

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC
Departamento de Engenharia de Sistemas - DENSIS

Modelos Equivalentes de FPO Baseados no Método de Newton com Técnicas de Barreira e Parametrização

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Adriana Luiza Tognete

Mestre em Engenharia Elétrica - FEEC/UNICAMP

Anésio dos Santos Jr.

Orientador

Leonardo Nepomuceno

Co-orientador

Banca Examinadora

Geraldo Roberto Martins da Costa

Katia Campos de Almeida

Takaaki Ohishi

Carlos Alberto de Castro Jr.

Vivaldo Fernando da Costa

Secundino Soares Filho

Campinas, Julho de 2002

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

T572m Tognete, Adriana Luiza
Modelos equivalentes de FPO baseados no método de
Newton com técnicas de barreira e parametrização /
Adriana Luiza Tognete. --Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientadores: Anésio dos Santos Jr. E Leonardo
Nepomuceno.

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

1. Otimização matemática 2. Pesquisa operacional 3.
Sistemas de energia elétrica. I. Santos Jr., Anésio dos. II.
Nepomuceno, Leonardo. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. IV. Título.

*Aos meus pais Darly e Maria de Lourdes
e à memória de meu irmão Iolando*

Agradecimentos

Seria impossível agradecer, em poucas palavras e com justiça, todo o apoio recebido nestes cinco anos de trabalho na FEEC/UNICAMP. Mas é preciso dizer que foram muitos os que me ajudaram: amigos, colegas, funcionários, professores e meus orientadores. Espero que a gratidão que sinto e desejo expressar a todas essas pessoas tenha sido e possa continuar sendo demonstrada nas minhas atitudes em relação a cada uma delas.

De maneira especial, gostaria de mencionar o apoio, carinho, consideração e compreensão de meus pais, irmãos e sogros, bem como o companheirismo, a amizade e o amor do meu marido Ricardo, sem os quais seria impossível a realização deste trabalho.

Gostaria também de agradecer ao povo brasileiro, que financiou meus estudos desde a pré-escola, e à CAPES, pelo suporte financeiro ao programa de doutorado.

Resumo

Estudos de otimização têm sido cada vez mais usados e necessários em centros de controle para a solução de problemas associados à operação de sistemas de energia elétrica. Assim, novos modelos e técnicas mais eficientes de solução de tais problemas têm recebido ampla consideração por parte de pesquisadores. No entanto, o problema de representação de redes externas (modelos equivalentes) não tem recebido a atenção devida. Neste trabalho, estudos mostram a importância da utilização de modelos equivalentes adequados aos estudos de otimização realizados em centros de controle de sistemas interligados. Contudo a representação de uma rede externa que apresente desempenho satisfatório em estudos de otimização é uma tarefa complexa. A complexidade do problema se deve à forma de representação dos controles externos, da função objetivo e restrições. Na literatura o modelo de otimização equivalente denominado Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE) aborda estas questões com bastante sucesso e este trabalho apresenta estudos nos quais tais questões são discutidas. Nesta tese é proposta uma generalização do modelo FPOE, com a introdução de área de amortecimento e aplicação em problemas reativo e ativo/reativo. O modelo proposto é denominado Fluxo de Potência Ótimo Equivalente Generalizado (FPOEG) e os problemas de otimização formulados são resolvidos pelo método de Newton com técnicas de barreira e parametrização. Estudos para avaliação do FPOEG, com os sistemas IEEE-118 barras e Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras, mostram que o desempenho deste modelo é superior ao do FPOE e o seu potencial para aplicação em estudos de otimização realizados em centros de controle.

Palavras-chave: Operação de Sistemas de Energia Elétrica, Fluxo de Potência Ótimo, Modelos Equivalentes.

Abstract

The demand for optimization studies focusing on operational problems related to electrical power systems has increased significantly over the last decade, especially due to their importance to utilities control centers. For this reason, much attention has been paid to the development of new models and solution techniques for these problems. However, the representation of areas outside the system under interest, *i.e.*, the modeling of external networks using equivalent models, is still an open question. The present work is intended to show the importance of adequately using equivalent models in optimization studies of interconnected power systems.

The external network modeling is a difficult problem particularly due to the complexity involved in the representation of local and global controls, operational constraints and performance criteria. This problem has been successfully dealt with in the literature by using a model called Equivalent Optimal Power Flow (EOPF). The present work proposes a generalization of this model, named Generalized Equivalent Optimal Power Flow (GEOPF), which introduces buffer-zone area as well as comprises reactive and active/reactive formulations. The corresponding optimization problems are solved using the Newton method associated with barrier and parametrization techniques. The performance of the GEOPF is evaluated by means of computational simulations which show that this model outperforms the EOPF in academic and real-world problems, thus having a great potential for use in optimization studies performed in control centers.

Keywords: Electrical Power System Operation, Optimal Power Flow, External Equivalent.

Lista de Figuras

3.1	Divisão Básica para Um Sistema Exemplo	29
3.2	Uma Área de Amortecimento para o Sistema Exemplo	30
5.1	Sistemas Interligados	71
6.1	Erros em <i>Taps</i> de Transformadores	100
6.2	Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada	101
6.3	Erros em Geração de Potência Reativa	102
6.4	Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão	103
6.5	Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão	104
6.6	Erros em <i>Taps</i> de Transformadores	105
6.7	Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada	106
6.8	Erros em Geração de Potência Reativa	107
6.9	Erros em Geração de Potência Ativa	108
6.10	Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão	109
6.11	Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão	110
6.12	Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada	113
6.13	Erros em <i>Taps</i> de Transformadores	114
6.14	Erros em Geração de Potência Reativa	115
6.15	Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão	116
6.16	Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão	117
6.17	Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada	119
6.18	Erros em <i>Taps</i> de Transformadores	120
6.19	Erros em Geração de Potência Reativa	121
6.20	Erros em Geração de Potência Ativa	122
6.21	Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão	123
6.22	Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão	124
A.1	Injeções de Potências Equivalentes	133
B.1	Perdas Aparentes e Parâmetros de Barreira	137
B.2	Perdas Ativas e Parâmetros de Barreira	138
B.3	Perdas Reativas e Parâmetros de Barreira	139

Lista de Tabelas

4.1	Sistema IEEE - 118 barras	48
4.2	Características Básicas (GG) - Problema Reativo	49
4.3	Características Básicas (IG) - Problema Reativo	50
4.4	Características Básicas (II) - Problema Reativo	51
4.5	Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (GG) - Problema Reativo .	52
4.6	Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (IG) - Problema Reativo .	52
4.7	Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (II) - Problema Reativo . .	53
4.8	Média de Desvios - Problema Reativo	54
4.9	Características Básicas (GG) - Problema Ativo/Reativo	55
4.10	Características Básicas (IG) - Problema Ativo/Reativo	56
4.11	Características Básicas (II) - Problema Ativo/Reativo	57
4.12	Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (GG) - Problema Ativo/Reativo	58
4.13	Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (IG) - Problema Ativo/Reativo	58
4.14	Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (II) - Problema Ativo/Reativo	59
4.15	Média de Desvios - Problema Ativo/Reativo	59
4.16	Desvios Médios - Problema Reativo (IEEE-118 barras)	63
4.17	Desvios Médios - Problema Reativo (SSB-810 barras)	63
4.18	Desvios Médios - Problema Ativo/Reativo (SSB-810 barras)	64
4.19	Desvios Médios- Com Casamento	66
4.20	Desvios Médios- Sem Casamento	66
5.1	Divisão do SSB - 810 barras em 2 Subsistemas	71
5.2	Divisão do SSB - 810 barras em 3 Subsistemas	71
5.3	Divisão do SSB - 810 barras em 4 Subsistemas	72
5.4	Tensões em Barras de Geração - Otimização Global	75
5.5	Transformadores com Controle de Tap - Otimização Global	75
5.6	Tensões em Barras de Geração - $FPOE_1^A$	76
5.7	Transformadores com Controle de Tap - $FPOE_1^A$	77
5.8	Tensões em Barras de Geração - $FPOE_2^A$	77
5.9	Transformadores com Controle de Tap - $FPOE_2^A$	78
5.10	Perdas de Potência (Duas Áreas)	78
5.11	“Desperdícios” de Potência no Sistema Interligado (Duas Áreas)	79

5.12	Impacto Operacional de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização (Duas Áreas)	80
5.13	Perdas de Potência (Três Áreas)	82
5.14	Impacto Operacional de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização (Três Áreas)	83
5.15	Perdas de Potência (Quatro Áreas)	85
5.16	Impacto Operacional de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização (Quatro Áreas)	85
6.1	Dados Básicos (IEEE-118 barras)	89
6.2	Perdas de Potência (IEEE-118 barras)	89
6.3	Número de Iterações (IEEE-118 barras)	89
6.4	Barras de Geração (F1) - (IEEE-118 barras)	90
6.5	Transformadores com Controle de <i>Tap</i> (F1) - (IEEE-118 barras)	90
6.6	Barras de Geração (F2) - (IEEE-118 barras)	91
6.7	Transformadores com Controle de <i>Tap</i> (F2) - (IEEE-118 barras)	91
6.8	Evolução do Parâmetro de Homotopia (F2) - (IEEE-118 barras)	92
6.9	Relaxação de Restrições de Desigualdades Ativas - (IEEE-118 barras)	93
6.10	Sistema SSB-810 barras	93
6.11	Dados Básicos (SSB-810 barras)	94
6.12	Perdas de Potência (SSB-810 barras)	94
6.13	Número de Iterações (SSB-810 barras)	94
6.14	Barras de Geração (F1) - (SSB-810 barras)	95
6.15	Transformadores com Controle de <i>Tap</i> (F1) - (SSB-810 barras)	95
6.16	Barras de Geração (F2) - (SSB-810 barras)	96
6.17	Transformadores com Controle de <i>Tap</i> (F2) - (SSB-810 barras)	96
6.18	Evolução do Parâmetro de Homotopia - (SSB-810 barras)	97
6.19	Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Reativo)	99
6.20	Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Ativo/Reativo)	105
6.21	Sistema SSB-810 barras	111
6.22	Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Reativo)	112
6.23	Avaliação de Perdas no Sistema Interno (FPOEG Reativo)	112
6.24	Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Ativo/Reativo)	118
6.25	Avaliação de Perdas no Sistema Interno (FPOEG Ativo/Reativo)	118

Lista de Siglas

- **FC:** Fluxo de Carga.
- **OG:** Otimização Global.
- **FPO:** Fluxo de Potência Ótimo.
- **FPOE:** Fluxo de Potência Ótimo Equivalente.
- **FPOEG:** Fluxo de Potência Ótimo Equivalente Generalizado.
- **GG:** padrão de otimização em que os controles globais (de todo o sistema interligado) são utilizados no atendimento de um critério de otimização imposto ao sistema como um todo. Consideram-se restrições globais.
- **IG:** padrão de otimização em que os controles globais são utilizados no atendimento de um critério de otimização imposto somente à área interna. Consideram-se restrições globais.
- **II:** padrão de otimização em que apenas os controles internos são considerados no atendimento de um critério de otimização imposto à area interna. Os controles da área externa são fixados em valores preestabelecidos. Desconsideram-se as restrições na área externa, exceto a demanda de potência que é atendida no sistema como um todo.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextuação do Problema de Modelos Equivalentes	1
1.2	Apresentação da Tese	4
2	Representação de Áreas Externas em Modelos de FPO	7
2.1	A Representação de Áreas Externas	7
2.2	Modelos Tradicionais de Representação de Áreas Externas	9
2.3	Modelos de Representação de Áreas Externas para Estudos de Otimização	11
2.4	Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE)	13
2.4.1	Formulação de Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE)	13
2.4.2	Metodologia de Solução	19
2.4.3	Metodologia de Análise de Modelos de Otimização Equivalentes	21
3	FPOE Generalizado Resolvido pelo Método de Newton com Técnicas de Barreira e Parametrização	25
3.1	Preliminares	25
3.2	Formulação do FPOEG	26
3.3	Função Objetivo e Restrições do FPOEG	30
3.3.1	Função Objetivo	30
3.3.2	Restrições do Problema	32
3.4	Tratamento das Restrições de Desigualdade	34
3.5	Solução pelo Método de Newton	37
3.6	Algoritmo Básico de Solução do FPOEG	41
4	Avaliação de FPO Equivalentes e Casamento na Fronteira	43
4.1	Introdução	43
4.2	Padrões de Otimização	43
4.3	Avaliando Referências e Alternativas de Modelagem para o FPOE	46
4.3.1	Estudos de Avaliação no Sistema IEEE-118 Barras	47
4.3.2	Conclusões	59
4.4	Avaliando Processo de Casamento na Fronteira	61
4.4.1	Avaliação de Influências de Incertezas Externas na Determinação de Injeções de Potências Equivalentes	62

4.4.2	Avaliação da Importância do Procedimento de Casamento na Fronteira em Processos de FPOE	65
4.4.3	Conclusões	67
5	Avaliação do Desempenho de Modelos Equivalentes Externos em Estudos de Otimização	69
5.1	Introdução	69
5.2	Estudos de Casos	70
5.2.1	Metodologia de Avaliação de Impacto Econômico de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização	72
5.2.2	Estudo de Caso I	73
5.2.3	Estudo do Caso II	80
5.2.4	Estudo do Caso III	83
5.3	Conclusões	85
6	Desempenho do Algoritmo de Solução do FPOEG e Estudos com Áreas de Amortecimento	87
6.1	Introdução	87
6.2	Estudos Envolvendo o Algoritmo de Otimização Proposto	88
6.2.1	Sistema IEEE-118 barras	88
6.2.2	Sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras	93
6.2.3	Conclusões	97
6.3	Avaliação da Área de Amortecimento Proposta	98
6.3.1	Estudos com o Sistema IEEE-118 Barras	98
6.3.2	Estudos com Sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 Barras . . .	111
6.3.3	Conclusões	124
7	Conclusões	127
	Bibliografia	129
A	Casamento na Fronteira	133
B	Parâmetro de Barreira	135

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextuação do Problema de Modelos Equivalentes

Analisar ou estudar uma área restrita, dentro de um sistema elétrico de potência com muitas conexões e submetido a várias configurações e condições de carga, sempre foi necessário em estudos de planejamento e operação de sistemas de energia elétrica. Distúrbios, como saída de equipamentos ou linhas, podem ocorrer em qualquer ponto de um sistema elétrico interligado, e embora locais, ocasionalmente podem causar mudanças nas condições operacionais de regiões eletricamente vizinhas a eles. Os primeiros modelos de representação de áreas, apresentados na literatura, para análise de desempenho de redes elétricas em regime permanente e em estudos de planejamento e operação, surgiram devido às dificuldades relacionadas com a necessidade de um grande número de circuitos analisadores e de fontes de tensão para representar analogicamente partes da rede com grande dimensão e com muitas conexões (Ward, 1949).

Com a evolução dos sistemas de energia elétrica, que cada vez mais tornaram-se interligados e sobrecarregados, novos conceitos de segurança foram adotados na operação destes sistemas. O desenvolvimento tecnológico permitiu a introdução dos centros computadorizados de gerenciamento de sistemas de energia (*Energy Management Systems*), para os quais, modelos de representação de áreas chamados Equivalentes Externos (Dopazo et al., 1979), (Monticelli et al., 1979), foram desenvolvidos para auxiliar em estudos de planejamento e análise de segurança *on line*. Em estudos de planejamento o uso de equivalente externo resulta em redução da dimensão do problema, então em vantagem computacional. Em aplicações *on line*, o objetivo básico é tentar contornar os problemas de falta de informações e de dados imprecisos. Atualmente, devido aos grandes avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas, são menores do ponto de vista técnico, os problemas que envolvem aquisição e processamento de informações, no entanto, como as empresas competem na utilização de recursos de sistemas interligados, obter informações sobre o estado de operação de sistemas externos depende de relações

contratuais entre empresas vizinhas (Kato et al., 1992).

Os modernos centros de controle de sistemas de energia elétrica, possuem programas computacionais que executam em tempo real diversas funções para análise do estado de operação da rede e de seu nível de segurança. Essas funções, de maneira geral, classificam-se em: funções de monitoramento, de análise de contingências e de análise corretiva/preventiva. Para cumprirem seus objetivos, essas funções contam com equipamentos digitais de telemetria, equipamentos de medição de grandezas elétricas, e com informações de *status* de dispositivos de sistemas elétricos, etc. Embora certas funções, tais como configuração da rede e estimação de estado, possam ser realizadas apenas com informações da rede que está sendo controlada e supervisionada (denominada rede interna), outras funções necessitam das informações das reações da rede total interligada. Otimização da operação e análises de estabilidade e de contingências, são algumas funções avançadas, usadas em centros de controle, que não devem prescindir de informações de regiões do sistema de energia elétrica interligado não monitoradas pelo centro de controle, denominadas redes externas.

Gerenciar o conflito entre segurança, investimentos e custo de operação, é o grande desafio das empresas de energia elétrica em ambientes economicamente competitivos. Não obstante, competitividade não deve significar perda de confiabilidade e aproveitamento indiscriminado de recursos. Um sistema elétrico de potência é constituído de uma rede elétrica complexa que interliga unidades geradoras de energia com pontos de consumo. Muitos estudos podem ser feitos para aumentar a eficiência de sistemas elétricos de potência, e entre eles os estudos de otimização, que procuram determinar alterações de controles do sistema que possam atender critérios de operação e restrições específicas. Desta forma, a representação de áreas externas, ou seja, o uso de modelos equivalentes em aplicações de otimização em centros de controle torna-se necessário para a operação de sistemas interligados (Momoh et al., 1997).

Na prática, centros de controle de empresas de energia elétrica convivem com falta de informações sobre os sistemas interligados, e empregam modelos equivalentes da rede externa associados ao modelo da rede que operam (Kato et al., 1994). A referência (Tinney et al., 1988) apontou algumas prováveis deficiências na utilização de modelos equivalentes tradicionais desenvolvidos para aplicações de análises de contingências, em estudos de otimização. As deficiências apresentadas em decorrência do uso de modelos equivalentes tradicionais em problemas de Fluxo de Potência Ótimo discutidas em (Tinney et al., 1988), tais como de representação de restrições operacionais e de parâmetros de rede na área externa, foram também confirmadas em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1996), onde também são propostos modelos equivalentes desenvolvidos para aplicações de estudos de otimização em centros de controle de sistemas de energia elétrica. Os resultados de testes realizados em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) para a avaliação do grau de representatividade de modelos equivalentes externos, evidenciam que alterações em controles exigem maior nível de capacidade de resposta do modelo equivalente que as alterações pontuais (por exemplo, saída de linha de transmissão) ocorridas durante

estudos de análise de segurança. Tais resultados estimulam o desenvolvimento de modelos equivalentes específicos adequados a processos de otimização, tal como o modelo proposto neste trabalho.

A liberalização dos mercados de energia suscita atitudes competidoras entre companhias e necessidade de se operar o sistema de forma flexível e muito controlada. Assim cada vez mais têm-se dado importância à otimização de recursos disponíveis e aumentado a demanda por novos modelos e técnicas eficientes para estudos de otimização. Teoricamente, num sistema em que a nova política de acesso aberto à transmissão (*Transmission Open Access*) é plenamente adotada, os participantes do mercado de energia elétrica, podem usar sem discriminação os serviços de transmissão, e esses usuários devem pagar um preço justo por tais serviços. Para um cenário como este, ainda não se tem regras muito claras e ainda não está claro inclusive, como o despacho de geração deve ser feito. Espera-se que uma companhia de geração de energia deva considerar os custos do serviço de transmissão ao fazer contratos de venda de energia com seus consumidores, além disso, o operador independente do sistema deve utilizar critérios técnicos em suas metas e decisões, ao passo que as companhias buscam critérios econômicos (Fang e David, 1999). No entanto, em meio a diversos questionamento, muitas idéias novas têm sido propostas na literatura, e nota-se uma propensão em se considerar representação da transmissão em planejamento e despacho de geração (Chattopadhyay, 1998), (Marwali e Shahidehpour, 2000b), em se criar interface entre sistemas que realizam tais tarefas e os dos centros computadorizados de gerenciamento de sistemas de energia (*Energy Management Systems*) (Cheung et al., 2000), (Shawwash et al., 2000), e em necessidade de realização de estudos de despacho de geração em tempo real (Marwali e Shahidehpour, 2000a). Assim, espera-se que problemas reativos e ativo/reativos, para os quais foram desenvolvidos o modelo proposto neste trabalho, sejam constantes na operação de sistemas.

O modelo de privatização do setor elétrico no Brasil traz a expectativa de um cenário competitivo sujeito a regras que regulamentam o compartilhamento de recursos. Neste momento de grande expectativa, muitos trabalhos de pesquisa são desenvolvidos, buscando amenizar o risco de racionamento de energia e explorar novas fontes renováveis de energia, e procurando otimizar o uso dos recursos já disponíveis, como por exemplo, evitando-se perdas desnecessárias de potência no sistema elétrico de transmissão de energia. O racionamento de energia (2001 e 2002) e os últimos blecautes ocorridos no Brasil (março de 1999 e janeiro de 2002) são efeitos, entre outras causas, da falta de investimentos derivada de determinações político-econômicas elaboradas para a nova regulamentação (ainda em andamento) do setor elétrico. A falta de investimentos em sistemas interligados significa protelar construção de novas unidades geradoras de energia e novas linhas de transmissão, e faz com que a utilização dos recursos existentes no sistema seja aumentada de forma que os equipamentos operem próximos de seus limites de estabilidade. Nesta situação, agrava-se o risco de colapso de tensão e a necessidade de interrupção de fornecimento de energia elétrica, e torna-se muito mais premente o aproveitamento eficiente de recursos. Este trabalho tem o propósito de contribuir com

o desenvolvimento do setor elétrico no Brasil, trazendo novas discussões sobre a operação de sistemas de energia elétrica e que podem ser levadas em conta numa análise sobre regulamentação do uso e operação destes sistemas. Um sistema confiável, seguro e operando de forma eficiente significa utilização racional de recursos energéticos disponíveis, permitindo que impactos ambientais e distorções no preço da energia elétrica sejam minimizados.

Em sistemas elétricos de países como o Brasil e Estados Unidos da América, que por razões geográficas possuem muitas interligações e grande número de empresas de energia competidoras que compartilham um mesmo sistema de transmissão, a falta de informação precisa sobre sistemas vizinhos é ainda um problema em busca de solução (Singh et al., 1997). Desta forma, centros de controle de sistemas interligados necessitam de modelos mais robustos de representação da rede elétrica externa interligada, que os auxiliem na tarefa de obter confiabilidade e eficiência na operação de seus sistemas. O uso de modelos equivalentes possibilita obter conhecimento de influências das condições operacionais das redes externas interligadas, circunstância indispensável para manter intercâmbios de recursos entre as empresas que obedecem relações contratuais específicas. Num contexto em que várias empresas competidoras compartilham recursos de um sistema de energia elétrica interligado, o modelo equivalente proposto nesta tese pode contribuir para o aperfeiçoamento do desempenho, não somente de cada empresa, mas do sistema elétrico interligado como um todo.

1.2 Apresentação da Tese

Aplicações de otimização em centros de controle de sistemas interligados devem levar em consideração as áreas externas ao sistema de interesse. Embora a deficiência de modelos de otimização em representar áreas externas tenha sido apontada em (Tinney et al., 1988) e (Momoh et al., 1997), a importância do impacto da utilização de modelos equivalentes em estudos de otimização não é devidamente demonstrada pela incidência com que este tema é abordado tanto no meio acadêmico como nas empresas do setor elétrico. Neste trabalho são apresentados estudos originais que evidenciam a importância do uso de modelos equivalentes adequados aos estudos de otimização realizados em centros de controle de sistemas interligados. E propõe-se uma generalização do modelo Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE) apresentado em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) para estudos de otimização reativa, com introdução de áreas de amortecimento e aplicação em problemas reativo e ativo/reativo. O modelo proposto é denominado Fluxo de Potência Ótimo Equivalente Generalizado (FPOEG). A apresentação do trabalho realizado é feita em sete capítulos e um apêndice, como descrito a seguir:

Capítulo 1: Neste capítulo o problema de modelos equivalentes é inserido no contexto da operação de sistemas interligados, expondo a motivação e a importância

deste trabalho. Os objetivos, propostas e organização do trabalho, também são apresentados.

Capítulo 2: Neste capítulo são apresentados conceitos e definições relacionados com a representação de redes externas. É feita uma breve revisão bibliográfica dos principais modelos equivalentes externos tradicionais propostos para análise de segurança. Os dois modelos equivalentes externos desenvolvidos para estudos de otimização propostos em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), são abordados. Destaque é dado ao modelo FPOE proposto em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997).

Capítulo 3: Neste capítulo apresentam-se a formulação e metodologia de solução do modelo FPOEG propostos neste trabalho. São relatadas as experiências obtidas em estudos em que a metodologia de solução do FPOE é usada, e isto é feito para mostrar a importância das inovações propostas.

Capítulo 4: Neste capítulo são apresentados estudos para análises críticas de modelos de otimização equivalentes. São analisados: referência de comparação para avaliação de desempenho de modelos, validação de modelos e influência do procedimento de casamento na fronteira no desempenho destes modelos. Os estudos são realizados com o sistema teste IEEE-118 barras.

Capítulo 5: Estudos originais para avaliação do impacto econômico do uso de modelos equivalentes externos em estudos de otimização em centros de controle de sistemas interligados são apresentados neste capítulo. Estes estudos são realizados com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras.

Capítulo 6: Neste capítulo são apresentados estudos que evidenciam características da metodologia de solução proposta e estudos que demonstram a melhoria de desempenho de cálculos de controles equivalentes internos obtida com a introdução da área de amortecimento proposta. Os estudos são realizados com os sistemas IEEE-118 barras e Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras.

Capítulo 7: Neste capítulo as conclusões obtidas neste trabalho, bem como perspectivas de trabalhos futuros, são apresentadas.

Apêndice A: Neste apêndice é apresentado o procedimento de casamento na fronteira, artifício amplamente utilizado em estudos envolvendo modelos equivalentes e realizados em tempo real.

Apêndice B: Neste apêndice são apresentadas características de processos de otimização realizados com o FPOEG, associadas aos parâmetros de barreira. A técnica de barreira é proposta neste trabalho, para tratar restrições lineares de desigualdade do problema de otimização.

Capítulo 2

Representação de Áreas Externas em Modelos de FPO

Conceitos e definições de termos freqüentemente utilizados neste trabalho são apresentados neste capítulo. É feita uma revisão bibliográfica dos principais modelos equivalentes externos tradicionais apresentados na literatura. O modelo equivalente reduzido, desenvolvido para estudos de otimização e proposto em (Hao e Papalexopoulos, 1995), é brevemente descrito. Destaque é dado à representação de áreas externas, feita conjuntamente com um modelo de otimização da área interna do sistema, proposta em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), através de um problema de otimização denominado Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE). O Fluxo de Potência Ótimo Equivalente Generalizado (FPOEG) e sua metodologia de solução propostos neste trabalho, resultaram de estudos que buscaram o aprimoramento do FPOE, no sentido de torná-lo viável e aplicável em procedimentos de otimização em centros de controle. Formulações de problemas de FPOE, assim como a metodologia de solução e de avaliação propostas em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) para estes problemas, são descritas sucintamente neste capítulo.

2.1 A Representação de Áreas Externas

A representação de áreas externas por meio de modelos equivalentes pode ser requerida, basicamente, por dois motivos: necessidade de redução da dimensão do problema de análise e falta de informações sobre o estado de operação atual de parte da rede elétrica interligada. Desta forma, de acordo com a finalidade específica para a qual a representação da rede externa é elaborada, podem-se estabelecer critérios diferentes na definição de área externa e do modelo usado para representá-la. Uma divisão de sistema em áreas interna, fronteira e externa, pode ser realizada considerando-se aspectos geográficos e de observabilidade. Assim, o sistema interno considerado, pode corresponder a área sob jurisdição de um determinado centro de controle (critério geográfico), ou a uma área sobre a qual este centro de controle é capaz de estabelecer supervisão e obter

informações operacionais a partir de um processo de estimação de estado (critério de observabilidade).

Em aplicações em tempo real, em centros de operação de sistemas de energia elétrica, é razoável que se considere o critério da observabilidade para definir área interna (observável) e área externa (não observável). Uma área é considerada observável, quando é possível obter-se um conjunto de medidas suficientes para a determinação de seu estado (magnitude e ângulos de tensões para cada uma das barras). A denominação de área interna, neste trabalho, refere-se a uma área observável, podendo ser geograficamente mais restrita ou mais ampla que a área sob o controle e jurisdição de um centro de operação, ao qual está sujeita a monitoramento e ações de controle. A área de fronteira é composta por barras da área observável que possuem ligações elétricas diretas com as barras da área não observável. Assim, área externa fica definida como sendo a área não observável, ou seja, a área sobre a qual o centro de controle de operação não é capaz de obter um estado estimado confiável.

O estado estimado confiável de uma área observável é obtido por programas computacionais que operam *on line*, denominados estimadores de estado. Para fazer a estimação confiável de estado é imprescindível que um centro de controle conte com um sistema supervisório (por exemplo, o SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*)), para obter informações sobre o estado atual da rede e transferi-las para o centro de controle. Um sistema supervisório coleta informações remotas (por toda a área observável) que são processadas na execução de funções avançadas (programas computacionais de execução *on line*), como o configurador e estimador de estado; assim, com tais informações pode-se obter um modelo confiável da rede supervisionada em tempo real.

O configurador determina a topologia da rede supervisionada utilizando informações sobre o *status* atual das chaves e disjuntores que conectam os vários componentes da rede elétrica. O estimador de estado fornece um estado atual confiável da área supervisionada. Ele utiliza a topologia da rede fornecida pelo configurador, o conhecimento sobre parâmetros da rede e as telemedidas de grandezas analógicas. O estimador de estado usa um conjunto de medidas redundantes para estimar o estado de uma área de interesse. Este conjunto de medidas é obtido em tempo real e compõe-se de medidas analógicas de magnitudes de tensão, injeções de potência reativa e ativa, fluxos de potência ativa e reativa. Caso ocorra uma alteração topológica do sistema e/ou falhas no sistema de telecomunicação da rede, o conjunto de medidas fornecidas em tempo real pode não ser suficiente para que o estado da área de interesse seja estimado com confiabilidade.

Utilizando-se os dados obtidos pelo configurador e pelo estimador de estado, pode-se então obter um modelo confiável da rede elétrica supervisionada (neste trabalho, área interna) utilizando-se de um conjunto de equações e inequações algébricas não lineares (modelagem estática para análise de regime permanente). Estas equações e inequações, representam os componentes básicos de um sistema de energia elétrica (geradores, cargas, reatores, capacitores, transformadores, linhas de transmissão, etc.), bem como

seus limites operacionais (limites na capacidade de geração, limites nas magnitudes de tensão, limites nos valores dos *taps* dos transformadores, etc.) (Monticelli, 1983). Embora, estas mesmas equações e inequações possam ser usadas para modelar explicitamente a rede externa, a falta e/ou as incertezas das informações não permitem a determinação de um estado externo confiável.

A modelagem explícita da área não supervisionada ou não observável (neste trabalho, área externa) é feita através de uma representação aproximada de seu estado atual. Em tempo real, como não se dispõe de dados suficientes e confiáveis sobre todo o sistema interligado, utiliza-se de dados obtidos em previsão de carga e despacho de geração, na composição do modelo da área externa (Geisler e Bose, 1983). Através de previsões de demanda, no sistema como um todo, e utilizando-se fatores de distribuição de carga previamente calculados (baseados em curvas de consumo médio horário), tanto gerações de potência ativa como cargas podem ser definidas na representação da área externa. Perfis de tensão em barras controladas podem ser determinados a partir de curvas que descrevem tensão em função de carregamento, *taps* de transformadores podem ser setados em valores básicos. As informações sobre a topologia da rede externa e seus parâmetros, podem ser constantemente e mais facilmente atualizadas, pois a configuração da rede varia muito lentamente em comparação com as alterações da carga e do estado. A topologia de áreas externas pode ser atualizada a partir de informações obtidas via telefone e/ou *links* de dados.

Em síntese, modelos equivalentes são obtidos a partir de informações sobre topologia, programação e previsões de geração e de carga, e comunicação manual ou via dispositivos digitais de dados; e são validados através de simulações. Cabe salientar que a obtenção destes modelos depende de outros (de previsão de carga, despacho de geração, etc.) que podem não representar adequadamente o problema que se propõe resolver.

2.2 Modelos Tradicionais de Representação de Áreas Externas

A grande maioria de equivalentes externos foi desenvolvida para análise de segurança estática. Estes são aqui denominados modelos equivalentes clássicos ou tradicionais, e entre eles destacam-se: os modelos reduzidos, (Monticelli et al., 1979), (Dopazo et al., 1979), (van Amerongen e van Meeteren, 1982), (Lo et al., 1997) e (Fu e Chung, 2000), obtidos a partir de processos de redução dos circuitos elétricos externos; e os modelos não reduzidos, baseados em fluxo de carga e estimação de estado (Geisler e Bose, 1983) e (Kato et al., 1994); entre outros, (Price et al., 1975), (Dopazo et al., 1977), (Savulescu, 1981) e (Monticelli e Wu, 1985). Os modelos equivalentes tradicionais oferecem resultados satisfatórios para estudos de análise de segurança (Deckmann et al., 1980a), (Deckmann et al., 1980b), (Housos e Irisarri, 1981), (Bose, 1984), e (Bose, 1986) mas quando associados a estudos de otimização apresentam erros inaceitáveis (Hao e

Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1997).

Os modelos de representação de áreas externas propostos na literatura, podem ser classificados, basicamente, em modelos reduzidos e não reduzidos. Os modelos reduzidos são adequados a aplicações em que se faz necessário diminuir a dimensão do problema obtendo-se assim vantagens no esforço computacional envolvido. Tais aplicações, são usadas em estudos de planejamento envolvendo redes elétricas muito grandes, que são reduzidas para viabilizar a execução de estudos que demandam muito tempo computacional. Entre os modelos tradicionais reduzidos, destaca-se na literatura e nas empresas, o modelo não linear Ward estendido (Monticelli et al., 1979), baseado na eliminação de Gauss das equações associadas à rede externa, gerando um conjunto de equações equivalentes representando elementos de circuitos (ramos equivalentes, admitâncias e barras PV fictícias). Este modelo introduz um dispositivo de ajuste das injeções de potência reativa das barras de fronteira usando ligações e barras PV fictícias para representar as reações das barras PV externas eliminadas durante o processo de redução. O modelo reduzido Ward estendido considera as reações externas de forma desacoplada em relação a parte ativa e a parte reativa de resposta do sistema externo. Neste modelo são calculadas injeções de potência equivalentes que são conectados às barras de fronteira num procedimento denominado de casamento na fronteira. Estas injeções de potência equivalentes garantem o acoplamento da rede externa à rede interna, impedindo que os estados da rede interna e fronteira (obtidos pelo estimador de estado) sejam afetados pela substituição da rede externa pelo modelo equivalente reduzido.

Entre os modelos tradicionais não reduzidos destacam-se: os modelos baseados em fluxo de carga e os modelos baseados em estimação de estado. Nos modelos tradicionais não reduzidos, a rede externa é representada explicitamente através de equações algébricas aproximadas. Os dados externos usados na modelagem da rede aproximada pelo modelo de fluxo de carga podem ser definidos com o auxílio de modelos de previsão de carga para determinar o carregamento, modelos de despacho econômico para determinar as gerações a partir da carga prevista, e também informações sobre o sistema externo podem ser obtidas *on line*. Embora não seja conhecido o estado da rede externa, a configuração externa pode ser facilmente atualizada, pois ela se altera mais lentamente que as cargas e o estado, ou seja, as alterações em topologia podem ser obtidas por algum outro meio de comunicação (Kato et al., 1992). As desvantagens do modelo baseado em fluxo de carga são: erros anormalmente grandes nos *mismatches* de potência resultante da comparação das injeções da fronteira calculadas pelo processo de casamento na fronteira e as injeções calculadas pelos modelos de previsão de carga e de despacho econômico, e exige grande esforço computacional de manutenção e atualização dos dados da rede externa (Bose, 1984). Nestes modelos, a topologia é o fator principal de erros, no entanto podem ser tolerados desde que os componentes correspondentes estejam eletricamente afastados da fronteira.

Em aplicações em tempo real ou em que exista erro de informação sobre a topologia da rede externa, faz-se necessário a utilização de um processo de obtenção de injeções de potências equivalentes, que são atribuídas às barras de fronteira para impe-

dir que os erros de modelagem da rede externa se propaguem para a rede interna. Este procedimento é muito importante na composição dos modelos equivalentes externos tradicionais e tem o objetivo de fazer um ajuste do modelo equivalente a um estado atual da rede interna (dado por um estimador de estado). Este ajuste de modelo, denominado casamento na fronteira, é feito calculando-se injeções equivalentes de potência nas barras de fronteira (Deckmann et al., 1980b). Para obter as injeções equivalentes de potências ativa e reativa, resolve-se um problema de fluxo de carga para a rede externa (a rede externa pode ser representada por um modelo equivalente reduzido ou não-reduzido), considerando-se as barras de fronteira como barras de folga (*slack*) para as quais especificam-se as magnitudes e ângulos de tensões nos valores do caso básico (valores obtidos pelo estimador de estado). Desta forma, as injeções equivalentes de potência obtidas pela solução do fluxo de carga são inseridas na rede formada pelas redes interna e externa (equivalente), compondo assim um modelo equivalente externo.

2.3 Modelos de Representação de Áreas Externas para Estudos de Otimização

A referência (Tinney et al., 1988) apontou algumas prováveis deficiências do fluxo de potência Ótimo na utilização de modelos equivalentes tradicionais. As deficiências apresentadas em decorrência do uso de modelos equivalentes tradicionais em problemas de fluxo de potência ótimo discutidas em (Tinney et al., 1988), foram também confirmadas em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1996). Neste último, mostrou-se através de resultados obtidos em estudos com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras, que os modelos equivalentes tradicionais, quando associados ao problema de fluxo de potência ótimo reativo, representam áreas externas de maneira insatisfatória.

A tarefa dos modelos equivalentes em estudos de otimização é muito mais complexa do que em análises estáticas de segurança. Em análise de contingências, por exemplo, as alterações no sistema estudado são pontuais, tais como saída de uma linha, de um gerador ou de um transformador. A função do modelo equivalente é a de simplesmente representar as reações externas associadas a tais alterações (estas, previamente conhecidas) na determinação de um novo estado da rede interna que atenda as gerações e cargas.

Nos estudos de otimização as alterações em controles determinadas pelo processo de otimização não são previamente conhecidas, e ocorrem distribuídas por todo o sistema estudado. Durante o processo iterativo de tais estudos, várias atualizações são realizadas em variáveis de controle e o modelo equivalente deve ser capaz de responder a estas alterações. O cálculo de controles do sistema interno com modelo equivalente deve fornecer um ponto de operação ótimo muito próximo da solução produzida numa situação em que se dispõe de informação do sistema completo. Neste caso, o modelo de otimização para calcular alterações de controles no sistema interno deve ser um modelo

de otimização equivalente, capaz de modelar as reações a alterações em controles na determinação de um ponto de operação que atenda um critério de otimização.

