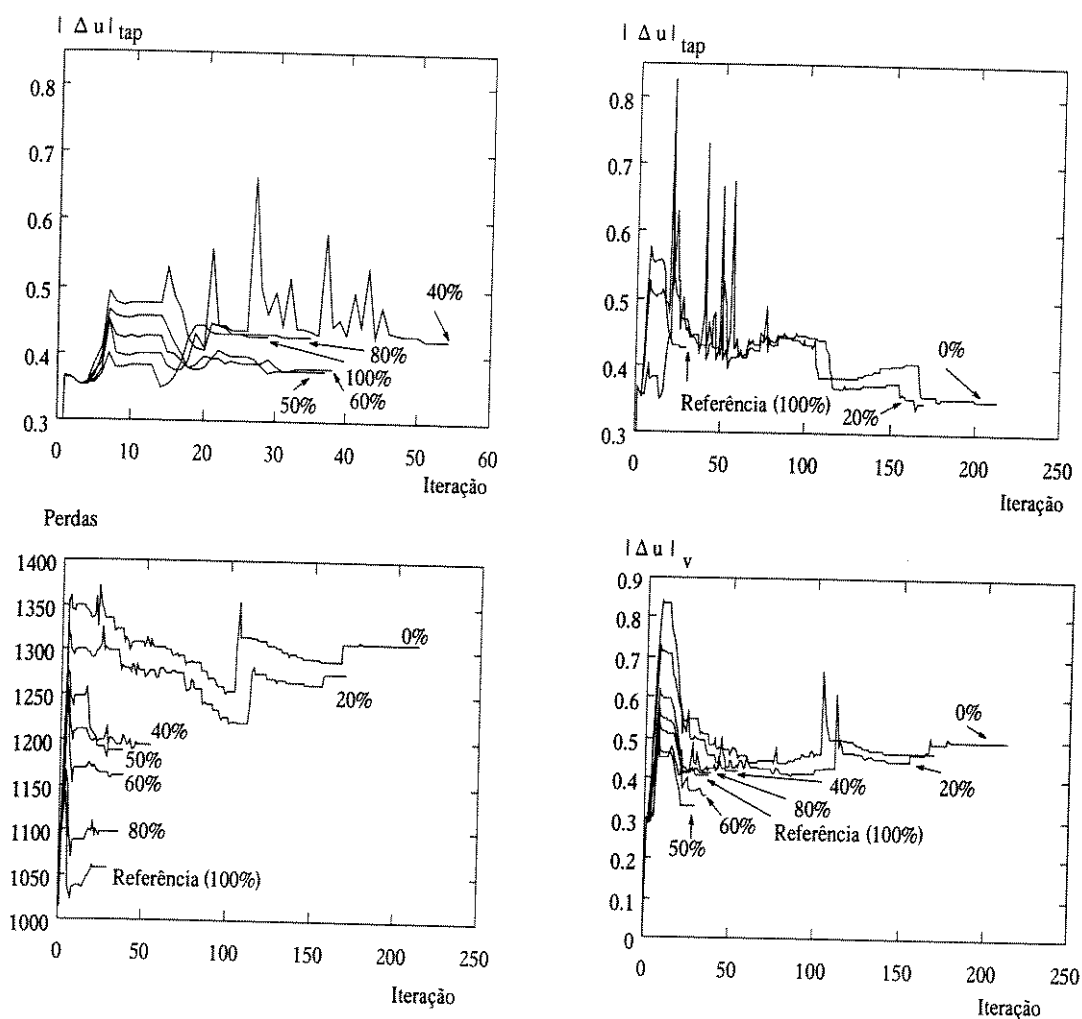


Figura 7.3: Influência das Cargas/Gerações Externas

fornecer uma reação a determinada alteração isolada.

Durante o processo de produção das ações de controle, tenta-se encontrar os controles equivalentes que minimizam determinado critério de otimização. Neste item, é analisada a influência da representação das restrições externas na produção destas ações de controle. Um equivalente irrestrito pode produzir ações de controle (e invariavelmente produzirá) que não levam em consideração os limites em variáveis e em restrições funcionais externas que, geralmente na prática, não são violados (uma vez que o sistema externo estará monitorando tais limites).

No estudo utilizado aqui para mostrar a influência que as restrições externas pos-

suem no modelo FCOE, considera-se o exemplo a seguir. Dois casos envolvendo otimizações com este modelo foram considerados. No primeiro, a otimização equivalente (FCOE1) utiliza apenas a variação dos controles internos. No segundo (FCOE2), admitiu-se uma certa mobilidade sobre os controles externos (controles fictícios) o que permite uma avaliação da introdução das restrições externas (restrições em variáveis e potência reativas). Esta mobilidade combinada com o controle das restrições reativas externas propiciou melhores resultados de resposta reativa sobre os controles ótimos internos, conforme se mostra na figura 7.4, onde estão representados os resultados dos dois casos. Percebe-se deste exemplo que um modelo equivalente irrestrito (sem mobilidade das variáveis de controle externas e sem monitoramento das restrições reativas externas) causa maiores erros na obtenção dos controles internos. Esse resultado tem se repetido em intensos testes computacionais com redes exemplo do IEEE (30, 57 e 118 barras) e com o sistema Sul-Sudeste brasileiro. Baseado nesta experiência é que se conclue aqui que é imprescindível a consideração das restrições externas e da mobilidade dos controles externos (Controles Fictícios) no processo de cálculo dos controles internos equivalentes.

Este exemplo abre também a possibilidade de se definir uma outra referência de otimização, mostrada na figura com a sigla Ref2. Nesta referência, considera-se:

- Otimização das Perdas Internas;
- Uso dos controles globais (internos e fictícios);
- Retrições globais.

Os controles externos são utilizados não com o intuito de minimizar perdas, mas para manter as restrições equivalentes externas nos seus limites. Esta referência de otimização é mais realista, pois supõe que o sistema externo está também sendo supervisionado de forma a manter os seus limites físicos e operacionais.

O atendimento das restrições equivalentes externas através de controles fictícios externos é um elemento importante para a melhoria da resposta dos equivalentes externos, conforme visto. O que se fará a seguir é refazer os estudos anteriores considerando este enfoque. Tais estudos são discutidos a seguir.

O estudo onde se analisa a influência das cargas e gerações externas já mostrado na figura 7.3 foi refeito considerando-se o a mobilidade dos controles externos e o atendimento das restrições equivalentes externas nos processos de otimização equivalente e de referência. Os resultados estão mostrados na figura 7.5 onde se mantiveram as mesmas escalas, de forma que as figuras 7.3 e 7.5 possam ser comparadas. Mostra-se que todos os

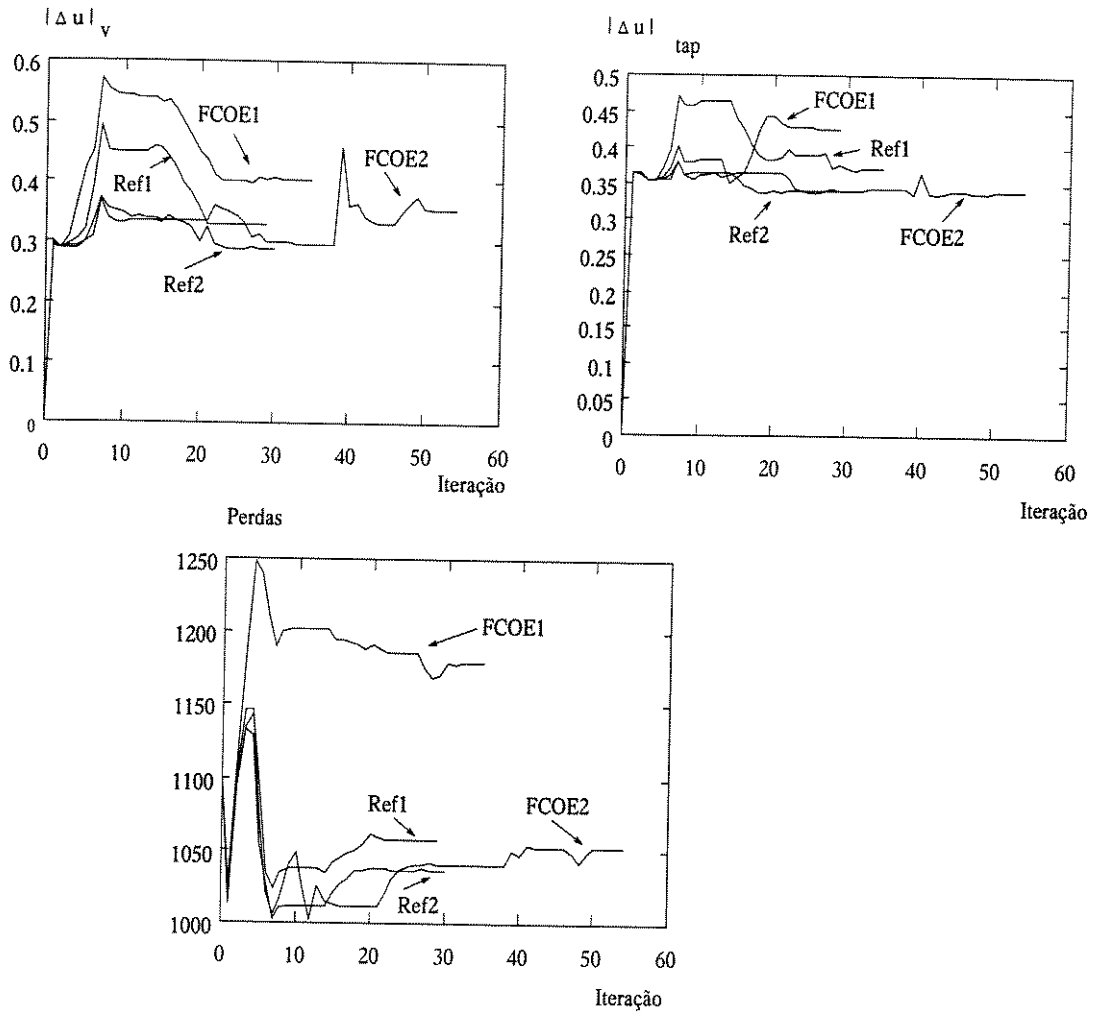


Figura 7.4: Controles Fictícios e Restrições Externas

erros nos controles são diminuídos. Desta forma é possível diminuir bastante a influência dos erros das cargas e gerações externas na precisão de cálculo dos controles internos.

O estudo onde se analisa a influência das tensões controladas foi feito considerando-se a mobilidade dos controles fictícios externos e o atendimento das restrições equivalentes externas. Note que neste caso as tensões iniciais (com erros de 1%, 2%, 3%, 4% e 5%) são alteradas pelo processo de otimização equivalente com o FCOE. Os resultados estão mostrados na figura 7.6. Comparando-se as figuras 7.1 e 7.6 mostra-se que também neste caso todos os erros nos controles são diminuídos. Assim sendo, a introdução dos controles fictícios externos e o monitoramento das restrições equivalentes externas também diminuem bastante a influência dos erros das tensões externas na precisão de cálculo dos controles

internos.

Alguns processos não ficam claros nas figuras, pois às vezes eles se sobrepõem, dificultando a visualização. Nesses casos, a resposta do modelo é excelente. O uso dos gráficos permite uma idéia qualitativa das respostas dos modelos. Os gráficos permitem uma visualização dos erros de resposta dos modelos equivalentes e, por isso, têm sido utilizados nestas análises.

Finalmente, o estudo da influência dos taps de transformadores foi refeito de forma análoga aos dois últimos estudos. Comparando-se as figuras 7.2 e 7.7, mostra-se que o efeito da inclusão das restrições externas no modelo não teve um efeito tão significativo quanto nos estudos anteriores, não prejudicando entretanto a resposta.

7.3 Generalizando os Processos de Otimização de Referência e Equivalente

Pode-se concluir dos três últimos estudos que a introdução dos controles fictícios externos, a fim de introduzir as restrições externas nos processos de otimização equivalente, leva a uma melhoria bastante significativa no cálculo dos controles internos. Pode-se, a partir dos resultados obtidos com as diferentes referências, generalizar as possibilidades de estudos de otimização de referência através de 4 tipos básicos. Estas referências são definidas em função da utilização dos controles Internos ou Globais e ainda em função da utilização das perdas Internas ou Globais. Para facilitar a identificação de cada uma destas referências adotar-se-á a seguinte denominação:

- II - denomina o estudo de otimização de referência em que são usados respectivamente as perdas Internas e controles Internos. *Corresponde ao problema formulado em 5.2.*
- IG - denomina o estudo de otimização de referência em que são usados respectivamente as perdas Internas e controles Globais.
- GI - denomina o estudo de otimização de referência em que são usados respectivamente as perdas Globais e controles Internos.
- GG - denomina o estudo de otimização de referência em que são usados respectivamente as perdas globais e controles globais. *Corresponde ao problema formulado em 5.4.*

É importante salientar que, na obtenção dos resultados, sempre que os controles em uma determinada região (interna ou externa) são flexibilizados, as restrições em variáveis

e funções também são limitadas em tal região. Tentar enforçar os limites em variáveis ou funções em regiões onde os controles não estão móveis seria formular de forma incorreta o problema de otimização. O estudo correspondente ao problema GI não tem sentido prático uma vez que controles internos são utilizados para minimizar perdas externas ao seu sistema.

Se analisarmos as condições de um centro de controle podemos perceber que a melhor referência de comparação em estudos "online" é dada pela solução IG. No dia-a-dia da operação do sistema elétrico é bastante razoável que os centros de controles vizinhos estejam operando, se não de forma mais otimizada, pelo menos mantendo seus limites físicos e operacionais. A referência II que considera as restrições apenas da parte interna, modela o sistema externo de forma irrestrita sendo portanto menos "real" do que a referência IG. Concluindo, a melhor referência seria considerar as perdas internas, uma vez que não se tem interesse em minimizar critérios de sistemas vizinhos, mas levando em conta as limites globais do sistema, já que se sabe que isso é uma prática no sistema como um todo.

Analogamente aos processos de otimização de referência, pode-se generalizar os processos de otimização equivalente com o modelo FCOE, da seguinte forma:

- $FCOE_{II}$ estudo de otimização equivalente utilizando o modelo FCOE em que os controles internos são utilizados para calcular as perdas internas.
- $FCOE_{IG}$ estudo de otimização equivalente utilizando o modelo FCOE em que os controles globais são utilizados para calcular as perdas internas.
- $FCOE_{GG}$ estudo de otimização equivalente utilizando o modelo FCOE em que os controles globais são utilizados para calcular as perdas globais.

7.4 Estudos com Áreas de Amortecimento

Nesta seção são avaliados alguns estudos envolvendo modelos híbridos em que partes do sistema externo são representadas de forma explícita (áreas de amortecimento) e parte são equivalenciadas com o modelo reduzido WE. No estudo aqui apresentado são realizados processos de otimização para os quais se consideram algumas áreas de amortecimento diferentes, de forma a se poder avaliar qual a influência da área de amortecimento na obtenção dos controles internos. Os resultados de cada processo de otimização são comparados à referência. São considerados os seguintes casos:

- 1 - A primeira vizinhança da fronteira é escolhida para compor a área de amortecimento

- 2 - A segunda vizinhança da fronteira é incorporada à área de amortecimento
- 3 - A terceira vizinhança da fronteira é incorporada à área de amortecimento
- 4 - A quarta vizinhança da fronteira é incorporada à área de amortecimento

Conforme descrito anteriormente e avaliado na seção anterior, estes modelos devem ser casados ao sistema interno, o que resulta na possibilidade de pelo menos 3 formas de casamento. O forma utilizada nesta seção é aquela descrita em 6.6 em que o casamento é feito em duas etapas.

Os processos de otimização com áreas de amortecimento e o processo de otimização de referência são mostrados na figura 7.8. Neste caso, percebe-se que à medida que novas barras são incorporadas à área de amortecimento mais a resposta se aproxima da resposta do sistema completo.

É conveniente destacar que este resultado, apesar de didático, não tem sido um resultado típico para os estudos realizados. Em alguns casos, a introdução das áreas de amortecimento tem até um efeito de deterioração dos resultados obtidos. Há que se considerar uma série de fatores tais como a forma de casamento utilizada, a possibilidade de utilização dos controles da área de amortecimento ou não, a imposição das restrições ou não, a mobilidades dos controles, etc.