Foram propostos na literatura modelos de equivalentes externos específicos para estudos de otimização em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1997). Em (Hao e Papalexopoulos, 1995) propõe-se um modelo reduzido de equivalente externo para estudos de otimização de sistemas elétricos baseado em relações de sensibilidade de segunda ordem interpretadas como elementos de circuito. A metodologia usada na obtenção deste modelo envolve redução da matriz Hessiana (matriz usada na solução de problemas de fluxo de potência ótimo pelo método de Newton) e solução de problemas pelo método de mínimos quadrados para obter parâmetros de circuitos (admitâncias) usados para modelar o acoplamento elétrico entre barras de fronteira e sistema externo, e também para modelar as conexões entre a rede interna e barras de geração fictícias.

É proposto em (Hao e Papalexopoulos, 1995) um casamento na fronteira diferente do apresentado em (Deckmann et al., 1980b), para fazer o ajuste do modelo equivalente reduzido obtido pela redução da matriz Hessiana. Neste caso, as condições de otimalidade exigidas pela metodologia de solução do fluxo de potência ótimo nas barras de fronteira são respeitadas. Essas condições são modeladas num novo problema de otimização (pelo método de mínimos quadrados), no qual são determinadas as injeções de correntes constantes que devem ser inseridas nas barras de fronteira. Deste modo, o ajuste do modelo equivalente é feito de forma que a solução básica do fluxo de potência ótimo seja igual à solução básica da rede completa. Resolve-se também um problema de mínimos quadrados para determinar os parâmetros de circuito de elementos *shunt* que são inseridos nas barras de fronteira para melhorar a representação da resposta reativa da rede equivalenciada.

A composição do modelo equivalente proposto em (Hao e Papalexopoulos, 1995) é inviável na prática, pois o processo de atualização do modelo fundamenta-se em uma solução básica de fluxo de potência ótimo obtida com o sistema completo. Assim, a validação deste modelo depende de informações corretas acerca de todos os sistemas interligados, condição necessária para obter-se uma solução básica de fluxo de potência ótimo para o sistema completo e muito difícil de ser satisfeita. Nos estudos de otimização apresentados na referência (Hao e Papalexopoulos, 1995), o método equivalente reduzido proposto obteve melhor desempenho que o método Ward estendido proposto em (Monticelli et al., 1979). Nestes estudos de otimização, o método proposto foi testado na solução do problema ativo (minimizar custo de geração), no qual as variáveis de controle do sistema são os despachos de potência ativa das unidades geradoras.

Na referência (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), um novo modelo de equivalente externo para otimização foi proposto. A abordagem adotada foi incorporar o modelo equivalente externo como parte do problema de otimização. Propõe-se assim, não apenas um modelo de representação das reações das áreas externas, mas um novo problema de otimização denominado Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE), no qual a rede externa não reduzida é representada em detalhe.

2.4 Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE)

Fluxo de potência ótimo (FPO) é uma denominação dada a uma classe muito ampla de modelos de otimização nos quais, restrições e função objetivo estão relacionadas com as condições operacionais de um sistema elétrico de potência. Portanto, os controles determinados por um FPO, além de satisfazerem o objetivo do critério de operação, devem determinar um estado de operação em que a demanda de potência do sistema seja atendida e que nenhum limite físico ou operacional do sistema seja violado.

O FPO é uma ferramenta computacional usada em centros de controle de sistemas de energia elétrica e envolve transmissão, geração e consumo de energia elétrica; sua aplicação é bastante vasta e compreende desde problemas de planejamento de expansão e de operação do sistema elétrico até problemas de operação em tempo real. Como os estudos de otimização envolvem um número bastante razoável de problemas, esses problemas, de acordo com suas formulações podem ser divididos, basicamente, em problemas ativos e problemas reativos. Nos problemas ativos são calculados controles associados ao fluxo de potência ativa que atendem algum critério como, por exemplo, o problema de minimização de custo de geração. Nos problemas reativos são calculados os controles reativos que atendem critérios associados à potência reativa como, por exemplo, o problema de minimização de perdas. Em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), foi focado o problema de otimização reativa, e em (Hao e Papalexopoulos, 1995) o problema de otimização ativa. No FPOEG proposto nesta tese, que é uma generalização do FPOE, dois tipos de problemas foram abordados, um problema reativo e um problema ativo/reativo.

Os problemas de FPO também podem ser divididos em subclasses de acordo com características particulares da formulação de cada problema (Momoh et al., 1999). Assim, problemas com restrições e função objetivo formuladas matematicamente por funções lineares são tratados por programação linear, e problemas que envolvem restrições ou função objetivo não lineares são tratadas com técnicas de programação não linear. Os problemas de FPO, abordados neste trabalho, estão inseridos na classe de programação não linear. Nesta categoria, as formulações clássicas foram propostas por (Carpentier, 1962) e por (Dommel e Tinney, 1968). Entre as inúmeras técnicas propostas para a solução de problemas desta classe, destaca-se a apresentada em (Sun et al., 1984), na qual o método de Newton foi usado pela primeira vez numa metodologia de solução de FPO.

2.4.1 Formulação de Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE)

A formulação do Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE) apresentada em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), foi obtida a partir de um problema genérico de FPO. Um problema de FPO pode ser descrito, genericamente, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
& \text{Min} \quad C(\underline{x}) \\
& \text{s.a. :} \\
& \quad \underline{g}(\underline{x}) = \underline{0} \\
& \quad \underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0} \\
& \quad \underline{x}^{\min} \leq \underline{x} \leq \underline{x}^{\max}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

onde:

$C(\underline{x})$ - função objetivo a ser otimizada;

$\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$ - equações de fluxo de carga;

$\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ - restrições funcionais de desigualdade;

\underline{x} - variáveis de otimização, controladas e dependentes;

\underline{x}^{\min} - limite mínimo operacional das variáveis controladas;

\underline{x}^{\max} - limite máximo operacional das variáveis controladas.

O problema de FPO (no qual o problema de otimização é formulado para o sistema completo) também pode ser definido, particionando-se: conjuntos de variáveis associados às áreas que compõem o sistema, funções objetivo e restrições funcionais de igualdade e desigualdade. Desta forma, o conjunto \underline{x} de variáveis do problema é matematicamente particionado da seguinte maneira:

$$\underline{x} = [\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_e]^T \tag{2.2}$$

onde: x_i , x_f e x_e estão associadas às áreas interna, fronteira e externa, respectivamente.

O particionamento apresentado em (2.2) é considerado na formulação do FPO apresentada em (2.1), e este passa ser representado da seguinte maneira:

$$\text{FPO} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Min} \quad C_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) + C_f(\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_e) + C_e(\underline{x}_f, \underline{x}_e) \\
 \text{s.a. :} \\
 \underline{g}_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) = \underline{0} \\
 \underline{h}_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) \leq \underline{0} \\
 \underline{x}_i^{\min} \leq \underline{x}_i \leq \underline{x}_i^{\max} \\
 \\
 \underline{g}_f(\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_e) = \underline{0} \\
 \underline{h}_f(\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_e) \leq \underline{0} \\
 \underline{x}_f^{\min} \leq \underline{x}_f \leq \underline{x}_f^{\max} \\
 \\
 \underline{g}_e(\underline{x}_f, \underline{x}_e) = \underline{0} \\
 \underline{h}_e(\underline{x}_f, \underline{x}_e) \leq \underline{0} \\
 \underline{x}_e^{\min} \leq \underline{x}_e \leq \underline{x}_e^{\max}
 \end{array} \right. \quad (2.3)$$

onde os índices i , e e f estão associados a barras das áreas interna, externa e de fronteira, respectivamente.

A formulação acima pode representar um problema de otimização genérico no qual em todo o sistema (áreas interna, fronteira e externa), os controles do processo de otimização e as restrições funcionais são respeitados, as equações de fluxo de carga são atendidas e a função objetivo é considerada. Para tanto, supõe-se então uma situação em que o sistema supervisor opera as áreas interna e externa, sendo capaz de utilizar controles globais (de todo o sistema) para atender as restrições, as demandas e os objetivos do estudo de otimização. Os parâmetros globais do sistema interligado também são conhecidos, e é evidente que esta situação não necessita de modelos equivalentes, este é um caso idealizado que inclusive oferece uma solução de referência.

A formulação do problema de otimização equivalente é necessária em situações práticas, em que o centro de controle do sistema em estudo dispõe de dados aproximados sobre os sistemas externos interligados. Para tais situações, é proposta em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) a formulação de um modelo equivalente que consiste de um problema de otimização formulado para o sistema completo (todo o sistema interligado) particionado em áreas interna, fronteira e externa. Desta forma, constituindo-se um problema de FPOE no qual tanto as variáveis de decisão quanto as expressões da função objetivo e das restrições são interpretadas como equivalentes, como representado na formulação a seguir:

$$\text{FPOE} \left\{ \begin{array}{l}
\text{Min} \quad C_i(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) + C_f(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) + C_e(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) \\
\text{s.a. :} \\
\underline{g}_i^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) = \underline{0} \\
\underline{h}_i^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) \leq \underline{0} \\
\underline{x}_i^{min} \leq \underline{x}_i^{eq} \leq \underline{x}_i^{max} \\
\\
\underline{g}_f^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) = \underline{0} \\
\underline{h}_f^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) \leq \underline{0} \\
\underline{x}_f^{min} \leq \underline{x}_f^{eq} \leq \underline{x}_f^{max} \\
\\
\underline{g}_e^{eq}(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) = \underline{0} \\
\underline{h}_e^{eq}(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) \leq \underline{0} \\
\underline{x}_e^{min} \leq \underline{x}_e^{eq} \leq \underline{x}_e^{max}
\end{array} \right. \quad (2.4)$$

Para resolver o problema formulado em (2.3), com a suposição de que os dados externos obtidos pelo centro de controle são incorretos, usa-se um modelo de otimização equivalente no qual os índices (eq) explicitam as equações, inequações e variáveis afetadas pelas incertezas consideradas na solução. É importante notar, que os modelos equivalentes tradicionais baseados em fluxo de carga (Kato et al., 1994), também estão contidos na formulação apresentada em (2.4). Os modelos equivalentes tradicionais baseados em fluxo de carga (modelo não reduzido) constituem-se em equações associadas às gerações e ao atendimento da carga nas áreas de fronteira e externa, dadas por:

$$\begin{aligned}
\underline{g}_f^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) &= \underline{0} \\
\underline{g}_e^{eq}(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) &= \underline{0}
\end{aligned} \quad (2.5)$$

Na formulação apresentada em (2.4), as equações do fluxo de carga da área de fronteira são ajustadas com as injeções equivalentes; tais injeções são obtidas por um procedimento conhecido como casamento na fronteira. Este procedimento é muito importante na composição dos modelos equivalentes externos tradicionais e tem o objetivo de fazer um ajuste do modelo equivalente a um estado atual da rede interna (dado por um estimador de estado).

O procedimento de casamento na fronteira faz parte do processo de solução do FPOE proposta em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997). Sendo assim, o modelo FPOE é atualizado *on line* com base nas informações obtidas do estimador de estado da área interna da seguinte forma: são calculadas as injeções equivalentes a serem inseridas na fronteira com o estado interno estimado fixado (processo clássico de casamento na fronteira apresentado no Apêndice A). A inserção destas injeções é feita atualizando-se as equações de fluxo de carga na fronteira que passam a ser representadas por:

$$\underline{g}_f^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) = \underline{0} \quad (2.6)$$

Os dados da rede externa, necessários à formulação do modelo equivalente externo do FPOE, são estimados. Pode-se contar com informações obtidas pelos centros de controle dos sistemas externos interligados (via comunicação de dados em tempo real) e com dados obtidos em estudos de previsão de carga. O modelo equivalente externo é composto pela topologia disponível do sistema externo, por dados aproximados de: cargas ativa e reativa nas barras de carga, de geração de potência ativa nas unidades geradoras, de tensões de barras controladas, de valores de *taps* fixos de transformadores, e de limites em variáveis e em restrições funcionais. Esses componentes são todos considerados na formulação do FPOE dado em (2.4).

O uso do modelo de FPOE apresentado em (2.4) é viável em situações em que a área interna é totalmente supervisionada. Tanto a área interna como a área de fronteira têm seus estados de operação estimados pelo estimador de estado. As barras de fronteira, embora não pertencentes a jurisdição do sistema interno, como são barras terminais de linhas de transmissão que interligam os sistemas interno e externo são observáveis, pois os fluxos nas interligações são medidas disponíveis ao centro de controle do sistema interno. As áreas externas são representadas de maneira explícita, da mesma forma que são representadas as áreas internas. No entanto, as informações sobre a área externa, em tempo real, não são disponíveis ao centro de controle da área interna. Assim, usam-se aproximações para compor a parte do modelo que representa o sistema externo.

Os centros de controle lidam com diferentes situações complexas determinadas por interesses econômicos, operacionais e pela disponibilidade de informações sobre o sistema externo interligado. É importante que o modelo equivalente seja capaz de representar a rede externa em diferentes cenários definidos pelas situações práticas. O modelo equivalente deve também ser adaptável a exigências impostas por diferentes estudos de otimização. Ou seja, é desejável que o modelo equivalente tenha capacidade de representar o comportamento da rede externa diante de diferentes problemas de otimização e que seja de fácil atualização. O modelo de otimização equivalente (FPOE) apresenta-se como uma alternativa capaz de atender estas características desejáveis de um modelo de representação de áreas externas.

A formulação apresentada em (2.4) pode ser modificada, para representar uma situação prática em que um centro de controle esteja interessado em atender algum critério de operação do sistema supervisionado (sistema interno), considerando a representação dos controles e das restrições de todo o sistema interligado. Neste caso, supõe-se que o centro de controle não dispõe de dados acerca do estado da área externa, mas as cargas, gerações e limites serão representados através de aproximações. Sendo assim, o problema de FPOE a ser resolvido é formulado como:

$$\begin{aligned}
& \text{Min} \quad C_i(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) \\
& \text{s.a.} : \\
& \quad \underline{g}_i^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) = \underline{0} \\
& \quad \underline{h}_i^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) \leq \underline{0} \\
& \quad \underline{x}_i^{min} \leq \underline{x}_i^{eq} \leq \underline{x}_i^{max} \\
& \quad \underline{g}_f^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) = \underline{0} \\
& \quad \underline{h}_f^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) \leq \underline{0} \\
& \quad \underline{x}_f^{min} \leq \underline{x}_f^{eq} \leq \underline{x}_f^{max} \\
& \quad \underline{g}_e^{eq}(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) = \underline{0} \\
& \quad \underline{h}_e^{eq}(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) \leq \underline{0} \\
& \quad \underline{x}_e^{min} \leq \underline{x}_e^{eq} \leq \underline{x}_e^{max}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Também pode-se modificar a formulação apresentada em (2.4) para modelar um problema similar ao descrito anteriormente, com a diferença que os controles e restrições do sistema externo não são respeitados, com exceção do atendimento da demanda e da geração. E a formulação deste problema é dada por:

$$\begin{aligned}
& \text{Min} \quad C_i(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) \\
& \text{s.a.} : \\
& \quad \underline{g}_i^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) = \underline{0} \\
& \quad \underline{h}_i^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) \leq \underline{0} \\
& \quad \underline{x}_i^{min} \leq \underline{x}_i^{eq} \leq \underline{x}_i^{max} \\
& \quad \underline{g}_f^{eq}(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) = \underline{0} \\
& \quad \underline{g}_e^{eq}(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) = \underline{0}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

na qual os controles relativos à área externa são fixados em valores preestabelecidos (valores básicos).

Vários outros problemas de otimização, representando diferentes cenários, podem ser modelados a partir da formulação genérica do FPOE dada em (2.4). As variações de modelos são caracterizadas pelas considerações feitas em relação a função objetivo, equações de fluxo de carga, restrições funcionais e controles; três destas variações são estudadas no Capítulo 4. Diferentes problemas podem ser formulados, associados ao que se denomina padrão de otimização. Desta forma, o padrão de otimização determina ao modelo de otimização, as considerações em relação a função objetivo, equações de fluxo de carga, restrições funcionais e controles .

O FPOE (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) foi definido juntamente com uma metodologia de otimização matemática para a sua solução e critérios para lidar com a disponibilidade parcial de informações sobre o estado do sistema externo. Um processo de otimização equivalente compreende a metodologia matemática utilizada na solução do problema FPOE, os critérios adotados para lidar com as informações disponíveis e a própria formulação matemática do problema (especializações possíveis de (2.4)).

2.4.2 Metodologia de Solução

Por ser definido através de um modelo de otimização, o FPOE dispõe de flexibilidade inerente às possibilidades dos métodos de solução para problemas de otimização matemática. Em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) o problema de FPOE é resolvido via método de Newton, utilizando-se a técnica de penalidades para tratar restrições de canalização nas variáveis e técnicas de parametrização para tratar as restrições funcionais de desigualdade. O problema de mínimas perdas foi escolhido pelo fato de que a modelagem de respostas reativas é mais difícil de ser elaborada em estudos que envolvem as equações do fluxo de carga. Desta forma, enfocou-se a natureza da resposta reativa em modelos de otimização equivalentes.

Num problema de otimização reativo as gerações de potência ativa são consideradas constantes, exceto na barra de referência. Os limites em magnitudes de tensão, *taps* de transformadores e potência reativa gerada são considerados através de restrições de desigualdade. Assim são calculados controles reativos que atendem um critério de otimização associado à potência reativa. Para o problema reativo do FPOE proposto em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), a função objetivo perdas ativas é representada como:

$$C(\underline{V}, \underline{\theta}, \underline{t}) = \sum_{km=1}^{nr} g_{km} [V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.9)$$

onde:

nr - número de ramos da rede elétrica.

\underline{V} - vetor de magnitudes de tensões nodais.

$\underline{\theta}$ - vetor de ângulos de fase de tensões nodais.

\underline{t} - vetor de *taps* de transformadores.

g_{km} - condutância do ramo $k - m$.

V_k, V_m - magnitudes de tensões de barras terminais do ramo $k - m$.

θ_k, θ_m - ângulos de fase de tensões de barras terminais do ramo $k - m$.

As restrições lineares de desigualdade, tais como limites em *taps* de transformadores e em magnitudes de tensões, foram tratadas por penalidades quadráticas que são incorporadas à função objetivo, modificando-se o problema original (formulado em (2.1)), como é mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C(\underline{x}) + C_v + C_t \\ \text{s.a.} : \quad & \underline{g}(\underline{x}) = \underline{0} \\ & \underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0} \end{aligned} \tag{2.10}$$

Neste problema os termos C_v e C_t são definidos como:

$$C_v = \sum_{i=1}^{nb} \frac{1}{2} P_v (V_i - V_i^r)^2 \tag{2.11}$$

$$C_t = \sum_{i=1}^{nt} \frac{1}{2} P_t (t_i - t_i^r)^2 \tag{2.12}$$

onde:

nb - número de barras dos sistema;

nt - número de transformadores com controle de *taps*;

V^r - valor limite de magnitude de tensão (mínimo ou máximo);

t^r - valor limite de *taps* de transformadores (mínimo ou máximo);

P_v - penalidade associada às restrições em magnitudes de tensão;

P_t - penalidade associada às restrições em *taps* de transformadores.

As restrições não lineares de desigualdade foram incorporadas ao problema através de funções homotopia parametrizadas em γ . A solução do problema de FPO é obtida através da solução de uma série de problemas parametrizados, como é mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C(\underline{x}) + C_v + C_t \\ \text{s.a.} : \quad & \underline{g}(\underline{x}) = \underline{0} \\ & \underline{H}(\underline{x}, \gamma) = \underline{0} \end{aligned} \tag{2.13}$$

A função homotopia que representa a restrição original de desigualdade é definida como:

$$\underline{H}(\underline{x}, \gamma) = h(\underline{x}) - (1 - \gamma)h(\underline{x}_0) \quad (2.14)$$

onde:

\underline{x}_0 - um ponto que atende a restrição $\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$ e não atende a restrição $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$;

γ - parâmetro que varia de 0 a 1 forçando o atendimento da restrição $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ (Ponrajah e Galiana, 1989).

A solução final do problema é um ponto de mínimo local e atende as condições de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker (Bazaraa et al., 1993).

2.4.3 Metodologia de Análise de Modelos de Otimização Equivalentes

Em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), análises numéricas e teóricas sustentam uma proposta de estrutura conceitual para modelos equivalentes de otimização e uma proposta de avaliação desses modelos. Em estudos de análise de segurança estática a avaliação do desempenho de um modelo equivalente é feita comparando-se, após uma contingência, o estado obtido em simulação que considera o sistema completo, com o estado obtido em simulação em que a rede externa é representada por um modelo equivalente. A avaliação de desempenho de modelos de otimização equivalentes requer a adoção de modelos de otimização de referência para comparação. Desta forma, a eficiência de um modelo de otimização equivalente é medida pela sua capacidade de produzir controles equivalentes muito próximos de controles obtidos por um modelo de otimização de referência.

Uma solução de referência é obtida num estudo de otimização no qual supõe-se serem conhecidas todas as informações do sistema interligado. E na avaliação de um modelo de otimização equivalente a comparação é estabelecida entre uma solução de otimização equivalente e uma solução de otimização de referência obtidas por processos de otimização associados a um mesmo padrão de otimização. E o processo de otimização equivalente e de sua respectiva referência, também são realizados a partir de uma mesma metodologia de solução do FPO. No entanto a otimização equivalente lida com falta de informações sobre o sistema externo, e desta forma há uma diferença de formulação entre processos de otimização equivalente e de referência. Por exemplo, para o problema de otimização equivalente formulado em (2.4), o respectivo problema de otimização de referência é dado em (2.3).

A metodologia de análise das soluções de FPOE apresentada em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) propõe que um processo de otimização equivalente é tanto mais preciso

quanto mais os controles equivalentes u_{eq} se aproximarem dos controles de referência u_{ref} , ou seja, quanto menores forem os desvios Δu_{mod} , denominados erros de modelo, dados por:

$$\Delta u_{mod} = u_{eq} - u_{ref} \quad (2.15)$$

Os valores dos desvios Δu_{mod} expressam a capacidade do modelo equivalente de representar as reações do sistema externo. u representa as variáveis de decisão (v , t e pg ; respectivamente magnitude de tensão, tap de transformadores e geração de potência ativa). Portanto, a precisão de um modelo de otimização equivalente pode ser dada sinteticamente por Δv_{mod} , Δt_{mod} , e Δpg_{mod} .

Controles internos obtidos pela otimização de referência são representados por u_{ref} . A otimização de referência representa uma situação hipotética em que dispõe-se de informações corretas acerca de todo o sistema. Os valores de u_{eq} são obtidos a partir de um ponto que considera erros aleatórios no estado do sistema externo, ou seja, são obtidos por processos de otimização equivalentes.

A partir de um ponto operacional básico dado pelo estimador de estado, um processo de otimização é capaz de obter controles que atendam um determinado critério de otimização. Para avaliar as variações nos valores de controles calculados pelo processo de otimização de referência (u_{ref}), em relação aos controles apresentados na solução correspondente ao ponto operacional básico (u_0), têm -se:

$$\Delta u_{ref} = u_{ref} - u_0 \quad (2.16)$$

Desta forma, Δu_{ref} representa o impacto da implementação do controle u_{ref} calculado pelo processo de otimização de referência. Analogamente, Δu_{eq} representa as variações nos controles de variáveis do problema calculados pelo processo de otimização equivalente, e pode ser expresso da seguinte forma:

$$\Delta u_{eq} = u_{eq} - u_0 \quad (2.17)$$

Os desvios Δu_{mod} dados em (2.15) também podem ser obtidos subtraindo-se a equação (2.16) da equação(2.17).

A partir da expressão dada em (2.15), obtém-se a média dos erros do modelo de otimização equivalente no cálculo de controles equivalentes internos através de (2.18) a seguir:

$$\Delta u_{mod}^{med} = \sum_{i=1}^{nc} \frac{|u_i^{eq} - u_i^{ref}|}{nc} \quad (2.18)$$

onde u_i^{ref} e u_i^{eq} representam os valores da i -ésima variável controlada da área interna no ponto de operação apresentados como soluções finais dos processos de otimização de referência e equivalente, respectivamente. nc é o número de controles internos considerados.

As alterações médias nos valores de controles obtidas pelos processos de otimização de referência, em relação ao ponto operacional básico (u_i^0), são calculadas a partir da expressão dada em (2.16), como mostra-se a seguir:

$$\Delta u_{ref}^{med} = \sum_{i=1}^{nc} \frac{|u_i^{ref} - u_i^0|}{nc} \quad (2.19)$$

Analogamente, as alterações médias nos valores de controles calculados pelos processos de otimização equivalentes, podem ser expressas da seguinte forma:

$$\Delta u_{eq}^{med} = \sum_{i=1}^{nc} \frac{|u_i^{eq} - u_i^0|}{nc} \quad (2.20)$$

Os cálculos de desvios relacionados com controles internos, apresentados acima, são de suma importância na apreciação da influência de erros de informação no desempenho de qualquer modelo equivalente, e em especial do modelo de otimização equivalente.

Capítulo 3

FPOE Generalizado Resolvido pelo Método de Newton com Técnicas de Barreira e Parametrização

O problema de Fluxo de Potência Ótimo Equivalente Generalizado (FPOEG) proposto nesta tese, é consequência de um processo de evoluções sucessivas do problema de Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE) proposto em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997). Desta forma, alterações e inovações no problema de (FPOE) foram realizadas na tentativa de esclarecer sua viabilidade e importância e ainda obter melhorias, no sentido de promover sua exequibilidade em procedimentos de otimização em centros de controle de sistemas elétricos de potência.

Neste capítulo, faz-se um breve relato dos problemas e conhecimentos adquiridos no decurso dos estudos realizados e que conduziram às proposições e conclusões apresentadas nesta tese. Tem-se com isto, o intuito de facilitar o entendimento da importância e da influência das inovações e melhorias introduzidas pelo FPOEG nos resultados das otimizações em relação ao desempenho do FPOE. A formulação do problema de Fluxo de Potência Ótimo Equivalente Generalizado (FPOEG) proposto e a metodologia utilizada para a sua solução são apresentadas.

3.1 Preliminares

O FPOEG pode ser visto como uma generalização do FPOE proposto em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997). A pesquisa que resultou no trabalho aqui apresentado, partiu de experimentação com o FPOE, usando-se a mesma metodologia de solução apresentada em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997). Nos estudos iniciais com o FPOE tentou-se reproduzir cenários realistas possíveis em um centro de controle. Para tanto, foram formulados problemas de otimização considerando-se aleatoriamente incertezas nas informações externas dentro de faixas determinadas em relação a um caso básico (solução de um FC). Tais incertezas foram alteradas em testes extensivos. Então, numa série de

testes com estes problemas, para avaliação da metodologia de otimização proposta em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), o uso da técnica de penalidades foi substituído pelo uso da técnica de barreira como nos métodos de pontos interiores (Granville, 1994).

Embora em estudos com os sistemas IEEE-57 barras e IEEE-118 barras, problemas numéricos de convergência não tenham surgido na solução de problemas de FPOE, nos estudos com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras apareceram problemas de mau condicionamento da matriz Lagrangeana como já apontados em (Almeida e Galiana, 1996). Detectou-se uma certa dificuldade para definir uma política de penalidades eficaz, que permitisse análises rigorosas dos modelos de otimização equivalentes. E como políticas de penalidades diferentes determinam padrões de otimização diferentes, tornou-se impraticável a realização de comparações entre soluções. Quando não se pode adotar a mesma política de penalidades em todos os processos de otimização envolvidos na avaliação, não é possível estabelecer um processo de otimização regular, adequado tanto à solução do FPOE, quanto à solução do problema de referência.

Uma avaliação de desempenho do FPOE requer uma comparação entre a solução de um processo de otimização equivalente e a solução de um processo de otimização de referência. É importante ressaltar que as soluções obtidas são ótimos locais e deve-se ter muito cuidado para poder estabelecer comparações. Também é conhecido que a eficiência das técnicas de penalidades requer testes exaustivos com o sistema, permitindo que uma política de penalidades adequada seja definida. Políticas diferentes podem levar a soluções diferentes. Sendo assim, para poder avaliar diferentes modelos de otimização equivalentes (cujas formulações foram propostas em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997)), fez-se necessário a adoção da técnica de barreira para a solução do FPOE. Esta nova abordagem, apresentada na Seção 3.3, é uma das inovações propostas nesta tese. Além de melhorar o desempenho dos processos de otimização, permitiu o estabelecimento de um processo de otimização padrão numericamente mais estável. Isto garantiu uma avaliação mais precisa dos modelos de otimização equivalentes, como a apresentada no Capítulo 4 .

A disponibilidade de um algoritmo de solução do FPO capaz de produzir um processo de otimização padrão, tornou possível a experimentação numérica com modelos que consideram uma área de amortecimento agregada ao modelo de otimização equivalente. Desta forma, é proposta uma nova formulação de modelo de otimização equivalente como apresentada na Seção 3.2. Esta formulação, que é parte da composição do modelo FPOEG, é resultado de pesquisa a partir do modelo FPOE.

3.2 Formulação do FPOEG

Além da inovação na técnica de solução dos processos de otimização envolvidos na avaliação dos modelos equivalentes, neste trabalho, propõe-se a incorporação de uma área de amortecimento aos modelos de otimização equivalentes. O modelo da área de amortecimento proposto, baseia-se em análises realizadas em resultados de testes que verificaram a influência das incertezas de informações da área externa no cálculo dos

controles internos equivalentes. Assim como a influência, individualmente, de cada tipo de incerteza de informação, a influência do procedimento de casamento na fronteira foi analisada. Os resultados destas análises, serão apresentados no Capítulo 4. Esses resultados definiram características que um modelo de área de amortecimento deve atender. Eles serviram de base para a definição das áreas de amortecimento propostas nesta tese. Tais resultados evidenciam que um nível de informação maior sobre os controles externos significa melhor performance do FPOEG em calcular os controles internos equivalentes.

Áreas de amortecimento, de maneira geral, são usadas como um artifício para melhorar a resposta dos modelos equivalentes clássicos. Uma área de amortecimento, por definição, é uma área entre a fronteira e áreas mais remotas do sistema externo (Duran e Arvanitidis, 1972). Na prática, sua determinação depende da capacidade para se detectar as regiões do sistema externo vizinho às quais o sistema interno é mais sensível. Ou seja, quais as barras e ramos do sistema externo que influenciam de forma mais acentuada as condições de operação do sistema interno. Também é necessário investigar, quais são as barras e ramos do sistema externo que são mais afetados por alterações ocorridas no sistema interno. Sendo assim, a determinação de uma área de amortecimento é uma tarefa que depende de estudos sobre a interação do sistema interno com os sistemas vizinhos em diversas condições de operação do sistema interligado. Em estudos de análise de segurança estática, com aplicações de modelo equivalente reduzido, áreas de amortecimento foram usadas para representar de maneira explícita as barras do sistema externo mais próximas as fronteiras e mais sensíveis a alterações no sistema interno (Shoults e Bierck Jr., 1988).

A área de amortecimento considerada no modelo de FPOEG, proposta neste trabalho, de fato, é um conjunto de informações confiáveis sobre controles do sistema externo. E não foram utilizados nem desenvolvidos, métodos ou critérios específicos para determinação de áreas de amortecimento. Nos testes realizados, as áreas de amortecimento foram definidas usando-se apenas o conceito de proximidade elétrica. As informações dos conjuntos definidos como áreas de amortecimento, são informações sobre *taps* de transformadores próximos da fronteira, e sobre magnitudes de tensão e potências (ativa e reativa) em barras de geração vizinhas da fronteira; entretanto, outras informações externas podem ser utilizadas.

Em (Nepomuceno, 1997) propõe-se usar áreas de amortecimento nos estudos de FPOE e define-se o conceito de fronteiras virtuais móveis. No entanto, os resultados obtidos com a utilização de áreas de amortecimento não foram satisfatórios devido à proposição de recuar as barras de fronteira em função da área de amortecimento.

O modelo de FPOEG proposto, equivale a uma extensão da formulação dada em (2.7), resultando de um novo reparticionamento das restrições e das variáveis x do problema, em termos dos subsistemas interno, fronteira, área de amortecimento (*buffer zone*) e externo:

$$\underline{x} = [\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_b, \underline{x}_e]^T \quad (3.1)$$

onde o índice b indica *buffer zone*.

Utilizando-se este novo particionamento, tem-se a formulação do FPOEG como é descrita a seguir:

$$\text{FPOEG} \left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \quad C_i(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) + z_f C_f(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_b^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) \\ \quad z_b C_b(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_b^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) + z_e C_e(\underline{x}_f^{eq}, \underline{x}_b^{eq}, \underline{x}_e^{eq}) \\ \text{s.a. :} \\ \quad \underline{g}_i^{eq}(\underline{x}_{i,f}^{eq}) = \underline{0} \\ \quad \underline{h}_i^{eq}(\underline{x}_{i,f}^{eq}) \leq \underline{0} \\ \\ \quad \underline{g}_f^{eq}(\underline{x}_{i,f,b,e}^{eq}) = \underline{0} \\ \quad \underline{h}_f^{eq}(\underline{x}_{i,f,b,e}^{eq}) \leq \underline{0} \\ \\ \quad \underline{g}_b^{eq}(\underline{x}_{f,b,e}^{eq}) = \underline{0} \\ \quad \underline{h}_b^{eq}(\underline{x}_{f,b,e}^{eq}) \leq \underline{0} \\ \\ \quad \underline{g}_e^{eq}(\underline{x}_{f,b,e}^{eq}) = \underline{0} \\ \quad \underline{h}_e^{eq}(\underline{x}_{f,b,e}^{eq}) \leq \underline{0} \\ \\ \quad \underline{x}^{min} \leq \underline{x}^{eq} \leq \underline{x}^{max} \\ \quad z_f, z_b, z_e \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

onde as funções de custo e as restrições funcionais de igualdade e desigualdade são particionadas em termos das variáveis x_i, x_f, x_b, x_e . Os índices dessas variáveis as relacionam com as suas respectivas áreas, da seguinte forma: i , área interna; f , fronteira; b , área de amortecimento, e e , área externa. Os fatores z_f, z_b e z_e também são relacionados com as áreas do sistema, e são usados de forma a considerar ou não as funções de custo em tais áreas.

Uma divisão para um dado sistema, em áreas interna, fronteira e externa, pode ser vista no exemplo na Figura 3.1:

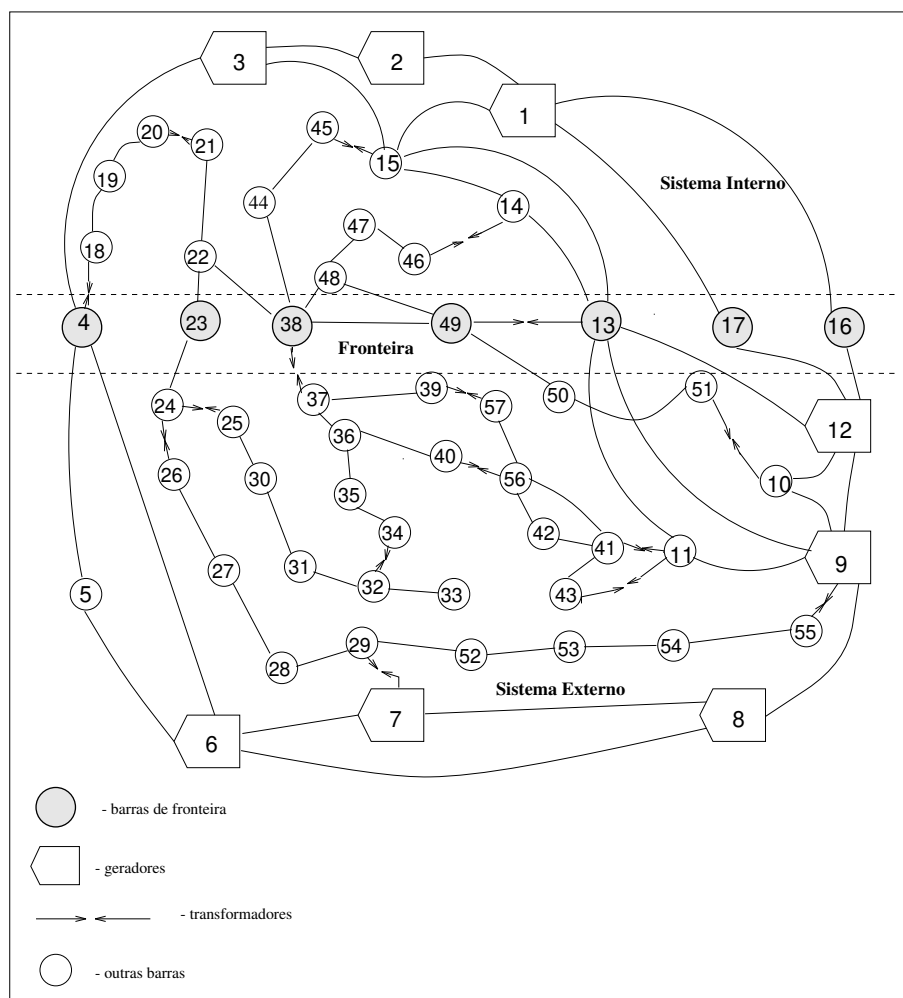


Figura 3.1: Divisão Básica para Um Sistema Exemplo

A partir de uma divisão básica do sistema, para modelos equivalentes, uma área de amortecimento pode ser definida de forma a subdividir o sistema externo. É importante ressaltar que a fronteira de fato, é composta apenas por barras, e as linhas de transmissão entre tais barras fazem parte da área externa. A Figura 3.2 exemplifica uma área de amortecimento proposta para o FPOEG que foi composta com informações de *taps* de transformadores, de magnitudes de tensão de barras de geração, e de potências (ativa e reativa) geradas nas barras de geração. Todas as barras da área de amortecimento estão localizadas na primeira vizinhança da fronteira.

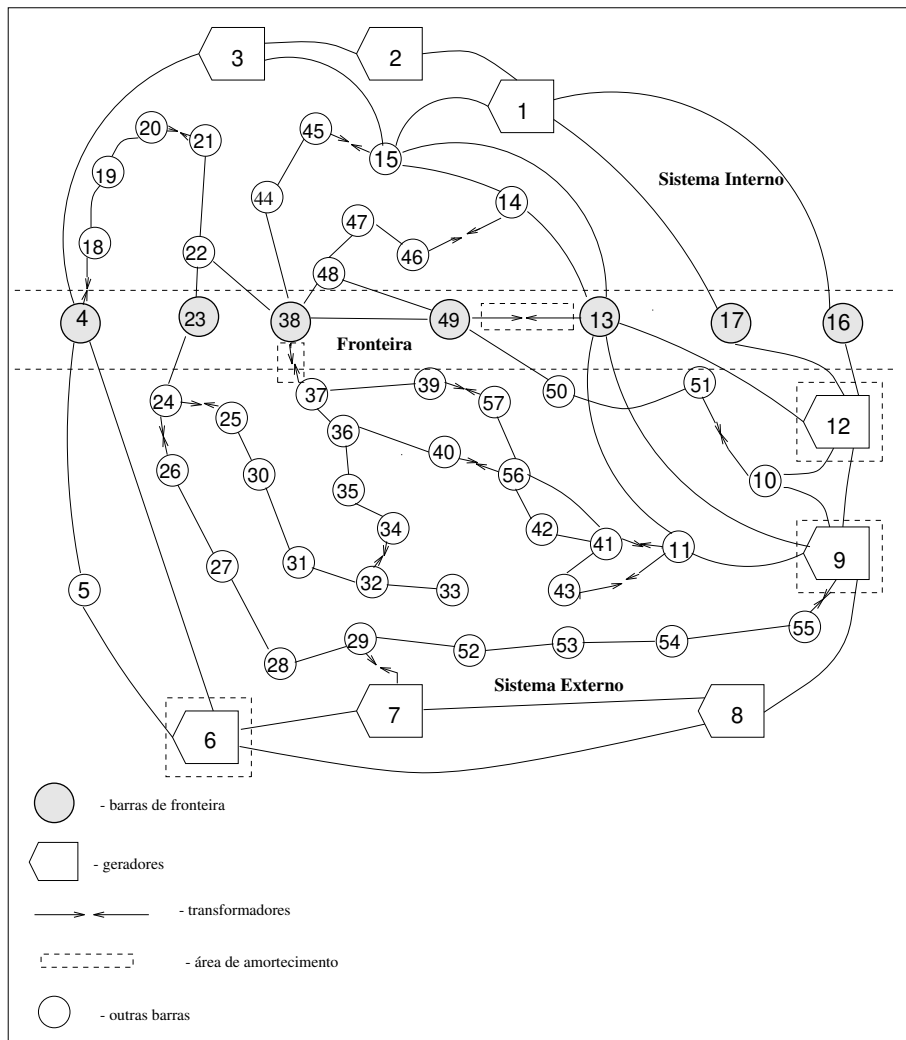


Figura 3.2: Uma Área de Amortecimento para o Sistema Exemplo

3.3 Função Objetivo e Restrições do FPOEG

Nesta seção, a formulação de um problema genérico dado em (2.1) é também considerada na apresentação dos elementos do problema do FPOEG, uma vez que este é uma generalização do FPOE.

3.3.1 Função Objetivo

O FPOEG é também uma formulação adequada a problemas de otimização variados (assim como o FPOE). E dois tipos de problemas foram estudados neste trabalho: um

FPOEG reativo e um FPOEG ativo/reativo. No FPOEG reativo a função objetivo usada foi a de perdas de potência aparente em elementos série de linhas de transmissão e de transformadores. Neste problema, as gerações de potência ativa são consideradas constantes, exceto na barra de referência. No problema ativo/reativo as gerações de potência ativa são redespachadas, sendo então também consideradas como variáveis de controle do problema juntamente com as magnitudes de tensão e *taps* de transformadores. As funções objetivo utilizadas no problema ativo/reativo são associadas aos controles ativos, tais como as funções de mínimo custo de geração (Despacho Ativo) ou mínimo desvio de potência ativa gerada em relação a uma dada programação de despacho.

No problema reativo a função objetivo adotada é a perda de potência aparente em elementos série das linhas de transmissão e de transformadores. Esta função objetivo propicia melhor condicionamento numérico da matriz Hessiana associada ao problema de otimização. A expressão dessas perdas é representada por:

$$C(\underline{x}) = \sum_{km=1}^{nr} \sqrt{(g_{km}^2 + b_{km}^2)} |V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{j\theta_m}|^2 \quad (3.3)$$

onde:

$$\underline{x} = [\underline{V}, \underline{\theta}, \underline{t}]^t$$

sendo:

nr - número de ramos da rede elétrica;

\underline{V} - vetor de magnitudes de tensões nodais;

$\underline{\theta}$ - vetor de ângulos de fase de tensões nodais;

\underline{t} - vetor de *taps* de transformadores;

g_{km}, b_{km} - condutância e susceptância série do ramo $k - m$, respectivamente;

V_k, V_m - magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;

θ_k, θ_m - ângulos de fase das tensões das barras terminais do ramo $k - m$.

Dois índices de desempenho são usados na composição da função objetivo associada ao FPOEG ativo/reativo, desvios de potência ativa e perda aparente (3.3). Em alguns estudos com o FPOEG ativo/reativo, usou-se apenas a função de desvios de potência ativa. Estas variações de tipos de problemas, foram testadas com o intuito de ressaltar a qualidade do FPOEG ser adaptável e eficiente em diferentes estudos de otimização. Uma forma típica de função objetivo e que foi usada neste trabalho é dada por:

$$C(\underline{x}) = \alpha \sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{2} w_{pg_i} (Pg_i - Pg_i^{esp})^2 + \beta \sum_{km=1}^{nr} \sqrt{(g_{km}^2 + b_{km}^2)} |V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{j\theta_m}|^2 \quad (3.4)$$

onde:

α, β - fatores calibrados através de experimentação;

ng - número de geradores da rede elétrica;

Pg_i - potência ativa gerada no gerador i ;

Pg_i^{esp} - potência ativa especificada por uma programação de despacho, no gerador i ;

w_{pg_i} - penalidade associada ao desvio de geração de potência ativa em relação ao valor especificado.

3.3.2 Restrições do Problema

Equações de Fluxo de Carga

As injeções de potência ativa (P_k) e de potência reativa (Q_k) em uma determinada barra k , podem ser modeladas por equações não lineares deduzidas pela aplicação da lei de Kirchhoff (Monticelli, 1983) e dadas pelas seguintes expressões:

$$P_k = \sum_{m \in K} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}) \quad (3.5)$$

$$Q_k = \sum_{m \in K} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}) - Q_k^{sh}(V_k) \quad (3.6)$$

em que:

K - é o conjunto das barras vizinhas da barra k ;

V_k, V_m - magnitudes das tensões nas barras terminais do ramo $k-m$;

θ_k, θ_m - ângulos das tensões nas barras terminais do ramo $k-m$;

t_{km} - valor do *tap* do transformador no ramo $k-m$;

P_{km} - fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;

Q_{km} - fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;

Q_k^{sh} - componente da injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* na barra k .

As restrições de igualdade $\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$ (apresentadas em (2.1)) são representadas em termos de *mismatches* de potências nas barras do sistema, e podem ser colocadas na forma vetorial apresentada a seguir:

$$\underline{\Delta P} = \underline{P}^{esp} - \underline{P}^{cal}(\underline{x}) = \underline{0} \quad (3.7)$$

$$\underline{\Delta Q} = \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}^{cal}(\underline{x}) = \underline{0} \quad (3.8)$$

Nessas equações, \underline{P}^{cal} representa o vetor das injeções calculadas de potência ativa (3.5) nas barras PQ e PV (barras de carga e de geração, respectivamente); \underline{P}^{esp} é o vetor de valores especificados para as mesmas; \underline{Q}^{cal} é o vetor das injeções calculadas de potência reativa (3.6) nas barras PQ e \underline{Q}^{esp} o vetor de valores especificados para as mesmas.

Restrições Lineares de Desigualdade

As restrições lineares de desigualdade $\underline{x}^{min} \leq \underline{x} \leq \underline{x}^{max}$ do problema do FPO representam limites físicos e operacionais nas variáveis do sistema de potência. Estas restrições foram, de acordo com cada tipo de problema de otimização, adotadas em magnitudes de tensão, em *taps* de transformadores e em potência ativa gerada:

$$\underline{V}^{min} \leq \underline{V} \leq \underline{V}^{max} \quad (3.9)$$

onde \underline{V} é o vetor das magnitudes de tensão;

$$\underline{t}^{min} \leq \underline{t} \leq \underline{t}^{max} \quad (3.10)$$

onde \underline{t} é o vetor dos *taps* de transformadores em fase;

$$\underline{P}_g^{min} \leq \underline{P}_g \leq \underline{P}_g^{max} \quad (3.11)$$

onde \underline{P}_g é o vetor das gerações e potência ativa.

Restrições Não Lineares de Desigualdade

As restrições funcionais não lineares de desigualdade $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ representam limites de geração de potência reativa. Para uma determinada barra k de tensão controlada do sistema, essas restrições são dadas pelas seguintes inequações:

$$Qg_k - Qg_k^{max} \leq 0 \quad (3.12)$$

$$-Qg_k + Qg_k^{min} \leq 0 \quad (3.13)$$

onde:

Qg_k - potência reativa gerada na barra k ;

Qg_k^{max}, Qg_k^{min} - limites máximo e mínimo de potência reativa gerada na barra k .

3.4 Tratamento das Restrições de Desigualdade

Neste trabalho é proposto um algoritmo de resolução de FPO baseado no método de Newton (Sun et al., 1984), combinado com técnicas de barreira (Bazaraa et al., 1993), (Granville, 1994) e técnicas de parametrização, (Ponrajah e Galiana, 1989) e (Almeida et al., 1994). Nesta seção, a formulação do problema genérico dado em (2.1), é considerada para apresentação das técnicas usadas no tratamento das restrições para a solução desse problema.

Homotopia Newton

Em um ponto x_0 as componentes não factíveis da restrição $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ são transformadas em restrições de igualdade por meio da técnica de parametrização e são incorporadas ao problema por multiplicadores de Lagrange. Assim, as componentes das restrições de desigualdade $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ não factíveis formam um conjunto \mathcal{A} que contém informações sobre as restrições não atendidas. A partir dessas informações, para cada restrição pertencente ao conjunto \mathcal{A} , é definida uma função homotopia parametrizada em γ , e que é expressa por:

$$\underline{H}(\underline{x}, \gamma) = \underline{h}_+(\underline{x}) - (1 - \gamma)\underline{h}_+(\underline{x}_0) \quad (3.14)$$

onde:

$$\begin{aligned} \underline{h}_+ &= [h_j, j \in \mathcal{A}] \\ \mathcal{A} &= \{j | h_j(\underline{x}_0) > 0\} \end{aligned}$$

e:

γ - parâmetro de homotopia que varia de 0 a 1;

\underline{x}_0 - ponto inicial no caminho gerado pela função homotopia;

\underline{x} - ponto no caminho gerado pela função homotopia;

$\underline{h}_+(\underline{x}_0)$ - vetor formado pelas componentes não factíveis de $\underline{h}(\underline{x})$, no ponto \underline{x}_0 .

A factibilização das componentes das restrições de desigualdade $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ infactíveis (pertencentes ao conjunto \mathcal{A}) é obtida após a solução de uma seqüência de problemas, nos quais γ vai se aproximando do valor 1. Deste modo uma série de problemas parametrizados são resolvidos excursionando-se o parâmetro de homotopia (γ) de 0 a 1 ((Ponrajah e Galiana, 1989)). À medida em que o valor do parâmetro de homotopia vai aumentando as componentes $\underline{h}_+(\underline{x})$ são levadas ao seu valor limite 0. A atualização no valor de γ é dada da seguinte forma:

$$\gamma^{\nu+1} = \gamma^\nu + 1/n, \quad n \geq 1 \quad (3.15)$$

onde n é um número inteiro.

As atualizações no valor de γ , dadas por n , determinam uma família de problemas paramétricos cujas soluções são obtidas pelo método de Newton. Cada alteração de γ é realizada após a determinação de uma solução para o problema parametrizado. Antes de se alterar o valor de γ , é verificado se novas componentes da restrição de desigualdade $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ estão infactíveis. Caso haja uma nova barra com limite de geração de potência reativa não atendida, esta é incluída no conjunto \mathcal{A} , e o valor de γ é inicializado novamente em 0. Começa-se assim um novo problema de otimização parametrizado, onde \underline{x}_0 é o estado do problema parametrizado anterior, no qual detectou-se a infactibilidade.

As funções homotopia associadas às componentes da restrição $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$, nos casos de não atendimento de limite máximo, e nos casos de não atendimento de limite mínimo de geração de potência reativa de uma determinada barra k , respectivamente, são dadas pelas seguintes expressões:

$$H_k(\underline{x}, \gamma) = (Q_k(\underline{x}) + Ql_k - Qg_k^{max}) - (1 - \gamma)(Q_k(\underline{x}_0) + Ql_k - Qg_k^{max}) \quad (3.16)$$

$$H_k(\underline{x}, \gamma) = (-Q_k(\underline{x}) - Ql_k + Qg_k^{min}) - (1 - \gamma)(-Q_k(\underline{x}_0) - Ql_k + Qg_k^{min}) \quad (3.17)$$

onde:

$Q_k(\underline{x})$ - injeção de potência reativa na barra k , calculada no ponto \underline{x} , sendo esta barra pertencente ao conjunto ativo \mathcal{A} .

Ql_k - carga de potência reativa na barra k .

Técnica de Barreira

A técnica de barreira é utilizada para tratamento das restrições lineares de canalização em variáveis (3.9), (3.10) e (3.11). A função barreira (contínua, convexa e diferenciável) usada é a função logarítmica de Frisch (Bazaraa et al., 1993) e é apresentada a seguir:

$$B(\underline{x}) = - \sum_{j=1}^n \ln[-\psi_j(\underline{x}_j)] \quad (3.18)$$

onde n é a dimensão do vetor de variáveis controladas do sistema.

Esta função se comporta como uma barreira para pontos interiores ao conjunto

$$\mathcal{X} = \{\underline{x}_j | \psi_j(\underline{x}_j) < 0, j = 1, \dots, n\} \quad (3.19)$$

de forma que a factibilidade das restrições de desigualdade $\psi_j \geq 0$ seja respeitada durante a solução do problema, ou seja, a convergência para a solução é atingida caminhando-se por pontos interiores ao conjunto \mathcal{X} . Durante o processo iterativo, no método de Newton, na determinação do passo nas componentes de \underline{x} , caso o passo leve alguma variável \underline{x}_j a não atender os limites operacionais, é calculado um fator de correção β que impede tais infactibilidades. Desta forma, durante todo o processo de solução, as seguintes condições são asseguradas, para garantir que $\underline{x}_j = [\underline{V}, \underline{t}, \underline{Pg}]$, respeite o limite máximo:

$$\underline{x}_j + \beta \underline{x}_j - \underline{x}_j^{max} < 0; \quad (3.20)$$

e para garantir a factibilidade pelo limite mínimo:

$$\underline{x}_j^{min} - \underline{x}_j - \beta \underline{x}_j < 0 \quad (3.21)$$

Assim sendo, as funções barreira logarítmica associadas às restrições lineares são dadas por:

$$B_v(\underline{V}^{min}, \underline{V}, \underline{V}^{max}) = - \sum_{k=1}^{nb} \ln(-V_k + V_k^{max}) - \sum_{k=1}^{nb} \ln(-V_k^{min} + V_k) \quad (3.22)$$

$$B_t(\underline{t}^{min}, \underline{t}, \underline{t}^{max}) = - \sum_{j=1}^{nt} \ln(-t_j + t_j^{max}) - \sum_{j=1}^{nb} \ln(-t_j^{min} + t_j) \quad (3.23)$$

$$B_{pg}(\underline{Pg}^{min}, \underline{Pg}, \underline{Pg}^{max}) = - \sum_{j=1}^{npg} \ln(-Pg_j + Pg_j^{max}) - \sum_{j=1}^{npg} \ln(-Pg_j^{min} + Pg_j) \quad (3.24)$$

onde:

nb - número de barras da rede;

nt - número de transformadores da rede com controle de tap ;

npg - número de geradores da rede com controle de geração de potência ativa.

3.5 Solução pelo Método de Newton

O problema do FPOEG é um problema com restrições de desigualdade, e as técnicas de barreira e de parametrização são utilizadas na sua solução. Essas técnicas são usadas definindo-se um problema aproximado, cuja solução aproxima-se da solução do problema original quando os parâmetros de homotopia e de barreira variam de modo adequado. O problema aproximado ou modificado associado à (2.1) é genericamente formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C(\underline{x}) + \mu B(\underline{x}) \\ \text{s.a.} : \quad & \underline{g}(\underline{x}) = \underline{0} \\ & \underline{H}(\underline{x}, \gamma) = \underline{0} \end{aligned} \quad (3.25)$$

onde:

μ - parâmetro de barreira;

$B(\underline{x})$ - função barreira logarítmica associada às restrições lineares de desigualdade;

$\underline{H}(\underline{x}, \gamma)$ - função homotopia definida em (3.14).

A solução do problema (3.14) é obtida através de uma seqüência de soluções do problema parametrizado (3.25), na qual os parâmetros μ e γ variam adequadamente de maneira preestabelecida. Nessa seqüência o parâmetro γ varia de 0 a 1 e o parâmetro μ decresce até atingir um limite mínimo pré-fixado.

A atualização de μ é feita da seguinte maneira:

$$\mu^{\nu+1} = \begin{cases} \kappa \mu^\nu, & \text{se } \kappa \mu^\nu > \mu^l \\ \mu^l, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.26)$$

onde κ ($0 < \kappa < 1$) é o fator de atualização dos parâmetros de barreira. O valor deste fator e μ^l são especificados arbitrariamente.

A estratégia usada para tratar os parâmetros de barreira é iniciar com μ comparativamente grande, fazendo com que a barreira atue fortemente mantendo a procura em áreas distantes das fronteiras da região de solução. Em seguida reduz-se moderadamente o parâmetro de barreira até um valor suficientemente pequeno, quando a procura é feita inclusive em áreas próximas das fronteiras. No processo iterativo, por exemplo, $\underline{\mu}^0$ é o valor inicial do parâmetro de barreira associado às restrições lineares de canalização referentes aos limites em \underline{x} , enquanto que μ^l é o limite. Uma discussão sobre valores de parâmetros de barreira usados nos casos de FPOEG estudados neste trabalho, é apresentada no Apêndice B.

Comparando-se com os resultados obtidos com o FPOE, a introdução de técnicas de barreira para tratamento das restrições lineares de desigualdade, conferiu maior robustez ao método, no que se refere a capacidade de determinação de soluções ótimas locais que atendessem um critério para comparação preestabelecido. Soluções de processos de otimização equivalentes submetidos a simulação de erros aleatórios diversos, puderam ser avaliados. Ou seja, essas soluções puderam ser obtidas com as mesmas condições iniciais e com os mesmos critérios de atualização de parâmetros e de convergência a que foram submetidos processos de otimização de referência. Esta característica também torna o algoritmo proposto uma ferramenta viável para aplicações em casos reais, uma vez que não requer recalibrações de parâmetros para obter soluções em condições operacionais diversas (condições operacionais variam consideravelmente ao longo de um dia).

O algoritmo proposto para a solução do FPO (formulação equivalente ou de referência, representada genericamente em (2.1)), baseia-se na resolução do problema parametrizado definido em (3.25). Esse algoritmo fundamenta-se no método de Newton aplicado à seqüência de problemas (como o formulado em (2.1)) gerada pela variação dos parâmetros μ e γ , e é composto de duas fases.

Fase I

Em uma primeira fase resolve-se parcialmente um problema relaxado, no qual as restrições não lineares de desigualdade não são consideradas. Assim a função Lagrangeana associada ao problema relaxado é definida como:

$$L(\underline{x}, \underline{\lambda}) = C(\underline{x}) + \underline{\lambda}^t \underline{g}(\underline{x}) + \mu \underline{B}(\underline{x}) \quad (3.27)$$

onde $\underline{\lambda}$ é composto pelos multiplicadores de Lagrange associados à restrição de igualdade $\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$. Esta fase é concluída ao obter-se a condição de factibilidade ($\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$) do problema relaxado, que corresponde à estacionariedade da Lagrangeana em relação a $\underline{\lambda}$.

Fase II

Após a conclusão da **Fase I**, inicia-se uma nova fase, em que se faz o reconhecimento do não atendimento das restrições de desigualdade $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$. Nesta fase identificam-se as componentes das restrições de desigualdade $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ que passam a ser tratadas como igualdades (3.25).

Nesta fase é encontrada a solução para o problema completo. A factibilização de restrições de desigualdade é promovida pela solução de uma seqüência de problemas modificados parametrizados em γ . A função Lagrangeana associada ao problema (3.25) é definida como:

$$L(\underline{x}, \underline{\lambda}, \underline{\rho}) = C(\underline{x}) + \underline{\lambda}^t \underline{g}(\underline{x}) + \underline{\rho}^t \underline{H}(\underline{x}, \gamma) + \mu \underline{B}(\underline{x}) \quad (3.28)$$

onde $\underline{\rho}$ é composto pelos multiplicadores de Lagrange associados às restrições funcionais de desigualdade $\underline{H}(\underline{x}, \gamma) = \underline{0}$.

A condição de estacionariedade da função Lagrangeana do problema (3.25) é expressa como:

$$\begin{aligned} \nabla L(\underline{x}, \underline{\lambda}, \underline{\rho}) &= \underline{0} & (a) \\ \underline{g}(\underline{x}) &= \underline{0} & (b) \\ \underline{H}(\underline{x}, \gamma) &= \underline{0} & (c) \end{aligned} \quad (3.29)$$

A solução do problema completo (2.1) requer além da condição de estacionariedade da função Lagrangeana apresentada em (3.29) para $\gamma = 1$, o atendimento das condições dos sinais dos multiplicadores de Lagrange das restrições de desigualdade $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$. Analisando a tendência de uma restrição de desigualdade para $\gamma = 1$ na condição (3.29) através dos multiplicadores de Lagrange verifica-se a viabilidade da direção do passo Newton. Assim, um ponto de estacionariedade da função Lagrangeana do problema (3.25) com $\gamma = 1$, para atender a condição de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker (mínimo local) do problema (2.1), deve ainda atender a condição de complementariedade estrita que é dada a seguir:

$$[\underline{\rho}] > [\underline{0}] \quad (3.30)$$

A análise dos sinais dos multiplicadores de Lagrange das restrições de desigualdade ativas, garante a condição de complementariedade estrita e é feita no ponto que atende a condição (3.29) para $\gamma = 1$. No algoritmo proposto a condição apresentada em (3.29) é parcialmente atendida para cada um dos problemas parametrizados em que $\gamma < 1$. Enquanto $\gamma < 1$ exige-se o atendimento das condições (b) e (c) em (3.29). Quando o parâmetro γ assume o valor 1 é exigido o atendimento de todas as condições de (3.29) juntamente com a condição (3.30). Esse procedimento é adotado com o intuito

de obter convergência com um número menor de iterações Newton. A solução do problema completo é um ponto de Karush-Kuhn-Tucker (atende as condições 3.29 e 3.30), ou seja, atende as condições de otimalidade de primeira-ordem.

Algumas heurísticas foram adotadas com o intuito de acelerar o processo de solução dos problemas de otimização, tais como: exigir o atendimento pleno da condição apresentada em (3.29) somente na solução dos problemas parametrizados em $\gamma = 1, 0$, e antecipar a relaxação de restrições de desigualdades ativas a partir de $\gamma = 0, 8$, utilizando-se do critério dado pela condição expressa em (3.30) mesmo que a condição dada em (3.29) não seja plenamente atendida. Faz-se neste ponto, um *rank* de valores obtidos na multiplicação de valores das violações pelos respectivos valores dos multiplicadores de Lagrange associados a elas, e duas barras para as quais obtêm-se os menores produtos e cujos multiplicadores de Lagrange associados atenderem a condição (3.30), podem ser retiradas do conjunto ativo.

Passo Calculado pelo Método de Newton

Um estado $\underline{y}^* = [\underline{x}^*, \underline{\lambda}^*, \underline{\rho}^*]^T$ que satisfaz a condição (3.29) do problema (3.25) é obtido a partir de um estado inicial $\underline{y}^0 = [\underline{x}^o, \underline{\lambda}^o, \underline{\rho}^o]^T$ utilizando-se de aproximações de segunda ordem da Lagrangeana (3.28). Em torno de um ponto $\underline{y}^\nu = [\underline{x}^\nu, \underline{\lambda}^\nu, \underline{\rho}^\nu]$ o método de Newton é aplicado resolvendo-se iterativamente a seguinte equação:

$$\nabla^2 \mathbf{L}(\underline{y}^\nu) \underline{\Delta y}^{\nu+1} = -\nabla \mathbf{L}(\underline{y}^\nu) \quad (3.31)$$

onde:

$$\underline{\Delta y} = \begin{bmatrix} \underline{\Delta x} \\ \underline{\Delta \lambda} \\ \underline{\Delta \rho} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

sendo:

$\nabla^2 \mathbf{L}$ - matriz Hessiana da Lagrangeana do problema (3.25);

$\nabla \mathbf{L}$ - vetor gradiente da Lagrangeana do problema (3.25);

$\underline{\Delta y}$ - passo Newton.

O estado \underline{y}^* , que é a solução do problema completo, pode ser encontrado num processo iterativo através de atualizações de \underline{y} :

$$\underline{y}^{\nu+1} = \underline{y}^\nu + \underline{\Delta y}^\nu \quad (3.33)$$

No entanto, a cada iteração, na atualização de $\underline{\Delta}y$, os valores das variáveis controladas pelas funções barreira são mantidas dentro de seus limites. Eventualmente se $\underline{\Delta}y$ puder levar a uma infactibilidade os limites da variável \underline{x} , a magnitude do incremento é corrigida. O $\underline{\Delta}y$ é alterado para garantir a factibilidade de \underline{x} . Desta forma na atualização de y , o vetor de alterações $\underline{\Delta}y$, determinado pela solução do sistema de equações dado em (3.31), é analisado. Assim, para todo $x_j \in [\underline{V}, \underline{t}, \underline{Pg}]$, determina-se:

$$\xi_j = \begin{cases} 1; & \text{se } x_j^{\min} < x_j^\nu + \Delta x_j^\nu < x_j^{\max} \\ \frac{|(x_j^{\max} - \epsilon) - (x_j^\nu)|}{|\Delta x_j^\nu|}; & \text{se } x_j^\nu + \Delta x_j^\nu \geq x_j^{\max} \\ \frac{|(x_j^{\min} + \epsilon) - (x_j^\nu)|}{|\Delta x_j^\nu|}; & \text{se } x_j^\nu + \Delta x_j^\nu \leq x_j^{\min} \end{cases} \quad (3.34)$$

sendo ϵ uma tolerância preestabelecida que garante os valores das variáveis controladas pelas funções barreira dentro de seus limites.

Assim um passo seguro $\underline{\Delta}y_b$ (que não viola restrições lineares de desigualdade) é calculado, da seguinte forma:

$$\underline{\Delta}y_b^\nu = \text{Min}_j \{ \xi_j \} \underline{\Delta}y^\nu \quad (3.35)$$

E de fato, as atualizações de \underline{y} são realizadas de acordo com a seguinte equação:

$$\underline{y}^{\nu+1} = \underline{y}^\nu + \underline{\Delta}y_b^\nu \quad (3.36)$$

Essa estratégia de atualização de \underline{y} é adotada nas duas fases de solução do FPO.

3.6 Algoritmo Básico de Solução do FPOEG

O algoritmo de solução do FPO consiste dos passos descritos a seguir:

1-Verifica-se o atendimento da restrição $\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$, no ponto inicial \underline{x}_0 .

- Se a restrição é atendida vai-se ao passo 3;
- Se não é atendida vai-se ao passo 2.

2- Resolve-se a condição (b) de (3.29) pelo método de Newton, controlando-se a factibilidade em \underline{x} , adotando-se como critério de convergência a factibilidade em $\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$. Ou seja, o processo se encerra quando: $\text{Máx}_i \{ |g_i(\underline{x})| \} < \text{tolerância}$.

3-Identifica-se as componentes ineficazes da restrição $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$, atualiza-se o conjunto \mathcal{A} e resolve-se (3.29) até o atendimento de (b) e (c) para uma seqüência de parâmetros $\gamma_n : 1/n; 2/n; 3/n; \dots; (n-1)/n; 1$. E:

- ocorrendo-se novas ineficazidades em $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ para $\gamma < 1$ reinicia-se o passo 3;
- não ocorrendo novas ineficazidades em $\underline{h}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ para $\gamma \Rightarrow 1/n, 2/n \dots (n-1)/n$, assim que $\gamma = 1$ vai-se ao passo 4.

4- Resolve-se as condições (a), (b) e (c) de (3.29) para $\gamma = 1$ e

- Se os multiplicadores de Lagrange associados às restrições $\underline{h}_j(\underline{x}) \leq \underline{0}$, pertencentes ao conjunto \mathcal{A} são todos positivos, o processo é finalizado;
- Caso contrário, restrições pertencentes ao conjunto \mathcal{A} e com multiplicador de Lagrange negativo, são retiradas do conjunto \mathcal{A} , e reinicia-se o passo 4.

Capítulo 4

Avaliação de FPO Equivalentes e Casamento na Fronteira

4.1 Introdução

Conforme já descrito neste trabalho, foram propostos na literatura, especificamente para estudos de otimização, apenas os modelos de representação de áreas externas apresentados em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1997). Estudos envolvendo a avaliação de modelos equivalentes em processos de otimização são recentes. E alguns paradigmas que orientam a formulação e a validação desses modelos são avaliados nos estudos apresentados neste capítulo. Um desses paradigmas é a referência de comparação usada nas avaliações de desempenho de modelos equivalentes, outro é o emprego do procedimento de casamento na fronteira.

Este trabalho propõe uma generalização do modelo de FPOE proposto em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), de modo a incorporar novas características de modelagem e uma nova metodologia de solução para tal modelo. O modelo FPOEG, proposto nesta tese, foi desenvolvido a partir de uma avaliação crítica do modelo de FPOE. Nesta análise destacam-se os seguintes aspectos: referências de comparação, alternativas de modelagem para o FPOE e influências do processo de casamento na fronteira.

As referências de comparação e as alternativas de modelagem para o FPOE são conceitualmente discutidas e avaliadas numericamente na Seção 4.3. Antes de avaliarmos tais aspectos é necessário introduzir o conceito de padrões de otimização que é discutido na Seção 4.2.

4.2 Padrões de Otimização

A denominação de FPOE envolve uma classe de problemas de otimização que se diferenciam pelas possibilidades de consideração de funções, variáveis, controles, etc., nos sistemas interno, externo e fronteira, e são definidos a partir da formulação genérica do

FPOE dada em (2.4). Neste capítulo são feitas avaliações de três destas modelagens para o FPOE, usadas para representar situações práticas que podem ser encontradas em centros de controle. As alternativas estudadas para os modelos de FPOE são: o problema de otimização equivalente que adota a formulação apresentada em (2.4) e denominado FPOE_{GG}, o problema FPOE_{IG} cuja formulação é dada em (2.7) e o problema denominado FPOE_{II} que tem sua formulação dada em (2.8).

O FPOEG é uma generalização do FPOE, e sua formulação genérica é dada em (3.2). Vários modelos de FPOEG também podem ser definidos a partir desta formulação, assim como é feito com a formulação genérica do FPOE. Desta forma, fazendo-se z_f , z_b e z_e de (3.2), iguais a um, define-se o FPOEG_{GG}. Se z_f , z_b e z_e de (3.2) são nulos, tem-se o FPOEG_{IG}. E o problema FPOEG_{II} é dado pela seguinte formulação:

$$\text{FPOEG}_{II} \left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \quad C_i(\underline{x}_i^{eq}, \underline{x}_f^{eq}) \\ \text{s.a. :} \\ \underline{g}_i^{eq}(\underline{x}_{i,f}^{eq}) = \underline{0} \\ \underline{h}_i^{eq}(\underline{x}_{i,f}^{eq}) \leq \underline{0} \\ \underline{x}_i^{min} \leq \underline{x}_i^{eq} \leq \underline{x}_i^{max} \\ \\ \underline{g}_f^{eq}(\underline{x}_{i,f,b,e}^{eq}) = \underline{0} \\ \underline{g}_b^{eq}(\underline{x}_{f,b,e}^{eq}) = \underline{0} \\ \underline{g}_e^{eq}(\underline{x}_{f,b,e}^{eq}) = \underline{0} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

na qual os controles relativos às áreas externa e de amortecimento são considerados fixos em valores preestabelecidos (valores básicos).

As formulações de FPO estão associadas a situações em que o sistema supervisor tem informações corretas de todo o sistema (áreas interna, fronteira e externa) e portanto são adequadas aos processos de otimização usados como referências de comparação para avaliação de desempenho de modelos de otimização equivalentes. O particionamento apresentado em (2.2) usado nas formulações dos problemas de otimização equivalentes é também usado na formulação de problemas de otimização que oferecem soluções de referência, tais como os problemas FPO_{GG}, FPO_{IG} e FPO_{II}. O problema denominado FPO_{GG} tem sua formulação apresentada em (2.3) e permite a definição de vários outros modelos de FPO, o FPO_{IG} cuja formulação é dada a seguir:

$$\text{FPO}_{IG} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Min } C_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) \\
 \text{s.a. :} \\
 \underline{g}_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) = \underline{0} \\
 \underline{h}_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) \leq \underline{0} \\
 \underline{x}_i^{\min} \leq \underline{x}_i \leq \underline{x}_i^{\max} \\
 \\
 \underline{g}_f(\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_e) = \underline{0} \\
 \underline{h}_f(\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_e) \leq \underline{0} \\
 \underline{x}_f^{\min} \leq \underline{x}_f \leq \underline{x}_f^{\max} \\
 \\
 \underline{g}_e(\underline{x}_f, \underline{x}_e) = \underline{0} \\
 \underline{h}_e(\underline{x}_f, \underline{x}_e) \leq \underline{0} \\
 \underline{x}_e^{\min} \leq \underline{x}_e \leq \underline{x}_e^{\max}
 \end{array} \right. \quad (4.2)$$

E o problema denominado FPO_{II} para o qual tem-se a seguinte formulação:

$$\text{FPO}_{II} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Min } C_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) \\
 \text{s.a. :} \\
 \underline{g}_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) = \underline{0} \\
 \underline{h}_i(\underline{x}_i, \underline{x}_f) \leq \underline{0} \\
 \underline{x}_i^{\min} \leq \underline{x}_i \leq \underline{x}_i^{\max} \\
 \\
 \underline{g}_f(\underline{x}_i, \underline{x}_f, \underline{x}_e) = \underline{0} \\
 \underline{g}_e(\underline{x}_f, \underline{x}_e) = \underline{0}
 \end{array} \right. \quad (4.3)$$

na qual os controles relativos às áreas externa e de amortecimento são considerados fixos em valores preestabelecidos (valores básicos).

Os índices associados aos modelos de otimização equivalentes avaliados definem as considerações feitas em relação à função objetivo, restrições de desigualdade e controles. O primeiro índice está relacionado à função objetivo adotada para o problema, que pode ser considerada apenas no sistema interno (índice I) ou no sistema global (índice G). O segundo índice está relacionado às restrições funcionais e controles adotados para o problema, que analogamente podem ser considerados apenas no sistema interno (I) ou globalmente (G). Admite-se que em todos os modelos as equações de igualdade (fluxo de carga) são sempre consideradas globalmente, razão pela qual os índices associados são omitidos. Esses índices definem os padrões de otimização associados ao modelo, como descrito a seguir:

- Padrão GG - os controles globais (de todo o sistema interligado) são utilizados no atendimento de um critério de otimização imposto ao sistema como um todo. Consideram-se restrições globais.

- Padrão *IG* - os controles globais são utilizados no atendimento de um critério de otimização imposto somente à área interna. Consideram-se restrições globais.
- Padrão *II* - consideram-se apenas os controles internos no atendimento de um critério de otimização imposto à área interna. Os controles da área externa são fixados em valores preestabelecidos. Desconsideram-se as restrições na área externa, exceto a demanda de potência que é atendida no sistema como um todo.

4.3 Avaliando Referências e Alternativas de Modelagem para o FPOE

Conforme se discutiu na seção anterior, tanto os processos de otimização de referência, quanto os processos de otimização equivalente podem ser implementados segundo diferentes padrões de otimização. Esta seção tem como objetivo a identificação dos padrões de otimização mais adequados, tanto para referência, quanto para os processos de otimização equivalente. Para tal foram realizados testes envolvendo o sistema IEEE-118 barras e foram feitos estudos de otimização com os problemas reativo e ativo/reativo.

A avaliação da precisão de um modelo equivalente é feita comparando-se a solução de dois estudos: *i*) um estudo onde se supõe que as informações acerca de todo o sistema interligado são disponíveis, aqui denominado estudo de referência, e *ii*) um estudo onde as informações externas não são totalmente conhecidas; neste estudo o sistema externo deve ser representado através de um modelo externo qualquer. Entretanto, em (Nepomuceno, 1997) mostra-se que em estudos de otimização é possível fixar várias referências (dependendo do uso de controles, restrições e objetivos dos sistemas interno, externo e fronteira) o que torna complexa a avaliação da precisão de um modelo externo. Nos estudos apresentados neste capítulo são feitos experimentos no sentido de identificar as referências de comparação mais apropriadas.

Nas avaliações realizadas aborda-se o problema da representação de áreas externas por modelos de otimização equivalentes considerando-se duas questões fundamentais: influências de incertezas nas informações acerca da área externa e deficiências da própria modelagem. As influências de incertezas nas informações externas na precisão dos controles internos obtidos num processo de otimização equivalente é verificada adotando-se no processo de referência um modelo associado ao mesmo padrão de otimização do modelo do processo de otimização equivalente. Na avaliação de deficiências de modelagem é necessário fazer comparações com referências associadas a outros padrões de otimização, diferentes do associado ao modelo equivalente a ser validado. A questão da modelagem, especificamente, levanta a discussão sobre a validação de modelos equivalentes, no que se refere à representatividade de respostas de áreas externas. O que se pretende é discutir a validação de um modelo de otimização equivalente, detectando-se entre os modelos avaliados, o mais eficiente.

A deficiência de modelagem pode ser analisada a partir da comparação de soluções

de processos de otimização equivalentes com a solução do processo de otimização de referência relativo ao problema de FPO_{GG} . O FPO_{GG} é uma referência global válida e importante para efeito de estudos, uma vez que se pode supor uma situação teórica, em que todos os centros de controle estejam usando um mesmo critério para otimizar a operação de seus sistemas, e no caso de minimizar perdas de potência isto é bastante razoável. Obviamente, sabe-se que na operação de sistemas interligados, nem todos os centros de controle de um sistema interligado têm os mesmos objetivos e executam ações de controle com o intuito de diminuir perdas na operação de suas redes elétrica, de forma tão simultânea, como é idealizada e modelada em problemas de FPO_{GG} . Nestes estudos os resultados obtidos na solução de processos de otimização equivalentes também foram comparados com os da solução do problema de FPO_{GG} . A comparação entre soluções equivalentes e solução de referência global (FPO_{GG}) permite a avaliação do desempenho do modelo equivalente em calcular os controles internos equivalentes e ao mesmo tempo analisar se estes controles são obtidos em detrimento das condições operacionais da rede externa. Esta avaliação expõe a validade do modelo analisado.

O desempenho dos modelos equivalentes é avaliado comparando-se as ações de controles equivalente e de referência na área interna. As expressões usadas nos cálculos destes desvios são dadas em (2.18), (2.19) e (2.20). Calculam-se os valores médios dos desvios de magnitudes de tensão, de valores de *taps* de transformadores e de gerações de potências ativa (nos estudos ativo/reactivo) para se formar uma idéia do erro apresentado pelo modelo equivalente no cálculo dos controles. Todos os valores de desvios, inclusive os desvios médios são dados em p.u., assim como os valores de magnitude de tensão e *taps* de transformadores, e as respectivas médias de seus valores.

Os desvios de potências reativas geradas na área externa são calculados por equações análogas às (2.15), (2.16) e (2.17). Pois são extremamente importantes na detecção de falha de modelagem das áreas externas em estudos de otimização. Não é habitual, em avaliações de modelos equivalentes, a análise das condições operacionais de áreas externas, uma vez que muitos modelos equivalentes são constituídos por reduções das redes elétricas que representam. Entretanto na avaliação dos modelos de otimização equivalentes é possível analisar as condições operacionais de redes externas, pois estas redes são representadas de forma explícita.