Esta é uma discussão já levantada nos estudos de Análise de Segurança, onde se propõe um aumento na área de amortecimento de forma a melhorar o desempenho dos equivalentes reduzidos. No artigo [21] Tinney propõe a utilização de áreas de amortecimento maiores como forma de precaução de erros causados pelo modelo WE em estudos de otimização.

Os resultados obtidos com vários casos analisados confirmam que a utilização de áreas de amortecimento cada vez mais amplas não garante, necessariamente, melhores resultados nos estudos de otimização. Na referência [13] é proposta uma forma de determinar as barras que devem compor as áreas de amortecimento baseada na sensibilidade do sistema interno em relação a tais barras. Outros resultados de otimizações envolvendo modelos equivalentes com áreas de amortecimento são dados no capítulo 8.

7.5 Conclusões

Nesta seção foram apresentados alguns conceitos básicos que definem o problema de otimização equivalente proposto neste trabalho. Procurou-se identificar os elementos externos que produzem erros na resposta externa durante estudos de otimização quando

comparados a um processo de otimização de referência. Os elementos externos estudados foram: as tensões controladas, as cargas/gerações, os taps de transformadores.

Percebe-se que o cálculo dos controles internos é significativamente afetado por erros associados à representação de variáveis externas. Entretanto, quando se adotam os controles fictícios externos e monitoram-se as restrições equivalentes externas, tal efeito é bastante minimizado. Este é um resultado importante, já que no ambiente da operação geralmente não se dispõe de informações dos controles externos.

Com relação aos taps externos, constatou-se que estes também produzem erros no cálculo os controles internos. A inclusão das restrições externas não trouxe melhorias consideráveis no cálculo dos controles neste caso.

As cargas/gerações externas também afetam os processos de otimização equivalente. Tais resultados não reproduzem as conclusões obtidas da Análise de Segurança, onde se mostra que as cargas/gerações externas não têm um efeito significativo na resposta da parte externa. O efeito das cargas/gerações é bastante minorado com a introdução da variação dos controles fictícios e imposição das restrições equivalentes externas no modelo de otimização.

A ferramenta de otimização equivalente FCOE se mostrou bastante eficaz na identificação e diagnóstico dos problemas de resposta associados à parte externa do sistema.

A ampliação das áreas de amortecimento não são linearmente acompanhados de melhorias nas respostas de modelos equivalentes durante estudos de otimização. É importante avaliar as respostas dos modelos equivalentes utilizando áreas de amortecimento, levando-se sempre em consideração as formas de casamento, os controles, as restrições, etc.

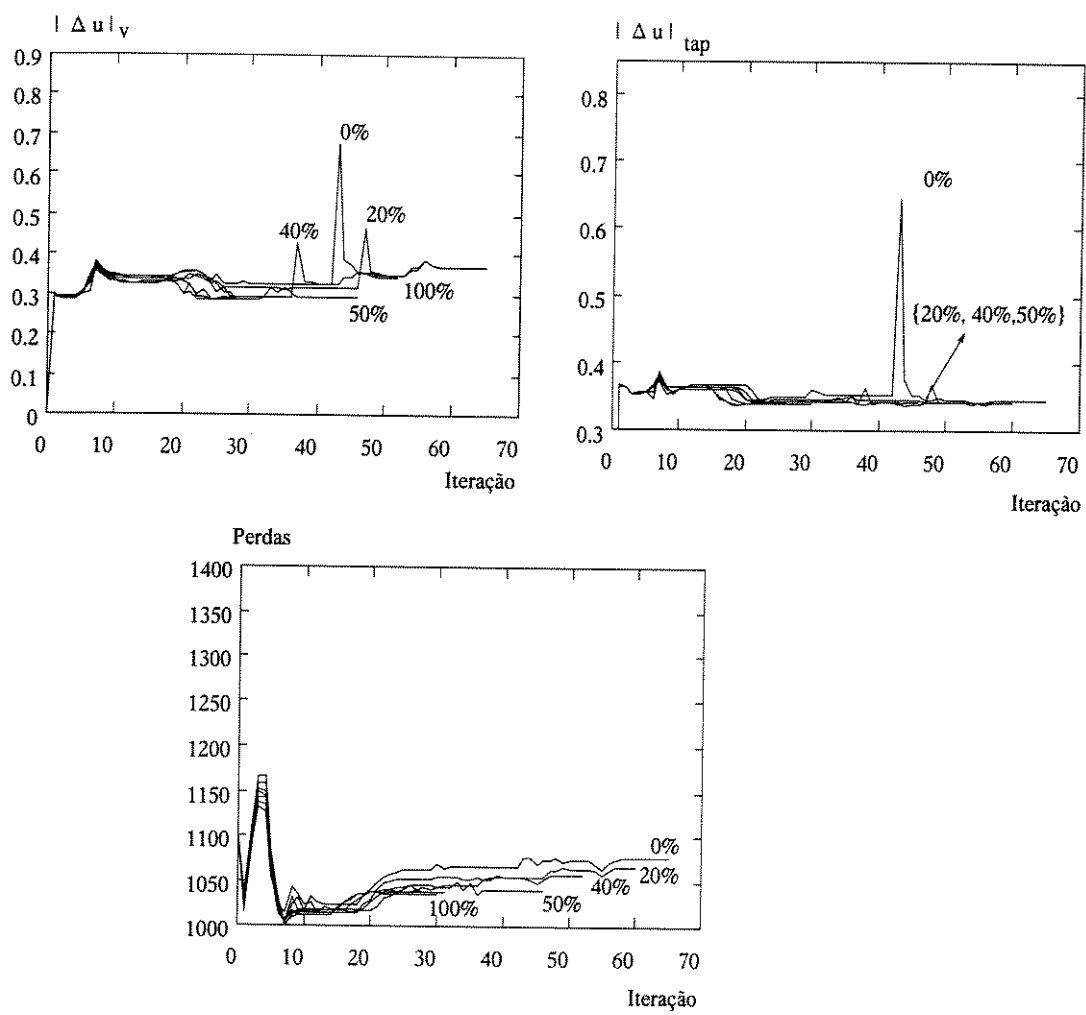


Figura 7.5: Influência das Cargas e Gerações Externas com Restrições Externas Consideradas

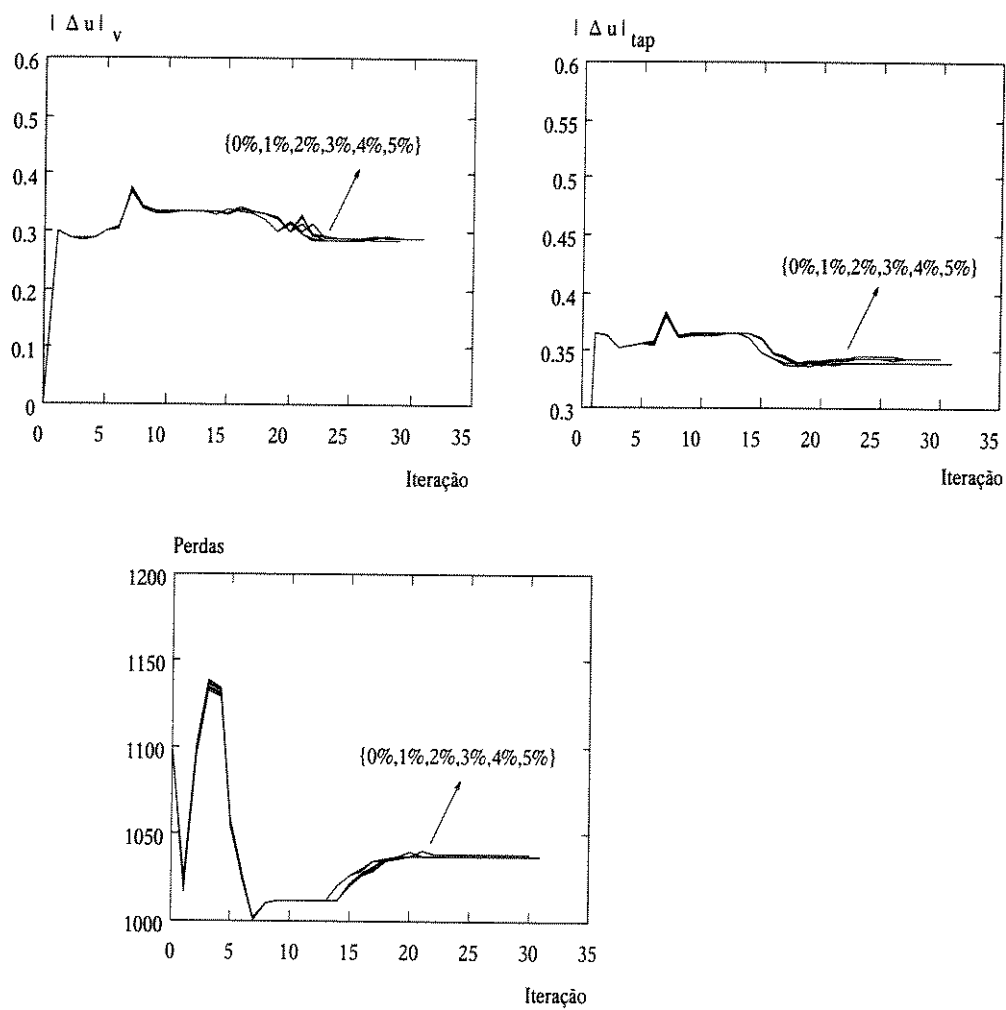


Figura 7.6: Influência dos Controles de Tensão Externos com Restrições Externas Consideradas

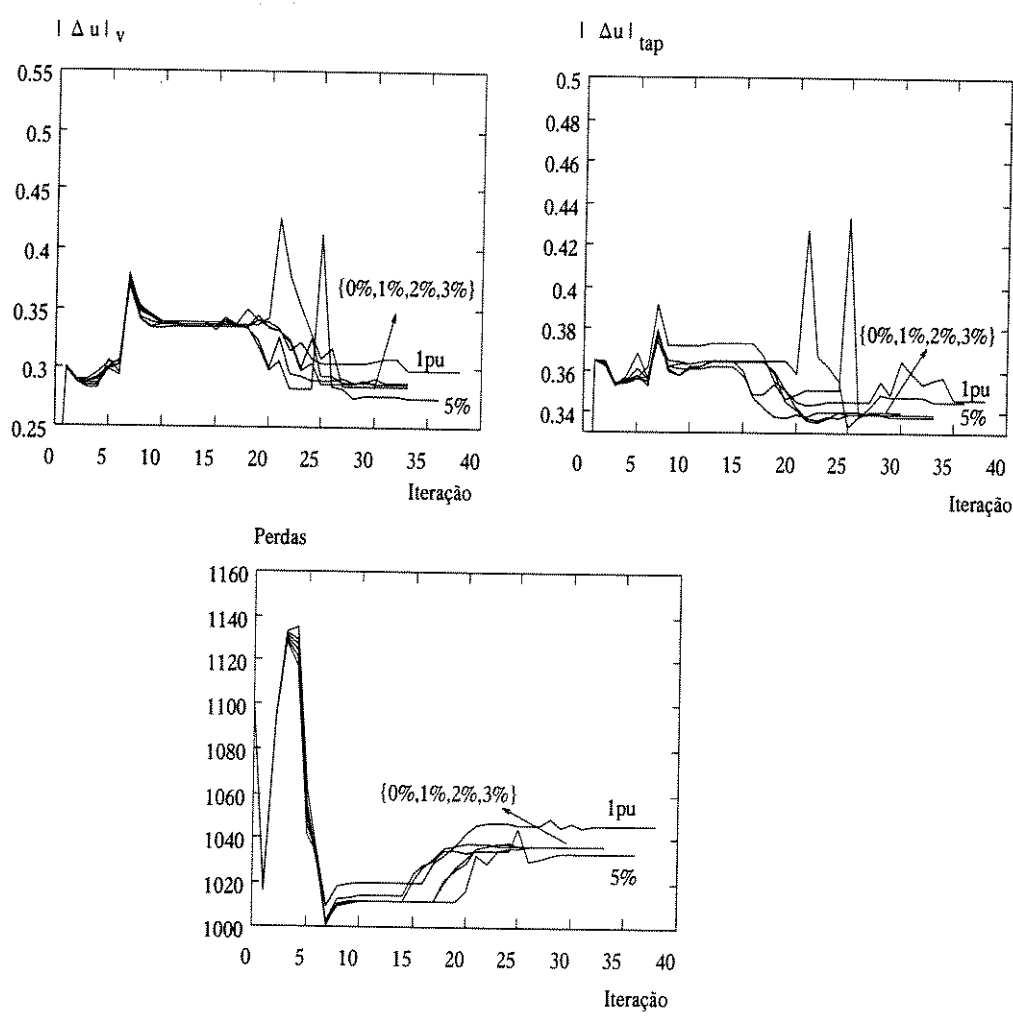


Figura 7.7: Influência dos Taps com Restrições Externas Consideradas

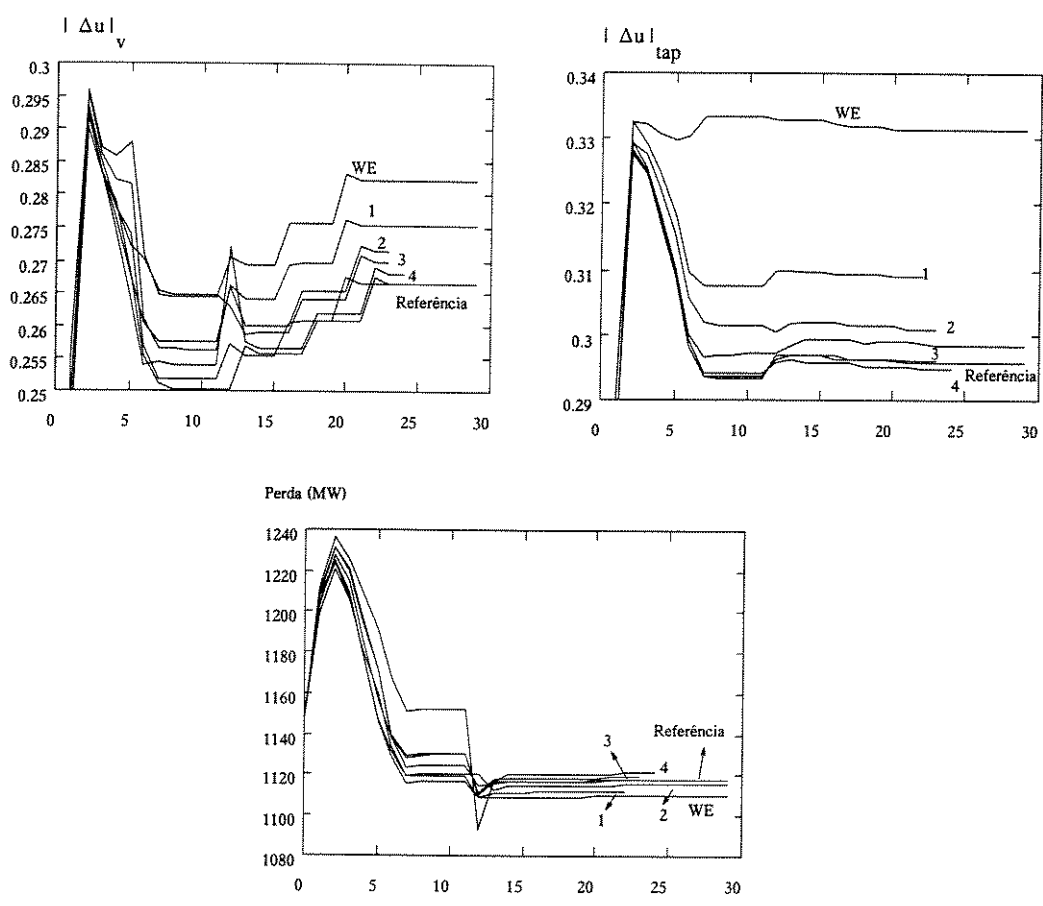


Figura 7.8: Influência das Áreas de Amortecimento

Capítulo 8

Resultados e Comparações

8.1 Introdução

A utilização de modelos de representação da parte externa, não foi devidamente estudada nos casos em que são realizados estudos de otimização "on-line" no sistema. Nesta seção serão realizados estudos, conforme a metodologia de análise proposta, de forma a avaliar o desempenho dos modelos WE, FCOE e híbridos durante estudos de otimização reativa.