4.3.1 Estudos de Avaliação no Sistema IEEE-118 Barras

Foram realizadas avaliações a partir de testes com o sistema IEEE-118 barras (Bose, 1986). A Tabela 4.1 contém informações sobre a divisão deste sistema em áreas interna, fronteira e externa, mostrando de cada área: o número de barras, de transformadores e de geradores; e os valores de potência ativa gerada e consumida.

Tabela 4.1: Sistema IEEE - 118 barras

área	barras	ramos	barras PV	trafos	Geração (MW)	Carga (MW)
interna	50	88	26	5	1812,1	2216,4
fronteira	11	2	0	2	0,0	362,1
externa	57	89	27	2	2482,3	1664,2

Problema Reativo - Minimização de Perdas Aparentes

Nos estudos com o problema reativo, na simulação de erros de informações sobre a área externa, os controles externos de magnitude de tensão, *tap* de transformadores e potência reativa, variaram aleatoriamente dentro de faixas em que os valores máximo e mínimo representam alterações de 5,0% em torno de valores dados pela solução básica. As alterações em cargas e geração de potência ativa puderam variar aleatoriamente numa faixa de 20,0% em relação ao caso básico.

Cada processo de otimização de referência tem como ponto inicial uma mesma solução básica (que é uma solução do fluxo de carga para o sistema completo), que pode ser dividida em duas componentes : \underline{s}_i^o que representa grandezas do sistema interno e \underline{s}_e^o representando grandezas do sistema externo. Da mesma forma, cada processo de otimização equivalente tem como ponto inicial uma solução também composta de duas componentes e que difere do ponto inicial da referência somente na componente \underline{s}_e^o , pois no processo de otimização equivalente o ponto inicial do sistema externo contém erros de informações (incertezas). Por fim, as soluções dos problemas de otimização de referência e equivalente, também são representadas por duas componentes: \underline{s}_i^* e \underline{s}_e^* . As componentes associadas às áreas de fronteira e de amortecimento são representadas juntamente com o sistema externo no vetor \underline{s}_e^* .

Para os estudos com o problema reativo são apresentadas as características básicas do sistema nos pontos iniciais (\underline{s}_i^o e \underline{s}_e^o) e na solução dos processos de otimização de referência e equivalente (\underline{s}_i^* e \underline{s}_e^*) nas tabelas a seguir. Todos os processos de otimização de referência tiveram como ponto inicial uma mesma solução básica. Todos os processos de otimização equivalentes, tiveram a mesma solução básica modificada por erros de informações relativos à área externa. Nas tabelas a seguir apresentam-se valores de perdas de potência aparente (P. Apa. (MVA)), valores médios das magnitudes de tensão em todas as barras da rede (Méd. tensões (p.u.)), valores médios de *taps* de transformadores (Méd. *taps* (p.u.)), geração de potência ativa (Ger. (MW)), geração de potência reativa (Ger. (MVar)), carga de potência ativa (Carga (MW)) e carga de potência reativa (Carga (MVar)).

Tabela 4.2: Características Básicas (GG) - Problema Reativo

	\underline{s}_i^o	\underline{s}_e^o	\underline{s}_i^*	\underline{s}_e^*
Referência - FPO _{GG}				
P. Apa. (MVA)	157,53	462,38	58,25	465,62
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0648	0,9916	0,9917
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9025	0,9970	0,9823
Ger. (MW)	1812,06	2482,30	1799,54	2482,30
Ger. (MVA _r)	373,36	304,85	445,04	264,35
Carga (MW)	2216,00	2026,30	2216,00	2026,30
Carga (MVA _r)	694,00	744,00	694,00	744,00
Equivalente - FPOE _{GG}				
P. Apa. (MVA)	157,53	533,19	56,04	485,65
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0517	0,9933	0,9928
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9239	0,9971	0,9887
Ger. (MW)	1812,06	2517,07	1792,12	2517,07
Ger. (MVA _r)	373,36	303,96	325,95	14,39
Carga (MW)	2216,00	2048,33	2216,00	2048,33
Carga (MVA _r)	694,00	366,10	694,00	366,10

A Tabela 4.2 mostra dados sobre processos de otimização realizados com o padrão *GG*. Estes resultados, mostram que embora o total de perdas aparentes tenha sido globalmente minimizado, somente na componente de potência referente a área interna é que se constata a diminuição de seu valor. Obviamente, este comportamento não é comum a todos os sistemas e verificou-se ser esta uma característica própria do sistema IEEE-118 barras, devido à distribuição de cargas e localização de unidades de geração de potências ativa e reativa; e este comportamento é devido à divisão estabelecida para o sistema.

Na Tabela 4.3 são apresentados dados sobre os processos de otimização realizados com o padrão *IG*. Comparando-se as características básicas das soluções de referência das Tabelas 4.2 e 4.3 constata-se melhor desempenho dos problemas FPOE_{IG} e FPO_{IG} ao minimizar perdas aparentes nos ramos da área interna e pior desempenho ao minimizar perdas nos ramos da área externa, em relação aos problemas FPOE_{GG} e FPO_{GG}. Isto pode ser explicado pelo fato de que o padrão *IG* considera atuação de controles em variáveis de otimização de todo o sistema para minimizar as perdas aparentes somente em ramos da área interna. As características das soluções equivalentes apresentadas nesta tabelas são muito semelhantes, e a maior discordância ocorre no valor de potência reativa gerada na área externa.

Tabela 4.3: Características Básicas (IG) - Problema Reativo

	\underline{s}_i^o	\underline{s}_e^o	\underline{s}_i^*	\underline{s}_e^*
Referência - FPO _{IG}				
P. Apa. (MVA)	157,53	462,38	58,12	468,48
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0648	0,9934	0,9920
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9025	0,9996	0,9982
Ger. (MW)	1812,06	2482,30	1801,00	2482,30
Ger. (MVar)	373,36	304,85	440,31	258,92
Carga (MW)	2216,00	2026,30	2216,00	2026,30
Carga (MVar)	694,00	744,00	694,00	744,00
Equivalente - FPOE _{IG}				
P. Apa. (MVA)	157,53	533,19	56,17	489,18
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0517	0,9942	0,9929
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9239	0,9967	0,9925
Ger. (MW)	1812,06	2517,07	1793,46	2517,07
Ger. (MVar)	373,36	303,96	329,97	51,75
Carga (MW)	2216,00	2048,33	2216,00	2048,33
Carga (MVar)	694,00	366,10	694,00	366,10

Os dados dos processos de otimização realizados com o padrão *II* são apresentados na Tabela 4.4 e mostram um pior desempenho dos problemas FPOE_{II} e FPO_{II} na minimização de perdas aparentes no sistema como um todo, comparando-se com os outros apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3. Observa-se que os valores de potência reativa gerada na área externa são maiores que os valores obtidos para a mesma grandeza nas soluções do processo otimização de referência global, enquanto que os valores de potência reativa gerada na área interna são menores. Os perfis de tensão e de *tap* do ponto operacional da rede externa, assim como os valores de potência reativa gerada na área externa, evidenciam que a falta de representação de controles operacionais levam a obtenção de um ponto operacional em que os controles internos equivalentes são obtidos no atendimento do critério de otimização imposto à área interna com detrimento da condição operacional da área externa e esta área pode funcionar como fonte (ou sorvedouro) “infinito” de potência reativa para a área interna. No caso apresentado, vê-se que o valor de potência reativa gerada na área externa aumentou sensivelmente, mostrando que a área externa reagiu como uma fonte de potência reativa para a área interna. Desta forma, pode-se concluir que o tanto o FPO_{II} como o FPOE_{II}, não são capazes de modelar a parte reativa da resposta do sistema externo num processo de otimização devido à falta de representação de restrições externas.

Tabela 4.4: Características Básicas (II) - Problema Reativo

	\underline{s}_i^o	\underline{s}_e^o	\underline{s}_i^*	\underline{s}_e^*
Referência - FPO _{II}				
P. Apa. (MVA)	157,53	462,38	63,04	459,24
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0648	0,9979	1,0637
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9025	0,9978	0,9092
Ger. (MW)	1812,06	2482,30	1797,58	2482,30
Ger. (MVA _r)	373,36	304,85	70,66	555,00
Carga (MW)	2216,00	2026,00	2216,00	2026,00
Carga (MVA _r)	694,00	744,00	694,00	744,00
Equivalente - FPOE _{II}				
P. Apa. (MVA)	157,53	533,19	63,10	609,23
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0517	0,9979	1,0659
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9239	0,9978	0,9084
Ger. (MW)	1812,06	2517,07	1797,58	2517,07
Ger. (MVA _r)	373,36	303,96	73,81	576,00
Carga (MW)	2216,00	2048,33	2216,00	2048,33
Carga (MVA _r)	694,00	366,10	694,00	366,10

Comparando-se as Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, observa-se (comparação com a referência global), que o padrão *IG* é o que apresenta melhor desempenho, no processo de otimização equivalente, na obtenção de uma componente de solução para a área interna mais próxima da componente da área interna da solução obtida no processo de otimização de referência em que o padrão *GG* é usado. Este desempenho do padrão *IG*, evidencia que embora os controles sejam considerados no sistema como um todo, o critério de otimização, sendo adotado, apenas na área interna, faz com que os erros de informações acerca da área externa afetem menos o cálculo de controles equivalentes internos.

Uma vez que a deficiência do padrão *II* em representar a parte reativa da resposta externa é detectada, uma análise comparativa entre os valores de potência reativa gerada em todo o sistema interligado pode dar uma dimensão da influência do erro de modelagem. Para tanto, são apresentados nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7, cinco barras da área interna e cinco barras da área externa, que apresentam os maiores desvios $\Delta Q_{g_{mod}}$ (em p.u.) nas soluções do FPOE_{GG}, FPOE_{IG} e FPOE_{II}, respectivamente.

Tabela 4.5: Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (GG) - Problema Reativo

barra	Q_{g_0}	$\Delta Q_{g_{eq}}$	$\Delta Q_{g_{ref}}$	$\Delta Q_{g_{mod}}$
Sistema Interno				
69	-1,0542	2,7550	3,0800	-0,3250
24	1,0222	-1,3980	-1,1180	-0,2799
18	0,1671	-0,1681	0,0628	-0,2309
65	1,1359	-2,1359	-1,9332	-0,2027
15	-0,0704	0,1882	0,3004	-0,1121
Sistema Externo				
113	0,1048	-1,0452	-0,0603	-0,9848
4	0,2153	-0,5297	0,0337	-0,5635
89	-0,0629	0,9127	1,1617	-0,2490
31	0,4028	-0,3657	-0,1312	-0,2345
25	0,2980	-0,7490	-0,5729	-0,1761

Tabela 4.6: Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (IG) - Problema Reativo

barra	Q_{g_0}	$\Delta Q_{g_{eq}}$	$\Delta Q_{g_{ref}}$	$\Delta Q_{g_{mod}}$
Sistema Interno				
69	-1,0542	2,7419	3,0411	-0,2991
24	1,0222	-1,3530	-1,1172	-0,2358
34	0,2304	-0,2804	0,0473	-0,2331
65	1,1359	-2,0733	-1,8893	-0,1840
18	0,1671	-0,1015	0,0628	-0,1643
Sistema Externo				
113	0,1048	-1,1048	-0,0925	-1,0122
4	0,2153	-0,4134	0,0741	-0,4875
89	-0,0629	0,7715	1,0969	-0,3254
31	0,4028	-0,3852	-0,1426	-0,2425
32	0,0910	-0,0733	0,1389	-0,2122

Comparando-se os dados da Tabela 4.5 (obtidos com as soluções do FPO_{GG} e do FPOE_{GG}) com os da Tabela 4.6 (obtidos com as soluções do FPO_{IG} e FPOE_{IG}), vê-se que a resposta reativa do sistema externo foi representada de forma razoável nos processos de otimização equivalentes. Os valores de potência reativa gerada nestes processos são próximos dos valores obtidos pelos respectivos processos de referência. Constata-se muita semelhança entre os processos comparados, evidenciada pela coincidência das barras apresentadas nestas tabelas. Mais uma vez, mostra-se que os desempenhos do

FPOE_{GG} e FPOE_{IG} são bastante similares.

Os valores de potências reativas geradas obtidos nas soluções do FPO_{II} e do FPOE_{II}, estão apresentadas na Tabela 4.7. Tais valores de potências reativas geradas são bastante distantes dos valores obtidos pelo FPO_{GG} ou FPO_{IG}. Mas a discrepância maior entre os controles apresentados nesta tabela e os das Tabelas 4.5 e 4.6, observa-se nos valores de potência reativa gerada nas barras externas, e confirmam a influência do erro de modelagem devido a não representação de restrições externas. Valores limites de geração de potencia reativa (em p.u.), violados na solução do FPOE_{II}, e especificados para as barras externas apresentadas na Tabela 4.7 são: $Q_g^{max} = 3,00$ para as barras 25 e 89, $Q_g^{min} = -3,00$ para a barra 26, $Q_g^{min} = -0,05$ para a barra 104 e $Q_g^{min} = 0,00$ para a barra 90. Observa-se que na solução do processo de otimização equivalente os geradores das barras 25, 89, 104 e 90 apresentam violações de geração de potência reativa.

Na solução do problema de FPO_{II} usado como referência nestas avaliações, seis geradores externos apresentam violações de geração de potência reativa e todas essas violações resultam num total de 147,25 MVar, ou seja, a solução do FPO_{II} é uma referência inadequada. Comparando-se os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, e observando-se os dados apresentados na Tabela 4.7, constata-se que o padrão *II* é inviável para estudos de otimização. As análises realizadas neste capítulo indicam que o padrão *II* não é válido para estudos de otimização, no Capítulo 5 é feita uma avaliação da viabilidade da implementação de controles equivalentes internos, obtidos a partir de modelos em que controles externos são fixos e restrições externas não são consideradas.

Tabela 4.7: Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (II) - Problema Reativo

barra	Q_{g0}	$\Delta Q_{g_{eq}}$	$\Delta Q_{g_{ref}}$	$\Delta Q_{g_{mod}}$
Sistema Interno				
116	1,1499	-0,9652	-0,9826	0,0173
72	-1,0464	0,8395	0,8368	0,0026
36	-0,1065	0,0912	0,0887	0,0025
69	-1,0542	2,0529	2,0510	0,0019
66	-0,2919	0,2019	0,2003	0,0016
Sistema Externo				
25	0,2980	4,9472	0,5259	4,4212
89	-0,0629	4,1142	0,0004	4,1138
26	-1,1795	-3,1151	0,0628	-3,1780
104	0,0555	-2,9798	0,0000	-2,9798
90	0,6078	-2,3026	0,0000	-2,3026

As soluções obtidas nos processos de otimização equivalentes, também foram comparadas com um ponto operacional básico como mostra a Tabela 4.8. Observa-se que os

padrões *IG* e *GG* apresentam valores de Δu_{eq}^{med} e Δu_{ref}^{med} muito próximos; são também influenciados de maneira muito similar por erros de informações da rede externa, como mostram os valores de Δu_{mod}^{med} relativos a estes padrões. As médias dos desvios em potência reativa gerada na área interna e em controles internos, apresentados nesta tabela não são capazes de evidenciar que o padrão *II* é inadequado aos estudos de otimização. O padrão *II* apresenta os menores Δu_{mod}^{med} . No entanto, a constatação de que o $FPOE_{II}$ sofre menos influência de erros de informações acerca da rede externa que os outros dois modelos de otimização equivalentes analisados ($FPOE_{IG}$ e $FPOE_{GG}$), não o valida para estudos de otimização, pois a própria solução de um problema de FPO_{II} , usada como referência no cálculo dos desvios apresentados, é inadequada, como já comentado anteriormente.

Tabela 4.8: Média de Desvios - Problema Reativo

	Δu_{eq}^{med}	Δu_{ref}^{med}	Δu_{mod}^{med}
padrão GG			
Δv	0,0588	0,0605	0,0028
Δt	0,0774	0,0768	0,0007
ΔQg	0,5437	0,5373	0,0587
padrão IG			
Δv	0,0582	0,0593	0,0026
Δt	0,0801	0,0799	0,0002
ΔQg	0,5248	0,5134	0,0619
Modelo II			
Δv	0,0630	0,0630	0,0001
Δt	0,0795	0,0795	0,0001
ΔQg	0,6388	0,6396	0,0016

Analisando-se os dados mostrados nas tabelas desta seção, fica evidente que uma avaliação em que se compara processos de otimização equivalentes e de referência associados a um mesmo padrão, pode não ser suficiente para a validação de um modelo equivalente, como é o caso do $FPOE_{II}$ que apresenta os menores desvios médios e no entanto não é capaz de representar satisfatoriamente a resposta reativa da rede externa.

Problema Ativo/Reativo - Minimização de Desvios de Potência Ativa Gerada

Num problema de otimização ativo/reactivo (apresentado em (3.4)), gerações de potência ativa são redespachadas, e nos estudos apresentados neste capítulo, realizados com tais problemas, os controles de geração de potência ativa permitiram que as alterações nestas variáveis atingissem uma porcentagem máxima de 10,00 % do valor original

preestabelecido para elas. Na simulação de erros de informações sobre a área externa, os controles externos de magnitude de tensão, tap de transformadores e potência reativa, puderam variar aleatoriamente dentro de faixas em que os valores máximo e mínimo representam alterações de 5,0% em torno de valores dados pela solução básica. As alterações em cargas puderam variar aleatoriamente numa faixa de 20,0% e a geração de potência ativa variou numa faixa de 10,0%, em relação ao caso básico.

Tabela 4.9: Características Básicas (GG) - Problema Ativo/Reativo

	\underline{s}_i^o	\underline{s}_e^o	\underline{s}_i^*	\underline{s}_e^*
Referência - FPO _{GG}				
Des. PG (MW)	0,00	0,00	6,00	8,84
P. Apa. (MVA)	157,53	462,38	59,08	464,75
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0648	0,9911	0,9900
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9025	0,9975	0,9842
Ger. (MW)	1812,06	2482,30	1806,48	2475,57
Ger. (MVA _r)	373,36	304,85	444,12	267,65
Carga (MW)	2216,00	2026,30	2216,00	2026,30
Carga (MVA _r)	694,00	744,00	694,00	744,00
Equivalentente - FPOE _{GG}				
Des. PG (MW)	0,00	0,00	16,99	19,10
P. Apa. (MVA)	156,11	533,19	58,21	483,67
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0517	0,9970	0,9907
Méd. taps (p.u.)	0,9980	0,9239	1,0001	0,9894
Ger. (MW)	1812,06	2517,07	1805,57	2507,12
Ger. (MVA _r)	373,36	303,96	336,28	31,17
Carga (MW)	2216,00	2048,33	2216,00	2048,33
Carga (MVA _r)	694,00	366,10	694,00	366,10

As mesmas comparações estabelecidas nos estudos com o problema reativo, são realizadas na avaliação dos modelos equivalentes nos estudos com o problema ativo/reativo. Usam-se também os mesmos padrões de tabelas para apresentação dos resultados obtidos nestes estudos, e são apresentadas características básicas do sistema IEEE-118 barras, nos pontos iniciais e nas soluções dos processos de otimização equivalentes e dos usados como referências. Na Tabela 4.9 estão apresentadas as características básicas de soluções relacionadas com o FPO_{GG} e o FPOE_{GG}. As características básicas de soluções do FPO_{IG} e do FPOE_{IG}, são apresentadas na Tabela 4.10. As características básicas das soluções referentes ao FPO_{II} e ao FPOE_{II} são dadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.10: Características Básicas (IG) - Problema Ativo/Reativo

	\underline{s}_i^o	\underline{s}_e^o	\underline{s}_i^*	\underline{s}_e^*
Referência - FPO _{IG}				
Des. PG (MW)	0,00	0,00	0,18	0,00
P. Apa. (MVA)	157,53	462,38	52,12	354,99
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0648	0,9928	0,9925
Méd. <i>taps</i> (p.u.)	0,9980	0,9025	0,9974	0,9923
Ger. (MW)	1812,06	2482,30	1812,86	2438,21
Ger. (MVar)	373,36	304,85	402,18	175,21
Carga (MW)	2216,00	2026,30	2216,00	2026,30
Carga (MVar)	694,00	744,00	694,00	744,00
Equivalente - FPOE _{IG}				
Des. PG (MW)	0,00	0,00	0,15	0,00
P. Apa. (MVA)	157,53	533,19	51,00	385,34
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0517	0,9936	0,9936
Méd. <i>taps</i> (p.u.)	0,9980	0,9239	0,9971	0,9941
Ger. (MW)	1812,06	2517,07	1812,77	2467,48
Ger. (MVar)	373,36	303,96	281,53	581,58
Carga (MW)	2216,00	2048,33	2216,00	2048,33
Carga (MVar)	694,00	366,10	694,00	366,10

As comparações dos dados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10 mostram que o FPOE_{IG}, entre os modelos equivalentes, é mais eficiente no atendimento do critério de não se desviar do total de geração de potência ativa preestabelecido para a área interna, e também ao minimizar perdas aparentes nos ramos da área interna. Os dados da Tabela 4.11 mostram que o ponto de operação proposto como solução dos processos de otimização associados ao padrão *II*, apresenta elevadas perdas aparentes no sistema como um todo. Constata-se falta de eficiência no atendimento dos critérios de otimização e na representação da parte reativa da resposta externa, deficiências já observadas no estudo realizado com o problema reativo. Os dados evidenciam que o FPOE_{II} não é capaz de oferecer uma resposta (ativo/reactiva) satisfatória da área externa.

Comparando-se os valores de geração de potência ativa, apresentados nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, conclui-se que somente o padrão *II* não é capaz de dar uma resposta externa da parte ativa, ou seja, uma vez que existem erros de informações de geração de potência ativa na área externa, não existe possibilidade desses valores serem "corrigidos" durante o processo de otimização, e esta incapacidade é inerente ao padrão *II*, no qual consideram-se fixos os valores das variáveis de controle no sistema externo.

Tabela 4.11: Características Básicas (II) - Problema Ativo/Reativo

	\underline{s}_i^o	\underline{s}_e^o	\underline{s}_i^*	\underline{s}_e^*
Referência - FPO _{II}				
Des. PG (MW)	0,00	0,00	9,07	0,00
P. Apa. (MVA)	157,53	462,38	79,95	470,17
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0648	0,9942	1,0637
Méd. <i>taps</i> (p.u.)	0,9980	0,9025	0,9982	0,9092
Ger. (MW)	1812,06	2482,30	1805,19	2482,30
Ger. (MVA _r)	373,36	304,85	-26,89	695,29
Carga (MW)	2216,00	2026,00	2216,00	2026,00
Carga (MVA _r)	694,00	744,00	694,00	744,00
Equivalente - FPOE _{II}				
Des. PG (MW)	0,00	0,00	9,26	0,00
P. Apa. (MVA)	157,53	715,05	81,09	618,44
Méd. tensões (p.u.)	1,0239	1,0657	0,9937	1,0648
Méd. <i>taps</i> (p.u.)	0,9980	0,9084	0,9979	0,9084
Ger. (MW)	1812,06	2517,07	1805,12	2517,07
Ger. (MVA _r)	373,36	303,96	-29,44	722,12
Carga (MW)	2216,00	2048,33	2216,00	2048,33
Carga (MVA _r)	694,00	366,10	694,00	366,10

Para avaliar a eficiência dos modelos analisados em representar as reações reativas externas num problema ativo/reactivo, compara-se os dados das Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14. Estas tabelas, apresentam desvios de potência reativa (em p.u.) de cinco barras da área interna e cinco barras da área externa, para as quais obteve-se os maiores erros de desvios ΔQg_{mod} . São apresentados, para cada barra da tabela, o valor de potência reativa gerada na caso solução básica (Qg_0). Mais uma vez, verifica-se que o FPO_{GG}, o FPOE_{GG}, o FPO_{IG} e o FPOE_{IG}, apresentam desempenhos semelhantes na resposta externa de reativos e que nas soluções do FPOE_{II} os desvios muito acentuados de potência reativa gerada violam os limites operacionais destas restrições funcionais (no padrão *II* estes limites não são considerados).

A Tabela 4.15 mostra os desvios médios (em p.u.) de controles internos e de potência reativa gerada na área interna nos estudos com o problema de otimização ativo/reactivo. Verifica-se mais uma vez, que o FPOE_{II} é o mais preciso ao obter valores de controles internos equivalentes próximos de valores de controles internos de sua própria referência. No entanto, tal característica não o habilita para aplicações de otimização, pois nas soluções obtidas com o FPO_{II} e o com o FPOE_{II}, avaliações de valores potência reativa gerada da área externa, evidenciam a incapacidade do padrão *II* em representar reações reativas da rede externa. Nos estudos com o problema ativo/reactivo, nas soluções do FPO_{II} e do FPOE_{II}, a rede externa comporta-se como uma fonte de reativos irrestrita

para a rede interna.

Tabela 4.12: Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (GG) - Problema Ativo/Reativo

barra	Qg_0	ΔQg_{eq}	ΔQg_{ref}	ΔQg_{mod}
Sistema Interno				
18	0,1671	-0,2171	0,0628	-0,2800
15	-0,0704	0,0204	0,3004	-0,2800
24	1,0222	-1,4070	-1,1274	-0,2795
69	-1,0542	2,9446	3,1825	-0,2379
54	1,5574	-0,3856	-0,6030	0,2173
Sistema Externo				
113	0,1048	-1,0488	-0,0576	-1,0472
4	0,2153	-0,3780	0,0538	-0,4319
89	-0,0629	0,7084	1,0635	-0,3550
31	0,4028	-0,3499	-0,1285	-0,2213
25	0,2980	-0,6922	-0,5375	-0,1546

Tabela 4.13: Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (IG) - Problema Ativo/Reativo

barra	Qg_0	ΔQg_{eq}	ΔQg_{ref}	ΔQg_{mod}
Sistema Interno				
69	-1,0542	2,4008	2,6872	-0,2864
34	0,2304	-0,2804	-0,0004	-0,2800
15	-0,0704	0,0503	0,3004	-0,2500
24	1,0222	-1,3533	-1,1196	-0,2337
65	1,1359	-2,1359	-1,9609	-0,1750
Sistema Externo				
113	0,1048	-1,1048	-0,1693	-0,9355
4	0,2153	-0,4344	0,0053	-0,4398
89	-0,0629	0,3695	0,6709	-0,3014
31	0,4028	-0,3428	-0,0980	-0,2447
32	0,0910	-0,0424	0,1389	-0,1813

Tabela 4.14: Maiores Erros em Potência Reativa Gerada (II) - Problema Ativo/Reativo

barra	Q_{g0}	$\Delta Q_{g_{eq}}$	$\Delta Q_{g_{ref}}$	$\Delta Q_{g_{mod}}$
Sistema Interno				
54	1,5574	1,4425	-0,0622	1,5048
49	1,38579	-2,1470	-0,7656	-1,3813
66	-0,2919	-0,2331	-0,7080	0,9412
59	0,7184	-0,6927	0,2315	-0,9243
46	0,0188	-0,0224	-0,1363	0,1139
Sistema Externo				
25	0,2980	5,0440	0,6076	4,4364
89	-0,0629	4,1141	0,0003	4,1138
26	-1,1795	-3,0467	0,1248	-3,1716
104	0,0555	-2,9798	0,0000	-2,9798
90	0,6078	-2,3026	0,0000	-2,3026

Tabela 4.15: Média de Desvios - Problema Ativo/Reativo

	Δu_{eq}^{med}	Δu_{ref}^{med}	Δu_{mod}^{med}
padrão GG			
Δv	0,0595	0,0607	0,0026
Δt	0,0779	0,0774	0,0005
ΔP_g	0,0036	0,0021	0,0014
ΔQ_g	0,5387	0,5427	0,0742
padrão IG			
Δv	0,0583	0,0592	0,0024
Δt	0,0783	0,0784	0,0009
ΔP_g	0,0003	0,0003	0,0001
ΔQ_g	0,5231	0,5109	0,0638
Modelo II			
Δv	0,0652	0,0646	0,0008
Δt	0,0795	0,0798	0,0002
ΔP_g	0,0002	0,0002	0,0001
ΔQ_g	0,8251	0,8157	0,0278

4.3.2 Conclusões

Embora estejam aqui apresentados apenas alguns casos de estudos de otimização realizados, estes são representativos de uma série de estudos nos quais constatou-se as

mesmas características em cada modelo avaliado. Ponderando-se as informações contidas nestes estudos, representadas nas tabelas apresentadas nesta seção, conclui-se que o padrão *IG* é o mais adequado para estudos de otimização. A falta de fidelidade das informações disponíveis em relação à verdadeira condição de operação do sistema externo influencia de maneira semelhante os desempenhos do $FPOE_{GG}$ e do $FPOE_{IG}$. A solução do $FPOE_{IG}$ é praticamente igual a solução do FPO_{GG} , no entanto, os dados mostram que o $FPOE_{GG}$ é menos eficiente que o $FPOE_{IG}$ em atender o critério de otimização imposto a operação da área interna, fato explicável pela dificuldade que o $FPOE_{GG}$ encontra ao tentar atender o critério de otimização imposto a uma área sobre a qual não se dispõe de informações confiáveis. Embora os resultados numéricos obtidos com os modelos $FPOE_{GG}$ e $FPOE_{IG}$ sejam bastante semelhantes, existe uma tendência de os resultados obtidos com o $FPOE_{IG}$ serem melhores, caso a referência adotada seja o FPO_{GG} .

Com base nos conhecimentos obtidos nestas avaliações, constata-se que o modelo de otimização que melhor pode representar uma situação prática da operação de sistemas de energia elétrica interligados, e que se compõem de áreas individualmente operadas por centros de controles regionais, é o $FPOE_{IG}$. É evidente que um centro de operação de uma determinada região de um sistema interligado não implementa controles em áreas externas vizinhas, no entanto, a experiência obtida nos estudos realizados mostra que é mais razoável adotar nos modelos equivalentes representação de controles internos e externos, de restrições nas áreas interna e externa, e de função objetivo na área interna. Sendo assim, fica implícito que em todos os problemas de $FPOEG$ apresentados adiante, o padrão de otimização *IG* é adotado.

Estes estudos mostram que é muito importante o rigor das análises na validação de um modelo de otimização equivalente. A referência usada na avaliação de controles internos equivalentes pode promover conclusões erradas, se forem avaliados os desvios médios obtidos, comparando-se apenas soluções de processos de otimizações de referência e equivalente associadas a um mesmo modelo. Desta forma, se nesta avaliação, não se considerar também uma referência global, que é útil para mostrar se os controles internos equivalentes foram obtidos à custa do comprometimento da condição operacional do sistema externo; pode-se concluir que o padrão *II* é o mais adequado para estudos de otimização equivalentes, o que é absolutamente errado.

Os resultados apresentados nestes estudos ressaltam a importância de se considerar os controles e restrições no sistema externo para poder obter o melhor modelo equivalente, e estas considerações são uma suposição bastante coerente com a prática de operação de sistemas reais, de que o sistema externo também está operando dentro dos limites operacionais. Nestas avaliações constata-se que o FPO_{II} e o $FPOE_{II}$ são inadequados para estudos de otimização e que o problema de modelagem de fluxos de potência ótimo em estudos de otimização está fortemente associado com as dificuldades de representação de restrições e controles nas áreas externas. Isto é evidenciado nas análises de geração de potência reativa na área externa nas quais constatou-se que os controles internos equivalentes “ótimos” foram obtidos à custa de condições operacio-

nais inviáveis nos sistemas externos.

4.4 Avaliando Processo de Casamento na Fronteira

Na operação em tempo real o estado do sistema interno é continuamente atualizado através da função de estimação de estado. Esta informação acerca do estado atual do sistema interno tem sido utilizada também para “casar” em tempo real o modelo externo com o modelo interno atualizado, através do procedimento de casamento na fronteira. No casamento na fronteira injeções de potência equivalentes que ajustam o modelo externo ao estado interno atual dado pelo estimador de estado são calculadas ((Monticelli et al., 1979) e (Lo et al., 1997)). Este procedimento diminui sensivelmente os erros de reações externas nos estudos de análise de contingência realizados no sistema interno.

Em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) também é proposta a adoção do procedimento de casamento na fronteira durante estudos de otimização, para impedir que erros de modelagem da rede externa se propagem para a rede interna. Neste trabalho o procedimento de casamento na fronteira é reavaliado, de forma crítica, em estudos de otimização equivalente. São identificadas situações típicas nas quais o procedimento de casamento na fronteira acaba por deteriorar a resposta do sistema externo, ao invés de melhorá-la. Para a avaliação do procedimento na fronteira em estudos de otimização equivalente, comparações são estabelecidas entre erros de cálculos de controles resultantes de dois tipos de processos de otimização equivalentes: um em que o procedimento de casamento na fronteira é usado, e um outro em que não se usa tal procedimento.

Nesta seção é feita uma avaliação de influências de incertezas externas na determinação de injeções de potências equivalentes obtidas pelo procedimento de casamento na fronteira e usadas em processos de FPOE. Na tentativa de fazer estudos em que situações de operação reais fossem representadas, considerou-se erros nos dados da rede externa obtidos por uma função randômica, de forma a reproduzir em estudo, uma situação realista, na qual consideram-se erros aleatórios em dados do sistema externo de forma generalizada. Os erros acerca da rede externa em um modelo de otimização equivalente podem advir de erros grosseiros em medidas, erros de informações incorretas, erros em modelos de previsão de carga, etc, ou seja, os erros de modelagem são casuais, e desta forma para simplificar as explicações, neste trabalho, denominam-se incertezas externas quaisquer erros sobre dados do sistema externo.

As incertezas inerentes à representação de rede externas podem ser decorrentes de muitos fatores; os dados usados para representar a rede externa aproximada possuem atributos diferentes e portanto têm influências diversas sobre o modelo de otimização equivalente. Para analisar como cada um destes dados, que são variáveis e parâmetros do problema de FPOE, uma seqüência de processos de otimização foi realizada, e os resultados destes estudos são apresentados a seguir. Dois tipos de problemas de otimização foram usados, o problema reativo (dado em (3.3)) e o problema ativo/reactivo

(dado em (3.4)) .

4.4.1 Avaliação de Influências de Incertezas Externas na Determinação de Injeções de Potências Equivalentes

Para cada um dos casos de estudos apresentados nesta seção, são mostrados os desvios médios (em p.u.) nos valores de gerações de potência reativa e de variáveis de controle do sistema interno. Os desvios médios apresentados foram obtidos com a expressão (2.18), por comparação de soluções de $FPOE_{IG}$ com soluções de FPO_{IG} . Os processos de otimização equivalentes envolvem incertezas (erros) em variáveis/funções e parâmetros externos, tais como: magnitudes de tensões, *taps*, gerações e cargas (de potências ativa e reativa). Tais incertezas foram simuladas no sistema externo aleatoriamente, mas dentro de determinadas faixas preestabelecidas. Estas faixas determinam a porcentagem máxima de erro que se deseja considerar para uma dada informação sobre o sistema externo. As alterações aleatórias em variáveis de otimização, além de respeitar o valor da porcentagem de erros, quando se trata de erros em variáveis controladas, também respeitam os limites operacionais máximos e mínimos dessas variáveis. Nesta seção foram consideradas faixas de 5,0 % para todas as incertezas envolvidas nos estudos.

Foram realizados os processos de otimização equivalentes definidos a seguir, e cada um deles, associado com o procedimento de casamento na fronteira, e sem a adoção de tal procedimento:

- I - Processo FPOE envolvendo incertezas em magnitudes de tensão (externas).
- II - Processo FPOE envolvendo incertezas em *taps* de transformador (externos).
- III - Processo FPOE envolvendo incertezas em gerações de potência reativa (externas).
- IV - Processo FPOE envolvendo incertezas em cargas de potências ativa e reativa (externas).
- V - Processo FPOE envolvendo incertezas em gerações de potência ativa (externas).
- VI - Processo FPOE envolvendo ao mesmo tempo, as incertezas de todos os processos citados acima.

Tabela 4.16: Desvios Médios - Problema Reativo (IEEE-118 barras)

Com Casamento na Fronteira					
	I-($\times 10^{-2}$)	II-($\times 10^{-2}$)	III-($\times 10^{-2}$)	IV-($\times 10^{-2}$)	V-($\times 10^{-2}$)
Δv_{mod}^{med}	0,1621	0,0895	0,1379	0,1382	0,1401
Δt_{mod}^{med}	0,0354	0,0362	0,0363	0,0359	0,0352
ΔQg_{mod}^{med}	9,7412	5,5568	7,4039	7,4101	7,4045
Sem Casamento na Fronteira					
	I	II	III	IV-($\times 10^{-3}$)	V-($\times 10^{-3}$)
Δv_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0411	0,0238
Δt_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0211	0,0132
ΔQg_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	2,6763	2,1537

Tabela 4.17: Desvios Médios - Problema Reativo (SSB-810 barras)

Com Casamento na Fronteira					
	I-($\times 10^{-2}$)	II-($\times 10^{-2}$)	III-($\times 10^{-2}$)	IV-($\times 10^{-2}$)	V-($\times 10^{-2}$)
Δv_{mod}^{med}	0,0144	0,0530	0,0341	0,0046	0,0045
Δt_{mod}^{med}	0,0639	0,1015	0,1088	0,0540	0,0537
ΔQg_{mod}^{med}	8,8071	14,4343	15,9441	5,8877	5,8894
Sem Casamento na Fronteira					
	I	II	III	IV-($\times 10^{-3}$)	V-($\times 10^{-3}$)
Δv_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0025	0,0020
Δt_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0087	0,0022
ΔQg_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	1,6601	5,5996

Na Tabela 4.16 apresentam-se os desvios médios nos valores de gerações de potência reativa e de variáveis de controle do sistema interno obtidos num estudo de otimização realizado com o sistema IEEE-118 barras e com um problema reativo. Os desvios médios nos valores de gerações de potência reativa e de variáveis de controle do sistema interno obtidos num estudo realizado com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras (SSB-810 barras), também com o problema reativo, são apresentados na Tabela 4.17. Finalmente num estudo realizado também com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras, mas com o problema ativo/reactivo, determinam-se os desvios médios apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Desvios Médios - Problema Ativo/Reativo (SSB-810 barras)

Com Casamento na Fronteira					
	I-($\times 10^{-2}$)	II-($\times 10^{-2}$)	III-($\times 10^{-2}$)	IV-($\times 10^{-2}$)	V-($\times 10^{-2}$)
Δv_{mod}^{med}	0,0070	0,1126	0,0003	0,1551	0,0025
Δt_{mod}^{med}	0,0021	0,0257	0,0001	0,0858	0,0006
$\Delta P g_{mod}^{med}$	0,1491	1,2615	0,0010	0,6679	0,1226
$\Delta Q g_{mod}^{med}$	0,8512	7,9531	0,0032	14,9437	0,2448
Sem Casamento na Fronteira					
	I	II	III	IV-($\times 10^{-3}$)	V
Δv_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	0,1771	0,0000
Δt_{mod}^{med}	0,0000	0,0000	0,0000	0,1147	0,0000
$\Delta P g_{mod}^{med}$	0,0000	0,0000	0,0000	0,8079	0,0000
$\Delta Q g_{mod}^{med}$	0,0000	0,0000	0,0000	20,0040	0,0000

As Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam desvios médios obtidos em dois tipos de processos de otimização, um em que casamento na fronteira por meio de injeções de potência ativa e reativa é feito para ajustar os *mismatches* de potência das barras de fronteira, e um outro processo em que as injeções de potência equivalentes não são usadas (Sem Casamento na Fronteira).