Primeiramente, serão analisados os processos de otimização de referência. O objetivo básico, neste caso, é mostrar que existe uma diferença considerável no cálculo dos controles internos, dependendo da referência de otimização que se estiver considerando. Em seguida, os processos de otimização equivalentes serão analisados e comparados as suas respectivas referências, em dois níveis de análise, conforme abordagem proposta. Seguem-se estudos envolvendo os modelos híbridos. A performance de todos os modelos é comparada nos resultados finais.

Todos os resultados apresentados aqui foram obtidos com estudos envolvendo o sistema Sul-Sudeste brasileiro (810 barras). Outros sistemas também têm sido estudados, tais como os sistemas IEEE 118, 57 e 30 barras. Os resultados destes sistemas não são apresentados aqui em virtude de a metodologia proposta exigir um certo volume de texto para explorar todos os detalhes do problema de equivalenciamento. Avaliar outros sistemas tomaria muito espaço e não acrescentaria conceitualmente ao presente texto. Da experiência com o sistema Sul-Sudeste e os demais sistemas, pode-se dizer que, de uma forma geral, as conclusões básicas apresentadas neste trabalho são típicas, isto é, têm se repetido para os vários sistemas estudados. O sistema Sul-Sudeste brasileiro utilizado, suas características básicas, e a divisão em subáreas componentes dos sistemas interno, fronteira e externo são

apresentados no apêndice c.

8.2 Estudos de Otimização no Sistema Completo

Nesta seção são realizados alguns estudos levando-se em consideração as informações do sistema completo. Não se discute portanto a questão do equivalenciamento em si, mas o problema do FPO, e suas nuances, no que tange à fixação de referências de comparação. Esta é portanto uma situação hipotética, já que no ambiente da operação não estão disponíveis as informações "on-line" do sistema externo. A hipótese de que as informações externas são conhecidas é feita simplesmente no sentido de se estabelecerem referências. Assume-se, portanto, que o estado externo é dado pelos valores apresentados nos arquivos de dados do sistema e realizam-se estudos de otimização, no sistema completo, aqui denominados otimizações de referência.

No capítulo anterior, foram resumidos alguns processos de otimização de referência (seção 7.2). Serão utilizadas três referências básicas de otimização para obtenção dos resultados. Estas referências são definidas em função da utilização dos controles Internos ou Globais e em função da utilização das perdas Internas ou Globais. Para facilitar a identificação de cada uma destas referências adotar-se-á a seguinte denominação:

- II - denomina o estudo de otimização de referência em que são usados respectivamente as perdas Internas e controles Internos.
- IG - denomina o estudo de otimização de referência em que são usados respectivamente as perdas Internas e controles Globais.
- GG - denomina o estudo de otimização de referência em que são usados respectivamente as perdas globais e controles globais.

8.2.1 Solução Básica Inicial - SB0

No ambiente da operação, os estudos de otimização "on-line" devem ser realizados tendo-se como condição inicial o estado fornecido pelo estimador. A partir deste estado, são calculados os controles que otimizam o sistema com relação a um dado critério. Este estado inicial do sistema interno é dado neste trabalho através de uma rotina de Fluxo de Carga. As características principais do ponto inicial básico utilizado para o sistema Sul-Sudeste brasileiro estão mostradas na tabela 8.1.

Na tabela são mostradas algumas tensões em barras controladas típicas (V) e alguns valores de taps (t) de transformadores típicos. As barras típicas do sistema são

as barras controladas que, nos processos de otimização de referência (avaliados a seguir), apresentam os valores mais elevados para as tensões. Os ramos de transformadores típicos são aqueles que, nos processos de otimização de referência, apresentam valores de taps mais elevados dentre os ramos de transformadores com regulação nos taps. Teremos assim:

- TAV: barras com valores Tipicamente Altos para as tensões;
- TBV: barras com valores Tipicamente Baixos para as tensões;
- TAT: ramos de transformadores com valores Tipicamente Altos para os taps;
- TAB: ramos de transformadores com valores Tipicamente Baixos para os taps.

Nas barras típicas são incluídos os valores de geração de potência reativa Q_g , seus limites mínimos $Q_g^{\min}$ e máximos $Q_g^{\max}$. Limites mínimos $t^{\min}$ e máximos $t^{\max}$ dos taps também são fornecidos.

Tabela 8.1: Solução Básica Inicial - SB0

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL					
TAV	1430	1.06000	-330.07	-100.	190.
	1250	1.04500	-391.6	-500.	650.
TBV	1438	1.01000	-39.71	-100.	89.
	1437	1.03100	138.42	-120.	120.
TAM	1434	1.00000	-4.78	-30.	30.
	1242	1.05000	85.92	-100.	100.
ÁREA EXTERNA					
TAV	720	1.03500	-147.4	-100.	130.
	707	1.03000	135.56	-300.	300.
TBV	152	1.00000	44.25	-9.5	19.
	399	1.02000	29.75	-1.	1.
	Ramo	t (pu)	t ^{min} (pu)	t ^{max} (pu)	
ÁREA OBSERVÁVEL					
TAT	1463 - 1462	1.050000	0.94	1.06	
	1478 - 1247	0.995000	0.94	1.06	
TBT	1456 - 1457	0.950000	0.94	1.06	
	1452 - 1453	0.950000	0.94	1.06	
ÁREA EXTERNA					
TAT	1176 - 1175	0.980000	0.94	1.06	
	803 - 800	1.029000	0.94	1.06	
TBT	1176 - 1177	0.980000	0.94	1.06	
	62 - 63	0.900000	0.94	1.06	

* Limite de Geração Reativa Violado

Todos os modelos equivalentes avaliados aqui são ajustados, através do processo de casamento na fronteira, ao estado interno dado pela solução SB0.

8.2.2 Otimização de Referência - II

Neste estudo de otimização as perdas Internas são otimizadas utilizando-se os controles Internos. Esta é uma situação prática típica de um empresa que está otimizando o seu sistema e sabe, de antemão, que os sistemas vizinhos não atuam em seu sistema de forma a otimizá-lo.

Esta solução, obtida portanto através de uma rotina do FPO aplicada ao sistema completo, é mostrada na tabela 8.2. Preservou-se a mesma nomenclatura utilizada na tabela 8.1 anterior. Valores críticos das restrições ativas em potência reativa podem ser detectados através dos valores de multiplicadores de Lagrange tipicamente altos associados a tais restrições: TAM (valores Tipicamente Altos para os Multiplicadores de lagrange). Os limites nas restrições de potência reativa da parte externa não são levados em consideração uma vez que os controles externos estão fixos neste caso.

Na solução final do processo as condições de otimalidade de Kuhn-Tucker de primeira ordem são plenamente satisfeitas. A precisão adotada neste estudo de otimização (assim como em todos os demais estudos de otimização realizados neste trabalho), foi de 10^{-5} para o módulo das componentes do vetor gradiente da função lagrangeana na parte interna do sistema.

8.2.3 Otimização de Referência - GG

Neste estudo considerou-se o caso em que os controles externos são liberados para minimizar as perdas do sistema externo. Esta é uma situação prática na qual um sistema supervisorio centralizado coordena as partes internas e externas do sistema. Tal sistema supervisorio atuará nas partes interna e externa de forma a minimizar as perdas do sistema como um todo. Os valores típicos estão mostrados na tabela 8.3. Neste caso os limites nas restrições de potência reativa foram respeitados também no sistema externo. A mesma política de penalidades adotada para a parte interna foi considerada no sistema externo.

8.2.4 Otimização de Referência - IG

Neste estudo são utilizados os controles globais do sistema, entretanto apenas as perdas externas são minimizadas. Os controles externos são liberados simplesmente com o intuito de factibilizar o ponto operacional externo com relação às variáveis e gerações de potência reativa. A função objetivo perdas externas não é considerada. A liberação dos controles é um artifício que tem se mostrado eficiente, conforme já discutido no capítulo 7.

Tabela 8.2: Otimização de Referência - II

	Barra	V (pu)	Q_g (Mvar)	$Q_g^{\min}$ (Mvar)	$Q_g^{\max}$ (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.083141	98.56	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.115025	-166.82	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.870973	-99.3	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.990759	-118.3	-120.	120.	0.0000000
TAM	1104	0.875814	0.	0.	0.	-0.115856
	1263	1.050037	120.	-120.	120.	0.0113021
ÁREA EXTERNA						
TAV	720	1.035000	-192.65	-100.	130.	*
	707	1.030000	130.89	-300.	300.	
TBV	152	1.000000	44.17	-9.5	19.	*
	399	1.020000	27.78	-1.	1.	*
	Ramo	t (pu)	$t^{\min}$ (pu)	$t^{\max}$ (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.0972541	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.0337990	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.8868918	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.9693336	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	1176 - 1175	0.9800000	0.94	1.06		
	803 - 800	1.0290000	0.94	1.06		
TBT	1176 - 1177	0.9800000	0.94	1.06		
	62 - 63	0.9000000	0.94	1.06		

* Limites de Reativos Violados

Os valores típicos deste processo de otimização estão mostrados na tabela 8.4. Os limites nas restrições de potência reativa e nas variáveis são portanto respeitados nas partes interna e externa do sistema. A mesma política de penalidades adotada para a parte interna foi considerada no sistema externo.

Dadas as tabelas que sintetizam os processos de otimização de referência, cabe ainda uma comparação entre as perdas e controles internos calculados durante cada processo. Esta comparação é dada na figura 8.1, onde se mostram as perdas internas e a evolução da norma dos desvios de controle nas tensões Δu_V e taps de transformadores Δu_{tap} durante os processos de otimização II, IG e GG.

Os gráficos apresentados nesta figura trazem uma informação importante para os estudos de otimização "on-line" nos centros de controle: *o cálculo dos controles internos é significativamente afetado pela participação (ou não) dos controles externos nos processos de otimização*. Portanto, para estudos de otimização os modelos equivalentes têm que ser capazes de representar, intrinsecamente aos seus modelos, a influência dos controles externos. Em modelos reduzidos, onde não se dispõe de meios para se lidar com controles externos esta representação não é possível.

Tabela 8.3: Otimização de Referência - GG

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.063056	189.	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060362	-497.	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.917966	-99.	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.940962	119.	-120.	120.	0.0000000
TAM	1434	1.056437	30.	-30.	30.	0.0473460
	1242	1.024566	100.	-100.	100.	0.0050963
ÁREA EXTERNA						
TAV	720	1.060362	-98.	-100.	130.	0.0000000
	707	1.060279	297.	-300.	300.	0.0000000
TBV	152	0.961258	19.	-9.5	19.	0.0472882
	399	0.986021	1.	-1.	1.	0.0353475
	Ramo	t (pu)	min t (pu)	max t (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 1462	1.0638143	0.94	1.06		
	1478 1247	1.0385464	0.94	1.06		
TBT	1456 1457	0.9330344	0.94	1.06		
	1452 1453	0.9397129	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	1176 1175	1.0610958	0.94	1.06		
	803 800	1.0499442	0.94	1.06		
TBT	1176 1177	0.9391426	0.94	1.06		
	62 63	0.9497621	0.94	1.06		

8.3 Estudos de Otimização Equivalente

Os processos de otimização de referência estudados anteriormente serão utilizadas para validar e comparar os modelos WE, FCOE e híbridos. Nesta seção serão estudados os processos de otimização equivalente que consistem em otimizar um sistema tendo a parte externa sendo representada por um modelo equivalente qualquer.

Os processos de otimização equivalente estudados nesta seção levam em consideração o estado fornecido pela solução básica inicial SB0. Isto é feito através do ajuste de cada um dos modelos equivalentes ao ponto operacional básico interno dado pela solução SB0. Dos testes realizados fica claro que esta resposta incremental a partir do ponto básico é um fator importante no sentido de diminuir os erros de resposta de todos os modelos externos estudados. Portanto, assim como os estudos de Análise Segurança Estática, onde os modelos da parte externa são ajustados a um ponto básico, também os estudos de otimização equivalente devem possuir uma etapa de casamento na fronteira.

Os resultados de estudos de otimização equivalente envolvendo os modelos equivalentes avaliados neste trabalho são dados a seguir, sendo também sintetizados em forma

Tabela 8.4: Otimização de Referência - IG

	Barra	V (pu)	Q_g (Mvar)	min- Q_g (Mvar)	max Q_g (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.062799	189.	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060774	-496.	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.917714	-98.	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.941059	118.	-120.	120.	0.0000000
TAM	1434	1.056222	30.0	-30.	30.	0.0470527
	1242	1.023646	100.0	-100.	100.	0.0029170
ÁREA EXTERNA						
TAV	720	1.060151	1.41	-100.	130.	0.0000000
	707	1.059253	300.0	-300.	300.	0.0001709
TBV	152	0.958711	19.0	-9.5	19.	0.1390091
	399	0.969973	1.	-1.	1.	0.0202460
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.0637676	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.0403630	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.9331342	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.9396686	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	1176 - 1175	1.0604235	0.94	1.06		
	803 - 800	1.0455881	0.94	1.06		
TBT	1176 - 1177	0.9397077	0.94	1.06		
	62 - 63	0.9467807	0.94	1.06		

de tabelas. Em seções seguintes os processos de otimização equivalente serão comparados criticamente nos dois níveis de análise.

8.3.1 Otimização Equivalente com o modelo WE

No processo de otimização analisado nesta seção são utilizados os controles Inter- nos para a minimização das perdas Internas, utilizando-se o modelo WE para representar o sistema externo (analogamente ao processo de refeência II). No cálculo desta solução usou-se a mesmo padrão de otimização adotado no processo de otimização II. Note-se que o modelo WE não possui acesso aos controles externos, sendo portanto impossível outros tipos de otimização, tais como processos análogos às otimizações GG, ou IG. Os resultados estão mostrados na tabela 8.5. O modelo WE considerado foi aquele em que são utilizados diretamente os shunts fictícios dado na figura 2.4.

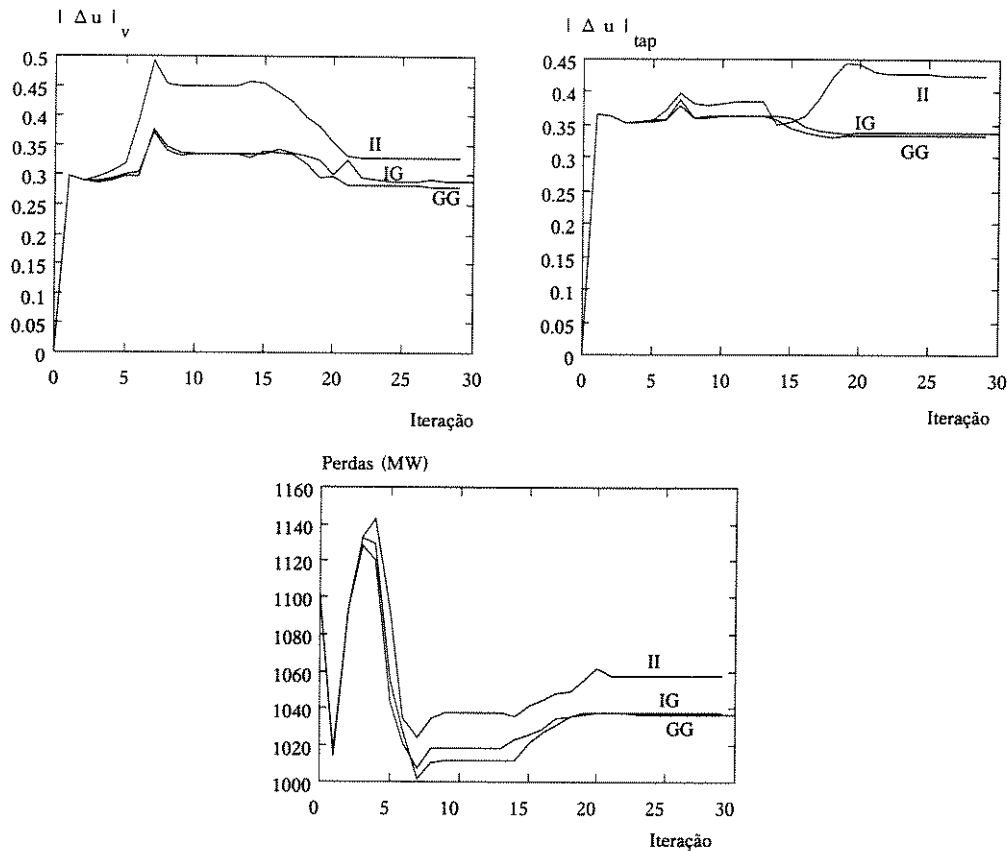


Figura 8.1: Comparação Entre as Referências

8.3.2 Otimizações Equivalentes com Modelos FCOE

Nesta seção serão avaliados os estudos de otimização equivalente utilizando-se o modelo FCOE proposto. Conforme já discutido anteriormente este modelo pode (analogamente aos processos de otimização de referência) ser definido de várias formas, conforme se considerem os controles internos ou globais e ainda as perdas internas ou globais, conforme:

- FCOE_{II} estudo de otimização equivalente utilizando o modelo FCOE em que os controles internos são utilizados para calcular as perdas internas.
- FCOE_{IG} estudo de otimização equivalente utilizando o modelo FCOE em que os controles globais são utilizados para calcular as perdas internas.
- FCOE_{GG} estudo de otimização equivalente utilizando o modelo FCOE em que os controles globais são utilizados para calcular as perdas globais.