Nas Tabelas 4.16 e 4.17 observa-se que os processos de otimização sem casamento na fronteira não são capazes de “filtrar” os erros em cargas de potências ativa e reativa e erros em geração de potência ativa. Isto é explicável pelo fato de que cargas de potências ativa e reativa e potência ativa gerada não são variáveis de controle no problema reativo solucionado, ou seja, são na verdade parâmetros do problema de otimização. Desta forma, vê-se que a influência de erros em variáveis não controladas no processo de otimização não pode ser eficientemente minimizada com a utilização de ações dos controles externos. Os erros em geração de potência reativa na área externa, que é uma variável funcional do problema, também são “filtrados” pela consideração de restrições operacionais dessas variáveis e da atuação dos controles em variáveis da área externa. Por outro lado, constata-se que todos os erros de informação influenciam os cálculos de controles equivalentes quando o procedimento de casamento na fronteira é usado. Pois, o procedimento de casamento na fronteira resume-se na solução de um problema de fluxo de carga, e neste problema os erros da rede externa são parâmetros nos cálculos das injeções de potências equivalentes determinadas.

No problema ativo/reactivo, geração de potência ativa é uma variável de controle, e cargas de potência ativa e reativa são parâmetros do problema. A Tabela 4.18 mostra, como esperado, que neste tipo de problema os erros em geração de potência ativa, na área externa, além dos erros em magnitude de tensão, *tap* de transformadores e geração de potência reativa, também são “filtrados” caso o procedimento de casamento na fronteira não seja usado.

Os dados das tabelas apresentadas demonstram que em estudos de otimização equivalente, nos quais conta-se apenas com erros nos controles externos, estes não comprometem o cálculo de controles internos no caso em que casamento na fronteira não é usado, e que o casamento na fronteira deteriora a resposta do modelo equivalente. Verifica-se assim a importância do efeito de alterações nos controles externos que participam do processo de otimização para atender as restrições equivalentes externas. Sem os controles externos, as imprecisões nos valores das variáveis externas influenciam de maneira a provocar erros no cálculo dos controles internos. Neste caso, se o casamento na fronteira por meio de injeções de potências ativa e reativa for realizado, os erros em valores de variáveis controladas do sistema externo são refletidos na fronteira (de modo indesejado) e resultam em injeções equivalentes que promovem erros no cálculo de controles internos e externos, pois levam em conta injeções equivalentes indesejadas na fronteira. Estas injeções de potência equivalentes na fronteira, neste caso, faz com que o casamento na fronteira deteriore a resposta do modelo equivalente.

4.4.2 **Avaliação da Importância do Procedimento de Casamento na Fronteira em Processos de FPOE**

O principal foco da avaliação de influência de incertezas externas no modelo de otimização equivalente incide sobre a importância da utilização do procedimento de casamento na fronteira na composição da representação da rede externa equivalente proposta para este modelo. E neste tipo de avaliação, comparações são estabelecidas entre erros de modelos resultantes de dois tipos de processos de otimização: um deles em que o procedimento de casamento na fronteira é usado, e um outro em que não se usa tal procedimento.

Pela análise das tabelas apresentadas na seção anterior, pode-se observar que nos processos de otimização equivalentes I, II e III (caso de FPO reativo); e I, II, III e V (caso de FPO ativo/reactivo), processos em que somente os controles externos são sujeitos a incertezas, obtêm-se controles equivalentes internos **exatos**, caso o casamento na fronteira não seja usado. Nestes casos, se o procedimento de casamento na fronteira for usado, a solução do FPOE é deteriorada. Nos processos em que aparecem incertezas nas cargas (de potências ativa e reativa) e geração de potência ativa externas, casos IV e V, há uma tendência de que os processos de casamento na fronteira melhorem as respostas do modelo. Obviamente uma situação prática é uma composição das situações I, II, III, IV e V, ou seja o processo VI, que envolve incertezas em todos os parâmetros e controles externos ao mesmo tempo.

Os estudos apresentados a seguir mostram como o desempenho do modelo FPOE pode ser influenciado pelo processo de casamento na fronteira. Os casos de estudos desta subseção, que utilizam o Processo VI, estão relacionados com um problema reativo e são comentados a seguir:

Caso 1- Envolve incertezas em magnitudes de tensões, *taps*, gerações e cargas (de potências ativa e reativa), todas dentro de faixas de variação de 5,0%.

Caso 2- Envolve incertezas em magnitudes de tensões, *taps*, gerações de potência reativa, todas dentro de faixas de variação de 5%; e incertezas em cargas (de potências ativa e reativa) e gerações de potência ativa, estas dentro de faixas de variação de 10,0 %.

Caso 3- Envolve incertezas em magnitudes de tensões, *taps*, gerações de potência reativa, todas dentro de faixas de variação de 5%; e incertezas em cargas (de potências ativa e reativa) e gerações de potência ativa, estas dentro de faixas de variação de 15,0 %.

Caso 4- Envolve incertezas em magnitudes de tensões, *taps*, gerações de potência reativa, todas dentro de faixas de variação de 5%; e incertezas em cargas (de potências ativa e reativa) e gerações de potência ativa, estas dentro de faixas de variação de 20,0 %.

Tabela 4.19: Desvios Médios- Com Casamento

	Δv_{mod}^{med}	Δt_{mod}^{med}	ΔQg_{mod}^{med}
Caso 1	$6,74 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-3}$	$1,92 \times 10^{-1}$
Caso 2	$6,63 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-3}$	$1,86 \times 10^{-1}$
Caso 3	$7,59 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-3}$	$2,10 \times 10^{-1}$
Caso 4	$6,98 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-3}$	$1,94 \times 10^{-1}$

Tabela 4.20: Desvios Médios- Sem Casamento

	Δv_{mod}^{med}	Δt_{mod}^{med}	ΔQg_{mod}^{med}
Caso 1	$5,83 \times 10^{-4}$	$1,02 \times 10^{-3}$	$1,77 \times 10^{-1}$
Caso 2	$6,27 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^{-1}$
Caso 3	$9,24 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-3}$	$2,47 \times 10^{-1}$
Caso 4	$8,42 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-1}$

Os desvios médios apresentados nas Tabelas 4.19 e 4.20 mostram que o casamento na fronteira pode ser dispensável em casos em que os erros em geração de potência ativa e em cargas de potências ativa e reativa são moderados (caso 1 e caso 2). Mas nos casos em que os erros em geração de potência ativa e em cargas de potências ativa e reativa são mais intensos (caso 3 e caso 4), o uso do casamento na fronteira mostra-se como um artifício capaz de trazer melhoria no cálculo de controles internos equivalentes.

Outros inúmeros casos foram estudados, além destes estudos que são mostrados nas Tabelas 4.19 e 4.20. E apresenta-se a seguir, conclusões consequentes dos estudos realizados:

1) Foram detectados casos em que os erros de informações muito acentuados inviabilizaram a solução do problema de fluxo de carga no procedimento do casamento na

fronteira. Podem ocorrer problemas de divergência e de não atendimento do critério de convergência que deve ser muito rígido (na ordem de $1,00 \times 10^{-6}$), impedindo a obtenção de injeções de potências equivalentes.

2) Nos estudos realizados verificou-se a importância da precisão exigida no atendimento do critério de convergência (*mismatches* de potência nulos) na solução do FC do casamento na fronteira. Um critério rígido deve ser adotado para impedir que valores imprecisos de injeções de potência equivalentes inseridas nas barras de fronteira causem erros no cálculo de controles equivalentes. É importante, na validação do modelo FPOE, fazer uma avaliação sobre ordem de valores adotados nos critérios de convergência.

4.4.3 Conclusões

Os resultados obtidos nestes estudos, de certa forma são esperados, pois conforme se destaca em (Papalexopoulos et al., 1989) a solução de um FPO não é sensível às condições iniciais. Os resultados apresentados mostram que nos processos de solução de FPOE sem casamento na fronteira, as incertezas nos controles externos são gradativamente eliminadas com a atualização destes (controles externos) durante o processo de atualização. As incertezas sobre variáveis externas sobre as quais se atribui controles durante o processo de otimização são apenas condições iniciais do problema, e sendo assim, os valores dos controles externos são recalculados corretamente a partir dos valores iniciais que contém erros de informação. No processo de solução do FPOE com casamento na fronteira, as incertezas dos controles externos são refletidas nas barras de fronteira através de injeções equivalentes, deteriorando a resposta do modelo.

Em situações em que há incertezas em controles e parâmetros externos, o procedimento do casamento na fronteira é um artifício importante para melhoria de desempenho de FPOE. No entanto, observa-se que é necessário avaliar a necessidade de sua utilização, pois os resultados dos estudos apresentados, mostram que nem sempre é viável tomar a decisão de usá-lo. Esta avaliação é uma tarefa que envolve noção da operação do sistema em estudo, e a decisão de usar ou não o procedimento de casamento na fronteira deve ser baseada em experiências computacional e heurística obtidas com a utilização efetiva do modelo de otimização equivalente.

Capítulo 5

Avaliação do Desempenho de Modelos Equivalentes Externos em Estudos de Otimização

5.1 Introdução

Os estudos de otimização *on line* são feitos nos centros de controle através de modelos de Fluxo de Potência Ótimo (FPO). O objetivo fundamental destes estudos é a determinação de controles “ótimos” que, ao serem implementados, levem a uma economia de recursos (relacionada ao critério de otimização adotado) em todo o sistema interligado. Os benefícios econômicos advindos da implementação destes controles podem ser muito significativos. Na referência (Papalexopoulos et al., 1994) é feita uma análise de custo/benefício da implementação de um modelo de otimização ativo *on line* no centro de controle da *Pacific Gas and Electric Company* (PG&E).

De maneira geral os resultados obtidos a partir de estudos realizados em centros de controles nos quais modelos equivalentes externos são usados, apresentam algum nível de imprecisão. Em estudos de otimização, o cálculo de controles equivalentes é prejudicado de forma bastante significativa pela imprecisão de modelos equivalentes e pela falta de informações sobre os sistemas externos, conforme discutido em (Nepomuceno e Santos Jr., 1996). No contexto de sistemas interligados a utilização de modelos equivalentes durante os estudos de otimização *on line* é imprescindível. Neste caso, cada centro de controle do sistema interligado é responsável pela otimização de seus próprios recursos. Nesta tarefa um dado centro de controle geralmente não conta com informações completas e corretas sobre as áreas vizinhas. Desta forma, os estudos de otimização realizados em cada centro devem ser feitos, representando-se os sistemas externos por algum tipo de modelo equivalente. Após estes estudos de otimização, cada centro de controle determina as ações de controle que (supostamente) atendem critérios individuais (de cada região).

Dependendo da precisão do modelo externo adotado, os estudos de otimização *on*

line realizados podem produzir controles “ótimos” muito imprecisos. Quando implementadas tais ações de controle podem levar o sistema interconectado a pontos operacionais ainda piores, em que os objetivos iniciais de economia de recursos não são atingidos. Assim, os benefícios econômicos advindos da utilização de modelos de otimização *on line* podem ser seriamente comprometidos pela utilização de modelos externos imprecisos.

Neste capítulo o impacto econômico de modelos equivalentes em estudos de otimização *on line* é avaliado no contexto de sistemas interligados; e é proposta uma nova metodologia para a avaliação deste impacto. A base desta metodologia é a comparação entre dois estados operativos: *i*) o estado obtido na solução do problema de otimização global de referência descrito na formulação dada em (2.1), e *ii*) o estado obtido quando os controles calculados em cada centro de controle, através de estudos de FPO equivalentes, são implementados no sistema utilizando-se uma ferramenta de fluxo de carga.

Nos estudos de otimização realizados neste capítulo, duas abordagens de modelos externos foram avaliadas, ambas derivadas do FPOE. Na primeira abordagem (FPOE₁) os controles externos são fixados e as restrições externas desprezadas. A abordagem FPOE₁ representa um estudo de otimização equivalente no qual determinadas informações externas (tais como controles, função objetivo, restrições, etc) não podem ser representadas. Esta situação ocorre muito freqüentemente, na prática, quando o sistema externo é representado por modelos equivalentes tradicionais, tais como os modelos baseados em fluxo de carga (Kato et al., 1994). Em modelos baseados em fluxo de carga, a função objetivo e as restrições, simplesmente, não são representadas no sistema externo.

Na segunda abordagem (FPOE₂) os controles externos são variáveis de modo que as restrições externas sejam atendidas. A abordagem FPOE₂ representa um estudo de otimização equivalente mais geral conforme destacado em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997). Os impactos econômicos das duas abordagens de modelagem externa são avaliados neste capítulo.

Deve-se ressaltar, que o foco dos estudos feitos neste capítulo não é o erro de modelos equivalentes em si, mas sim a avaliação dos impactos econômico e operacional do uso de modelos equivalentes em estudos de otimização de sistemas interligados.

5.2 Estudos de Casos

Os impactos do uso de modelos equivalentes em estudos de otimização em sistemas interligados (Figura 5.1), foram avaliados levando-se em conta a influência do nível da descentralização a que esta submetida a operação do sistema (número de centros de controle). Sendo assim, o sistema Sul-Sudeste Brasileiro (SSB - 810 barras), usado nas análises realizadas neste capítulo, foi dividido em quatro subsistemas conforme mostrado na Tabela 5.3.

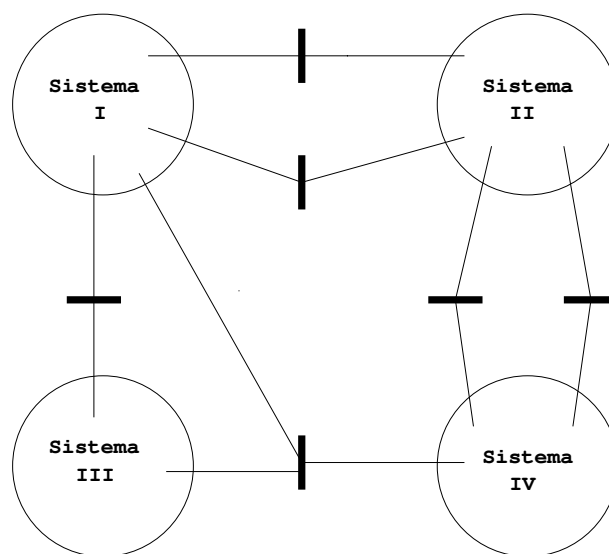


Figura 5.1: Sistemas Interligados

Três estudos de casos foram realizados nesta seção. O Caso I, que representa uma situação em que o sistema interligado tem sua operação descentralizada e submetida a duas áreas de controle (A e B conforme Tabela 5.1). O Caso II, em que a descentralização da operação do sistema é dada em três áreas de controle (A, B e C, conforme Tabela 5.2). E por fim o Caso III, que conta com quatro áreas de controle (A, B, C e D, conforme Tabela 5.3).

Tabela 5.1: Divisão do SSB - 810 barras em 2 Subsistemas

Áreas de Controle	barras	ramos	barras PV	trafos	Geração (MW)	Carga (MW)
Área A(Sist. I)	176	265	46	37	21982	10720
Área B(Sists. II, III e IV)	634	1075	68	168	15881	25446

Tabela 5.2: Divisão do SSB - 810 barras em 3 Subsistemas

Áreas de Controle	barras	ramos	barras PV	trafos	Geração (MW)	Carga (MW)
Área A (Sist. I)	176	202	46	14	21982	10720
Área B (Sist. II)	155	257	16	7	4590	15695
Área C (Sists. III e IV)	479	721	52	135	11290	9751

Tabela 5.3: Divisão do SSB - 810 barras em 4 Subsistemas

Áreas de Controle	barras	ramos	barras PV	trafos	Geração (MW)	Carga (MW)
Área A (Sist. I)	176	202	46	14	21982	10720
Área B (Sist. II)	155	257	16	7	4590	15695
Área C (Sist. III)	233	320	14	58	8066	3602
Área D (Sist. IV)	246	356	38	63	3224	6149

5.2.1 Metodologia de Avaliação de Impacto Econômico de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização

Nos estudos apresentados em (Hao e Papalexopoulos, 1995) e (Nepomuceno e Santos Jr., 1997), as ações de controle calculadas pelos procedimentos de otimização equivalentes foram avaliadas apenas no contexto de um centro de controle. Nos estudos realizados neste capítulo, os impactos operacional e econômico de modelos equivalentes externos são avaliados no contexto do sistema interligado como um todo. Os efeitos e os impactos da utilização de modelos de otimização equivalentes são avaliados pela acuidade com que perdas de potência e restrições são representadas.

Em sistemas interligados, os estudos *on line* são tradicionalmente realizados em cada um de seus centros de controle. Sendo assim, para cada um dos centros de controle, são realizados procedimentos de FPOE. As ações de controle equivalentes (ações de controle que levam em conta erros do sistema externo) determinadas em cada um desses procedimentos de otimização, freqüentemente, são imprecisas devido aos erros de representação da área externa a estes centros de controle, e embora tais ações de controle sejam imprecisas, são implementadas no sistema. Para avaliar os impactos econômico e operacional, da implementação de controles equivalentes “ótimos” no sistema interligado, apresenta-se a metodologia descrita a seguir:

- a) Realiza-se otimização reativa global envolvendo o sistema interligado como um todo. Considerando-se os aspectos operacional e econômico, a solução deste processo de otimização é tomada como o melhor ponto operacional para o sistema interligado.
- b) Procedimentos de otimização reativa são realizados em cada centro de controle usando um modelo de FPOE. Note que a representação de sistemas externos é imprescindível. Cada centro de controle calcula suas próprias **ações de controle equivalentes**.
- c) As ações de controle calculadas em cada centro de controle em b) são implementadas no sistema interligado usando-se uma ferramenta de fluxo de carga.

- d) As soluções obtidas (em **a**) e **c**) são comparadas quanto à economia de recursos (função objetivo adotada nos processos de otimização) e ao atendimento de restrições.

As comparações entre as soluções obtidas em **a**) e **c**) revelam os impactos econômico e operacional do modelo equivalente em sistemas interligados, mostrando que a otimização de recursos pode ser sobre ou subestimadas, assim como as restrições podem não ser atendidas. Esta metodologia proposta permite avaliar as discrepâncias entre o ponto operacional determinado pela implementação dos controles reativos “ótimos” calculados em cada centro de controle e o obtido pela otimização global.

5.2.2 Estudo de Caso I

De acordo com a metodologia de análise apresentada anteriormente nesta seção, os passos básicos descritos a seguir orientam a avaliação do impacto econômico de modelos equivalentes em estudos de otimização de um sistema interligado. Neste estudo de caso supõe-se que o sistema interligado esteja sendo operado por dois centros de controle (A e B) conforme a Tabela 5.1.

Algoritmo para o Estudo com a Divisão em Duas Áreas

Passo 0 - Um procedimento de otimização global de referência (conforme descrito na formulação dada em (2.3) é realizado. Destalhes deste processo de otimização são mostradas nas Tabelas 5.4 e 5.5 apresentadas a seguir.

Passo 1 - Cada centro de controle realiza 2 processos de otimização, utilizando respectivamente os modelos $FPOE_1$ e $FPOE_2$. Assim, temos 4 processos de otimização conforme descrito a seguir:

$FPOE_1^A$ - Processo de otimização $FPOE_1$ realizado pelo centro de controle A (onde a área definida por A é considerada interna e a área definida por B é considerada externa). Detalhes deste processo de otimização dados nas Tabelas 5.6 e 5.7

$FPOE_1^B$ - Processo de otimização $FPOE_1$ realizado pelo centro de controle B (onde a área definida por B é considerada interna e a área definida por A é considerada externa).

$FPOE_2^A$ - Processo de otimização $FPOE_2$ realizado pelo centro de controle A (onde a área definida por A é considerada interna e a área definida por B é considerada externa). Detalhes deste processo de otimização dados nas Tabelas 5.8 e 5.9

$FPOE_2^B$ - Processo de otimização $FPOE_2$ realizado pelo centro de controle B (onde a área definida por B é considerada interna e a área definida por A é considerada externa).

As ações de controle internas calculadas em cada um dos estudos de otimização acima são armazenadas pelos centros de controle.

Passo 2 - As ações de controle calculadas no **Passo 1** em cada centro de controle são implementadas no sistema interconectado utilizando uma ferramenta de fluxo de carga. Temos dois tipos de ações de controle: *i*) aquelas calculadas utilizando o FPOE₁ que representam o sistema externo através de modelos tradicionais, e *ii*) aquelas calculadas utilizando o FPOE₂, que representam o sistema externo com restrições equivalentes.

Assim, são implementadas no sistema interconectado dois conjuntos de controle, através da resolução de dois procedimentos de fluxo de carga (FC), conforme descrito a seguir:

FC₁ - Simulação dos controles calculados pelos processos de otimização FPOE₁^A e FPOE₁^B, respectivamente nas áreas definidas por A e B. A solução deste fluxo de carga nos fornece o estado do sistema interligado se os centros de controle A e B utilizassem modelos externos tradicionais (com sistema externo irrestrito) durante seus estudos de otimização; e implementassem os controles calculados por tais estudos.

FC₂ - Simulação dos controles calculados pelos processos de otimização FPOE₂^A e FPOE₂^B, respectivamente nas áreas definidas por A e B. A solução deste fluxo de carga nos fornece o estado do sistema interligado se os centros de controle A e B utilizassem modelos externos com restrições equivalentes durante seus estudos de otimização; e implementassem os controles calculados por tais estudos.

Passo 3 - As soluções de FC₁ e FC₂ são comparadas (em termos de perdas e restrições) à solução do procedimento de otimização global (OG) realizado no **Passo 0**. A comparação entre FC₁ e OG revela o impacto econômico dos modelos tradicionais nos estudos de otimização, mostrando que estes modelos estão superestimando ou subestimando as perdas no sistema interconectado. A comparação entre FC₂ e OG revela o impacto econômico dos modelos externos com restrições equivalentes.

Resultados do Estudo com a Divisão em Duas Áreas

Dados da solução do processo de otimização global descrito no **Passo 0** são mostrados nas Tabelas 5.4 e 5.5. Na Tabela 5.4, tanto para o sistema interno (Área A), como para o sistema externo (Área B), são apresentadas barras de geração que apresentaram as duas maiores (*H*) e as duas menores (*L*) magnitudes de tensão, e barras de geração que apresentaram os dois maiores multiplicadores de Lagrange (λ_q), dados em MW/MVAr e associados à geração de potência reativa (*M*), na solução do processo de Otimização Global. São dados os valores máximos (Qg^{max}) e mínimos (Qg^{min}) de geração de potência reativa das barras apresentadas, em MVAr. Coincidentemente as

barras externas que apresentaram os dois menores valores de magnitudes de tensão, também apresentaram os dois maiores multiplicadores de Lagrange. Sendo assim, são inseridas na tabela, outras barras que apresentam, depois dessas, os menores valores de magnitude de tensão.

Tabela 5.4: Tensões em Barras de Geração - Otimização Global

	n.b.	V(p.u.)	$Qg(\text{MVar})$	λ_q	Qg^{min}	Qg^{max}
Sistema Interno - Área A						
H	1241	1,0406	150,0000	0,5206	-150,00	150,00
H	1250	1,0338	236,9304	0,0000	-999,90	999,90
L	1130	0,9949	-169,4189	0,0000	-999,90	999,90
L	1114	0,9986	90,0000	1,2483	-90,00	90,00
M	1242	1,0240	120,0000	54,4917	-120,00	120,00
M	1258	1,0343	80,0000	43,2483	-80,00	80,00
Sistema Externo - Área B						
H	756	1,0577	365,9098	0,0000	-400,00	400,00
H	710	1,0572	87,7429	0,0000	-999,90	999,90
L	1438	0,9678	67,8275	0,0000	-80,00	80,00
L	1181	0,9785	-72,0063	0,0000	-999,90	999,90
M	152	0,9682	19,0000	376,4284	-9,50	19,00
M	399	0,9745	1,0000	238,2042	0,00	1,00

Tabela 5.5: Transformadores com Controle de *Tap* - Otimização Global

t	ramo	tap(p.u.)	t^{min}	t^{max}
Sistema Interno - Área A				
H	1483-1263	1,0283	0,9000	1,1000
H	1309-1241	1,0190	0,9000	1,1000
L	1225-1132	0,9680	0,9000	1,1000
L	1242-1312	0,9744	0,9000	1,1000
Sistema Externo - Área B				
H	977-976	1,0517	0,9000	1,1000
H	734-733	1,0515	0,9000	1,1000
L	1456-1457	0,9360	0,9000	1,1000
L	62-63	0,9413	0,9000	1,1000

Apresentam-se na Tabela 5.5, os ramos das áreas interna e externa, que apresenta-

ram os dois maiores (H) e os dois menores (L) valores de tap , na solução da Otimização Global, e os valores máximos e mínimos estipulados para os $taps$ dos transformadores destes ramos.

Dados de soluções obtidas por processos de otimização equivalentes são apresentados nas Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9. Os dados apresentados nestas tabelas, são referentes aos sistemas interno e externo, associados às Áreas A e B da Tabela 5.1, respectivamente. As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram dados obtidos na solução de um processo FPOE₁ e as Tabelas 5.8 e 5.9 mostram dados obtidos na solução de um processo FPOE₂.

Na Tabela 5.6 não são apresentados os maiores multiplicadores de Lagrange associados à geração de potência reativa na área externa, pois o processo de otimização equivalente usa uma aproximação do modelo equivalente tradicional baseado em Fluxo de Carga. Uma análise comparativa de valores de controles equivalentes externos obtidos pelos dois modelos de representação de área externas pode dar uma noção razoável de seus desempenhos.

As comparações entre FC₁ e FC₂ com a otimização global são feitas a seguir, e estão mostradas nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12. As Tabelas 5.10 e 5.11 fazem uma avaliação do impacto econômico e a Tabela 5.12 avalia o impacto operacional dos modelos equivalentes.

A Tabela 5.10 mostra valores de referência de perdas de potência, obtidos pela Otimização Global, além de valores de perdas obtidos quando os controles equivalentes são implementados no sistema interligado através dos estudos de fluxo de carga FC₁ e FC₂. São comparados valores de perdas ôhmicas (P.O.), perdas reativas (P.R.) e de perdas aparentes (P.A.).

Tabela 5.6: Tensões em Barras de Geração - FPOE₁^A

	n.b.	V (p.u.)	Qg (MVar)	λ_q	Qg^{min}	Qg^{max}
Sistema Interno - Área A						
H	1241	1,0401	1,8656	0,0000	-150,00	150,00
H	1250	1,0370	358,9858	0,0000	-999,90	999,90
L	1130	1,0006	-136,6400	0,0000	-999,90	999,90
L	1114	0,9555	-90,0000	-14,3849	-90,00	90,00
M	1242	1,0232	120,0000	68,3265	-120,00	120,00
M	1258	1,0327	80,0000	58,6884	-80,00	80,00
Sistema Externo - Área B						
H	756	1,0000	130,7401	-	-	-
H	710	1,0500	78,8472	-	-	-
L	1438	1,0100	22,5357	-	-	-
L	1181	1,0400	253,7803	-	-	-

Tabela 5.7: Transformadores com Controle de Tap - FPOE₁^A

t	ramo	tap(p.u.)	t^{min}	t^{max}
Sistema Interno - Área A				
H	1483-1263	1,0268	0,9000	1,1000
H	1309-1241	1,0188	0,9000	1,1000
L	1225-1132	0,9686	0,9000	1,1000
L	1242-1312	0,9753	0,9000	1,1000
Sistema Externo - Área B				
H	977-976	0,9980	0,9000	1,1000
H	734-733	1,0270	0,9000	1,1000
L	1456-1457	0,9500	0,9000	1,1000
L	62-63	0,9000	0,9000	1,1000

Tabela 5.8: Tensões em Barras de Geração - FPOE₂^A

	n.b.	V(p.u.)	$Qg(\text{MVar})$	λ_q	Qg^{min}	Qg^{max}
Sistema Interno - Área A						
H	1241	1,0404	150,0000	0,6058	-150,00	150,00
H	1250	1,0337	239,0859	0,0000	-999,90	999,90
L	1130	0,9949	-169,4595	0,0000	-999,90	999,90
L	1114	0,9983	90,0000	1,1782	-90,00	90,00
M	1242	1,0240	120,0000	54,6998	-120,00	120,00
M	1258	1,0343	80,0000	43,4849	-80,00	80,00
Sistema Externo - Área B						
H	756	1,0576	366,0773	0,0000	-400,00	400,00
H	710	1,0572	87,8266	0,0000	-999,90	999,90
L	1438	0,9747	80,0000	0,0000	-80,00	80,00
L	1181	0,9785	-71,4643	0,0000	-999,90	999,90
M	152	0,9681	19,0000	377,0896	-9,50	19,00
M	399	0,9746	1,0000	238,0141	0,00	1,00

Tabela 5.9: Transformadores com Controle de Tap - FPOE₂^A

t	ramo	tap(p.u.)	t^{min}	t^{max}
Sistema Interno - Área A				
H	1483-1263	1,0283	0,9000	1,1000
H	1309-1241	1,0192	0,9000	1,1000
L	1225-1132	0,9680	0,9000	1,1000
L	1242-1312	0,9745	0,9000	1,1000
Sistema Externo - Área B				
H	977-976	1,0517	0,9000	1,1000
H	734-733	1,0516	0,9000	1,1000
L	1456-1457	0,9361	0,9000	1,1000
L	62-63	0,9414	0,9000	1,1000

Tabela 5.10: Perdas de Potência (Duas Áreas)

	OG	FC ₁	FC ₂
Sistema Interligado			
P.O.(MW)	1829,56	1862,61	1830,31
P.R.(MVar)	9088,29	9143,98	9104,79
Sistema Interno			
P.O.(MW)	1008,24	1016,77	1007,61
P.R.(MVar)	249,57	268,36	268,51
Sistema Externo			
P.O.(MW)	821,33	845,84	822,71
P.R.(MVar)	8838,72	8875,62	8836,28

Os dados da Tabela 5.10, mostram que sob o ponto de vista de minimização de perdas (critério econômico), a descentralização da operação em dois centros de controle leva à obtenção de controles equivalentes menos eficientes. Nota-se também, que os controles equivalentes obtidos a partir de modelos equivalentes tradicionais promovem impacto maior na economia do sistema interligado como um todo, e também a cada área individualmente.

A Tabela 5.11 faz uma análise percentual do impacto dos modelos equivalentes estudados na otimização do sistema interligado, calculando o “desperdício” percentual das potências ativa e reativa decorrentes da utilização destes modelos. Estes valores de “desperdícios” percentuais são calculados para o sistema interligado como um todo e tomando as perdas obtidas na otimização global como referência. Tais valores expressam que, numa estrutura descentralizada de operação, os controles equivalentes obtidos

em centros de controles de sistemas, determinam ações de controle que não resultam em otimização da operação global do sistema, essas porcentagens de “desperdícios” expressam o nível do impacto econômico resultante da utilização de modelos equivalentes em estudos de otimização.

Tabela 5.11: “Desperdícios” de Potência no Sistema Interligado (Duas Áreas)

Potência Ativa	Potência Reativa
FC ₁	
1,36%	0,86%
FC ₂	
0,04%	0,18%

Uma conclusão importante que se pode extrair da Tabela 5.11 é que a utilização de modelos equivalentes tradicionais deve levar a um “desperdício” de potência ativa da ordem de 1,36%, muito superior aos 0,04% de “desperdício” de potência no caso em que são utilizados modelos equivalentes com restrições externas. Assim, a utilização de modelos tradicionais têm um impacto negativo na economia do sistema interligado como um todo.

A avaliação do impacto operacional dos modelos equivalentes em estudos de otimização é feita considerando-se todas as restrições operacionais que deixaram de ser respeitadas quando os controles calculados pelos centros de controle A e B foram efetivamente implementados no sistema interligado. Isto é feito mostrando-se o número de restrições violadas na soluções fornecidas em FC₁ e FC₂, conforme a Tabela 5.12. Nesta tabela temos o número de magnitudes de tensões violadas (NV_{viol}), o número de *taps* violados (NT_{viol}), o número de gerações reativas violadas (NQ_{viol}), e ainda o volume total de gerações reativas violadas $\|\Delta Q_{viol}\|$, (dado em MVar) e calculado por:

$$\|\Delta Q_{viol}\| = \sum_{i \in \Omega_{Q_{viol}}} |Q_i - Q_i^{lim}| \quad (5.1)$$

onde :

$\Omega_{Q_{viol}}$ - conjunto de barras com gerações de potência reativa violadas;

Q_i - valor de potência reativa gerada na barra i ;

Q_i^{lim} - valor do limite violado de potência reativa gerada na barra i .

Tabela 5.12: Impacto Operacional de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização (Duas Áreas)

	NV_{viol}	NT_{viol}	NQ_{viol}	$\ \Delta Q_{viol}\ $
FC_1	0	0	10	85,68
FC_2	0	0	14	4,10

Percebe-se da Tabela 5.12 que quando os centros de controle A e B implementam, através de FC_1 , os controles calculados a partir dos processos de otimização $FPOE_1$ (que utilizam modelos equivalentes tradicionais), o volume de violações nas gerações reativas é muito mais elevado se comparado à solução FC_2 .

Conclui-se da Tabela 5.12 que os modelos equivalentes tradicionais têm um impacto negativo também no aspecto operacional do sistema interligado. Já os modelos externos com restrições equivalentes representados pela solução FC_2 têm uma boa representação dos aspectos operacionais.

5.2.3 Estudo do Caso II

Algoritmo para o Estudo com a Divisão em Três Áreas

Passo 0 - Um procedimento de otimização global de referência (conforme descrito na formulação dada em (2.3) é realizado.

Passo 1 - Cada centro de controle realiza 2 processos de otimização utilizando respectivamente os modelos $FPOE_1$ e $FPOE_2$. Assim, temos 6 processos de otimização conforme descrito a seguir:

$FPOE_1^A$ - Processo de otimização $FPOE_1$ realizado pelo centro de controle A (onde a área definida por A é considerada interna e as áreas definidas por B e C são consideradas externas).

$FPOE_1^B$ - Processo de otimização $FPOE_1$ realizado pelo centro de controle B (onde a área definida por B é considerada interna e as áreas definidas por A e C são consideradas externas).

$FPOE_1^C$ - Processo de otimização $FPOE_1$ realizado pelo centro de controle C (onde a área definida por C é considerada interna e as áreas definidas por A e B são consideradas externas).

$FPOE_2^A$ - Processo de otimização $FPOE_2$ realizado pelo centro de controle A (onde a área definida por A é considerada interna e as áreas definidas por B e C são consideradas externas).

$FPOE_2^B$ - Processo de otimização $FPOE_2$ realizado pelo centro de controle B (onde a área definida por B é considerada interna e as áreas definidas por A e C são consideradas externas).

$FPOE_2^C$ - Processo de otimização $FPOE_2$ realizado pelo centro de controle C (onde a área definida por C é considerada interna e as áreas definidas por A e B são consideradas externas).

As ações de controle internas calculadas em cada um dos estudos de otimização acima são armazenadas pelos centros de controle.

Passo 2 - As ações de controle calculadas no **Passo 1** em cada centro de controle são implementadas no sistema interconectado utilizando uma ferramenta de fluxo de carga. Temos dois tipos de ações de controle: *i*) aquelas calculadas utilizando o $FPOE_1$ que representam o sistema externo através de modelos tradicionais, e *ii*) aquelas calculadas utilizando o $FPOE_2$, que representam o sistema externo com restrições equivalentes.

Assim, são implementadas no sistema interconectado dois conjuntos de controle, através da resolução de dois procedimentos de fluxo de carga (FC), conforme descrito a seguir:

FC_1 - Simulação dos controles calculados pelos processos de otimização $FPOE_1^A$, $FPOE_1^B$ e $FPOE_1^C$, respectivamente nas áreas definidas por A, B e C. A solução deste fluxo de carga nos fornece o estado do sistema interligado se os centros de controle A, B e C utilizassem modelos externos tradicionais (com sistema externo irrestrito) durante seus estudos de otimização; e implementassem os controles calculados por tais estudos.

FC_2 - Simulação dos controles calculados pelos processos de otimização $FPOE_2^A$, $FPOE_2^B$ e $FPOE_2^C$, respectivamente nas áreas definidas por A, B e C. A solução deste fluxo de carga nos fornece o estado do sistema interligado se os centros de controle A, B e C utilizassem modelos externos com restrições equivalentes durante seus estudos de otimização; e implementassem os controles calculados por tais estudos.

Passo 3 - As soluções de FC_1 e FC_2 são comparadas (em termos de perdas e restrições) à solução do procedimento de otimização global (OG) realizado no **Passo 0**. A comparação entre FC_1 e OG revela o impacto econômico dos modelos tradicionais nos estudos de otimização, mostrando que estes modelos estão superestimando ou subestimando as perdas no sistema interconectado. A comparação entre FC_2 e OG revela o impacto econômico dos modelos externos com restrições equivalentes.

Resultados do Estudo com a Divisão em Três Áreas

Na Tabela 5.13 apresenta-se as perdas de potências ativa (P.O.) e reativa (P.R.) , e o “desperdício” percentual de tais potências no sistema interligado, no caso em que o sistema interligado é dividido em três áreas de controle. Os “desperdícios” percentuais são calculados para o sistema interligado como um todo, tomando-se as perdas obtidas

na otimização global como referência. As mesmas observações feitas no estudo de Caso I anterior, cabem aos resultados obtidos neste estudo. E pela comparação da Tabela 5.13 com a Tabela 5.11, infere-se que o nível de descentralização da operação influencia os estudos de otimização. O nível do impacto econômico do uso de otimização equivalente é maior, de maneira geral, no Caso II, ou seja, quando aumenta-se o número de áreas de controle no sistema interligado. A utilização de modelos equivalentes tradicionais no Caso II leva a um “desperdício” de potência ativa da ordem de 3,06% , superior aos 1,36% de desperdício de potência do Caso I. E no Caso II o “desperdício” de potência ativa da ordem de 3,06% quando modelos tradicionais são utilizados (FC₁) é muito superior aos 0,08% quando utiliza-se modelos equivalentes com restrições externas (FC₂).

Tabela 5.13: Perdas de Potência (Três Áreas)

FC ₁	
P.O.= 1886,38 MW	P.R.= 9305,33 MVar
FC ₂	
P.O. = 1828,88 MW	P.R. = 9093,81 MVar
“Desperdício” (P.O.)	“Desperdício” (P.R.)
FC ₁	
3,06%	2,20%
FC ₂	
0,08%	0,12%

Consta-se que no Caso II, a porcentagem de “desperdícios” das perdas reativas obtidos na simulação FC₂ em relação aos valores da Otimização Global não é superior à mesma porcentagem do Caso I. Mas este comportamento não é padrão. Outros estudos similares a estes, foram realizados, embora não apresentados nesta tese, e a tendência é de que aumentando-se o número de centros de controle, o impacto do uso de otimização equivalente leva a obtenção de condições operacionais menos econômicas para o sistema interligado que os controles obtidos na Otimização Global.

Na Tabela 5.14 verifica-se que o impacto operacional negativo advindo da implementação dos controles equivalentes obtidos na simulação FC₁ é muito significativo, a somatória das violações de geração de potência reativa indicam uma condição operacional absolutamente insegura do sistema interligado.