Tabela 8.5: Otimização Equivalente com WE

	Barra	V (pu)	Q_g (Mvar)	$Q_g^{\min}$ (Mvar)	$Q_g^{\max}$ (Mvar)	λ ($\frac{MW}{Mvar}$)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.061335	189.	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060839	-490.29	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.920861	-94.	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.941655	115.	-120.	120.	0.0000000
TAM	1434	1.057914	30.	-30.	30.	0.0570043
	1242	1.024054	100.	-100.	100.	0.0027218
	Ramo	t (pu)	$t^{\min}$ (pu)	$t^{\max}$ (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1463 - 1462	1.0641511	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.0422960	0.94	1.06		
TBV	1456 - 1457	0.9317592	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.9696306	0.94	1.06		

Conforme discutido no capítulo 5 adotou-se, para os processos de otimização equivalentes, os mesmos padrões de otimização adotados nos processos de otimização equivalentes análogos. O mesmo padrão de otimização adotado para a referência II foi adotado para a modelo FCOE_{II}.

Os modelo FCOE fazem determinadas hipótese sobre determinados dados "on-line" externos, conforme dicutido no capítulo 6. Neste sentido, este modelo pode ser considerado exato, na hipótese de que todos os dados externos estão perfeitamente determinados. Para efeito de se prever situações práticas, onde os dados externos contêm certas imprecisões, foram introduzidos alguns erros associados às incertezas sobre estes dados. Considerou-se em todos os estudos com os modelos FCOE testados neste capítulo os seguintes erros:

- erro de 2% para as tensões externas;
- erro de 20% nas cargas e gerações externas;
- erro de 2% para os taps de transformadores externos.

As tabelas que sintetizam os processos de otimização equivalente com o modelo FCOE são dadas a seguir em 8.6, 8.7 e 8.8.

Tabela 8.6: Otimização Equivalente -FCOE_{II}

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.061603	188.4	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060887	-448.6	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.925520	-97.	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.946486	119.	-120.	120.	0.0000000
TAM	1104	0.994752	0.	-30.	30.	-0.0718962
	1242	1.022897	100.	0.	0.	0.0035538
ÁREA EXTERNA						
TAV	720	1.014300	-336.4	-100.	130.	0.0000000
	707	1.009400	39.0	-300.	300.	0.0000000
TBV	152	0.980000	27.15	-9.5	19.	0.0000000
	399	0.999600	-26.6	-1.	1.	0.0000000
	Ramo	t (pu)	t _{min} (pu)	t _{max} (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.064863	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.045158	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.930363	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.968558	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	1176 - 1175	0.999600	0.94	1.06		
	803 - 800	1.049580	0.94	1.06		
TBT	1176 - 1177	0.999600	0.94	1.06		
	62 - 63	0.918000	0.94	1.06		

* Limites de Reativos Violados

8.3.3 Otimizações Equivalentes com Modelos Híbridos

São considerados nesta seção, estudos de otimização equivalente utilizando-se os modelos híbridos, que se constituem em um meio termo entre os modelos reduzidos e não reduzidos. De fato, toda a metodologia descrita neste trabalho está conceitualmente embutida em modelos deste tipo, que tratam em um modelo unificado os modelos WE e o FCOE proposto.

Os modelos híbridos definidos neste trabalho consideram partes do sistema geograficamente externo (áreas de amortecimento) como sendo compostas por modelos do tipo FCOE. A parte restante do sistema externo, não representada pela área de amortecimento, é representada pelo modelo WE. De forma análoga aos casos anteriores pode-se definir alguns estudos de otimização equivalente com modelos híbridos, tais como:

- BUF_{II} estudo de otimização equivalente utilizando áreas de amortecimento em que os controles internos são utilizados para calcular as perdas internas;
- BUF_{IG} estudo de otimização equivalente utilizando áreas de amortecimento em que os controles globais são utilizados para calcular as perdas internas;

Tabela 8.7: Otimização Equivalente -FCOE_{IG}

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.062796	190.0	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060782	-494.4	-.500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.917713	-99.	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.941076	119.0	-120.	120.	0.0000000
TAM	1434	1.056104	30.0	-30.	30.	0.0473781
	1263	1.042865	120.0	-100.	100.	0.0109433
ÁREA EXTERNA						
TAV	720	1.053250	128.	-100.	130.	0.0000000
	707	1.002266	26.7	-300.	300.	0.0000000
TBV	152	0.972150	19.	-9.5	19.	0.0152443
	399	0.961018	1.	-1.	1.	0.0107699
	Ramo	t (pu)	min t (pu)	max t (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.0637714	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.0417494	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.9331263	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.9396712	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	1176 - 1175	1.0604421	0.94	1.06		
	803 - 800	1.0074675	0.94	1.06		
TBT	1176 - 1177	0.9396970	0.94	1.06		
	62 - 63	0.9599041	0.94	1.06		

- BUF_{GG} estudo de otimização equivalente utilizando áreas de amortecimento em que os controles globais são utilizados para calcular as perdas globais.

A área de amortecimento utilizada na obtenção destes resultados é composta por 54 barras. O casamento na fronteira, utilizado para ajustar todos os processos de otimização equivalente envolvendo áreas de amortecimento ao sistema interno, é aquele descrito na seção 6.6.

Supõe-se também um certo erro associado à estimação de dados "on-line" na área de amortecimento. Assumiu-se nesta área os mesmos erros nas informações externas do modelo FCOE, que são:

- erro de 2% para as tensões externas;
- erro de 20% nas cargas e gerações externas;
- erro de 2% para os taps de transformadores.

Adotando-se os mesmos erros na área de amortecimento, espera-se que as respostas dos processos de otimização dos modelos híbridos sejam intermediárias entre aquelas

Tabela 8.8: Otimização Equivalente -FCOE_{EGG}

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.063048	189.0	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060809	-493.7	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.918010	-99.0	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.941044	119.0	-120.	120.	0.0000000
TAM	1434	1.056136	30.	-30.	30.	0.0494319
	1242	1.025117	100.	-100.	100.	0.0019555
ÁREA EXTERNA						
TAV	720	1.049034	-98.9	-100.	130.	0.0000000
	707	1.060041	203.6	-300.	300.	0.0000000
TBV	152	1.002576	19.0	-9.5	19.	0.0034157
	399	0.996425	1.	-1.	1.	0.0143868
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.063833	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.040678	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.933000	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.939717	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	1176 - 1175	1.0611643	0.94	1.06		
	803 - 800	1.0253949	0.94	1.06		
TBT	1176 - 1177	0.9391125	0.94	1.06		
	62 - 63	0.9883294	0.94	1.06		

obtidas pelos modelos WE e FCOE, dependendo, logicamente, da dimensão da área de amortecimento escolhida. A seguir, os estudos de otimização equivalente até aqui apresentados, serão comparados às suas respectivas referências, nos dois níveis de análise. As tabelas de síntese dos processos de otimização equivalente utilizando os modelos híbridos são dadas a seguir em 8.9, 8.10, 8.11.

8.4 Análise Comparativa dos Modelos Externos

8.4.1 Primeiro Nível de Análise

Conforme discutido no capítulo 5 mostra-se que, no caso de estudos de otimização "on-line", são dois os objetivos do equivalente. Um primeiro objetivo é o cálculo dos controles "ótimos" da forma mais precisa possível. A seguir é importante saber o nível de resposta dos modelos quando tais controles são efetivamente implementados no sistema.

Neste item procurou-se comparar as respostas dos processos de otimização equivalente utilizando-se os modelos WE, FCOE e Híbridos estudados anteriormente com relação

Tabela 8.9: Otimização Equivalente - BUF_{II}

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)	λ (MW / Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.061630	189.9	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060932	-446.0	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.925674	-98.0	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.946566	119.0	-120.	120.	0.0000000
TAM	1104	0.995578	0.0	0.	0.	-0.0450001
	1242	1.021909	100.0	-100.	100.	0.0038558
ÁREA EXTERNA						
TAV	714	1.019200	-354.0	-600.0	600.0	*
	722	1.019200	-1076.3	-560.0	560.0	
TBV	986	0.982940	-85.3	-100.0	100.0	
	983	1.009400	-0.81	-2.6	4.4	
	Ramo	t (pu)	min t (pu)	max t (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.0648812	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.0435157	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.9302953	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.9742867	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	901 - 981	1.072020	0.94	1.06		
	1199 - 1198	1.071000	0.94	1.06		
TBT	1176 - 1177	0.999600	0.94	1.06		
	559 - 558	0.996540	0.94	1.06		

* Limite de Geração de Reativo Violado

às 3 referências de comparação. Uma comparação qualitativa é feita através dos gráficos que mostram a evolução das normas dos desvios nos controles e ainda a evolução da função objetivo. Como o volume de dados envolvidos na solução de problema de otimização é elevado, especialmente para sistemas reais, esta avaliação visual tem facilitado a identificação das respostas dos modelos.

Além da evolução dos controles, os valores médios calculados sobre a solução final dos processos de otimização fornecem valores quantitativos relativos à precisão do cálculo dos controles. Tabelas contendo os valores mais críticos com relação aos erros no cálculo dos controles também são fornecidas. Os estudos são dados separadamente para cada uma das referências de otimização.

Estudos Associados à Referência II

Neste estudo os processos de otimização equivalente utilizando-se respectivamente os modelos FCOE_{II}, BUF_{II} e o WE, são comparados ao processo de otimização de referência II. A evolução das normas dos desvios de controle de tensão e taps e as perdas

Tabela 8.10: Otimização Equivalente - BUF_{IG}

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.061762	-99.0	-100.	190.	-0.0098168
	1250	1.060820	-494.8	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.918168	-99.0	-100.	89.	0.0000000
	1437	0.941568	-119.0	-120.	120.	0.0000000
TAM	1434	1.054835	30.0	-30.	30.	0.0430501
	1242	1.025593	100.0	-100.	100.	0.0017273
ÁREA EXTERNA						
TAV	714	0.992603	600.0	-600.0	600.0	0.4110035
	722	1.063310	380.5	-560.0	560.0	0.0000000
TBV	986	1.020409	-57.1	-100.0	100.0	0.0000000
	983	1.022005	-2.6	-2.6	4.4	-0.0426679
	Ramo	t (pu)	t _{min} (pu)	t _{max} (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.0637780	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.0402742	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.9330173	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.9396985	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	901 - 981	1.0000000	0.94	1.06		
	1199 - 1198	0.9780033	0.94	1.06		
TBT	1176 - 1777	0.9396308	0.94	1.06		
	559 - 558	1.0074154	0.94	1.06		

internas durante os processos de otimização são dadas na figura 8.2.

Os gráficos sintetizam as duas fases de otimização descritas pelo modelo matemático do problema de FCO dado no capítulo 3. Os picos nos gráficos, que ocorrem na FASE II de otimização, estão associados à introdução de restrições nos limites de potência reativa das barras controladas, ou mesmo de restrições em tensões controladas.

Os gráficos mostram o efeito cumulativo de resposta dos equivalentes. Os processos de otimização são bastante coincidentes nas iterações iniciais e a medida que os controles vão sendo iterativamente alterados, os erros de resposta se acumulam ficando às vezes bastante altos. Os valores finais correspondem aos controles "ótimos" calculados por cada modelo. Percebe-se que o modelo FCOE além de calcular controles mais aproximados, acompanha mais de perto o processo de otimização de referência em si. A precisão do modelo WE especialmente no cálculo dos controles de taps de transformadores é bem inferior ao modelo FCOE. A precisão de cálculo dos controles em taps de transformadores do modelo híbrido é muito boa. Nota-se uma certa deficiência de representação das perdas no caso do modelo híbrido. Apesar disso, sua resposta de uma forma geral é melhor que aquela apresentada pelo WE.

Tabela 8.11: Otimização Equivalente - BUF_{GG}

	Barra	V (pu)	Q _g (Mvar)	min Q _g (Mvar)	max Q _g (Mvar)	λ (MW/Mvar)
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAV	1430	1.062677	189.9	-100.	190.	0.0000000
	1250	1.060810	-476.3	-500.	650.	0.0000000
TBV	1438	0.919162	-98.9	-100.	89.	0.0000000
	1434	1.060059	26.9	-30.	30.	0.0000000
TAM	1437	0.939229	120.	-120.	120.	0.0787376
	1242	1.022430	100.	-100.	100.	0.0034789
ÁREA EXTERNA						
TAV	986	1.013562	-57.7	-100.	100.	0.0000000
	983	1.009148	-2.6	-2.6	4.4	-0.0250199
TBV	722	0.938772	-550.	-560.	560.	0.0000000
	714	0.983848	-600.	-600.	600.	-0.0425767
	Ramo	t (pu)	t ^{min} (pu)	t ^{max} (pu)		
ÁREA OBSERVÁVEL						
TAT	1463 - 1462	1.06371559	0.94	1.06		
	1478 - 1247	1.04352010	0.94	1.06		
TBT	1456 - 1457	0.93352312	0.94	1.06		
	1452 - 1453	0.93967126	0.94	1.06		
ÁREA EXTERNA						
TAT	901-981	1.0000000	0.94	1.06		
	1199-1198	0.9794395	0.94	1.06		
TBT	1176-1777	0.9391325	0.94	1.06		
	559-558	0.9582187	0.94	1.06		

Nesta fase de análise, um equivalente é tanto mais preciso quanto mais os controles ótimos equivalentes calculados se aproximarem dos controles obtidos com o sistema completo. As tabelas 8.12 e 8.14 e 8.13 mostra os maiores erros nos desvios dos controles obtidos respectivamente com os modelos WE, $FCOE_{II}$ e BUF_{II} .

Valores médios são dados nas tabelas comparativas entre os modelos WE e $FCOE_{II}$ e BUF_{II} . São dados os valores médios dos desvios nos controles calculados em cada processo de otimização e os módulos dos valores finais destes desvios. Os melhores valores médios apresentados são aqueles obtidos com o $FCOE_{II}$. O cálculo dos controles de taps no modelo BUF_{II} é melhor que o WE mas o cálculo dos controles em tensão são piores.

Estudos Associados à Referência IG

Neste estudo os processos de otimização equivalente utilizando-se respectivamente os modelos BUF_{IG} $FCOE_{IG}$ e WE, são comparados ao processo de otimização de referência IG. As evoluções das normas dos desvios de controle de tensão e taps e as perdas

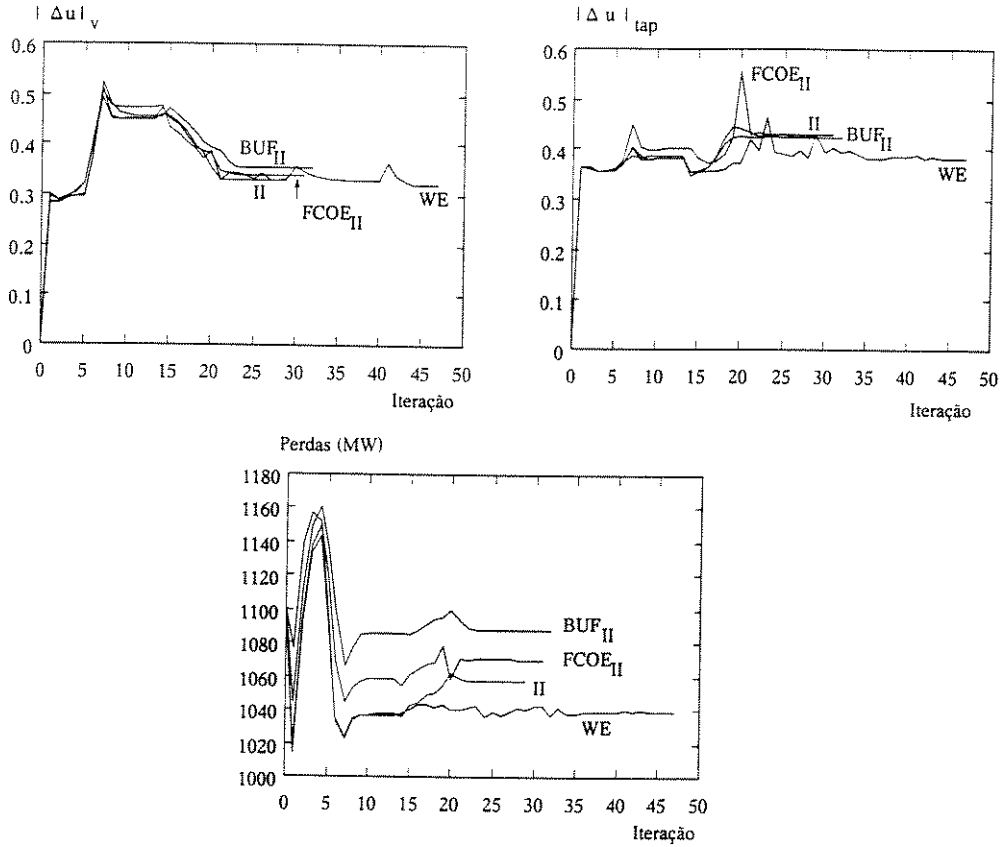


Figura 8.2: Estudo II - Comparação Entre os Modelos

internas durante os processos de otimização são dadas na figura 8.3.

Os resultados mostrados na figura 8.3, se comparados aqueles obtidos na figura anterior, evidenciam uma deficiência básica tanto do modelo WE quanto de todos os modelos reduzidos, que consiste na incapacidade de acesso tanto às restrições quanto a todo tipo de variáveis externas. Isto quer dizer que os modelos de equivalentes reduzidos são sempre irrestritos. A impossibilidade de se levar em conta as restrições na parte externa do sistema faz com que a resposta do modelo WE seja bastante prejudicada, sendo que os seus controles equivalentes são bem mais imprecisos do que aqueles calculados pelo $FCOE$.

No caso do modelo $FCOE_{IG}$ o que se percebe é uma melhoria significativa de resposta, inclusive se compararmos ao processo anterior (com a referência II) devido ao fato de que as restrições externas foram todas atendidas. O artifício de liberação dos controles fictícios externos para a factibilização das restrições externas tem melhorado consideravelmente a resposta dos modelos $FCOE$. O modelo híbrido, neste caso, teve uma melhor

barra	u_v^{II}	u_v^{WE}	erro %
1115	1.037993	0.939901	9.450130
1103	0.936165	0.996066	6.398539
1134	1.002241	1.052720	5.036562
ramo	$u_{\text{tap}}^{\text{II}}$	$u_{\text{tap}}^{\text{WE}}$	erro %
1223-1131	0.9393585	1.0052239	7.0117403
1285-1411	0.9399471	0.9841068	4.6981090
1208-1207	1.0251999	0.9913057	3.3061140

Tabela 8.12: Modelo WE - Caso II - Maiores Erros nos Controles

barra	u_v^{II}	$u_v^{\text{BUF}^{\text{II}}}$	erro %
1184	1.049565	0.964608	8.094547
1145	1.057856	0.989554	6.456714
1148	1.046062	0.993460	5.028608
ramo	$u_{\text{tap}}^{\text{II}}$	$u_{\text{tap}}^{\text{BUF}^{\text{II}}}$	erro %
1136-1226	1.0144220	1.0600784	4.5007
1484-1255	1.0243206	0.9735444	4.9570
1483-1263	1.0407531	0.9977867	4.1283

Tabela 8.13: Modelo BUF^{II} - Maiores Erros nos Controles

resposta se comparado ao WE. A utilização de controles fictícios e restrições equivalentes na área de amortecimento também propiciou uma melhor performance deste modelo. Percebe-se entretanto uma certa deficiência de representação das perdas, por parte dos modelos híbridos neste estudo.

As tabelas 8.16, 8.18 e 8.17 mostram os maiores erros nos desvios de controle de tensão e tap de transformadores obtidos respectivamente com os processos de otimização equivalente utilizando-se os modelos WE, FCOE_{IG} e BUF_{IG} , quando comparados aqueles dados pela solução de referência IG.

Os valores de erros médios são dados nas tabelas comparativas entre os modelos WE, FCOE_{IG} e BUF_{IG} , de forma análoga ao estudo anterior. Os valores médios evidenciam em todos os aspectos as melhorias obtidas com a utilização do modelo FCOE. Os valores médios também deixam claro a melhoria de utilização dos modelos híbridos em relação ao caso II anterior. A utilização de controles fictícios para a factibilização das restrições externas equivalentes nas áreas de amortecimento é um artifício que produz uma melhor

barra	u_v^{II}	$FCOE_{II}$ u_v	erro %
1117	1.061300	1.020656	3.829636
1122	1.021107	1.060050	3.813724
1255	1.025146	0.984690	3.946395
ramo	u_{tap}^{II}	$FCOE_{II}$ u_{tap}	erro %
1136-1226	1.0144220	1.0600428	4.497
1484-1255	1.0243206	0.9844104	3.896
1136-1227	1.0303213	1.0601376	2.893

Tabela 8.14: Modelo $FCOE_{II}$ - Maiores Erros nos Controles

	solução inicial - SB0	solução II	solução WE	solução $FCOE_{II}$	solução BUF_{II}
Perdas	1100.11	1057.61	1039.55	1069.86	1087.98
$ \Delta u _v$ (pu)		0.329183	0.3212877	0.339898	0.35280
$ \Delta u _{lap}$ (pu)		0.425993	0.3833828	0.429019	0.42125
Erro médio em u_v^{eq} (%)			0.8220	0.5437	0.9020
Erro médio em u_{lap}^{eq} (%)			0.7114	0.5783	0.8264

Tabela 8.15: Estudo II - Valores Médios

resposta por parte deste modelo. Neste estudo, o cálculo dos controles nas tensões e taps do modelo híbrido foi melhorado com relação ao modelo WE.

Estudos Associados à Referência GG

Neste estudos é utilizada como referência de comparação a otimização de referência GG. Os processos de otimização equivalente utilizando o WE, $FCOE_{GG}$ e BUF_{GG} foram comparados ao processo de otimização de referência GG. As evoluções das normas dos desvios de controle e das perdas internas, em todos os processos, são dadas na figura 8.4.

No caso do processo $FCOE_{GG}$ o ponto operacional externo não é confiável, portanto as "perdas" externas, que são minimizadas neste processo de otimização equivalente, não são muito representativas. Ainda assim, o cálculo dos controles utilizando este modelo tem uma performance bastante melhorada em relação ao modelo WE. O modelo híbrido

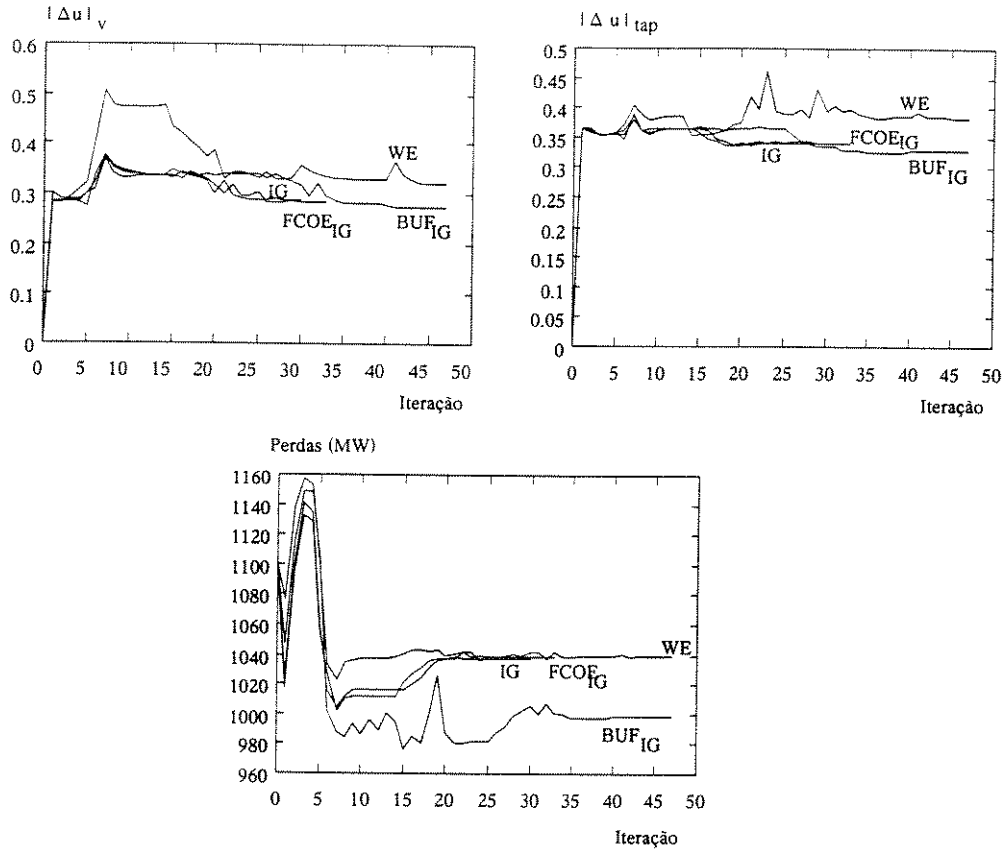


Figura 8.3: Estudo IG - Comparação Entre os Modelos

representa melhor que WE o cálculo dos controles de tensão e taps. Há ainda, por parte deste modelo, uma deficiência de representação das perdas no processo.

O cálculo dos controles internos utilizando o modelo FCOE_{GG} tem sido a forma de mais difícil representação nos estudos realizados. A representação do processo de otimização das perdas externas é um complicante a mais nestes casos. No estudo mostrado na figura 8.4, a resposta foi razoável pois o que se percebe é que os controles externos variaram muito mais em função de restringir os limites externos do que em função de minimizar as perdas externas. Isto pode ser notado pois os controles das referências IG e GG estão bastante próximos (ver figura 8.1). À medida que, em outros estudos, a referência IG se afasta de GG a resposta do modelo FCOE_{GG} é geralmente deteriorada. Cabe lembrar que a situação GG não é muito usual nos estudos de otimização "on-line" na operação dos centros de controle. A situação IG, conforme já discutido anteriormente, é mais realista em estudos de otimização "on-line".

barra	u_v^{IG}	u_v^{WE}	erro %
1114	0.971189	1.062567	9.408821
1431	1.059282	0.972258	8.215399
1137	0.990095	0.916515	7.431661
ramo	u_{tap}^{IG}	u_{tap}^{WE}	erro %
1213-1215	0.9909969	1.0601855	6.9817143
1179-1178	0.9970663	1.0600701	6.3189205
1285 -1286	1.0126126	1.0603161	4.7109377

Tabela 8.16: Modelo WE - Caso IG - Maiores Erros nos Controles

barra	u_v^{IG}	$u_v^{BUF_{IG}}$	erro %
1135	1.021702	1.047105	2.486253
1149	1.024498	1.053726	2.852921
1148	1.058231	1.037261	1.981615
ramo	u_{tap}^{IG}	$u_{tap}^{BUF_{IG}}$	erro %
1449-1421	0.9993184	1.0306409	3.1343937
1486-1254	1.0063392	1.0242685	1.7816370
1136 -1227	1.0017293	0.9895467	1.2161500

Tabela 8.17: Modelo BUF_{IG} - Maiores Erros nos Controles

Os maiores erros apresentados nos desvios de controle são dados nas tabelas 8.20, 8.22 e 8.21 respectivamente para os modelos WE, $FCOE_{GG}$ e BUF_{GG} .

A tabela com os valores médios dos erros obtidos com os modelos é dada em 8.23. Os valores confirmam que também neste processo de otimização o modelo FCOE representa de forma bem mais precisa o cálculo dos controles, em especial os taps de transformadores. Os valores obtidos para o modelo híbridos são melhorados em relação ao WE.

Os estudos realizados até aqui mostram que os modelos equivalentes FCOE dão uma maior flexibilidade para o cálculo dos controles internos. Pelo menos três situações práticas importantes, quais sejam as otimizações II, IG e GG, são relativamente bem modeladas por esta ferramenta. O modelo WE fornece em contrapartida uma solução fixa que geralmente não se enquadra em nenhuma destas situações. Os controles mais precisos foram calculados pela ferramenta FCOE. Os modelos híbridos têm apresentado uma solução intermediária entre as soluções dos modelos FCOE e WE. O passo avaliado a seguir consiste em simular os controles calculados no sistema completo e equivalenciado e compará-los em

barra	u_v^{IG}	$FCOE_{IG}$ u_v	erro %
1254	1.007197	1.030421	2.305788
1115	1.007838	1.017123	0.921291
1103	1.027746	1.036797	0.880698
ramo	u_{tap}^{IG}	$FCOE_{IG}$ u_{tap}	erro %
1486 -1254	1.0063392	1.0302388	2.3749057
1179 -1178	0.9970663	0.9917725	0.5309329
1483 -1263	1.0428574	1.0376865	0.4958353

Tabela 8.18: Modelo $FCOE_{IG}$ - Maiores Erros nos Controles

	solução inicial - SB0	solução IG	solução WE	solução $FCOE_{IG}$	solução BUF_{IG}
Perdas	1110.11	1036.90	1039.55	1038.48	998.04
$ \Delta u _v$ (pu)		0.2884645	0.3212877	0.2849306	0.275635
$ \Delta u _{tap}$ (pu)		0.3401707	0.3833828	0.3415529	0.327891
Erro médio em u_v^{eq} (%)			1.2009	0.2977	0.5070
Erro médio em u_{tap}^{eq} (%)			0.7124	0.1395	0.3870

Tabela 8.19: Estudo IG - Valores Médios

um outro nível de análise.

8.4.2 Segundo Nível de Análise

Neste nível de análise os controles equivalentes são efetivamente implementados respectivamente nos sistemas completo e equivalenciado (modelo WE, FCOE ou híbrido) através de uma rotina de fluxo de carga, conforme descrito no capítulo 5. Os resultados são apresentados separadamente para cada referência de comparação.