Tabela 5.14: Impacto Operacional de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização (Três Áreas)

	NV_{viol}	NT_{viol}	NQ_{viol}	$\ \Delta Q_{viol}\ $
FC ₁	0	0	13	1174,18
FC ₂	0	0	15	68,73

5.2.4 Estudo do Caso III

Algoritmo para o Estudo com a Divisão em Quatro Áreas

Passo 0 - Um procedimento de otimização global de referência (conforme descrito na formulação dada em (2.3) é realizado.

Passo 1 - Cada centro de controle realiza 2 processos de otimização utilizando respectivamente os modelos FPOE₁ e FPOE₂. Assim, temos 8 processos de otimização conforme descrito a seguir:

FPOE₁^A - Processo de otimização FPOE₁ realizado pelo centro de controle A (onde a área definida por A é considerada interna e as áreas definidas por B, C e D são consideradas externas).

FPOE₁^B - Processo de otimização FPOE₁ realizado pelo centro de controle B (onde a área definida por B é considerada interna e as áreas definidas por A, C e D são consideradas externas).

FPOE₁^C - Processo de otimização FPOE₁ realizado pelo centro de controle C (onde a área definida por C é considerada interna e as áreas definidas por A, B e D são consideradas externas).

FPOE₁^D - Processo de otimização FPOE₁ realizado pelo centro de controle D (onde a área definida por D é considerada interna e as áreas definidas por A, B e C são consideradas externas).

FPOE₂^A - Processo de otimização FPOE₂ realizado pelo centro de controle A (onde a área definida por A é considerada interna e as áreas definidas por B, C e D são consideradas externas).

FPOE₂^B - Processo de otimização FPOE₂ realizado pelo centro de controle B (onde a área definida por B é considerada interna e as áreas definidas por A, C e D são consideradas externas).

FPOE₂^C - Processo de otimização FPOE₂ realizado pelo centro de controle C (onde a área definida por C é considerada interna e as áreas definidas por A, B e D são consideradas externas).

FPOE₂^D - Processo de otimização FPOE₂ realizado pelo centro de controle D (onde a área definida por D é considerada interna e as áreas definidas por A, B e C são consideradas externas).

As ações de controle internas calculadas em cada um dos estudos de otimização acima são armazenadas pelos centros de controle.

Passo 2 - As ações de controle calculadas no **Passo 1** em cada centro de controle são implementadas no sistema interconectado utilizando uma ferramenta de fluxo de carga. Temos dois tipos de ações de controle: *i*) aquelas calculadas utilizando o FPOE₁ que representam o sistema externo através de modelos tradicionais, e *ii*) aquelas calculadas utilizando o FPOE₂, que representam o sistema externo com restrições equivalentes.

Assim, são implementadas no sistema interconectado dois conjuntos de controle, através da resolução de dois procedimentos de fluxo de carga (FC), conforme descrito a seguir:

FC₁ - Simulação dos controles calculados pelos processos de otimização FPOE₁^A, FPOE₁^B, FPOE₁^C e FPOE₁^D, respectivamente nas áreas definidas por A, B, C e D. A solução deste fluxo de carga nos fornece o estado do sistema interligado se os centros de controle A, B, C e D utilizassem modelos externos tradicionais (com sistema externo irrestrito) durante seus estudos de otimização; e implementassem os controles calculados por tais estudos.

FC₂ - Simulação dos controles calculados pelos processos de otimização FPOE₂^A, FPOE₂^B, FPOE₂^C e FPOE₂^D, respectivamente nas áreas definidas por A, B, C e D. A solução deste fluxo de carga nos fornece o estado do sistema interligado se os centros de controle A, B, C e D utilizassem modelos externos com restrições equivalentes durante seus estudos de otimização; e implementassem os controles calculados por tais estudos.

Passo 3 - As soluções de FC₁ e FC₂ são comparadas (em termos de perdas e restrições) à solução do procedimento de otimização global (OG) realizado no **Passo 0**. A comparação entre FC₁ e OG revela o impacto econômico dos modelos tradicionais nos estudos de otimização, mostrando que estes modelos estão superestimando ou subestimando as perdas no sistema interconectado. A comparação entre FC₂ e OG revela o impacto econômico dos modelos externos com restrições equivalentes.

Resultados do Estudo com a Divisão em Quatro Áreas

Este estudo, em que o sistema interligado é dividido em quatro áreas, é apresentado para confirmar a tendência de obter-se maiores impactos econômicos e operacionais negativos com o uso de otimização equivalente quando há um número maior de áreas de controle. Para tanto, apresenta-se as mesmas tabelas dos outros dois casos de estudos.

Tabela 5.15: Perdas de Potência (Quatro Áreas)

FC ₁	
P.O.= 1937,42 MW	P.R.= 9554,04 MVar
FC ₂	
P.O. = 1832,70 MW	P.R. = 9082,76 MVar
“Desperdício”(P.O.)	“Desperdício”(P.R.)
FC ₁	
5,85%	4,93%
FC ₂	
0,13%	0,24%

Tabela 5.16: Impacto Operacional de Modelos Equivalentes em Estudos de Otimização (Quatro Áreas)

	NV _{viol}	NT _{viol}	NQ _{viol}	$\ \Delta Q_{viol}\ $
FC ₁	4	0	11	2589,23
FC ₂	0	0	15	76,09

Conclui-se das Tabelas 5.15 e 5.16 que os modelos equivalentes tradicionais, representados pela solução FC₁, têm impactos negativos econômico e operacional muito mais significantes que os modelos externos com restrições equivalentes representados pela solução FC₂. A utilização de modelos equivalentes tradicionais no Caso III implica em um “desperdício” de potência ativa da ordem de 5,85% e um “desperdício” de potência reativa da ordem de 4,93% , todos estes muito superiores aos mesmos obtidos nos Casos I e II. E observa-se que no Caso III, quando se utiliza modelos equivalentes com restrições externas (FC₂), os ‘desperdícios’ percentuais de perdas de potências ativa e reativa no sistema interligado, não são sensivelmente aumentados, assim como o valor da somatória das violações de geração de potência reativa não é muito aumentado.

5.3 Conclusões

Os controles equivalentes são acometidos por erros de informações acerca de áreas externas, no entanto, esta é uma situação inevitável na atividade prática de centros de controles de sistemas elétricos de potência, e é necessário conviver com algum nível de imprecisão nos cálculos de controles equivalentes. Mas existem tolerâncias razoáveis para essas imprecisões, e conclui-se que o FPOE₂ tem desempenho bastante satisfatório na obtenção de controles equivalentes.

O $FPOE_1$, tem um desempenho insuficiente sob aspectos econômicos e operacionais, em ambientes de operação descentralizada. Com esta avaliação, demonstra-se que quando os controles externos são fixados e as restrições externas desprezadas, o modelo externo pode representar um sistema funcionando como uma fonte de reativos para o sistema interno. Nos estudos apresentados neste capítulo, conclui-se que os controles obtidos com o $FPOE_1$, foram obtidos à custa de violações reativas nos sistemas externos.

Capítulo 6

Desempenho do Algoritmo de Solução do FPOEG e Estudos com Áreas de Amortecimento

6.1 Introdução

Nesta tese propõe-se inovações às técnicas de solução de problemas de FPOE e inovações no modelo do FPOE com a introdução de áreas de amortecimento. Estas inovações consolidam o modelo denominado de Fluxo de Potência Ótimo Generalizado (FPOEG), com o qual foram realizados estudos em problemas reativos e ativo/reativos, desta forma generalizando a aplicação de modelos de otimização equivalentes. Neste capítulo apresentam-se estudos de otimização reativa para validar a metodologia de solução proposta. Estudos de otimização reativa e ativo/reativa também são apresentados para avaliação da influência das áreas de amortecimento no desempenho do FPOEG.

Nos estudos com o problema reativo são realizados processos de otimização (de referência e equivalente) com as mesmas considerações em relação aos limites de variáveis de controle, aos critérios de atualização e limites dos parâmetros de barreira, assim como em relação às tolerâncias envolvidas nos procedimentos de cálculos e verificações de critérios de parada (convergência) e atendimento de restrições. Deste modo, a diferença entre processos de otimização comparados restringe-se às informações acerca da área externa. As comparações dos processos de otimização de referência e equivalente mostram a robustez (processos de otimização de referência e equivalente bastante similares) da metodologia proposta e esclarecem detalhes sobre o algoritmo de solução apresentado na Seção 3.6.

É feita uma avaliação da importância da introdução de áreas de amortecimento em estudos de otimização equivalente. São apresentados estudos com modelos sem áreas de amortecimento e estudos em que essas áreas são incorporadas ao modelo equivalente. Também é objetivo destes estudos, estabelecer uma comparação entre modelos FPOEG e FPOE, pois uma das inovações propostas ao FPOE é a introdução da área

de amortecimento composta apenas de informações sobre *taps* de transformadores da vizinhança elétrica da fronteira e sobre magnitudes de tensão e valores de potências (ativa e reativa) em barras de geração vizinhas da fronteira.

6.2 Estudos Envolvendo o Algoritmo de Otimização Proposto

Os estudos realizados consideram o problema de minimização das perdas aparentes em elementos série de linhas de transmissão em dois sistemas testes diferentes: o sistema IEEE-118 barras e o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras.

6.2.1 Sistema IEEE-118 barras

Nos estudos realizados com o sistema IEEE-118 barras, os erros considerados na área externa em controles (magnitude de tensão e tap de transformadores) e potência reativa gerada variaram aleatoriamente dentro de faixas em que os valores máximo e mínimo representam alterações de 5,0% em torno do valor considerado como referência. Os erros em cargas e geração de potência ativa puderam variar aleatoriamente numa faixa de 20% em relação ao caso básico. A divisão do sistema IEEE-118 barras considerada é apresentada na Tabela 4.1.

A Tabela 6.1 apresenta os parâmetros utilizados nos testes dos processos de otimização, do problema reativo, realizados com o sistema IEEE-118 barras. São apresentados os limites operacionais (máximos e mínimos) de magnitudes de tensão e de *taps* de transformadores e tolerâncias usadas nos critérios de convergência (Fase I (F1) e Fase II (F2)) para a solução do problema FPOEG, através do algoritmo apresentado na Seção 3.6. O fator de atualização, assim como valores iniciais e finais dos parâmetros de barreira μ também são mostrados. Segundo a metodologia de solução adotada, valores diferentes, iniciais e/ou finais de parâmetros de barreira podem ser considerados para cada uma das variáveis controladas (como mostra-se no Apêndice B). Na Tabela 6.1, T indica que os parâmetros de barreira estão associados aos transformadores com controle de *taps*, V(SL e PV) indica que estão associados a barras com tensão controlada e V(PQ) a barras de carga.

Na Tabela 6.2 apresentam-se os valores de perdas de potências na área interna para uma solução básica, para a solução final em cada uma das fases dos processos de referência e equivalente (FPOEG). Mostram-se valores de perdas ôhmicas (P.O.), de perdas reativas (P.R.) e de perdas aparentes (P.A.).

Tabela 6.1: Dados Básicos (IEEE-118 barras)

Limites de Magnitude de Tensão	
V^{min} (p.u.)	V^{max} (p.u.)
0,90	1,10
Limites de tap de transformadores	
tap^{min} (p.u.)	tap^{max} (p.u.)
0,90	1,10
Tolerâncias (p.u.)	
$Mismatch$ de Potência	Gradiente
$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$
Parâmetro de Barreira (μ) - T e V(SL e PV)	
Inicial	Final
10,00	1,00
Parâmetro de Barreira (μ) - V(PQ)	
Inicial	Final
1,00	0,10
Fator de atualização de μ ; $\kappa = 0,85$	

Tabela 6.2: Perdas de Potência (IEEE-118 barras)

Solução Básica		
P.O.= 61,11 MW	P.R.= 126,08 MVar	P.A.= 157,53 MVA
Referência		
P.O.(F1)= 41,17 MW	P.R.(F1)= 7,61 MVar	P.A.(F1)= 44,56 MVA
P.O.(F2)= 42,93 MW	P.R.(F2)= 24,81 MVar	P.A.(F2)= 58,12 MVA
FPOEG		
P.O.(F1)= 41,17MW	P.R.(F1)= 8,28 MVar	P.A.(F1)= 44,16 MVA
P.O.(F2)= 42,26 MW	P.R.(F2)= 23,34 MVar	P.A.(F2)= 65,96 MVA

Tabela 6.3: Número de Iterações (IEEE-118 barras)

Referência	
n.iter(F1) = 10	n.iter(F2) = 32
FPOEG	
n.iter(F1) = 10	n.iter(F2) = 33

Tabela 6.4: Barras de Geração (F1) - (IEEE-118 barras)

S.I.		Referência		FPOEG		$Qg^{limites}_{(MVar)}$	
	n.barra	V(p.u.)	$Qg_{(MVar)}$	V(p.u.)	$Qg_{(MVar)}$	Qg^{min}	Qg^{max}
s	69	1,0014	-50,74	1,0016	-46,6614	-1000,00	1000,00
H	77	1,0090	253,89	1,0086	234,3600	-10,00	38,00
H	49	1,0034	39,87	1,0034	39,3951	-100,00	300,00
H	19	1,0030	56,67	1,0026	54,0000	-5,00	15,00
L	74	0,9998	45,25	0,9997	45,0499	0,00	4,00
L	36	0,9998	27,99	1,0000	29,0546	-5,00	15,00
L	62	0,9998	26,25	0,9979	25,4785	0,00	8,00

O número de iterações ocorridas nos processos de otimização comparados nestes estudos são apresentados na Tabela 6.3. O número de iterações é apresentado por fases (F1 e F2) da solução. Nota-se que o número de iterações na fase F1 é o mesmo para os processos de referência e equivalente. Na fase F2 o número de iterações é diferente para cada otimização.

A obtenção dos controles internos nos processos comparados também é avaliada nestes estudos. Apresentam-se na Tabela 6.4 as barras da área interna com tensão controlada (barra de folga do sistema (s)) que na fase F1 do processo de otimização de referência apresentam os maiores (H) e menores (L) valores de magnitude de tensão. Os valores de potência reativa gerada nestas barras, na solução da fase F1 do FPOEG, também são apresentados, bem como os de seus limites. Nesta tabela é possível observar o não atendimento dos limites de reativos para as barras 77, 19, 74, 36 e 62. A Tabela 6.5 apresenta *taps* de transformadores da área interna na solução da fase F1 do processo de otimização de referência. As Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam barras e transformadores selecionados com os mesmos critérios, obtidos na solução da fase F2 dos processos de otimização de referência e equivalente.

Tabela 6.5: Transformadores com Controle de *Tap* (F1) - (IEEE-118 barras)

S.I.	Referência	FPOEG
ramo	tap(p.u.)	tap(p.u.)
68-69	0,9999	0,9999
65-66	0,9998	0,9998
64-61	0,9996	0,9994
63-59	0,9994	0,9993
38-37	0,9972	0,9970

Tabela 6.6: Barras de Geração (F2) - (IEEE-118 barras)

S.I.		Referência			FPOEG			$Qg^{limites}_{(MVAR)}$	
	n.b.	$V(p.u.)$	$Qg_{(MVAR)}$	λ_q	$V(p.u.)$	$Qg_{(MVAR)}$	λ_q	Qg^{min}	Qg^{max}
s	69	1,0321	198,42	0,0000	1,0306	193,19	0,0000	-1000,00	1000,00
=	19	0,9803	15,00	0,1256	1,0060	13,60	0,0000	-5,00	15,00
=	49	1,0045	24,63	0,0000	1,0044	26,06	0,0000	-100,00	300,00
=	18	0,9834	23,00	0,0989	1,0123	23,00	0,0146	-5,00	23,00
=	36	0,9987	15,00	0,0057	0,9933	11,43	0,0000	-5,00	15,00
H	116	1,0199	-2,89	0,0000	1,0184	12,31	0,0000	-250,00	525,00
H	65	1,0135	-72,86	0,0000	1,0115	-81,26	0,0000	-100,00	300,00
H	73	1,0115	9,48	0,0000	1,0111	9,59	0,0000	-100,00	300,00
L	76	0,9199	8,00	0,9491	0,9214	8,00	0,8923	0,00	8,00
L	74	0,9570	4,00	0,4830	0,9572	4,00	0,4623	0,00	4,00
L	77	0,9579	38,00	0,4687	0,9611	38,00	0,4379	-10,00	38,00
M	76	0,9199	8,00	0,9491	0,9214	8,00	0,8923	0,00	8,00
M	74	0,9570	4,00	0,4830	0,9572	4,00	0,4623	0,00	4,00
M	77	0,9579	38,00	0,4687	0,9611	38,00	0,4379	-10,00	38,00

Tabela 6.7: Transformadores com Controle de *Tap* (F2) - (IEEE-118 barras)

S.I.	Referência	FPOEG
ramo	tap(p.u.)	tap(p.u.)
68-69	1,0078	1,0080
63-59	0,9971	0,9972
64-61	0,9959	0,9964
65-66	0,9957	0,9962
38-37	0,9901	0,9887

A Tabela 6.6 mostra os valores de magnitudes de tensão das barras apresentadas na Tabela 6.4 (tais barras são indicadas por =), assim como os valores de potência reativa gerada por estas barras na solução do problema completo (F2). Outras barras internas com tensão controlada são inseridas na Tabela 6.6 na solução da fase F2 dos processos de otimização. Estas barras (indicadas por M) são as que apresentaram os maiores valores absolutos dos multiplicadores de Lagrange λ_q associados às restrições nos limites de geração de potência reativa. Observa-se que há uma redundância na apresentação dos resultados, pois estes critérios determinaram barras coincidentes. Os

valores de multiplicadores de Lagrange associados às barras apresentadas, na solução final (F2) dos problemas de referência e equivalente, são dados em MW/MVAr.

Tabela 6.8: Evolução do Parâmetro de Homotopia (F2) - (IEEE-118 barras)

Referência				FPOEG			
		$dim\mathcal{A}$				$dim\mathcal{A}$	
γ	it.	s.i.	s.e.	γ	it.	s.i.	s.e.
0,0	-	12	12	0,0	-	10	12
0,2	1	12	12	0,2	1	12	12
0,4	1	12	12	0,2	1	12	12
0,6	1	12	12	0,4	1	12	12
0,8	1	12	12	0,6	1	12	12
1,0	14	12	12	0,2	0	12	13
-	-	-	-	0,4	1	12	13
-	-	-	-	0,6	1	12	13
-	-	-	-	0,8	0	12	13
-	-	-	-	1,0	14	12	13

A Tabela 6.8 mostra a evolução do processo de otimização com o parâmetro γ e a formação do conjunto de restrições ativas na solução do problema (conjunto \mathcal{A}). Nos processos de otimização, de referência e equivalente, adota-se $n = 5$ (da expressão usada para atualização de γ dada em (3.15)) e o valor do incremento de γ é 0,2. A Tabela 6.8 informa o número ($dim\mathcal{A}$) de restrições funcionais de desigualdade ($h(\underline{x}) \leq 0$) consideradas como igualdade ($H(\underline{x}, \gamma) = 0$) e o número de iterações (it) ocorridas no processo de solução de cada problema parametrizado em γ . A dimensão do conjunto de restrições ativas ($dim\mathcal{A}$) é dada para o sistema interno (s.i.) e para o sistema externo (s.e.). Observa-se na Tabela 6.8, que para dois valores de γ (0,2 e 0,8), a solução atende o critério de convergência adotado e não são realizadas iterações Newton. Estes casos acontecem quando as violações de potência reativa gerada são muito pequenas, de tal forma que tais violações incorrem em *mismatches* de potência menores que a tolerância adotada como critério de convergência, que neste caso é igual a $1,0 \times 10^{-4}$. A expressão para o cálculo destes *mismatches* de potência é dada em (3.14).

No final do processo de otimização é realizada a relaxação das restrições de desigualdade que não atendem à condição de complementariedade estrita (dada em (3.30)) e estas são excluídas do conjunto \mathcal{A} . Após a exclusão destas barras, novas iterações são realizadas na determinação de uma nova solução que atende à condição de estacionariedade da Lagrangeana. O número de iterações (it) realizadas nestes procedimentos são apresentados na Tabela 6.9. Os dados apresentados na Tabela 6.9, mostram que no processo de otimização de referência uma barra externa foi excluída do conjunto \mathcal{A} . No processo de otimização equivalente, duas barras (uma interna e uma externa) foram

excluídas do conjunto ativo. Assim as condições de (3.30) e (3.29) foram atendidas para todas as restrições do conjunto \mathcal{A} .

Tabela 6.9: Relaxação de Restrições de Desigualdades Ativas - (IEEE-118 barras)

Referência				FPOEG			
		$dim\mathcal{A}$				$dim\mathcal{A}$	
γ	it.	s.i.	s.e.	γ	it.	s.i.	s.e.
1,0	14	12	11	1,0	13	11	12

6.2.2 Sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras

Nestes estudos realizados com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras, os erros em controles externos (magnitude de tensão e *tap* de transformadores), em potências ativa e reativa geradas e em cargas, variaram aleatoriamente dentro de faixas em que os valores máximo e mínimo representam alterações de 5,0% em torno do valor considerado como referência. Considerou-se a divisão do sistema Sul-Sudeste Brasileiro (SSB-810 barras) apresentada na tabela a seguir:

Tabela 6.10: Sistema SSB-810 barras

área	barras	ramos	barras PV	trafos	Geração (MW)	Carga (MW)
interna	229	447	53	44	26572,3	17484,4
fronteira	61	43	0	9	0,0	5671,6
externa	520	850	61	152	11290,6	13010,5

Parâmetros utilizados nos testes realizados com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro estão apresentados na Tabela 6.11. A Tabela 6.12 apresenta, os valores de perdas de potência (ativa, reativa e aparente) na área interna, obtidas para uma solução básica e no final de cada fase (F1 e F2) de solução dos problemas de otimização de referência e equivalente (FPOEG). A Tabela 6.13 mostra o número de iterações ocorridas em cada fase dos processos de solução e nota-se que são os mesmos para cada otimização.

Tabela 6.11: Dados Básicos (SSB-810 barras)

Limites de Magnitude de Tensão	
V^{min} (p.u.)	V^{max} (p.u.)
0,90	1,10
Limites de <i>tap</i> de transformadores	
tap^{min} (p.u.)	tap^{max} (p.u.)
0,90	1,10
Tolerâncias (p.u.)	
Mism. Potência	Gradiente
$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Parâmetro de Barreira(μ) - T e V(SL e PV)	
Inicial	Final
120,00	60,00
Parâmetro de Barreira(μ) - V(PQ)	
Inicial	Final
80,00	40,00
Fator de atualização de μ ; $\kappa = 0,90$	

Tabela 6.12: Perdas de Potência (SSB-810 barras)

Solução Básica		
P.O.= 977,88 MW	P.R.= 554,72 MVA _r	P.A.= 1464,73 MVA
Referência		
P.O.(F1)= 974,34 MW	P.R.(F1)= 596,09 MVA _r	P.A.(F1)= 1506,10 MVA
P.O.(F2)= 1009,23 MW	P.R.(F2)= 267,50 MVA _r	P.A.(F2)= 1300,64 MVA
FPOEG		
P.O.(F1)= 974,34 MW	P.R.(F1)= 596,09 MVA _r	P.A.(F1)= 1506,10 MVA
P.O.(F2)= 1009,95 MW	P.R.(F2)= 294,46 MVA _r	P.A.(F2)= 1324,70 MVA

Tabela 6.13: Número de Iterações (SSB-810 barras)

Referência	
n.iter(F1) = 18	n.iter(F2) = 12
FPOEG	
n.iter(F1) = 18	n.iter(F2) = 12

Tabela 6.14: Barras de Geração (F1) - (SSB-810 barras)

S.I.		Referência		FPOEG		$Qg^{limites}_{(MVAR)}$	
	n.barra	$V(p.u.)$	$Qg_{(MVAR)}$	$V(p.u.)$	$Qg_{(MVAR)}$	Qg^{min}	Qg^{max}
s	1114	0,9993	104,04	0,9968	85,85	-90,00	90,00
H	1241	1,0376	181,03	1,0373	160,43	-150,00	150,00
H	1242	1,0326	148,34	1,0325	148,08	-120,00	120,00
H	1258	1,0324	72,52	1,0323	72,41	-80,00	80,00
L	1438	0,9724	78,44	0,9714	76,45	-80,00	80,00
L	1428	0,9838	0,81	0,9820	-2,67	-20,00	20,00
L	1430	0,9852	-46,24	0,9825	-110,94	-90,00	90,00

Na formação das Tabelas 6.14 e 6.15 são usados os mesmos critérios dos estudos com o sistema IEEE-118 barras para tabelas semelhantes. Na Tabela 6.15 são apresentados ramos com transformadores (da área interna), para os quais foram obtidos o três maiores e os três menores valores de *taps* na solução da fase F1 do processo de referência. Na Tabela 6.17 estes mesmos ramos são apresentados. Na Tabela 6.16 são inseridas as barras de geração, que na solução final da fase F2 do problema de otimização de referência apresentaram os maiores multiplicadores de Lagrange associados às restrições funcionais de desigualdade $h(\underline{x}) \leq 0$, e assim como ocorre nos estudos da seção anterior, tais multiplicadores estão associados com barras de geração que já haviam sido incorporadas à tabela pelo critério associado com os valores de magnitude de tensão.

Tabela 6.15: Transformadores com Controle de *Tap* (F1) - (SSB-810 barras)

S.I.		Referência	FPOEG
	ramo	tap(p.u.)	tap(p.u.)
H	1483-1263	1,0270	1,0270
H	1463-1462	1,0194	1,0193
H	1309-1241	1,0183	1,0184
L	1456-1457	0,9413	0,9414
L	1242-1312	0,9652	0,9652
L	1225-1132	0,9739	0,9751

Tabela 6.16: Barras de Geração (F2) - (SSB-810 barras)

S.I.		Referência			FPOEG			$Qg^{limites}_{(MVAR)}$	
	n.b.	$V(p.u.)$	$Qg_{(MVAR)}$	λ_q	$V(p.u.)$	$Qg_{(MVAR)}$	λ_q	Qg^{min}	Qg^{max}
s	1114	0,9973	90,00	0,3170	0,9966	82,62	0,0000	-90,00	90,00
=	1242	1,0277	120,00	45,6103	1,0278	120,00	44,6614	-120,00	120,00
H	1241	1,0404	150,00	1,4830	1,0411	150,00	1,2174	-150,00	150,00
H	1259	1,0334	20,00	6,4862	1,0326	20,00	7,5296	-20,00	20,00
H	1258	1,0325	80,00	41,7276	1,0326	80,00	40,6779	-80,00	80,00
L	1438	0,9722	77,89	0,0000	0,9712	76,15	0,0000	-80,00	80,00
L	1428	0,9836	0,41	0,0000	0,9818	-2,84	0,0000	-20,00	20,00
L	1430	0,9862	-31,28	0,0000	0,9833	-90,00	-0,5363	-90,00	90,00
M	1242	1,0277	120,00	45,6103	1,0278	120,00	44,6614	-120,00	120,00
M	1258	1,0325	80,00	41,7276	1,0326	80,00	40,6779	-80,00	80,00
M	1259	1,0334	20,00	6,4862	1,0326	20,00	7,5296	-20,00	20,00

Tabela 6.17: Transformadores com Controle de Tap (F2) - (SSB-810 barras)

S.I.		Referência	FPOEG
	ramo	tap(p.u.)	tap(p.u.)
H	1483-1263	1,0267	1,0268
H	1463-1462	1,0195	1,0193
H	1309-1241	1,0193	1,0186
L	1456-1457	0,9411	0,9414
L	1242-1312	0,9794	0,9793
L	1225-1132	0,9739	0,9751

A Tabela 6.18 mostra que são iguais o número de restrições (associadas a barras internas e externas) ativas e o número de iterações (it) ocorridas nos processos de otimização de referência e equivalente. Nestes processos o valor de incremento de γ é 0,2. Nestes estudos, na verificação do atendimento das condições dos sinais dos multiplicadores de Lagrange (3.30) das restrições funcionais de desigualdade $h(\underline{x}) \leq 0$, detectou-se não haver restrições candidatas a deixar o conjunto \mathcal{A} . Sendo assim não é apresentada uma tabela de fase de relaxação de restrições de desigualdade.

Tabela 6.18: Evolução do Parâmetro de Homotopia - (SSB-810 barras)

Referência				FPOEG			
		$dim\mathcal{A}$				$dim\mathcal{A}$	
γ	it.	s.i.	s.e.	γ	it.	s.i.	s.e.
-	-	6	9	-	-	6	9
0,2	1	6	9	0,2	1	6	9
0,4	1	6	9	0,4	1	6	9
0,2	1	7	9	0,2	1	7	9
0,4	1	7	9	0,4	1	7	9
0,2	1	8	9	0,2	1	8	9
0,4	1	8	9	0,4	1	8	9
0,6	1	8	9	0,6	1	8	9
0,8	1	8	9	0,8	1	8	9
1,0	4	8	9	1,0	4	8	9

6.2.3 Conclusões

Os dados apresentados demonstram que processos de otimização de referência e equivalentes podem ser realizados com as mesmas considerações em relação aos limites de parâmetros, variáveis e funções dos problemas, aos critérios de atualização e às tolerâncias envolvidas na metodologia proposta. E que estes processos apresentam semelhanças na obtenção de controles equivalentes internos, na evolução do processo de otimização com o parâmetro de homotopia e no número de iterações Newton realizadas por fases de solução. Estas características mostram que a metodologia de solução do FPOEG é robusta.

Os parâmetros usados nos testes foram calibrados em uma série de estudos de otimização realizada com os sistemas IEEE-118 barras e Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras, de modo a estabelecer um padrão de dados adequado aos processos de solução do FPOEG de cada um destes sistemas. Observa-se que para cada sistema são estabelecidos parâmetros e critérios de convergência diferentes.

6.3 Avaliação da Área de Amortecimento Proposta

Nos estudos apresentados na Seção 4.4 mostrou-se que as incertezas em valores de *taps* de transformadores, magnitudes de tensão e potências (ativa e reativa) em barras de geração, são refletidas nas injeções de potência equivalentes obtidas no procedimento de casamento na fronteira. E que no casamento na fronteira, para atualizar o modelo externo às condições atuais do sistema externo, as injeções de potência equivalentes introduzem erros indesejáveis de informação. Para diminuir a influência de incertezas de informações da área externa, propõe-se nesta tese a introdução de áreas de amortecimento ao modelo de otimização equivalente. A área de amortecimento, proposta e avaliada nos estudos apresentados nesta seção, é composta por barras de geração e transformadores do sistema externo próximos das barras de fronteira sobre os quais é possível obter dados confiáveis através de troca de informações entre empresas. Estes estudos envolvem problemas em que perdas aparentes em elementos série de linhas de transmissão são minimizadas (dado em (3.3)) e em que potência ativa são redespachadas conforme critérios dados em (3.4). Os estudos são realizados com os sistemas IEEE-118 barras e Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras.

De acordo com a metodologia de análise já discutida na Seção 4.3, as soluções dos estudos de otimização equivalentes FPOE e FPOEG devem ser comparadas à solução da otimização de referência (FPO), para avaliação de influências de erros de informação em um modelo validado. Isto será feito de modo exaustivo nos estudos apresentados a seguir.

Nestes estudos, as incertezas em magnitude de tensão, *taps* de transformadores e potência reativa gerada, puderam variar aleatoriamente dentro de faixas em que valores máximo e mínimo representam alterações de 5,0% de um caso básico preestabelecido. No problema reativo os erros em carga e potência ativa gerada puderam variar aleatoriamente dentro de faixas em que valores máximos e mínimos representam alterações de 25,0%. E no problema ativo/reactivo os erros em carga puderam variar aleatoriamente 25,0% dentro de tais faixas, e os erros em potência ativa gerada puderam variar aleatoriamente dentro de faixas em que os valores máximos e mínimos representam alterações de 5,0% do valor do caso básico. Nos problemas ativo/reactivos, os limites operacionais máximos e mínimos de potência ativa gerada são valores limites de uma faixa de variação de 10,0% em torno do valor do pré-despacho para estas variáveis.

6.3.1 Estudos com o Sistema IEEE-118 Barras

Nestes estudos com o sistema IEEE-118 barras, adotou-se como área interna, a mesma considerada nos estudos apresentados em (Bose, 1986), ou seja, a área 1. E mais detalhes

da divisão deste sistema em áreas interna, externa e fronteira foram apresentadas na Tabela 4.1. Usa-se uma área de amortecimento com 12 geradores e um transformador, encontrados na vizinhança das barras da área de fronteira.

Para avaliar a performance do FPOEG na obtenção de controles internos equivalentes em processos de otimização de problemas reativo e ativo/reativo, são realizados os seguintes estudos com o sistema IEEE-118 barras:

- a) FPO: Estudo de otimização que utiliza o FPO_{IG} (formulado em (4.2)), no qual as informações acerca de todo o sistema estão disponíveis.
- b) FPOE: Estudo de otimização que utiliza o modelo FPOE_{IG}, cuja formulação é dada em (2.7) e no qual existem incertezas aleatórias no sistema externo, conforme já descrito anteriormente para cada um dos casos de estudo.
- c) FPOEG: Estudo de otimização que utiliza o modelo FPOEG_{IG} (descrito na Seção 4.2) com as mesmas incertezas externas dadas no estudo **b)** e utilizando a área de amortecimento.

Estudos com o Problema Reativo

A precisão dos controles internos é analisada inicialmente, comparando-se a média de desvios de controles internos, obtidas nas soluções do FPOE e do FPOEG. As médias de desvios apresentadas na Tabela 6.19 mostram que, de maneira geral, os controles internos em magnitude de tensão de barras controladas (Δv^{med}) e em *taps* de transformadores (Δt^{med}) calculados nos estudos com o modelo FPOEG, são mais precisos.

Tabela 6.19: Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Reativo)

	Δv^{med}	Δt^{med}
FPOE	$3,36 \times 10^{-3}$	$2,99 \times 10^{-3}$
FPOEG	$2,30 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$

Nas figuras apresentadas a seguir os erros nas principais variáveis e funções internas são avaliados (para cada estudo de otimização equivalente) de modo individualizado. São avaliados os erros nas seguintes variáveis e funções internas: magnitudes de tensão de barras de geração com tensão controlada, *taps* de transformadores, geração de potência reativa e fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão. A Figura 6.1 mostra erros absolutos em *taps* de transformadores da área interna. A distribuição de freqüência dos erros absolutos em *taps* de transformadores, obtidos nestes estudos, dispensa apresentação por contar-se apenas com cinco ramos com *taps* controlados na área interna. A Figura 6.2 a) mostra erros absolutos em magnitude de tensão de barras controladas e a Figura 6.2 b) a distribuição de freqüência. E nas figuras que se seguem gráficos análogos são mostrados para as demais funções e variáveis do sistema interno.

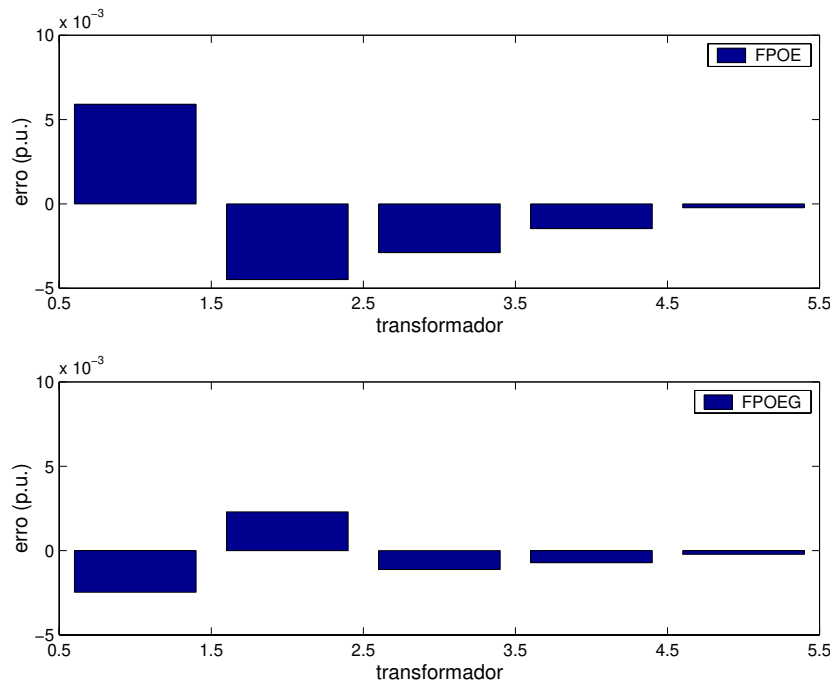


Figura 6.1: Erros em *Taps* de Transformadores

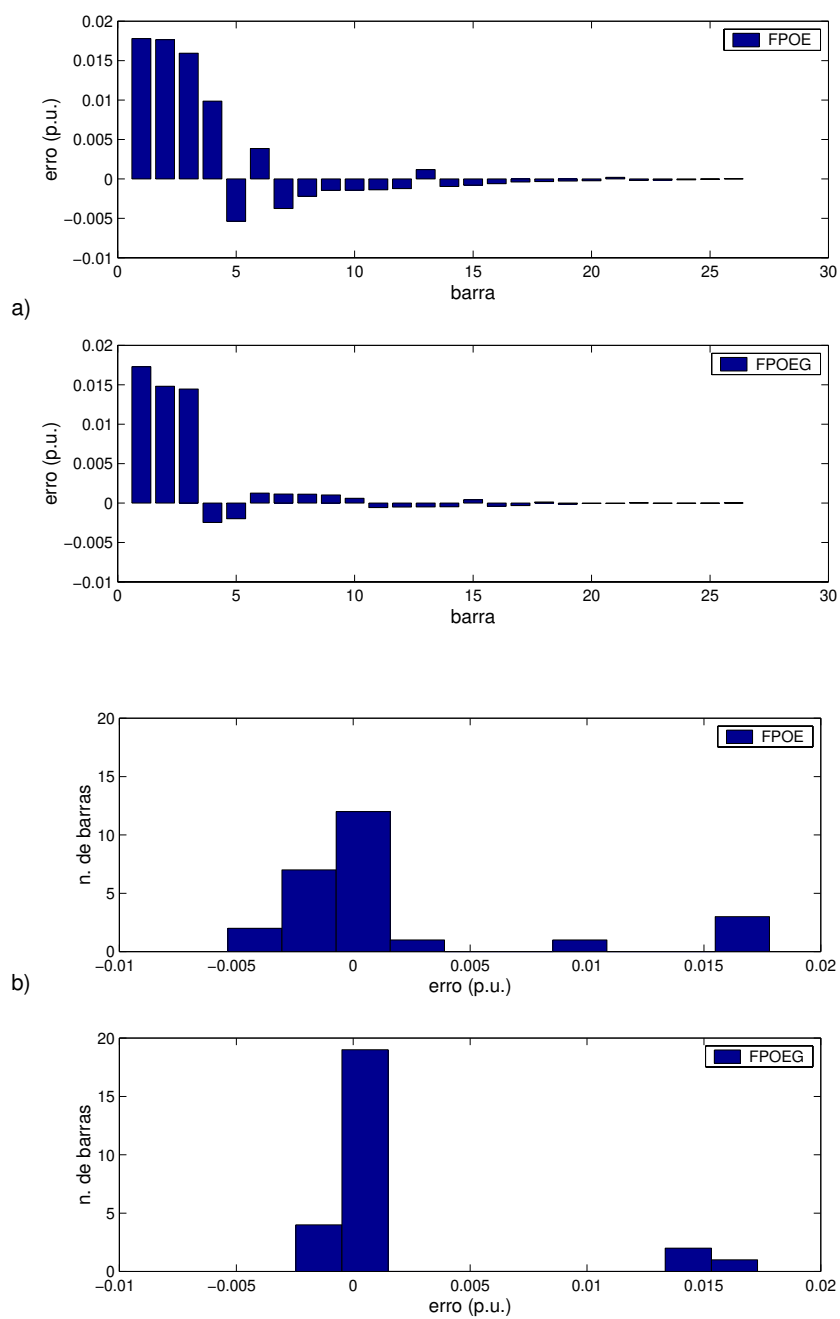


Figura 6.2: Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada

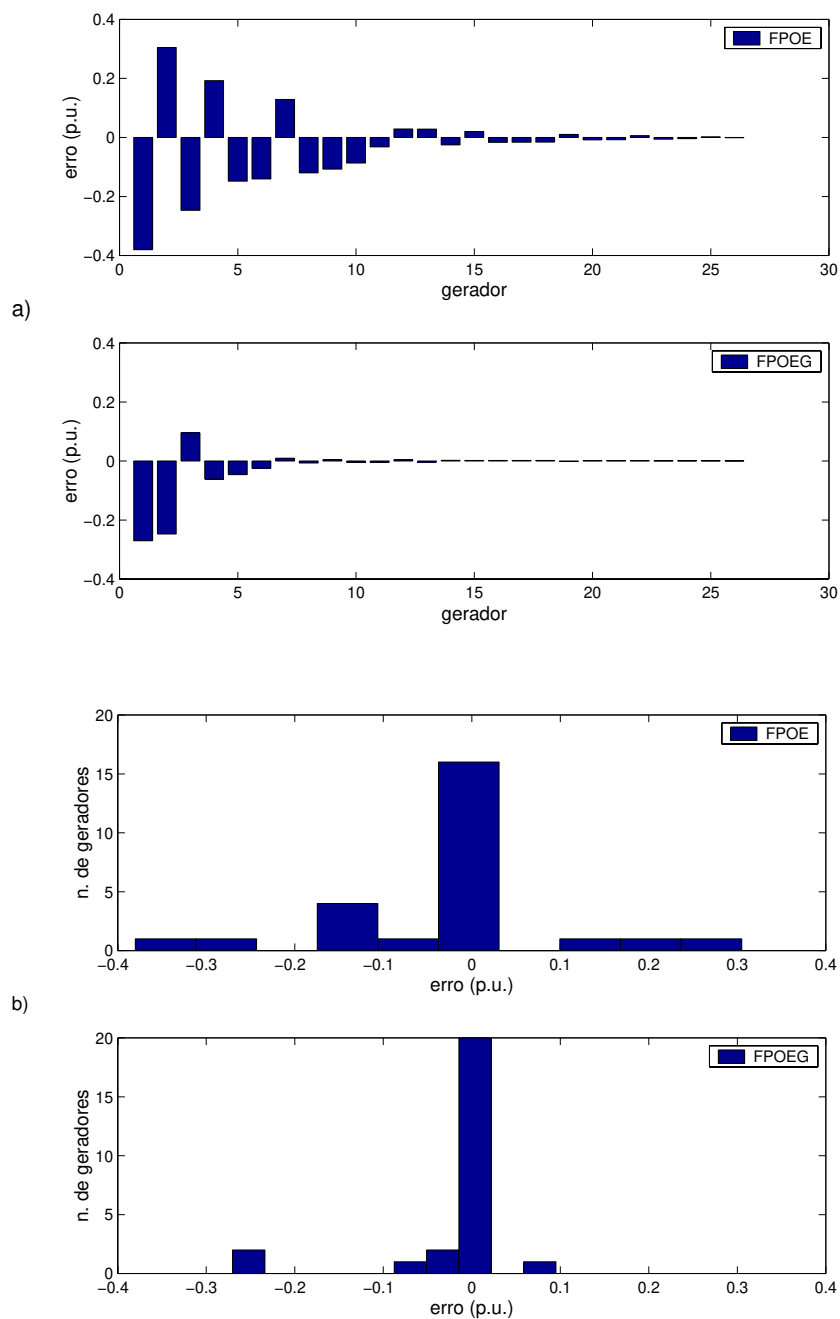


Figura 6.3: Erros em Geração de Potência Reativa

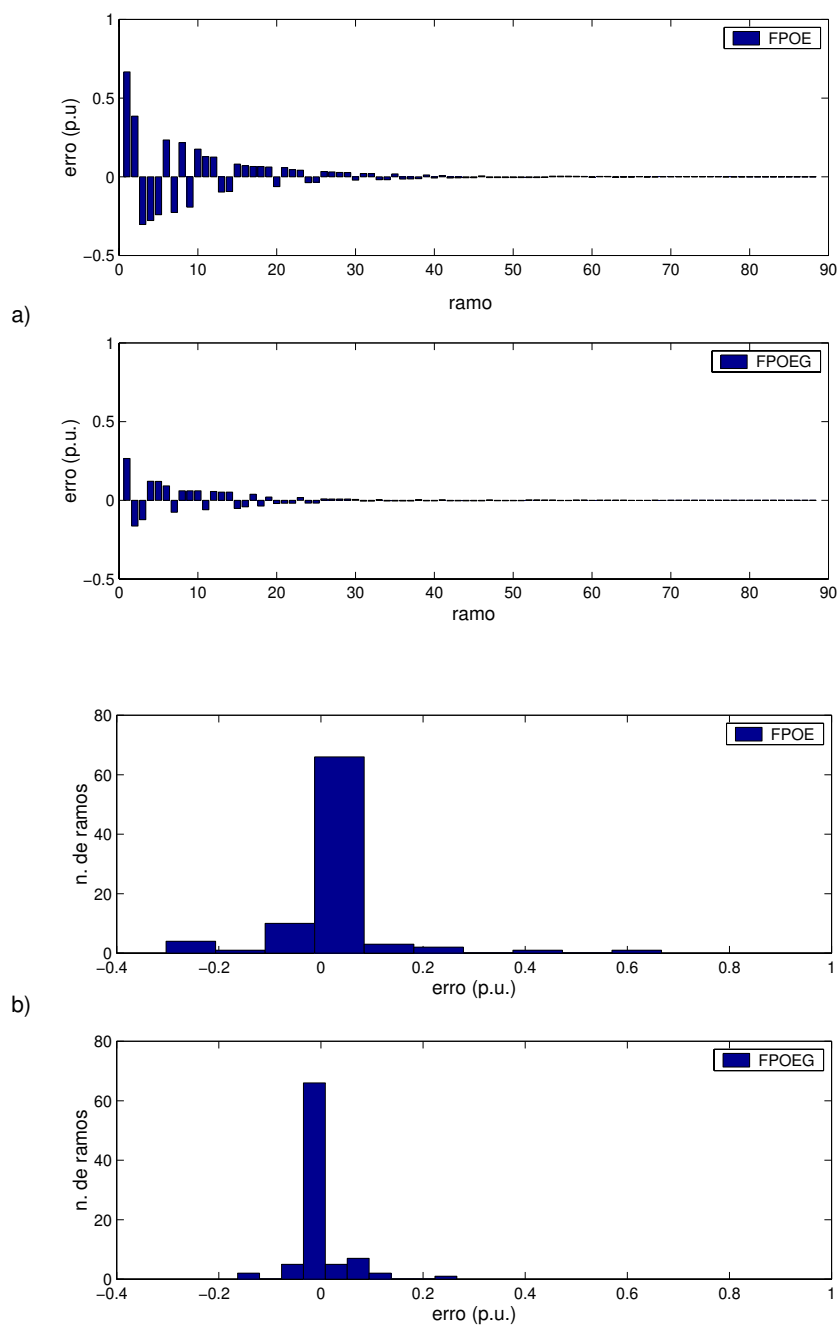


Figura 6.4: Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão

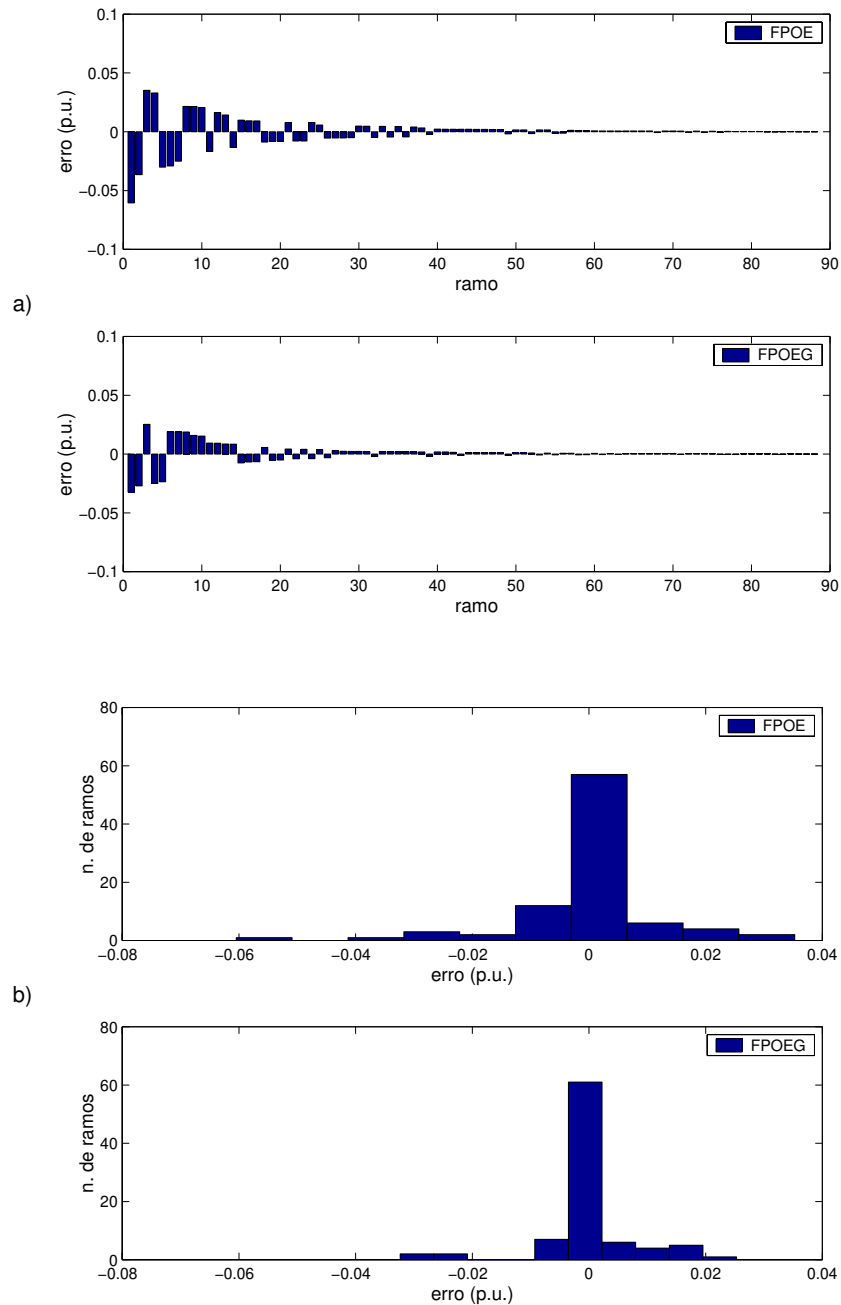


Figura 6.5: Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão

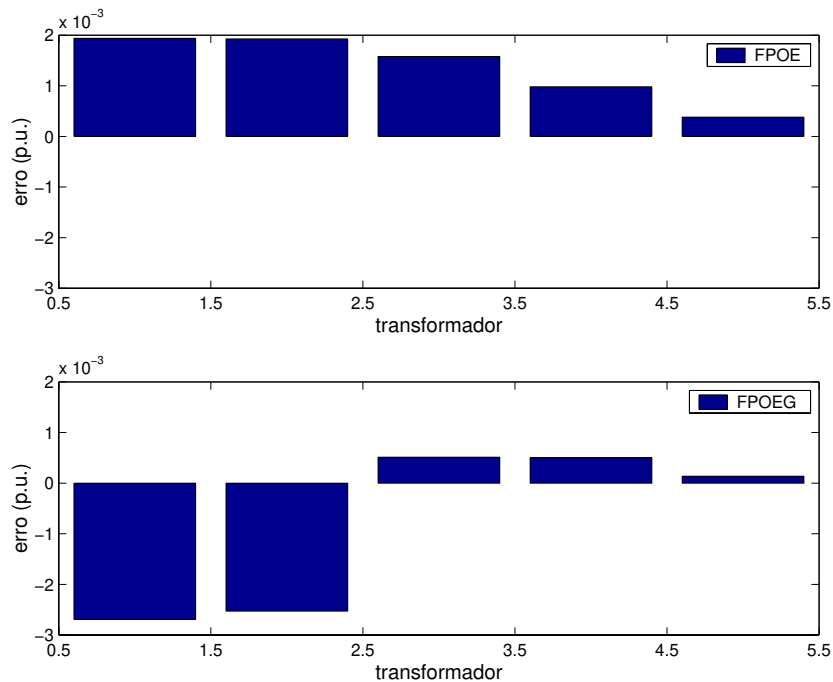
Estudos com o Problema Ativo/Reativo

Assim como foi feito nos estudos anteriores com o problema reativo, nesta seção a precisão dos controles internos é analisada comparando-se a média de desvios de controles

internos obtidas nas soluções do FPOE e do FPOEG. São avaliados erros nas seguintes variáveis e funções internas: magnitudes de tensão de barras com tensão controlada, *taps* de transformadores, fluxos de potências (ativa e reativa) nas linhas de transmissão e geração de potência. Nestes estudos, também são avaliados os desvios médios em potência ativa gerada (ΔP_g^{med}). As médias de desvios apresentadas na Tabela 6.20 mostram que os controles internos calculados nos estudos ativo/reativos com o modelo FPOEG, também são mais precisos. As figuras a seguir mostram erros absolutos nas variáveis e funções internas e também a distribuição de frequência destes erros.

Tabela 6.20: Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Ativo/Reativo)

	Δv^{med}	Δt^{med}	ΔP_g^{med}
FPOE	$2,27 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$	$1,82 \times 10^{-3}$
FPOEG	$2,16 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^{-4}$

Figura 6.6: Erros em *Taps* de Transformadores

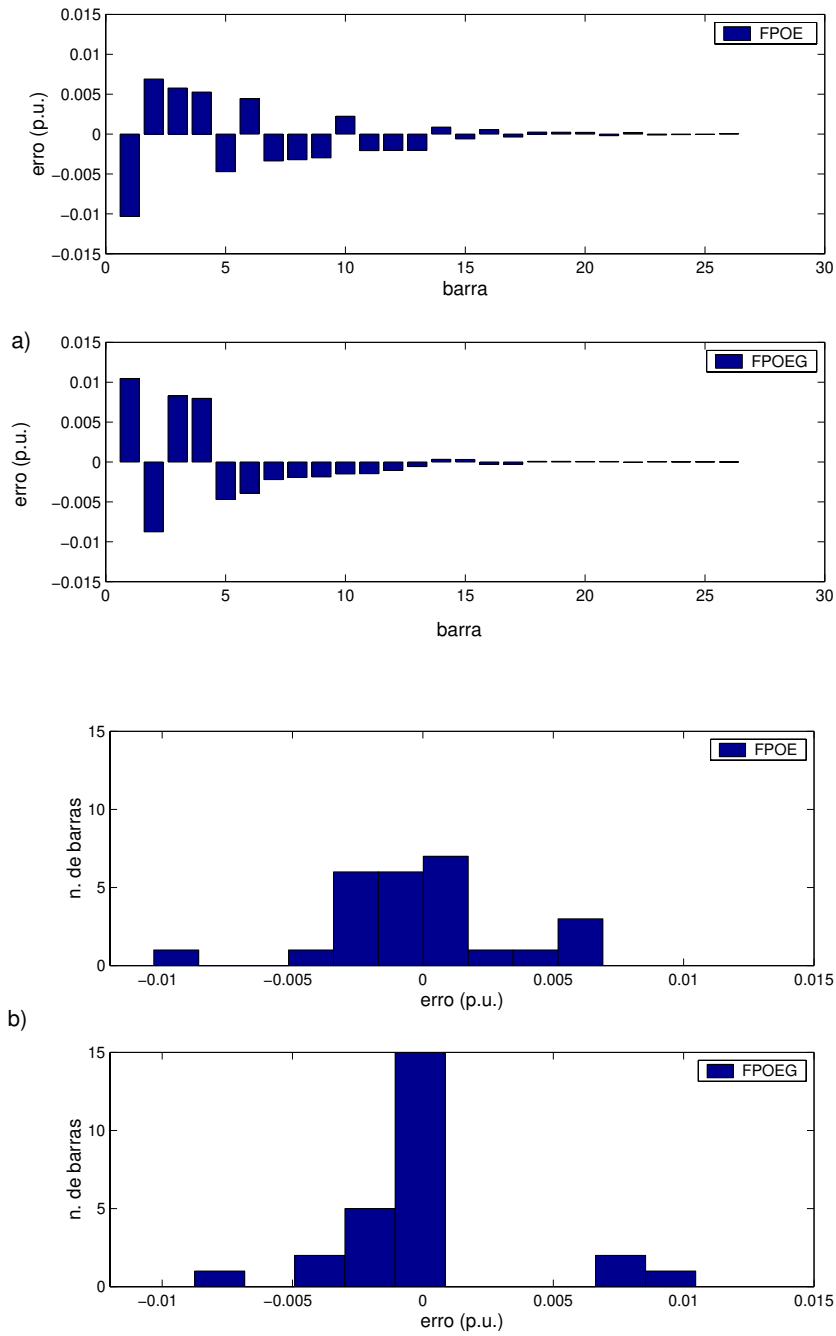


Figura 6.7: Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada

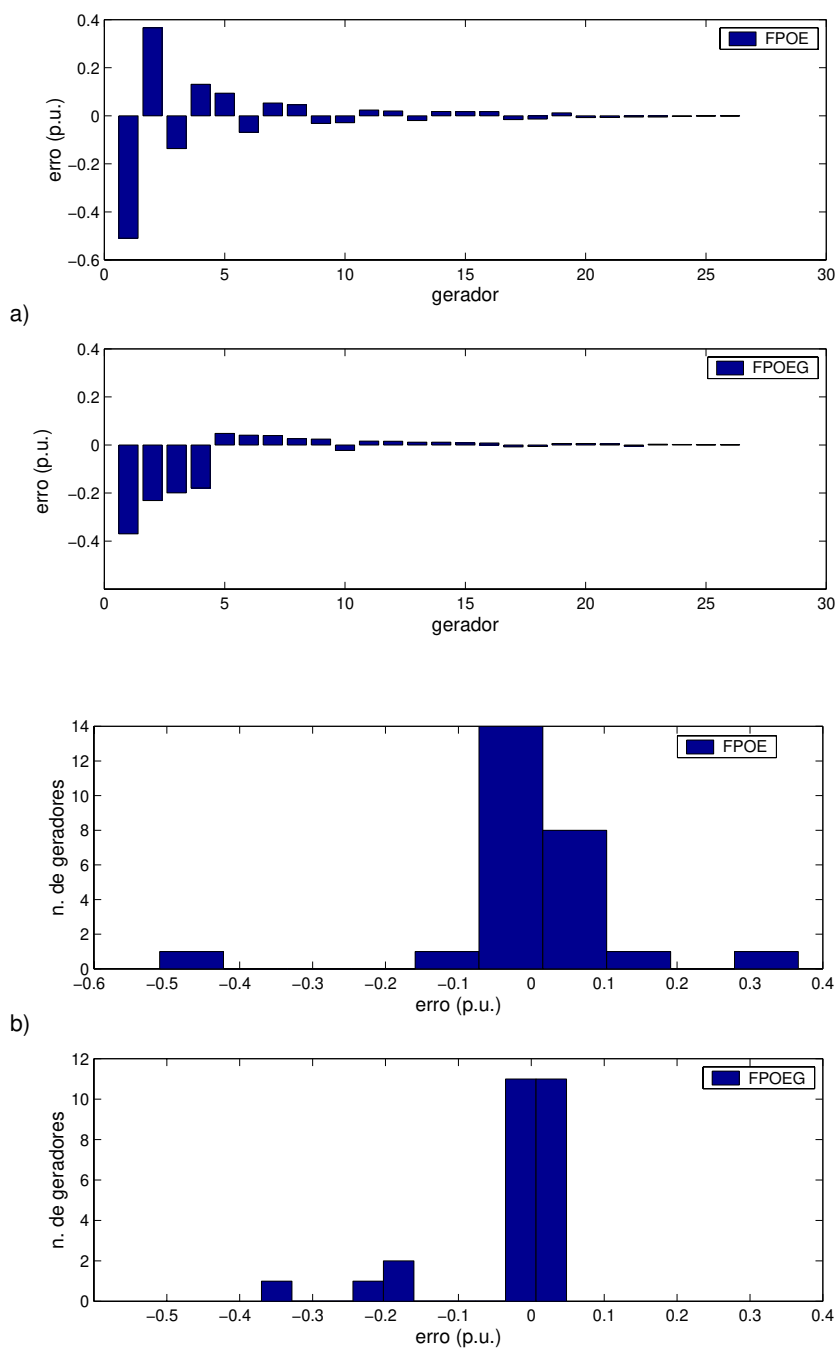


Figura 6.8: Erros em Geração de Potência Reativa

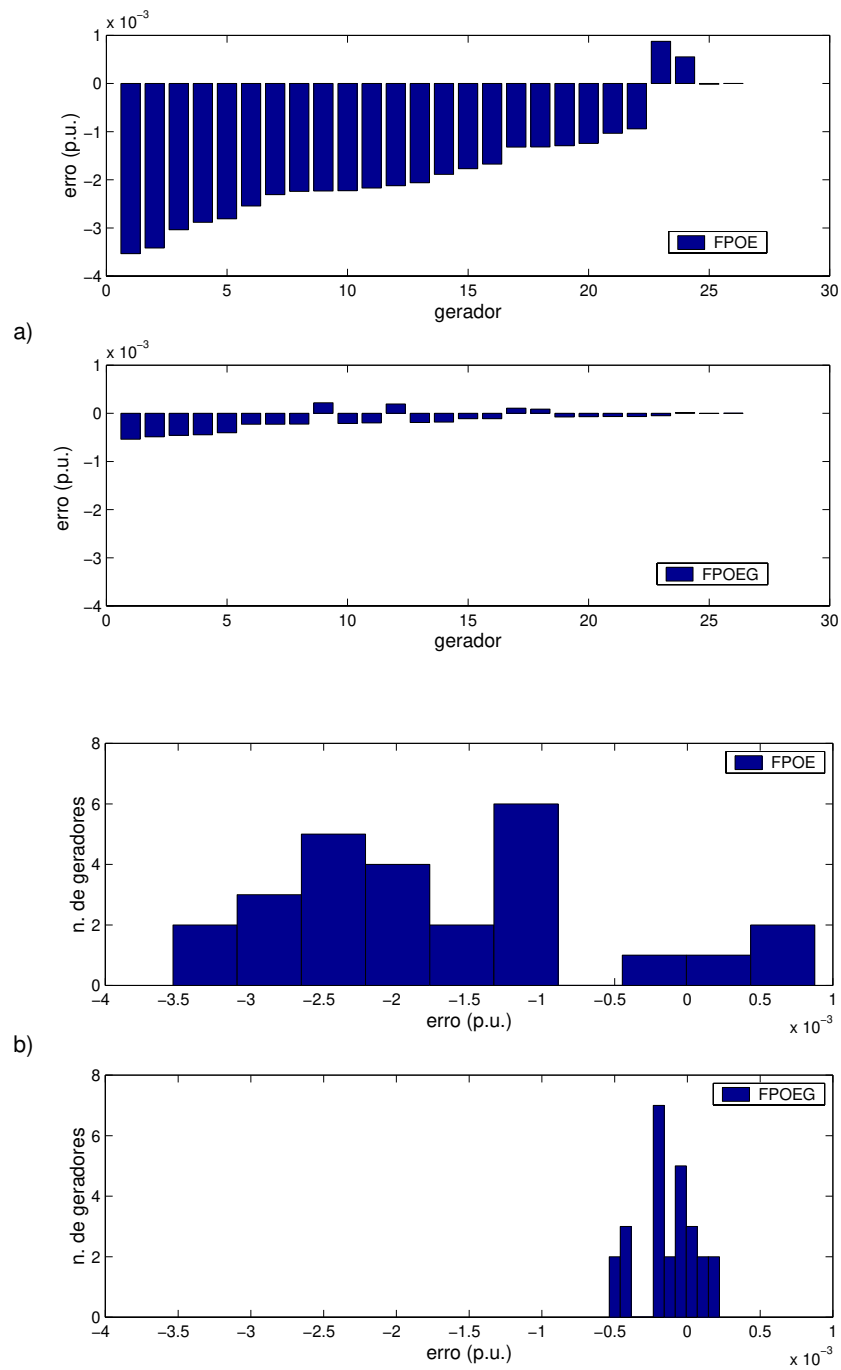


Figura 6.9: Erros em Geração de Potência Ativa

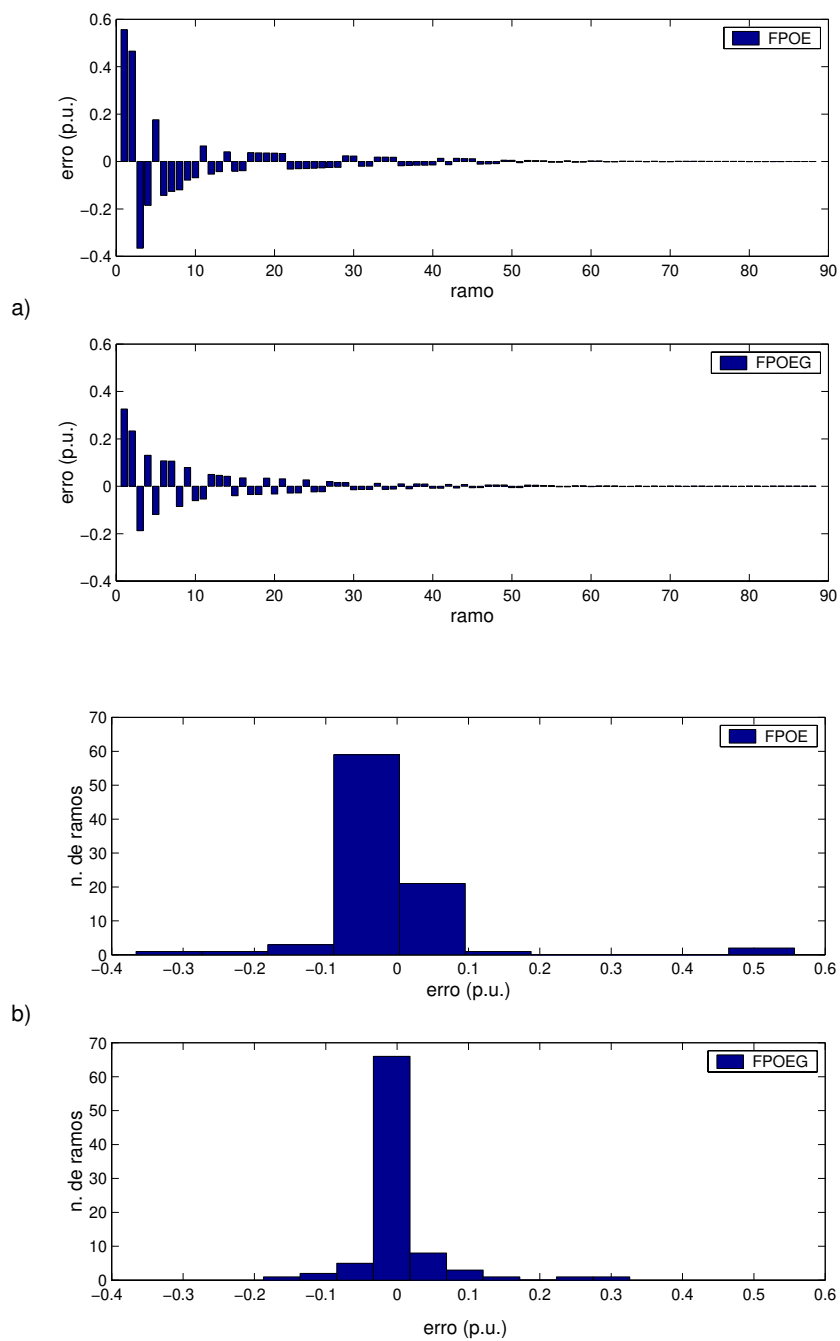


Figura 6.10: Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão

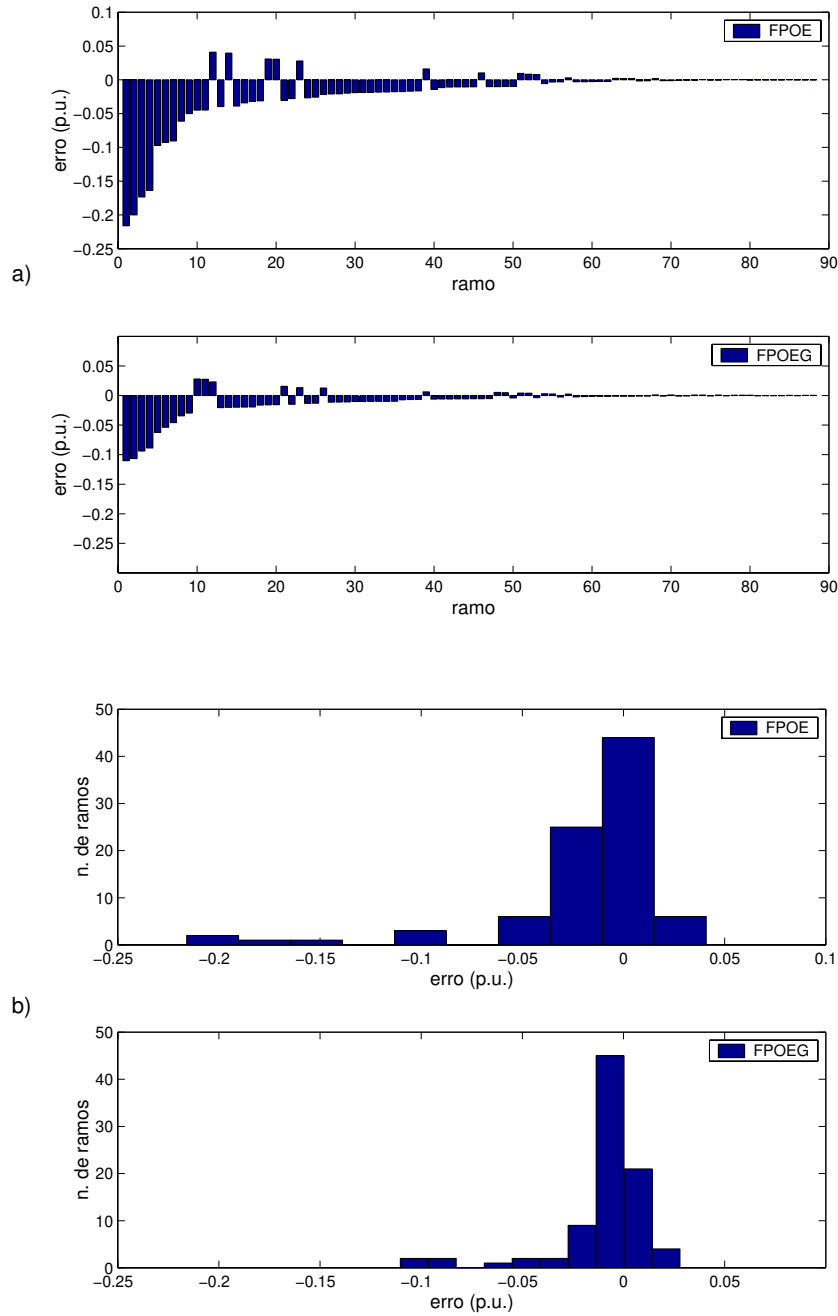


Figura 6.11: Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão

6.3.2 Estudos com Sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 Barras

Avalia-se a influência da dimensão da área de amortecimento nos estudos de otimização associados a problemas reativo e ativo/reativo usando-se o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras. São realizados os seguintes estudos:

- a) FPO: Estudo de otimização que utiliza o FPO_{IG} (formulado em (4.2)), no qual as informações acerca de todo o sistema estão disponíveis.
- b) FPOE: Estudo de otimização que utiliza o modelo $FPOE_{IG}$, cuja formulação é dada em (2.7) e no qual existem incertezas aleatórias no sistema externo, conforme já descrito anteriormente para cada um dos casos de estudo.
- c) FPOEG(A1): Estudo de otimização que utiliza o modelo $FPOEG_{IG}$ (descrito na Seção 4.2) com as mesmas incertezas externas dadas no estudo **b)** e utilizando a área de amortecimento A1 definida a seguir para cada um dos sistemas estudados.
- d) FPOEG(A2): Estudo de otimização que utiliza o modelo $FPOEG_{IG}$ (descrito na Seção 4.2) com as mesmas incertezas externas dadas no estudo **b)** e utilizando a área de amortecimento A2 definida a seguir para cada um dos sistemas estudados.

As soluções dos estudos de otimização equivalentes FPOE, FPOEG(A1) e FPOEG(A2) são comparadas à solução da otimização de referência (FPO) nas figuras e tabelas apresentadas a seguir. Foram consideradas duas áreas de amortecimento, a área de amortecimento indicada por A1 é formada por 22 transformadores e 3 geradores da primeira vizinhança das barras de fronteira, a área A2 abrange a A1 e mais 12 geradores localizados na segunda vizinhança das barras de fronteira. Nestes estudos, a divisão do Sistema Sul-Sudeste Brasileiro (SSB-810 barras) é feita segundo a Tabela 6.21, dada a seguir.

Tabela 6.21: Sistema SSB-810 barras

área	barras	ramos	barras PV	trafos	Geração (MW)	Carga (MW)
interna	176	265	46	37	21982	10720
fronteira	73	148	0	10	0,0	8008
externa	561	927	68	158	15881	17438

Estudos com o Problema Reativo

A Tabela 6.22, os desvios médios Δv^{med} (em magnitude de tensão) e Δt^{med} (em valores de tap de transformadores), obtidos nos processos em que: áreas de amortecimento não

foram usadas, denominados FPOE, e em que áreas de amortecimento foram usadas, o FPOEG(A1) e o FPOEG(A2). Estes desvios médios mostram que a precisão dos controle equivalentes internos melhora a medida em que a área de amortecimento tem sua dimensão aumentada.

Tabela 6.22: Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Reativo)

	Δv^{med}	Δt^{med}
FPOE	$4,81 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-3}$
FPOEG(A1)	$2,33 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$
FPOEG(A2)	$2,19 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-3}$

A influência da dimensão da área de amortecimento também pode ser avaliada comparando-se valores de perdas de potência calculadas na solução final de cada um dos processos de otimização. Estes dados são apresentados na Tabela 6.23. Estes dados mostram que ao aumentar-se a dimensão da área de amortecimento o valor de perdas aparentes na área interna obtidas por otimizações equivalentes se aproximam do valor obtido pelo processo de otimização de referência (FPO).

Tabela 6.23: Avaliação de Perdas no Sistema Interno (FPOEG Reativo)

	P. Ôhmica(MW)	P. Reativa(MVAr)	P. Aparente(MVA)
FPO	622,24	258,45	858,28
FPOE	622,34	270,23	875,35
FPOEG(A1)	621,13	267,93	866,01
FPOEG(A2)	620,67	266,34	864,97

Nestes estudos a precisão dos controles internos também é analisada, mostrando-se desvios de controles equivalentes internos obtidos nas soluções do FPOE, do FPOEG(A1) e do FPOEG(A2). Nas figuras que se seguem, gráficos análogos aos mostrados nos estudos da Seção 6.3.1 apresentam erros absolutos em funções e variáveis do sistema interno, obtidos nas soluções dos problema equivalentes analisados.