Estudos Associados à Referência II

Dos estudos feitos no nível 1, para a referência de comparação II, concluiu-se que os controles equivalentes propostos pelo modelo $FCOE_{II}$ são mais precisos que aqueles propostos pelos modelos WE e BUF_{II} . Os controles internos dados pela solução do

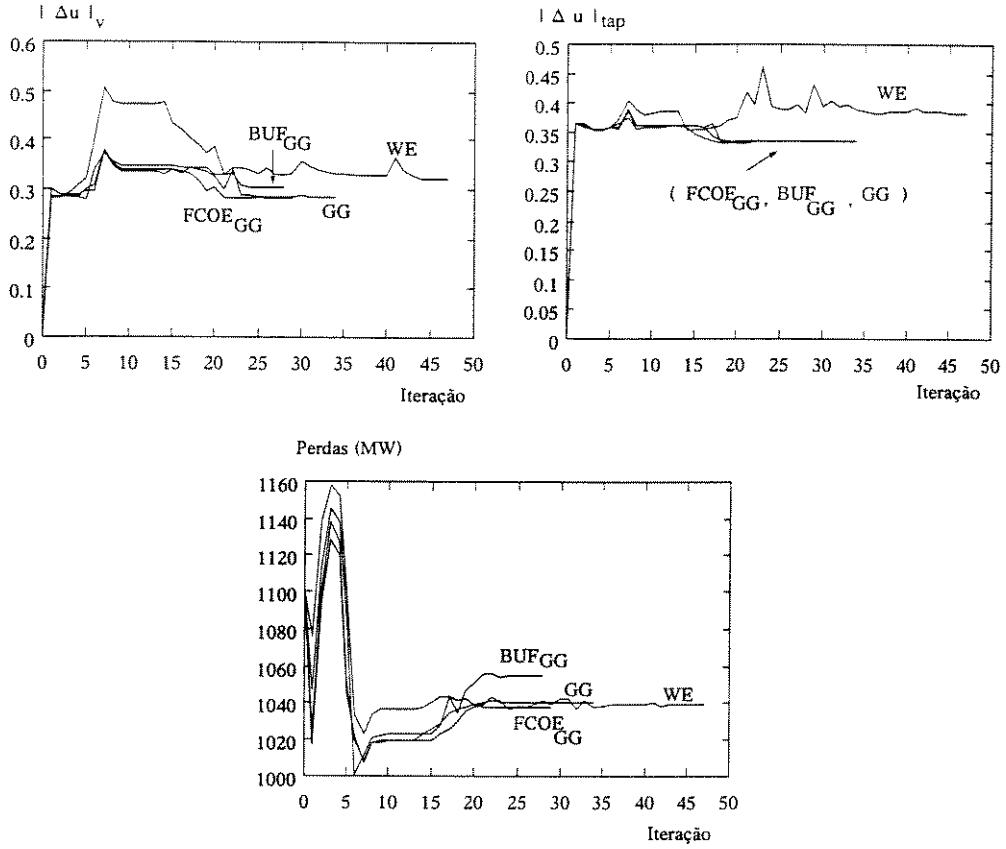


Figura 8.4: Estudo GG - Comparação Entre os Modelos

processo $FCOE_{II}$ são portanto implementados, através de uma rotina de fluxo de carga, respectivamente:

- no sistema completo, produzindo uma solução x_{II}^{com}
- no sistema equivalenciado pelo modelo WE produzindo uma solução x_{II}^{WE}
- no sistema equivalenciado pelo modelo FCOE produzindo uma solução x_{II}^{FCOE}
- no sistema equivalenciado pelo modelo híbrido produzindo uma solução x_{II}^{BUF}

A solução x_{II}^{com} corresponde ao que "realmente" aconteceria ao sistema completo se os controles equivalentes calculados no processo $FCOE_{II}$ fossem efetivamente implementados no sistema. A solução x_{II}^{WE} corresponde à resposta do modelo WE quando os mesmos controles equivalentes são também implementados. A solução x_{II}^{FCOE} corresponde à resposta do modelo FCOE também à implementação dos mesmos controles, etc. Comparando-se as

barra	u_v^{GG}	u_v^{WE}	erro %
1114	0.975846	1.062277	8.856991
1424	1.012437	0.926259	8.511930
1137	0.992001	0.916960	7.564580
ramo	u_{tap}^{GG}	u_{tap}^{WE}	erro %
1213 1215	0.9903727	1.0601035	7.0408612
1179 1178	0.9962569	1.0600303	6.4012962
1204 1202	1.0087455	1.0600913	5.0900639

Tabela 8.20: Modelo WE - Caso GG - Maiores Erros nos Controles

ramo	u_{tap}^{GG}	$u_{tap}^{BUF\,GG}$	erro %
1431	1.049045	0.979639	6.616132
1263	1.037899	0.998661	3.780524
1246	1.060013	1.022115	3.575187
barra	u_v^{GG}	$u_v^{BUF\,GG}$	erro %
1483-1263	1.0360361	0.9986769	3.6059691
1211-1126	1.0335827	1.0207456	1.2420047
1484-1255	1.0098379	0.9926096	1.7060459

Tabela 8.21: Modelo BUF_{GG} - Maiores Erros nos Controles

soluções x_{II}^{WE} , x_{II}^{FCOE} e x_{II}^{BUF} com a solução "correta" x_{II}^{com} podemos avaliar a precisão da resposta dos modelos com relação a alterações em controles internos.

A tabela 8.24 mostra a comparação entre as soluções x_{II}^{WE} , x_{II}^{BUF} e x_{II}^{FCOE} com a solução x_{II}^{com} . Esta comparação é feita em termos dos erros associados aos fluxos de potência ativa e reativa na parte interna do sistema, das tensões nas barras de carga e das gerações nas barras PV. Os erros nos fluxos estão mostrados separadamente para os ramos Interno-Interno (I - I) e Interno-Fronteira (I - F). Os valores mostrados na tabela evidenciam que o modelo FCO também possui melhores respostas às alterações dos controles internos. Os resultados com o modelo híbrido são melhores que aqueles obtidos com o WE. Apesar disso, a solução obtida para o WE é bem próxima da solução x_{II}^{com} e pode ser considerada aceitável. O modelo WE é relativamente eficaz na resposta a alterações em controles (segundo nível de análise) mas é deficiente quando se trata de "produzir" os controles equivalentes (primeiro nível de análise).

barra	u_v^{GG}	$u_v^{FCOE_{GG}}$	erro %
1137	0.992001	1.041910	5.031165
1103	1.015027	1.035864	2.052899
1254	1.008124	1.028131	1.984625
ramo	u_{tap}^{GG}	$u_{tap}^{FCOE_{GG}}$	erro %
1486 -1254	1.0058766	1.0281965	2.2189547
1211-1126	1.0335827	1.0215353	1.1655957
1212 -1211	0.9887463	0.9778286	1.1042003

Tabela 8.22: Modelo $FCOE_{GG}$ - Maiores Erros nos Controles

	solução inicial - SB0	solução GG	solução WE	solução $FCOE_{GG}$	solução BUF_{GG}
Perdas	1100.11	1037.68	1039.55	1040.49	1054.84
$ \Delta u _v$ (pu)		0.2815909	0.3212877	0.2852638	0.3019455
$ \Delta u _{tap}$ (pu)		0.3332196	0.3833828	0.3337231	0.3343686
Erro médio em u_v^{eq} (%)			1.28281	0.29772	0.8541
Erro médio em u_{tap}^{eq} (%)			0.69403	0.18523	0.4336

Tabela 8.23: Estudo GG - Valores Médios

Estudos Associados à Referência IG

Analogamente ao estudo anterior, os controles internos dados pela solução do processo $FCOE_{IG}$ são implementados, através de uma rotina de fluxo de carga, respectivamente:

- no sistema completo, produzindo uma solução da simulação x_{IG}^{com}
- no sistema equivalenciado pelo modelo WE produzindo uma solução x_{IG}^{WE}
- no sistema equivalenciado pelo modelo FCOE produzindo uma solução x_{IG}^{FCOE}
- no sistema equivalenciado pelo modelo híbrido produzindo uma solução x_{IG}^{BUF}

A tabela 8.25 mostra a comparação entre as soluções x_{IG}^{WE} , x_{IG}^{BUF} e x_{IG}^{FCOE} com a solução x_{IG}^{com} . Os resultados das simulações confirmam o teste anterior, no qual a melhor resposta é proporcionada pelo modelo FCOE, e o modelo híbrido sendo melhor em relação

	Barra PQ V (pu)	Barra PV Q _g (MVAR)	Fluxos			
			P (MW)		Q (MVAR)	
			I - I	I - F	I - I	I - F
FCOE _{II} (erro %)	0.00610	0.28854	0.02671	0.02331	0.04629	0.13196
WE (erro %)	0.04981	1.36657	0.08589	0.07833	0.20132	0.78094
BUF _{II} (erro %)	0.00756	0.31813	0.02367	0.02467	0.05414	0.15284

Tabela 8.24: Segundo Nível - Estudo II

ao WE. Nos casos em que se conhece os controles a serem implementados (segundo nível), os modelos com áreas de amortecimento são uma boa opção de modelagem.

	Barra PQ V (pu)	Barra PV Q _g (MVAR)	Fluxos			
			P (MW)		Q (MVAR)	
			I - I	I - F	I - I	I - F
FCOE _{IG} (erro %)	0.00498	0.77556	0.05104	0.03276	0.05697	0.15024
WE (erro %)	0.12955	2.24047	0.24236	0.24481	0.75102	1.63972
BUF _{IG} (erro %)	0.01916	1.47904	0.07502	0.06164	0.11961	0.26823

Tabela 8.25: Segundo Nível - Estudo IG

Estudos Associados à Referência GG

Analogamente ao estudo anterior, os controles internos dados pela solução do processo FCOE_{GG} são implementados, através de uma rotina de fluxo de carga, respectivamente:

- no sistema completo, produzindo uma solução da simulação dada por x_{GG}^{com}
- no sistema equivalenciado pelo modelo WE produzindo uma solução dada por x_{GG}^{WE}
- no sistema equivalenciado pelo modelo FCOE produzindo uma solução dada por x_{GG}^{FCOE}
- no sistema equivalenciado pelo modelo híbrido produzindo uma solução dada por x_{GG}^{BUF}

A tabela 8.26 mostra a comparação entre as soluções x_{GG}^{WE} , x_{GG}^{BUF} e x_{GG}^{FCOE} com a solução x_{GG}^{com} . Os resultados são análogos aos anteriores. Neste caso, a utilização do modelo WE acarreta erros de fluxos em alguns ramos internos superiores ao aceitável. A inclusão

das barras de amortecimento, no modelo híbrido, melhora consideravelmente a resposta conforme mostrado na tabela.

	Barra PQ V (pu)	Barra PV Q _g (MVAR)	Fluxos			
			P (MW)		Q (MVAR)	
			I - I	I - F	I - I	I - F
FCOE _{GG} (erro %)	0.00470	0.2728	0.05278	0.03597	0.06109	0.19872
WE (erro %)	0.13119	3.1953	0.24147	0.23983	0.75802	1.96540
BUF _{GG} (erro %)	0.01761	0.6234	0.08636	0.07568	0.12143	0.30578

Tabela 8.26: Segundo Nível - Estudo GG

8.5 Conclusões

Os resultados mostram que as ações de controle internas calculadas com o sistema completo dependem, de forma significativa, do "status" das ações de controle externas. Ou seja, dependendo do "status" dos controle externos, diferentes controles internos são calculados. Mostrou-se que as três referências de otimização II, IG e GG produzem controles internos bem distintos.

Em estudos de otimização, a finalidade precípua de um modelo externo é produzir ações de controle equivalentes na parte interna que se aproximem o mais possível daquelas ações produzidas pelo mesmo estudo de otimização feito no sistema completo. Portanto, um modelo externo usado em otimização é eficaz quando é capaz de calcular ações de controle equivalentes com uma precisão aceitável quando comparadas com aquelas obtidas na otimização do sistema completo. A deficiência de modelagem do modelo WE em estudos de otimização está associada ao primeiro nível de análise (que é o mais importante), ou seja, na produção dos controles equivalentes. A resposta do modelo WE às alterações em controles internos é razoavelmente bem modelada.

Nos resultados apresentados, o modelo de otimização equivalente FCOE tem se mostrado capaz de modelar de forma mais precisa e flexível as variações nos controles externos, sendo capaz de representar as diferentes referências de otimização. Isto é possível devido ao artifício de se utilizarem os controles fictícios externos que factibilizam as restrições equivalentes externas. As soluções obtidas com o modelo FCOE no segundo nível de análise também foram melhores em todos os casos estudados. O modelo FCOE é portanto a melhor opção de modelagem nos dois níveis de análise.

Os modelo híbridos se mostraram uma boa opção de modelagem no que diz

respeito ao segundo nível de análise. No nível de produção dos controles, este modelo tende a ser melhor que o WE. Ficou clara também a necessidade de utilização dos controles fictícios externos, no primeiro nível, a fim de limitar as restrições equivalentes externas. A utilização de áreas de amortecimento irrestritas pode até mesmo apresentar resultados piores que aqueles dados pelo modelo WE.

Capítulo 9

Conclusões

Nos centros de controle de sistemas de potência as ferramentas de FPO e equivalentes foram desenvolvidas separadamente, isto é, sem que se pensasse nas questões que envolvem os modelos de interface entre tais ferramentas. A utilização de modelos equivalentes clássicos em estudos de otimização não encontra na literatura definições eficientes em termos de conceitos, metodologias de análise, etc. Um dos objetivos do presente trabalho foi o de discutir aspectos conceituais que envolvam as interrelações entre estes dois modelos.

Esta avaliação conceitual iniciou-se pelos estudos com os modelos equivalentes clássicos quando utilizados em estudos de otimização, sendo que o modelo WE foi o foco inicial destes estudos, devido a sua grande difusão e aceitabilidade para estudos de Análise de Segurança. Algumas conclusões a respeito da utilização deste modelo em estudos de otimização são resumidas:

- As versões dos modelos WE respectivamente com PV fictícia e shunt fictícios, eram consideradas muito próximas nos estudos de Análise de Segurança, sendo ambas denominadas na literatura como modelo WE. Nos estudos de otimização as duas versões podem ter resultados bastantes diferenciados devido ao aparecimento de controles nas barras PV fictícias. Os controles das barras PV fictícia não devem ser utilizados para representar os controles externos, o que deteriora bastante o resultado deste modelo.
- Mostrou-se através de resultados numéricos com o sistema sul-sudeste brasileiro que o modelo WE não possui uma precisão aceitável, no que diz respeito à parte reativa de solução, quando utilizado em estudos de otimização no sistema interno. Este resultado confirma para o sistema brasileiro a hipótese de deficiência feita por Tinney no artigo [21].

- A utilização de modelos WE não permite acessar atributos externos importantes para um processo de otimização tais como restrições de todo o tipo, penalidades, função objetivo, etc. Estes atributos externos, conforme se verificou com resultados numéricos, são fatores importantes para a melhoria da resposta dos modelos equivalentes. Concluiu-se portanto que equivalentes irrestritos prejudicam significativamente o cálculo dos controles.

Sobre A Metodologia de Análise

Dos estudos realizados com o modelo WE a necessidade de uma metodologia de análise também ficou clara. Nos estudos de Análise de Segurança a alteração que é feita respectivamente nos sistemas equivalenciado e completo é muito clara. Consiste em retirar determinado elemento do sistema interno, e é a mesma para os sistemas equivalenciado e completo. No processo de otimização as alterações (nos controles) que são "produzidas" pelo sistema completo são diferentes daquelas "produzidas" pelo equivalente, as quais se denominou controles equivalentes. Se o cálculo dos controles fosse conhecido, a tarefa do equivalente seria somente a de representar a resposta externa quando da implementação de tais controles, entretanto uma das tarefas do equivalente é produzir os controles equivalentes.

Propôs-se desta forma a metodologia de análise que particiona o problema de quantificação da resposta dos modelos equivalentes em dois níveis. No primeiro nível procura-se quantificar os erros de "produção" dos controles equivalentes. No segundo nível os erros associados à implementação destes controles no sistema interno são avaliados. A metodologia proposta neste trabalho foi utilizada para validar os modelos equivalentes estudados neste trabalho.

Outro aspecto associado à metodologia de análise é o que diz respeito às referências de comparação. Nos estudos de Análise de Segurança a referência de comparação era única, já que a solução de um processo de fluxo de carga é sempre única. Nos estudos de otimização existem sempre vários cenários possíveis para um determinado problema de otimização. É necessário portanto se fixarem padrões de otimização para que não sejam comparados processos otimização (com e sem equivalentes) completamente diferentes. Alguns pontos importantes para garantir padrões de otimização foram salientados.

Mostrou-se que referências de comparação diferentes podem produzir controles internos bastantes distintos. Algumas referências de comparação possíveis foram avaliadas, entre elas as referências II, IG, GG (o primeiro índice sendo associado às perdas Internas ou Globais e o segundo índice associado aos controles Internos ou Globais). Mostra-se que a referência IG representa melhor o problema para estudos de otimização "on-line".

Esta referência pressupõe que apenas as perdas internas estão sendo minimizadas mas os controles externos são liberados para factibilizar o estado externo. No dia-a-dia da operação do sistema elétrico é bastante razoável que os centros de controles vizinhos estejam operando, se não de forma mais otimizada, pelo menos mantendo seus limites físicos e operacionais.

Sobre a ferramenta FCOE

A constatação das deficiências de representação de modelos equivalentes reduzidos associadas à incapacidade de acessar atributos externos importantes, tais como restrições, penalidades ou a função objetivo, fez com que se pensasse em modelos não reduzidos para a representação da parte externa. Tal fato fez vir novamente à tona as questões associadas à redução/não redução de modelos externos. Estas questões foram extensamente discutidas na década de 80 quando se estudavam modelos equivalentes para Análise de Segurança, e foram retomadas neste trabalho com a proposição de um modelo equivalente não reduzido para estudos de otimização.

A abordagem de modelo equivalente proposta consiste na construção de um modelo de Fluxo de Carga Ótimo Equivalente (FCOE), particinando o problema de otimização do sistema completo nos subsistemas interno, fronteira e externo. Os sistemas externos são representados de forma não reduzida através de restrições aproximadas (ou equivalentes). Este modelo engloba os modelos baseados em fluxo de carga como restrições aproximadas de igualdade. Assim sendo, o modelo proposto é potencialmente utilizável tanto para estudos de Análise de Segurança Estática, onde a literatura já comprovou a eficiência dos modelos baseados em fluxo de carga, quanto em estudos de otimização, conforme mostram os resultados obtidos neste trabalho.

Uma das características mais importantes da abordagem não reduzida proposta é a sua capacidade de representação de diferentes possibilidades de otimização de referência, tais como as referências II, IG e GG definidas. Ressaltam-se os resultados obtidos com a referência IG, que conforme analisado, representa melhor o problema de otimização "on-line". Em contrapartida, a solução de modelos reduzidos como o WE é única, não sendo possível associar seus processos de otimização equivalente a nenhum processo de otimização de referência.

A capacidade de representação de diferentes referências pelo modelo FCOE é devida à utilização de atributos externos, aqui denominados fictícios, (em virtude de que, em um centro de controle não se tem acesso de alteração a tais atributos), ou ainda equivalentes (pelo fato de que o ponto operacional externo é dado por um modelo equivalente).

Um panorama geral dos atributos externos que afetam mais diretamente os processos de otimização associados ao modelo FCOE foi levantado, através da avaliação numérica de imprecisões em alguns dos atributos externos, tais como, os controles de tensão e taps de transformadores, as cargas/gerações, e as restrições. Dentre os atributos externos mais estudados, estão os controles externos fictícios, que ao serem liberados no processo de otimização equivalente enforçam as restrições equivalentes externas. A utilização destes elementos é um artifício matemático que, conforme mostram os resultados, tem permitido a representação eficiente das diferentes possibilidades de otimização, melhorando significativamente a precisão de cálculo dos controles internos.

Sobre os Modelos Híbridos

Seguindo a linha dos modelos equivalentes propostos para estudos de Análise de Segurança, propôs-se também neste trabalho uma abordagem de modelagem híbrida para o sistema externo. Tal abordagem integra em um único modelo, o modelo FCOE proposto e o modelo WE. Nesta abordagem, algumas barras escolhidas da parte externa (área de amortecimento) são representadas por submodelos tipo FCOE, e a parte restante do sistema externo é reduzida à nova fronteira, definida pela área de amortecimento, e representada através do submodelo WE. Esta abordagem busca compatibilizar as boas características dos modelos reduzidos (menor esforço computacional de manutenção) e não reduzidos (melhor precisão).

De fato, os modelos híbridos encerram, conceitualmente, toda a metodologia e abordagens de modelagem propostas e discutidas aqui. Estes modelos podem se reduzir ao modelo WE, no caso em que não haja nenhuma área de amortecimento, ou ainda ao modelo FCOE, no caso em que todo o sistema externo seja escolhido para compor a área de amortecimento. Entre estas situações limítrofes, é possível se definir uma série de problemas de otimização equivalente no ambiente da operação, dependendo de que informações o operador disponha para inserir nas áreas de amortecimento.

Para que se possa utilizar áreas de amortecimento adaptativas, isto é, que sejam atualizadas "on-line" (inserção ou retirada de novas barras na área de amortecimento), pelo operador de forma arbitrária, definiu-se o conceito de fronteiras virtuais móveis. Estas fronteiras são aquelas às quais se deve conectar o modelo equivalente reduzido, e são variáveis, dependendo da escolha das barras que comporão a área de amortecimento, feita pelo operador.

Os modelos híbridos clássicos usados em análise de segurança estática não deixam clara a forma de junção entre os submodelos explícito e reduzido. Neste trabalho

foram propostas 3 formas de se fazer o casamento do modelo híbrido ao sistema interno. Estas formas de junção são também aplicáveis aos modelos híbridos clássicos, que integram modelos baseados em fluxo de carga e modelos reduzidos.

Resultados numéricos de estudos de otimização equivalentes envolvendo os modelos híbridos mostram que as respostas destes modelo, geralmente, são intermediárias entre as respostas dos modelo WE e FCOE. Aumentos nas áreas de amortecimento não são linearmente acompanhados de melhorias nas respostas de modelos equivalentes durante estudos de otimização. É importante avaliar as respostas dos modelos híbridos, levando-se sempre em consideração as formas de casamento, os controles, as restrições, etc.

Revaliando o desempenho de modelos equivalentes tradicionais em estudos de otimização, propondo e discutindo uma metodologia de análise mais eficiente, propondo novas abordagens de modelagem, tratando enfim, dos aspectos de definição de novos conceitos que venham definir melhor o problema de equivalentes externos em estudos de otimização, este trabalho contribui no sentido de tornar mais aplicáveis e viáveis as ferramentas de otimização necessárias aos centros de controles de sistemas de potência.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Monticelli, A. J.; *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*; CEP-EL/Eletróbrás/Edgard Blücher Ltda; São Paulo; 1985.
- [2] Luenberger, D. *Linear and Nonlinear Optimization*; Second Edition, Addison-Wesley, 1984.
- [3] Elgerd, O. I.; *Electric Energy Systems Theory: an introduction*; Mac Graw Hill Company; New York; 1971.
- [4] Morozowski, M.; *Matrizes Esparsas em Redes de Potências: Técnicas de Operação*; LTC; Rio de Janeiro; 1981.
- [5] Zolentkopf, K.; *Bi-Factorization Basic Computational Algorithm and Techniques - Large Sparse Set of Linear Equations*; J. K. Reid; Academic Press; 1971.
- [6] Tinney, W. F. & Walker, J. W.; *Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization*; IEEE pp 1801-1809; 1967.
- [7] Ward, J. B.; *Equivalent Circuits for Power Flow Studies*; AIEE Transactions; vol 68; pp 373-382; New York; 1949.
- [8] Ward, J. B.; *Digital Computer Solution of Power Flow Problems*; AIEE Transactions; vol 75; pp 398-404; New York; June; 1956.
- [9] Dy Liacco, T. E.; *The Adaptive Reliability Control System*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-86; pp 517-530; May; 1967.
- [10] Deckmann, S. & Pizzolante, A. & Monticelli, A. & Stott, B. & Alsac, O.; *Studies on Power System Load Flow Equivalencing*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-99; pp 2292-2300; New York; 1980.
- [11] Deckmann, S. & Pizzolante, A. & Monticelli, A. & Stott, B. & Alsac, O.; *Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-99; pp 2292-2300; New York; 1980.

- [12] **Alvarado, F. L.**; *Determination of External System Topology Errors*; IEEE Trans. on Power Syst.; November, 1981.
- [13] **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.
- [14] **Tavares, P.**; *Equivalente Estático Reduzido. Uma Revisão Crítica do Modelo Ward Estendido.*; Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica; UNICAMP; setembro; 1987.
- [15] **Tavares, P. & Deckmann, S.**; *The One-Step Extended Ward Equivalent For On-Line Static Security Analysis*; SC - 39 CIGRE meeting, Tokyo, october, 1987.
- [16] **Deckmann, S.**; *Equivalentes Estáticos para Sistemas de Energia Elétrica*; Tese de Doutorado; Faculdade de Engenharia Elétrica; UNICAMP.
- [17] **Pizzolante, A. C.**; *Representação de Partes Parcialmente Observáveis de Sistemas de Energia Elétrica*; Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica; UNICAMP.
- [18] **Tinney, W. F. & Brandwajn, V. & Chan S. M.**; *Sparse Vector Method*; IEEE Trans. Power Syst.; vol PAS-104; pp 295-301; february; 1985.
- [19] **Tinney, W. F. & Bright, J. M.**; *Adaptative Reduction for Power Flow Equivalents*; IEEE Trans Power Syst.; PWRS-2; pp 351-360; May; 1987.
- [20] **Nara, K. & Tanaka, K. & Kodama, H. & Shoultz, 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
- [21] **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.
- [22] **Tinney, W. F. & Powell W. L.**; *The REI Approach to Power Network Equivalents*; Proceedings of Power Industry Computer Application Conference, Toronto, Canada, pp 314-320, May, 1977.
- [23] **Monticelli, A. J. & Deckmann S. & Garcia A. & Stott B.**; *Real time External Equivalents for Static Security Analysis.*; IEEE Tans. Power App. Syst.; PAS-98; March/April; 1979.
- [24] **Van Amerongen, R. A. M. & Van Meeteren, H. P.**; *A Generalised Ward Equivalent for Security Analysis*; IEEE Trans. Power Syst.; PAS-101; pp 1519-1525; june; 1982.

- [25] Geisler, K. I. & Bose, A. *State Estimation Based External Network Solution for On-line Security Analysis*; IEEE Trans on Power Syst.; PAS-102; pp 2447-2454; August; 1983.
- [26] Bose A.; *Modeling of External Networks for On-line Security Analysis*; IEEE Trans on Power Syst.; PAS-103; pp 2117-2125; August 1984.
- [27] Geisler, K. I. & Tripathi, N. K. *State Estimation Based External Network Solution: Field Testing*; IEEE Trans on Power Syst.; PAS-104; pp 2126-2132; August; 1985.
- [28] Monticelli, A. & Wu, F.; *A Method that Combines Internal State Estimation and External Network Modelling*; IEEE Trans Power Syst.; PAS-104; January; 1985.
- [29] Bose, A.; *The Effects of External Modeling Errors on On-line Security Analysis*; IEEE Trans. Power Syst.; PWRS-1; February; 1986.
- [30] Lu, C. N. & Liu, K. C. & Vemuri, S.; *An External Network Modeling Approach for On-line Security Analysis*; IEEE Trans. Power Syst.; May; 1990.
- [31] Stott, B. & Alsac, O.; *Fast Decoupled Load Flow*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-73; pp 859-869; may/june; 1974.
- [32] Nepomuceno, L. ; *Equivalentes Externos Tipo Ward Visando Estudos de Otimização em Sistemas de Potência*; Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica; UNICAMP.
- [33] Carpentier, J.; *Contribution a L'etude du Dispatching Economique*; Bull. Soc. Française Electriciens, vol 3, August. 1962.
- [34] Dommel, H. W. & Tinney, W. F.; *Optimal Power Flow Solutions*; IEEE Trans on Power App. and Syst. vol. PAS-87, pp 1866-1876, October, 1968.
- [35] Stott, B. & Hobson, E.; *Power System Security Control Calculations Using Linear Programming, Parts I and II*; IEEE Trans on Power App. Syst., vol. PAS-97, pp 1713-1731, September/October, 1978.
- [36] Stott, B. & Marinho, J. L.; *Linear Programming for Power System Network Security Applications*; IEEE Trans on Power App. Syst., vol. PAS-98, pp 837-848, May/June, 1979.
- [37] Sasson, A. M. & Vilorio, F. & Aboytes, F.; *Optimal Load Flow Solution Using the Hessian Matrix*; IEEE Trans. on Power App. Syst., vol PAS-92, pp 31-41, January/February, 1973.
- [38] Burchett, R. C. & Happ, H. H. & Wirgau, K. A.; *Large Scale Optimal Power Flow*; IEEE Trans on Power App. Syst., vol PAS-101, n. 10, October, 1982.

- [39] Burchett, R. C. & Happ, H. H. & Vierath, D. R.; *Quadratically Convergent Optimal Power Flow*; IEEE trans on Power App. Syst., vol PAS-103, n. 11, November, 1984.
- [40] Sun, D.I. & Ashley, B. & Brewer, B. & Hughes, A. & Tinney, W.; *Optimal Power Flow by Newton Approach*; IEEE trans.Power Syst.; vol. PAS-103, no 10, october, 1984.
- [41] Sun, D.I. & Hughes, B. & Tinney, W. & Bright,J. & Lamont, J.; *Optimal Power Flow Solution by Newton's Method*; In Reactive Power: Basics Problems and Solutions, IEEE Tutorial Course, pp 35-48, 1987
- [42] Sun, D.I. & Demaree, K.D. & Brewer, B.; *Application and Adaptation of Newton for Optimal Power Flow*; In Application of Optimization Methods For Economy/Security Functions in Power System Operations, IEEE tutorial course, pp 14-19, 1990 1990.
- [43] Santos Jr., A. & Deckmann, S. & Soares, S.; *A Dual Augmented Lagrangian Approach For Optimal Power Flow*; IEEE Trans. on Power Syst., vol. 3, pp 1020-1025, August, 1988.
- [44] Vasconcelos, M. T.; *Restrições Funcionais de Desigualdade no FPO Newton Tratadas pelo Método da Continuação*; Tese de Mestrado, FEEC/UNICAMP, Campinas, SP, 1995.
- [45] Rahimi, A.F. & Kato, K. & Ansari, S.H. & Brandwajn, V. & Cauley, G. & Sobajic, D. J. ; *On External Network Model Development*; IEEE Trans. Power App. Syst.; pp 905-910; May; 1996.
- [46] Nepomuceno, L. & Santos Jr., A.; *Minimização de Perdas Via FCO Newton com Representação das Partes Não Observáveis Através do Modelo Ward Estendido*; XI Congresso Brasileiro de Automática - CBA; pp 179-184; São Paulo; 1996.
- [47] Nepomuceno, L. & Santos Jr., A.; *Equivalent Optimization Model For Loss Minimization: Suitable Analysis Approach*; artigo aceito para apresentação no IEEE PES Summer Meeting, Berlin, July, 1997.
- [48] Kato, K. et all *External Network Modeling - Recent Practical Experience*, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, n. 1, pp. 216-228, February, 1994.
- [49] Hao, S.; & Papalexopoulos, A. *External Network Modeling for Optimal Power Flow Applications*, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, n. 2, pp. 825-837, May, 1995.
- [50] Bose, A. & Clements, K. A. *Real Time Modeling of Power Networks*, Proceedings of the IEEE, vol. 75, n. 12, pp 1607-1622, December, 1987.

- [51] Stott, B. & Alsac, O. & Monticelli, A. J. *Security Analysis and Optimization*, Proceedings of the IEEE, vol. 75, n. 12, pp 1623-1644, December, 1987.
- [52] Liu, W. H. E. & Papalexopoulos, A. D. & Tinney, W. F.; *Discrete Shunt Controls in a Newton Optimal Power Flow*; IEEE Trans on Power Syst. vol. 7, n. 4, pp 1509-1518, November 1992.
- [53] Papalexopoulos, A. D. & Imparato, C. F. & Wu, F. F.; *Large Scale Optimal Power Flow: Effects of Inicialization, Decoupling and Discretization*; IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, n. 2, pp 748- 754, May, 1989.
- [54] Chang, S. K. & Marks, G. E. & Kato, K.; *Optimal Real Time Voltage Control*; IEEE Trans on Power Syst. vol. 5, n. 3, August, 1990.
- [55] Carpentier, J. L.; *Optimal Power Flows: Uses Methods and Developments*; IFAC, Rio de Janeiro, 1985.

Apêndice a

Estruturação da Matriz W

As matrizes hessiana e jacobiana possuem a mesma estrutura da matriz de admitância nodal, exceto pelos termos correspondentes aos tap's de transformador. Na matriz lagrangeana, agrupando as variáveis θ, V, λ_P e λ_Q segundo a barra a qual pertencem, conforme apresentado na referência [40] e adotando-se a notação:

$$\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x_i \partial x_j} \Rightarrow X_i X_j ;$$
$$\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x_i \partial \lambda_{P_j}}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x_i \partial \lambda_{Q_j}} \Rightarrow P_j / X_i, Q_j / X_i .$$

obtemos a estrutura apresentada na figura a.1 . Esta estruturação da matriz lagrangeana preserva as características de simetria e esparsidade. Didaticamente, pode-se particionar esta matriz em três submatrizes conforme observado na fig.a.1, onde:

A é uma submatriz simétrica estruturada por ramo com transformador;

B é uma submatriz simétrica estruturada por barra; e

C, C' são submatrizes estruturadas conforme a incidência do ramo com transformador em suas barras terminais.

Seja o sistema exemplo mostrado na figura a.2. A estrutura da matriz W que explora a esparsidade desta matriz para este sistema é mostrada na figura a.3. Os termos não nulos são marcados com um "x", para que se possa visualizar a estrutura da matriz.

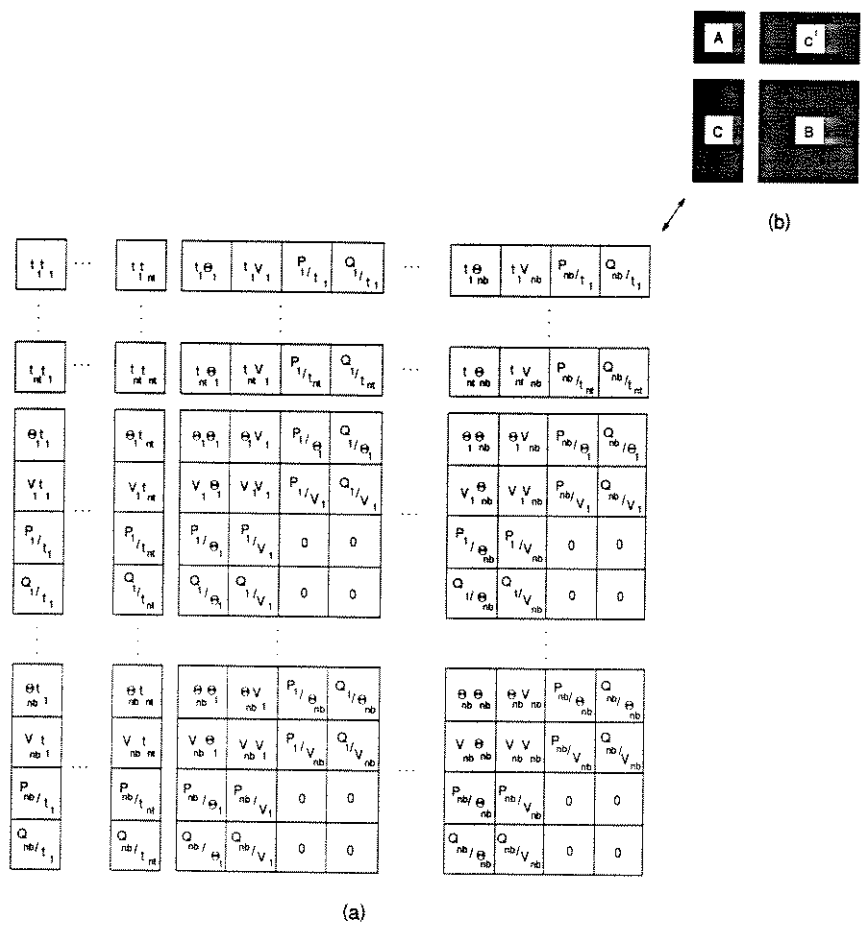


Figura a.1: Estrutura da Matriz Lagrangeana.

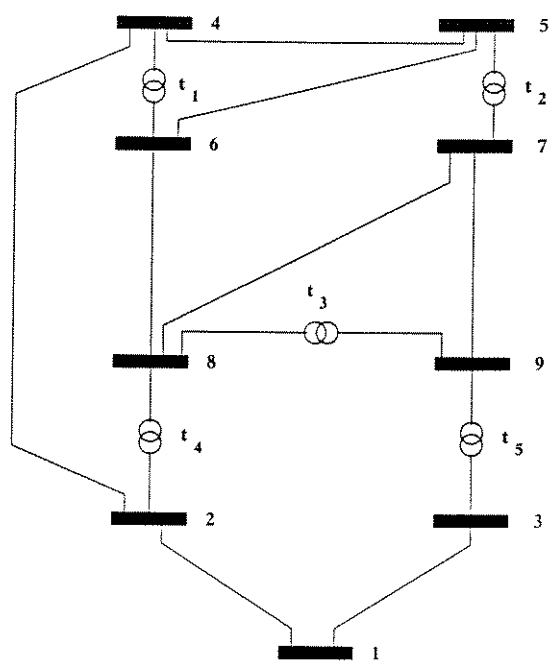


Figura a.2: Sistema exemplo

Matriz Lagrangeana - Sistema Teste (9 barras)

A B C D E						1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	x								x x x x		x x x x			
B		x								x x x x		x x x x	x x x x	x x x x
C			x									x x x x	x x x x	
D				x				x x x x					x x x x	
E					x				x x x x					x x x x

1						x x x x	x x x x	x x x x						
						x x x x	x x x x	x x x x						
						x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0						
						x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0						
2			x			x x x x	x x x x		x x x x				x x x x	
			x			x x x x	x x x x		x x x x				x x x x	
			x			x x 0 0	x x 0 0		x x 0 0				x x 0 0	
			x			x x 0 0	x x 0 0		x x 0 0				x x 0 0	
3				x		x x x x		x x x x						x x x x
				x		x x x x		x x x x						x x x x
				x		x x 0 0		x x 0 0						x x 0 0
				x		x x 0 0		x x 0 0						x x 0 0
4	x						x x x x		x x x x	x x x x	x x x x			
	x						x x x x		x x x x	x x x x	x x x x			
	x						x x 0 0		x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0			
	x						x x 0 0		x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0			
5		x							x x x x	x x x x	x x x x	x x x x		
		x							x x x x	x x x x	x x x x	x x x x		
		x							x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0		
		x							x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0		
6			x						x x x x	x x x x	x x x x		x x x x	
			x						x x x x	x x x x	x x x x		x x x x	
			x						x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0		x x 0 0	
			x						x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0		x x 0 0	
7				x						x x x x		x x x x	x x x x	x x x x
				x						x x x x		x x x x	x x x x	x x x x
				x						x x 0 0		x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0
				x						x x 0 0		x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0
8			x	x							x x x x	x x x x	x x x x	x x x x
			x	x							x x x x	x x x x	x x x x	x x x x
			x	x							x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0
			x	x							x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0
9					x							x x x x	x x x x	x x x x
					x							x x x x	x x x x	x x x x
					x							x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0
					x							x x 0 0	x x 0 0	x x 0 0

Figura a.3: Estrutura da Matriz Lagrangeana para o sistema teste

Apêndice b

Avaliando Alterações na Fase II

Neste ítem exemplifica-se o uso da técnica de parametrização utilizada no tratamento das restrições funcionais de reativos em barras de tensão controlada. Mostra-se aqui que a introdução de determinadas restrições funcionais em potência reativa pode causar alterações bruscas nos controles prejudicando o processo de otimização ou ainda inviabilizando a convergência.

Conforme discutido no capítulo 3, a introdução das restrições funcionais é feita de forma parametrizada, sendo que os valores de γ excursionam de 0 a 1. Seja η o número de intervalos em que se divide o intervalo de 0 a 1. Se por exemplo $\eta = 4$, tem-se que os valores de γ serão incrementados de 0 até 1 em passos de 0.25.

Foram realizados alguns processos de otimização considerando os valores de $\eta = 4$, $\eta = 8$, $\eta = 10$, $\eta = 12$. Os resultados estão mostrados na figura b.1.

Para valores inferiores a $\eta = 8$ não se obteve convergência nos processos de otimização. A introdução de determinadas restrições funcionais nesses casos foi muito brusca, fazendo com que o processo divergisse, conforme se pode mostrar na figura para o caso $\eta = 4$. Percebe-se que nesse caso há uma alteração brusca nos controles. Com o uso de passos de discretização menores, a introdução das restrições funcionais é suavizada, ocorrendo ainda alguns picos nos controles, porém mais suaves. A introdução de forma suave das restrições permitiu a convergência do processo e a determinação do conjunto ativo final. Mostra-se ainda na figura que a escolha dos valores de η não altera a solução final do processo (todos os processo convergiram para o mesmo valor). Ou seja, o caminho seguido não altera a solução do processo de otimização.

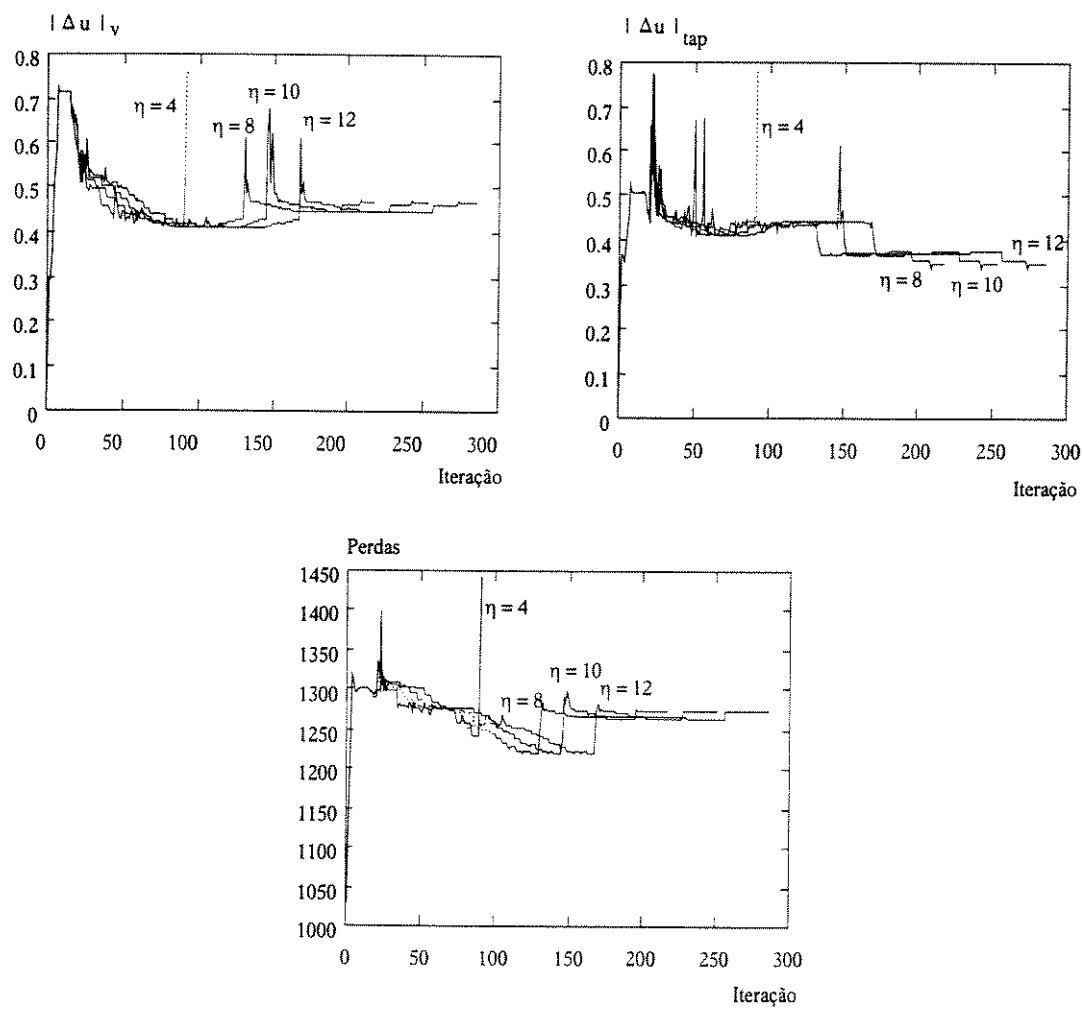


Figura b.1: Alterações nos Passos de Parametrização

Apêndice c

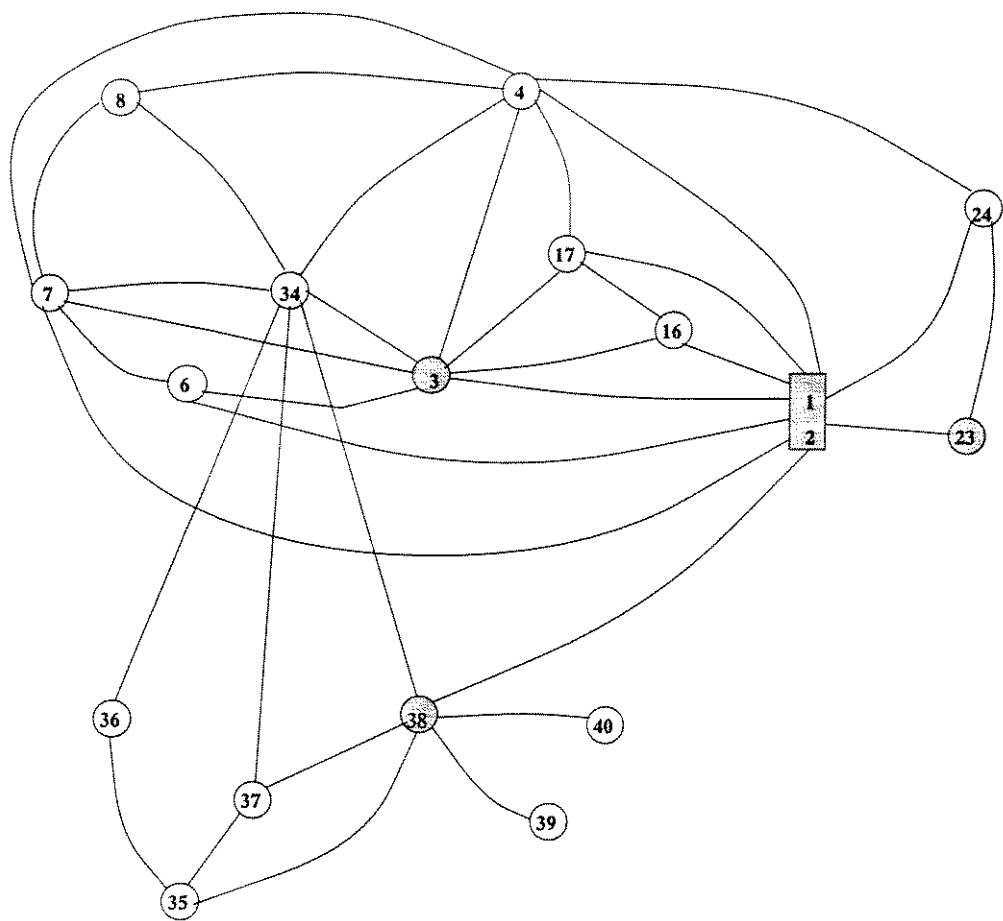
Sistema Sul-Sudeste Brasileiro

O sistema Sul-Sudeste brasileiro (810 barras) foi dividido nos sistemas interno fronteira e externo, a fim de se avaliar o desempenho dos modelos equivalentes em estudos de otimização. As características básicas deste sistema são dadas na tabela c.1.

A divisão do sistema levando-se em conta as concessionárias (as áreas) e suas interligações é dada na figura c.1. A divisão interno/fronteira/externo dada neste trabalho adota como sistema interno todas as barras pertencentes às áreas: 1, 3, 4, 6, 7, 8, 16, 17, 23, 24. Todas as demais barras são consideradas como pertencentes ao sistema fronteira /externo. A divisão conforme acima não deixa controles de tensão ou taps de transformadores na fronteira do sistema.

Área	barras	linhas	barras PV	Tap de Transf.	Geração (MW)	Carga (MW)
interna	262	499	60	52	26588	1772
fronteira	36	11	0	3	0.	5550
externa	512	830	53	150	11340	12845

Tabela c.1: Sistema Sul-Sudeste - Características Básicas



- | | |
|----|--------------------------------------|
| 1 | FURNAS - Geração/Controle de Tensão |
| 2 | FURNAS - Sistema de Transmissão |
| 3 | CESP - Geração e Controle de Tensão |
| 4 | CESP - Sistema de Transmissão |
| 6 | CESP - Região da Sorocabana |
| 7 | CESP - Região do Votuporanga |
| 8 | CESP - Região de Presidente Prudente |
| 16 | ELETROPAULO - 345 Kv |
| 17 | ELETROPAULO - 230 Kv e abaixo |
| 23 | CEMIG - Geração e Controle de Tensão |
| 24 | CEMIG - Sistema de Transmissão |
| 34 | ITAIPU |
| 35 | ELETROSUL - 230 Kv no MT do Sul |
| 36 | ENERSUL |
| 37 | COPEL |
| 38 | ELETROSUL |
| 39 | CELESC |
| 40 | SISTEMA CEEE |

Figura c.1: Sistema Sul-Sudeste - Divisão por Áreas