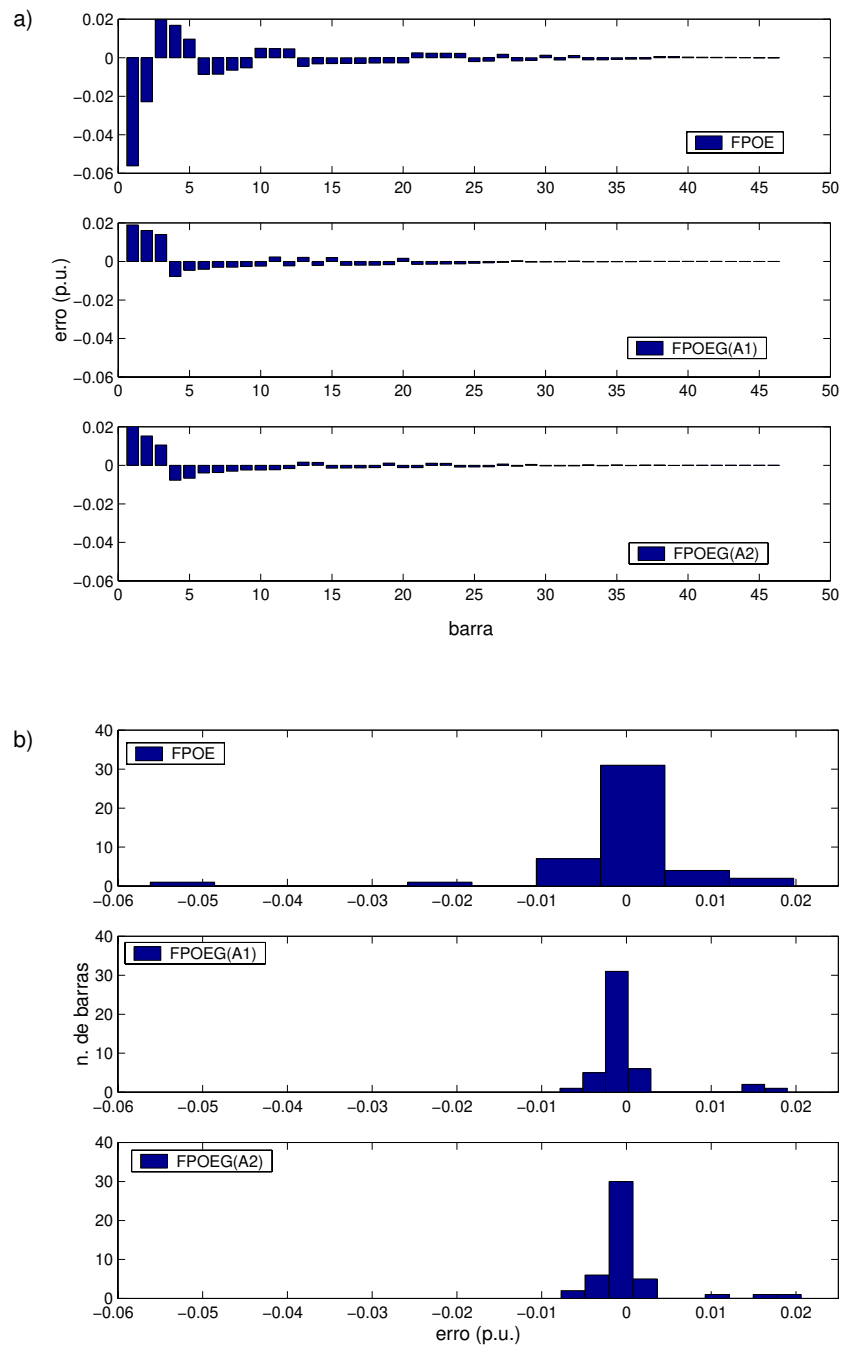


Figura 6.12: Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada

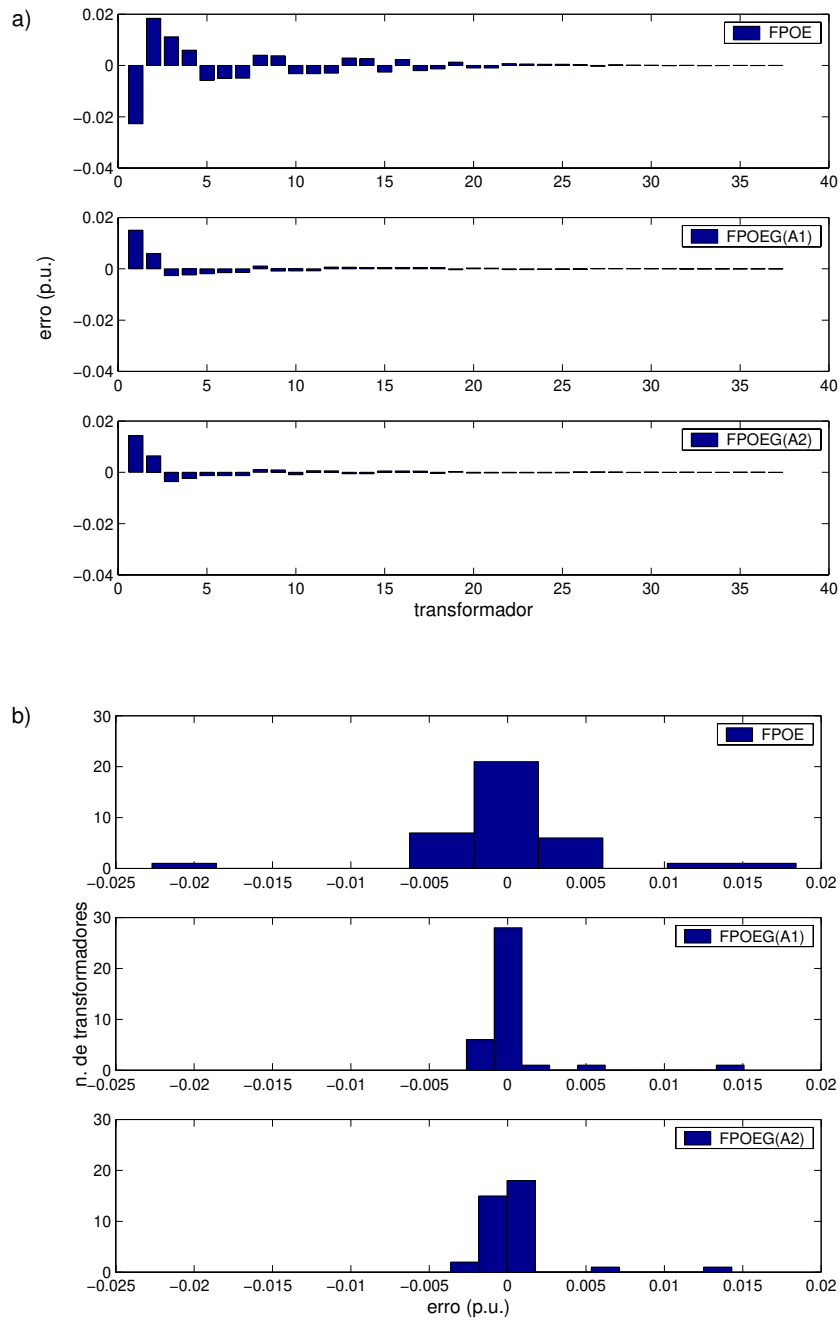


Figura 6.13: Erros em *Taps* de Transformadores

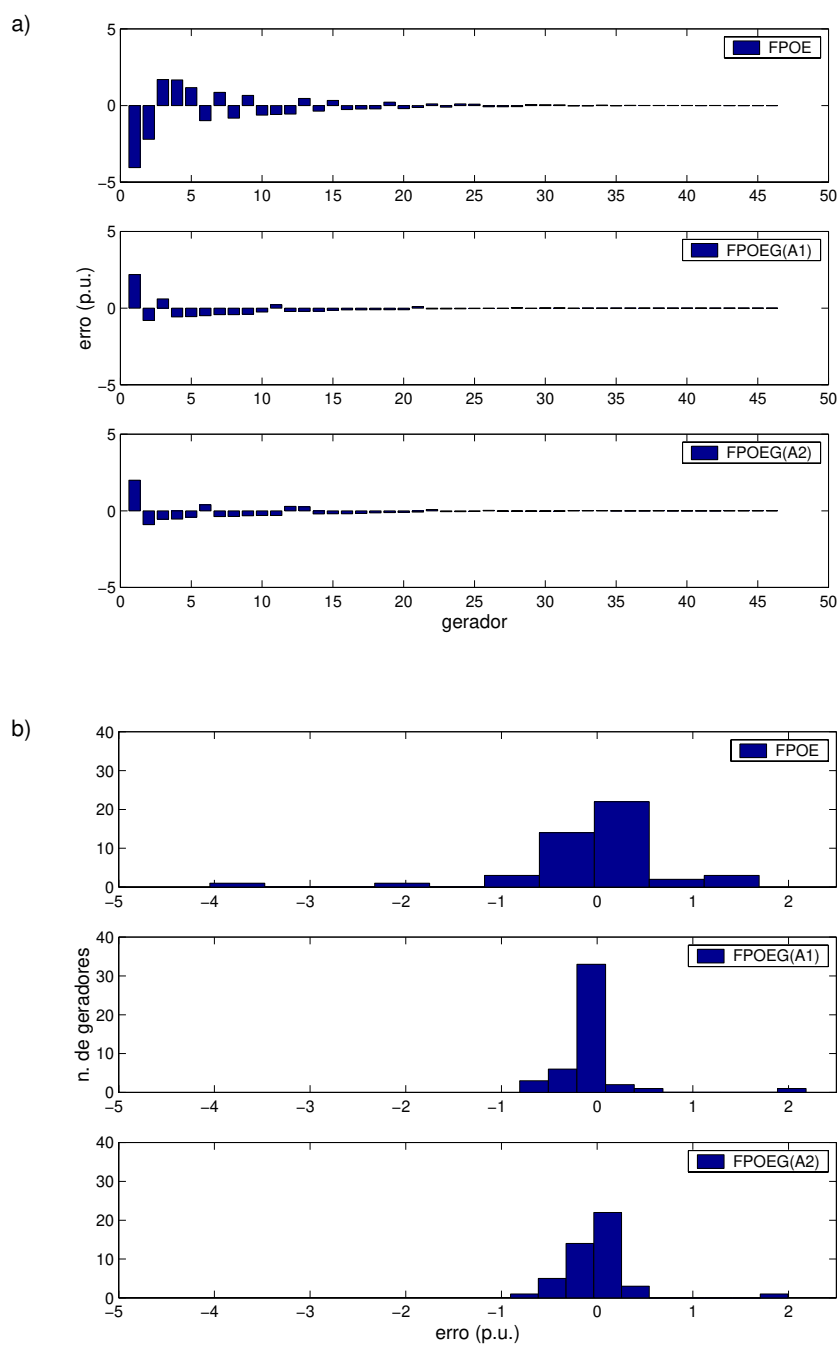


Figura 6.14: Erros em Geração de Potência Reativa

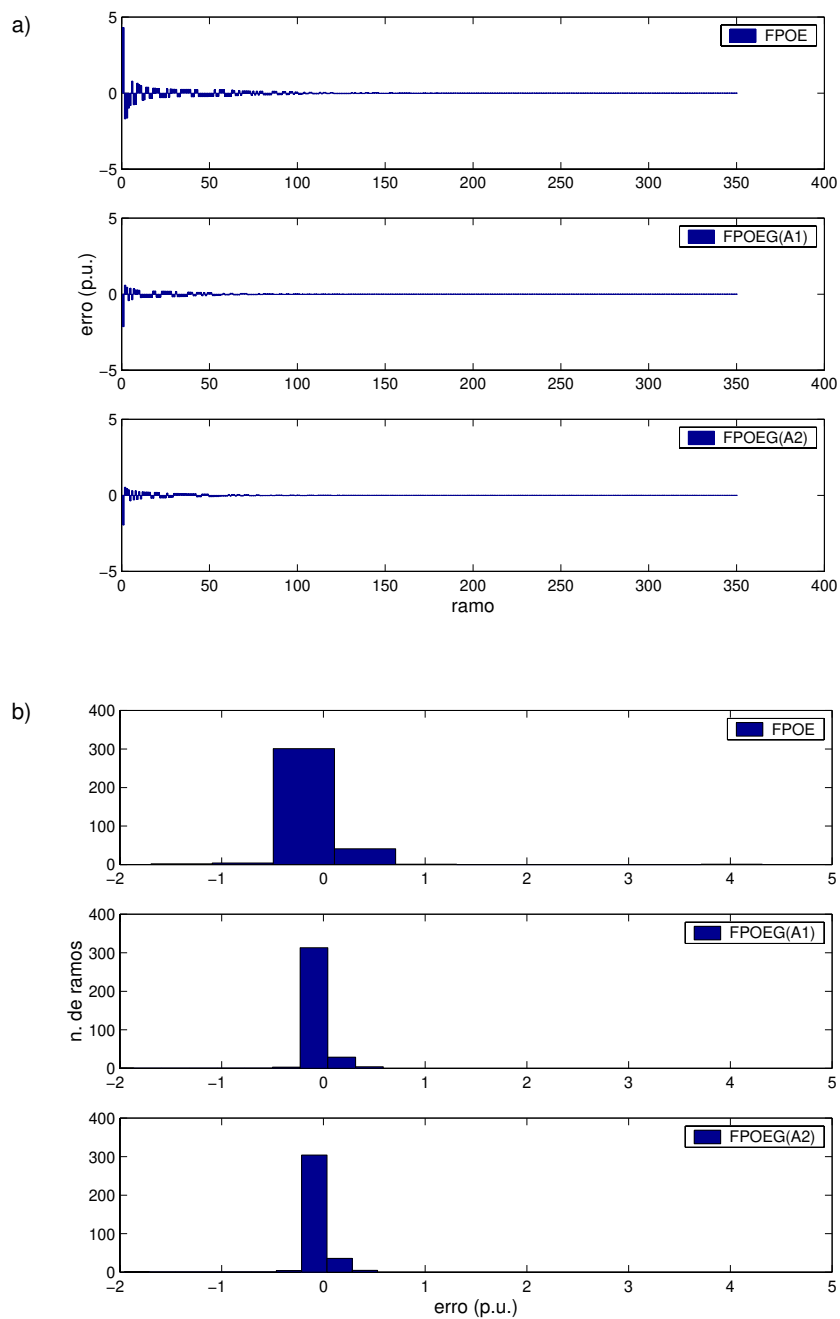


Figura 6.15: Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão

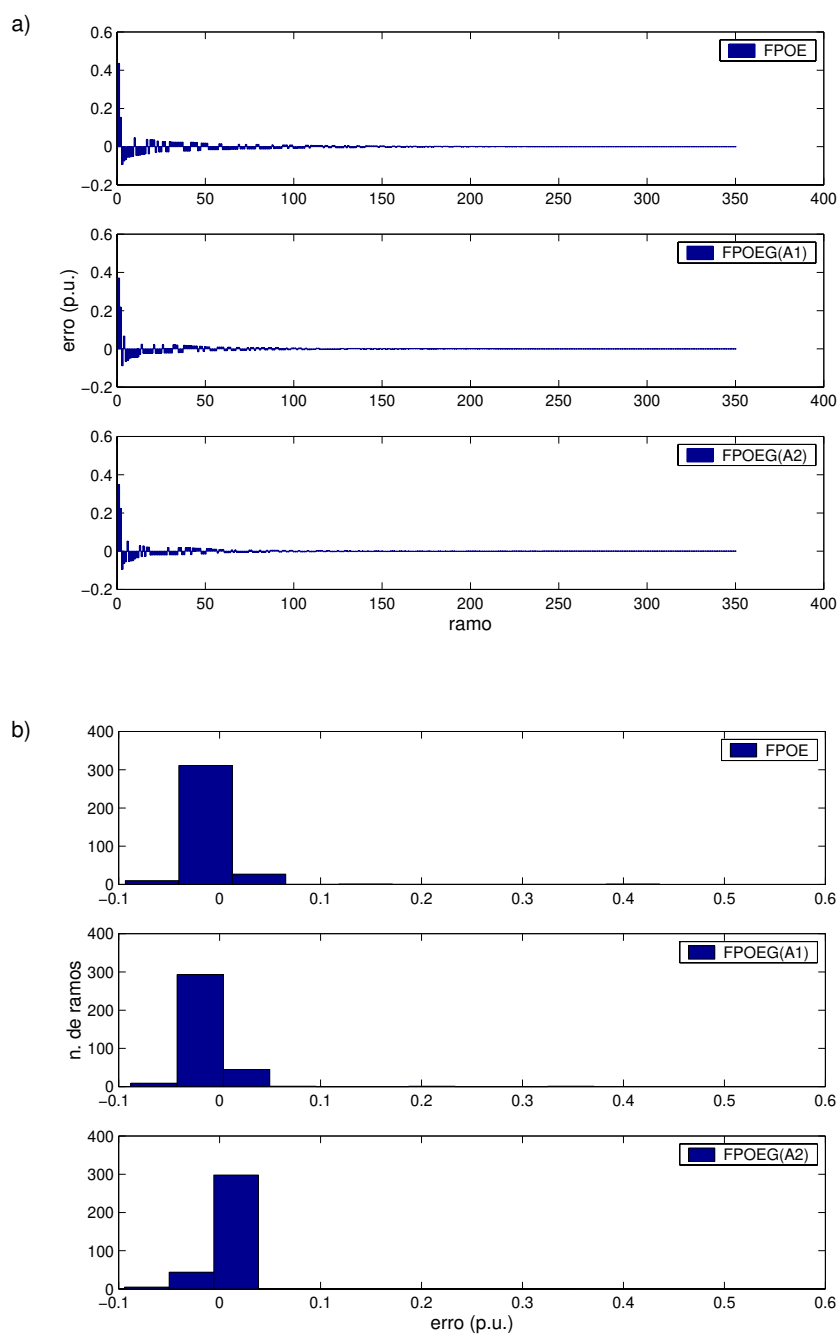


Figura 6.16: Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão

Estudos com o Problema Ativo/Reativo

Nos estudos com problema ativo/reactivo, gerações de potência ativa são variáveis controladas. Sendo assim, a Tabela 6.24 mostra desvios médios: Δv^{med} (desvios médios em magnitude de tensão, Δt^{med} (desvios médios em valores de tap de transformadores) e ΔP_g^{med} (desvios médios em potência ativa gerada). E a Tabela 6.25, apresenta os valores de desvios de potência ativa gerada (DP_g) no sistema interno e perdas de potências nos ramos do sistema interno.

Tabela 6.24: Desvios Médios em Controles Internos (FPOEG Ativo/Reativo)

	Δv^{med}	Δt^{med}	ΔP_g^{med}
FPOE	$4,86 \times 10^{-3}$	$3,38 \times 10^{-3}$	$5,17 \times 10^{-3}$
FPOEG(A1)	$1,79 \times 10^{-3}$	$8,33 \times 10^{-4}$	$3,77 \times 10^{-3}$
FPOEG(A2)	$1,72 \times 10^{-3}$	$7,77 \times 10^{-4}$	$3,48 \times 10^{-3}$

Tabela 6.25: Avaliação de Perdas no Sistema Interno (FPOEG Ativo/Reativo)

	DP_g (MW)	P. Ôhmica(MW)	P. Reativa(MVAr)	P. Aparente (MVA)
FPO	3,47	612,26	259,48	834,61
FPOE	4,07	613,23	276,32	856,99
FPOEG(A1)	3,59	612,08	270,12	845,66
FPOEG(A2)	3,52	611,32	270,76	843,90

Os dados da Tabela 6.24 mostram que a dimensão da área de amortecimento é capaz de promover melhoria na precisão dos controles internos equivalentes em estudos com problema ativo/reactivo. Os dados da tabela 6.25 mostram que os valores de perdas aparentes e desvios de geração de potência ativa na área interna obtidos nas soluções dos problemas de FPOEG se aproximam dos valores obtidos pelo processo de otimização de referência (FPO). Desta forma, verifica-se que a acuidade dos desvios médios em controles equivalentes internos resulta em melhor atendimento de critérios da função objetivo.

A precisão dos controles equivalentes internos obtidos nos estudos com o problema ativo/reactivo podem ser avaliados de modo mais individualizado a partir das figuras a seguir, onde mostram-se erros absolutos nas variáveis e funções internas, e também a distribuição de freqüência destes erros.

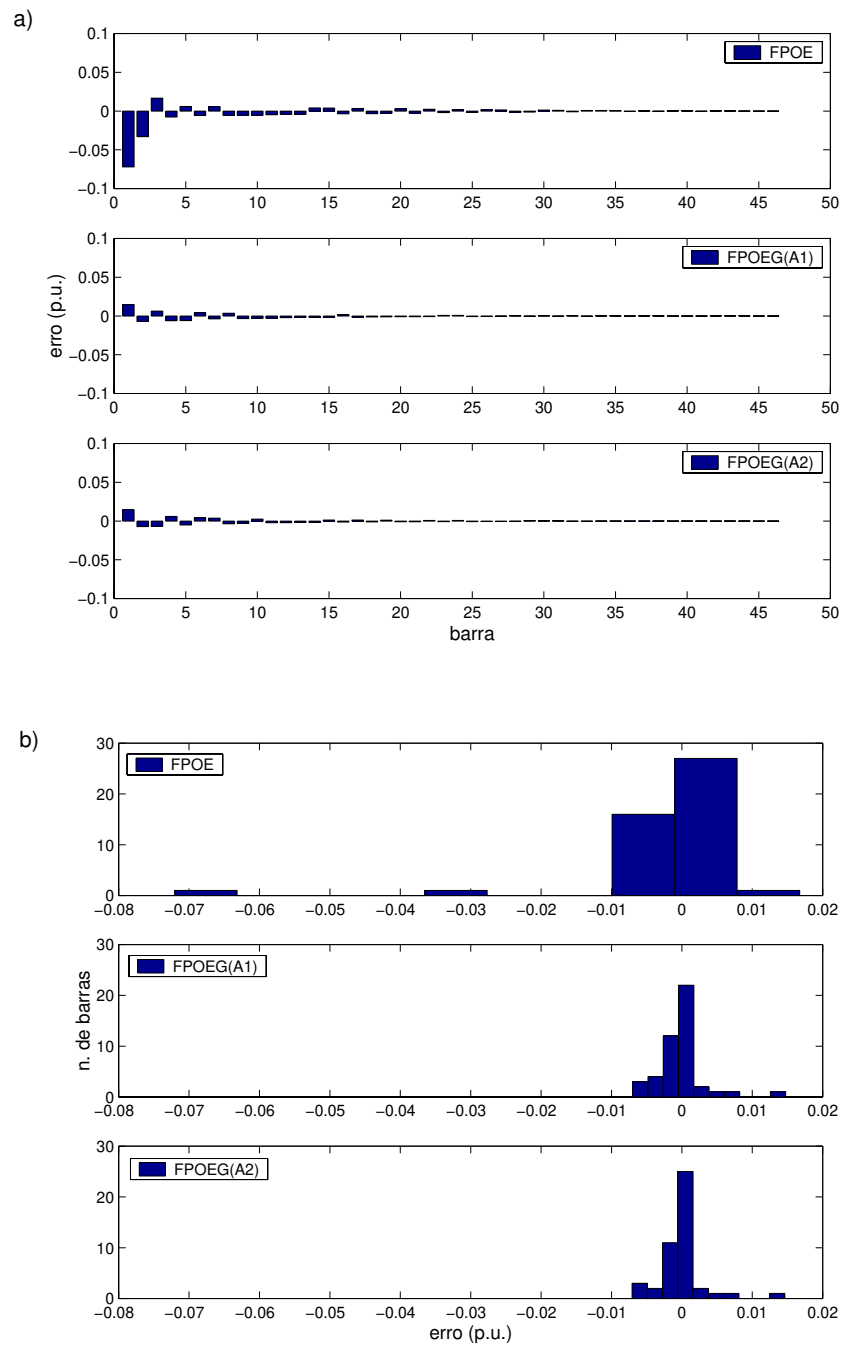


Figura 6.17: Erros em Magnitudes de Tensão de Barras de Tensão Controlada

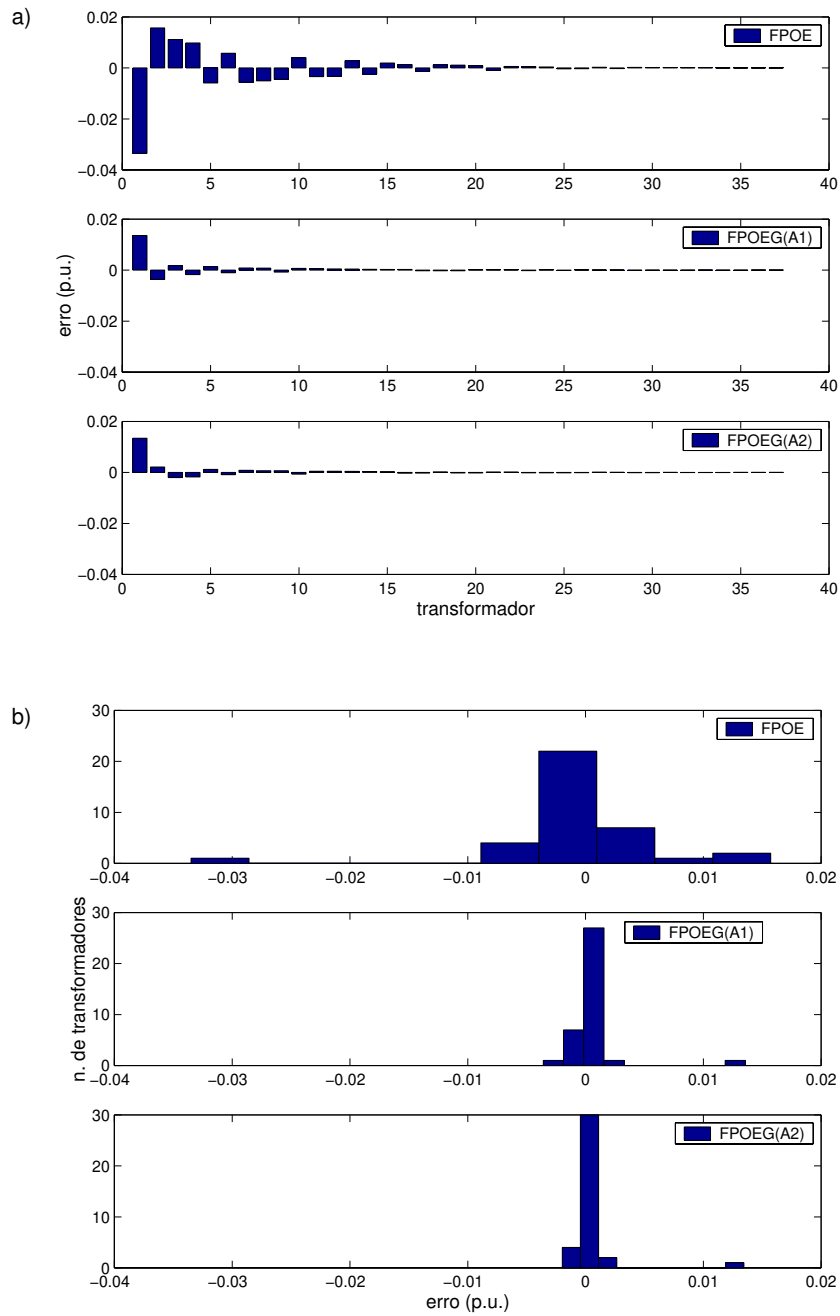


Figura 6.18: Erros em *Taps* de Transformadores

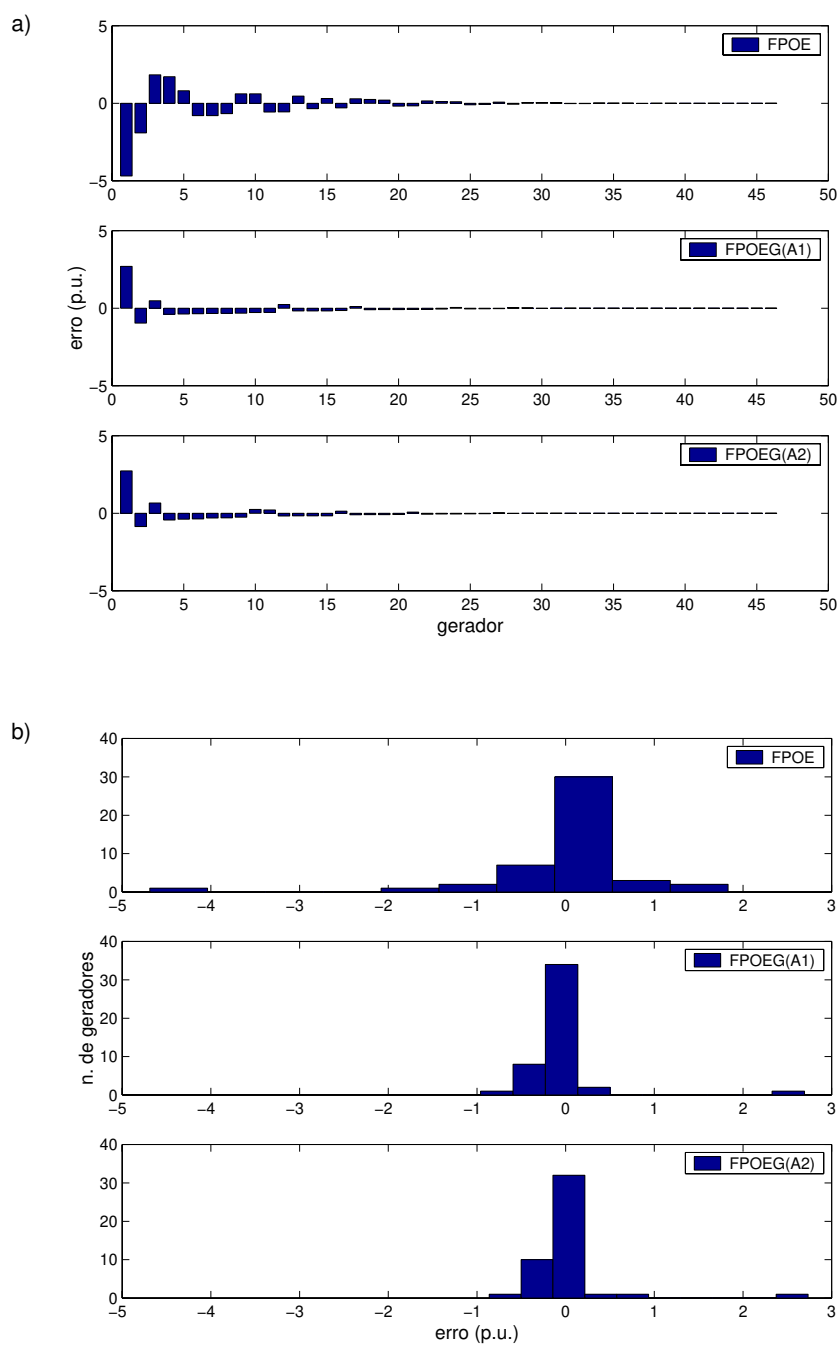


Figura 6.19: Erros em Geração de Potência Reativa

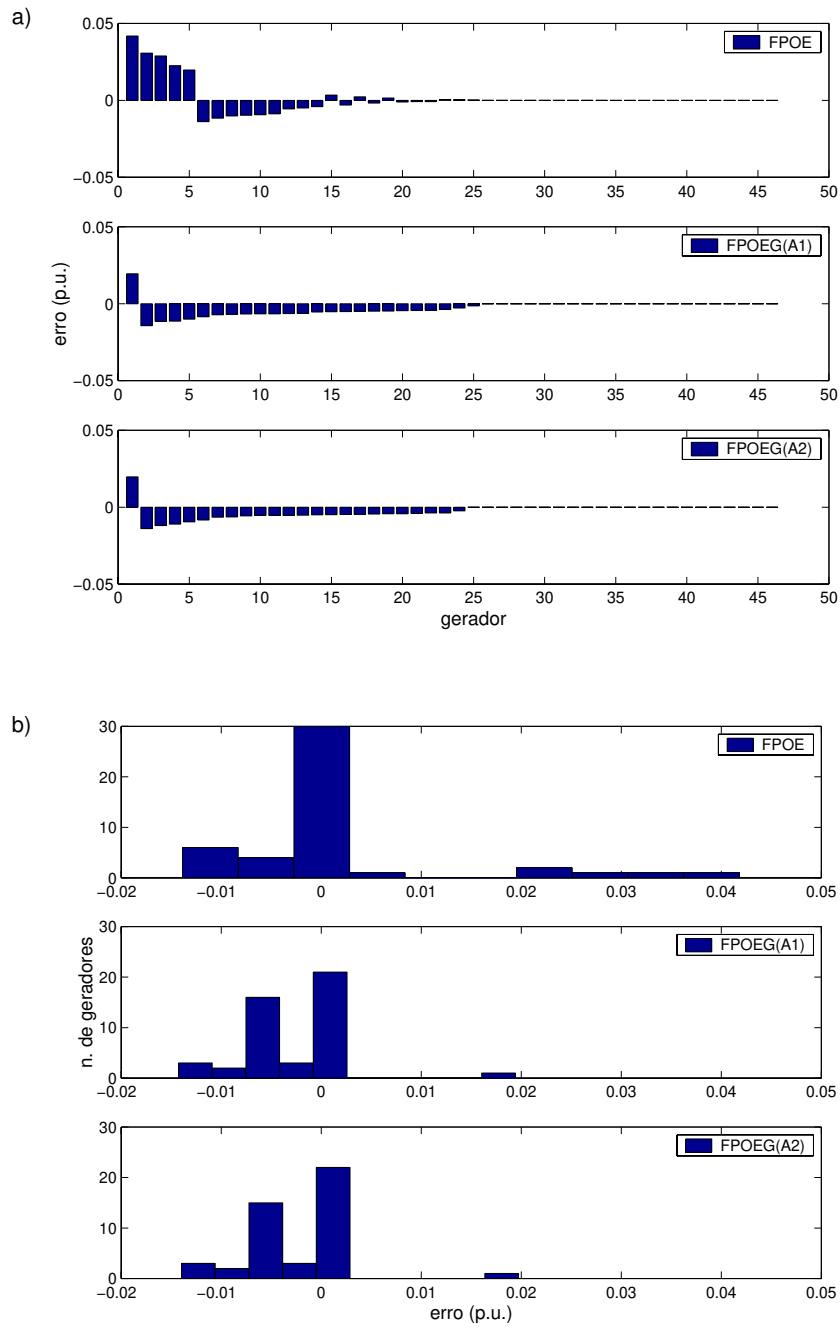


Figura 6.20: Erros em Geração de Potência Ativa

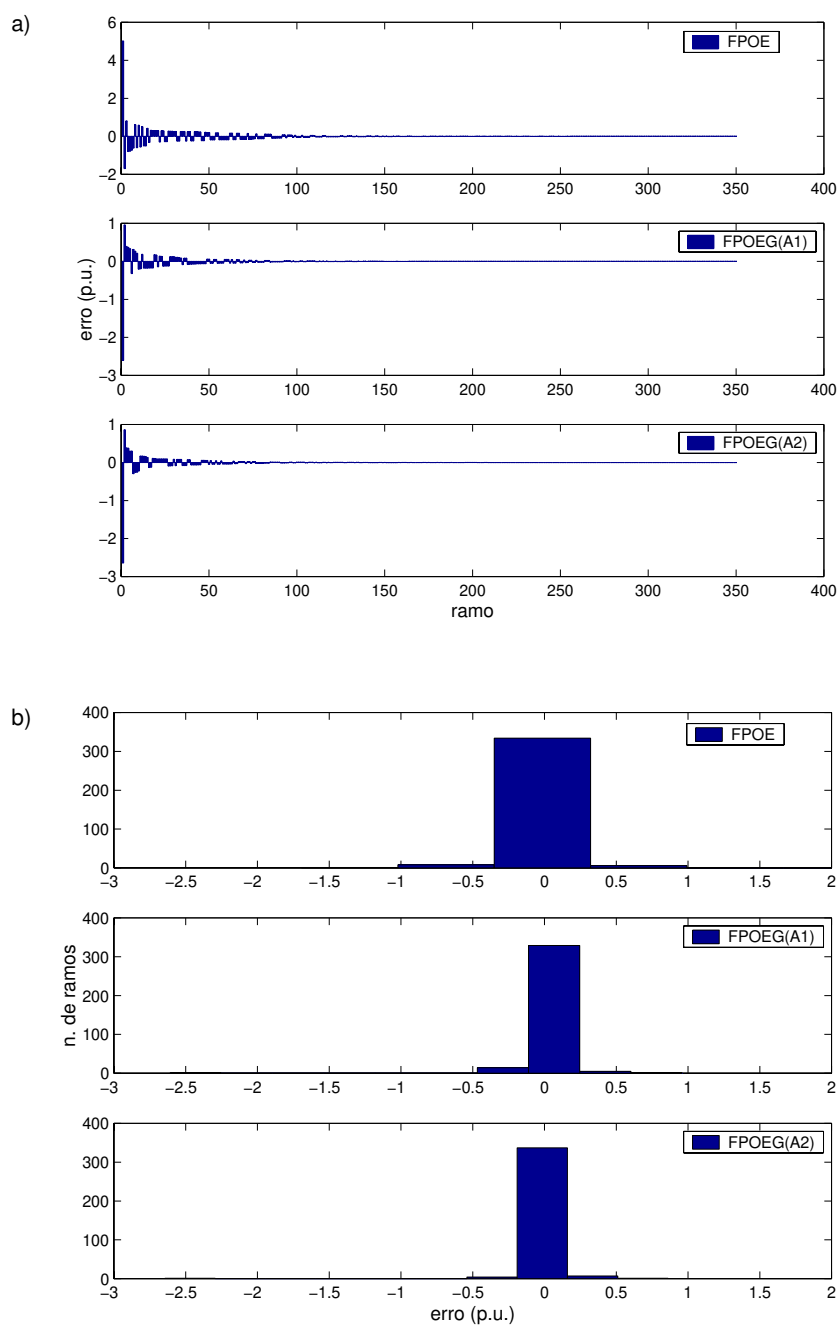


Figura 6.21: Erros em Fluxos de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão

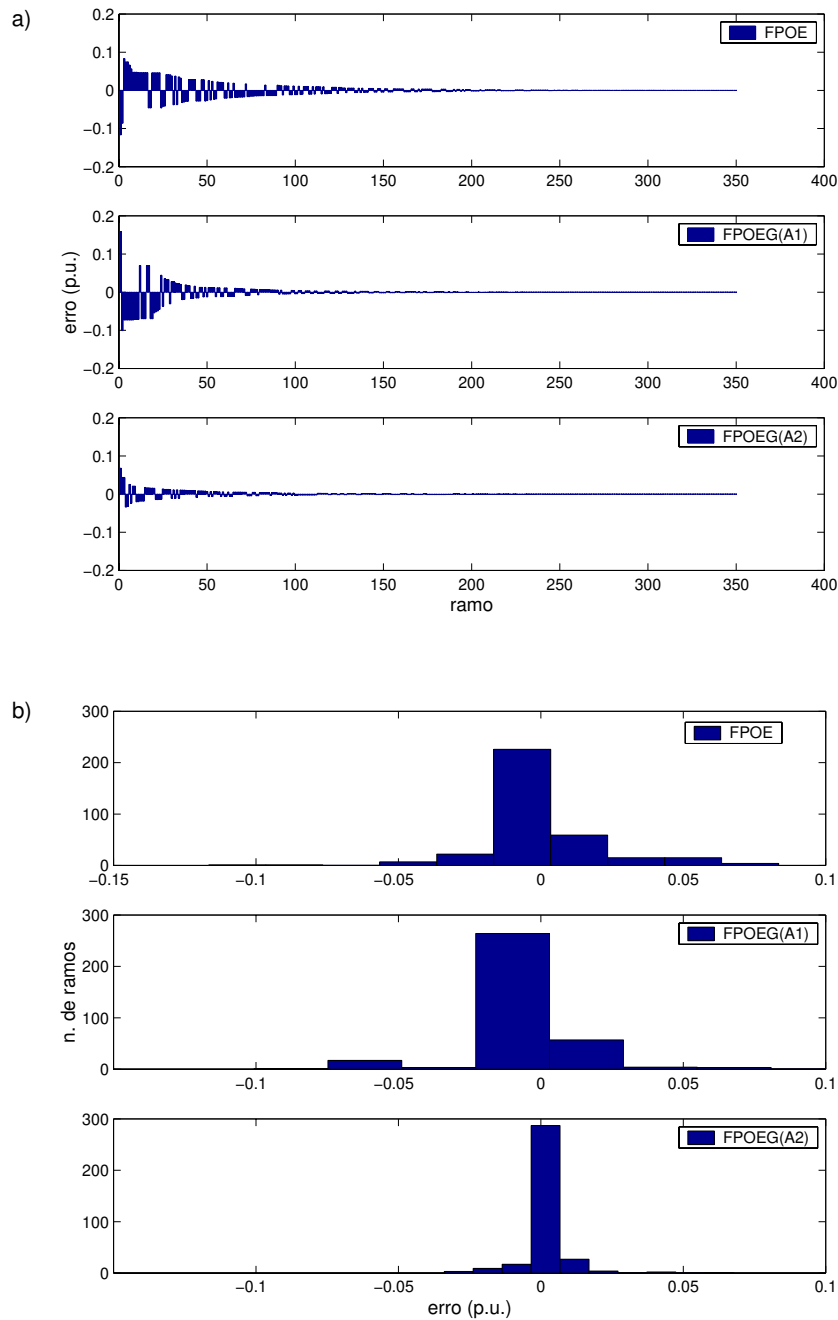


Figura 6.22: Erros em Fluxos de Potência Ativa nas Linhas de Transmissão

6.3.3 Conclusões

É importante notar que os dados referentes ao FPOE são também bastante razoáveis,

no entanto é sensível a melhora na precisão dos cálculos de controles equivalentes internos resultantes da introdução da área de amortecimento proposta. As comparações estabelecidas entre os dados relacionados com o FPOEG(A1) e o FPOEG(A2) permitem verificar a influência da incorporação de geradores na área de amortecimento. Em outros casos estudados, assim como neste aqui apresentado, constata-se que a correção nos cálculos de controles equivalentes internos é bastante superior quando informações sobre gerações de potências na área externa são corrigidas pela introdução de barras de geração na área de amortecimento. A introdução de áreas de amortecimento promove melhorias no cálculo de controles equivalentes internos, de forma que estes controles levam o sistema a um ponto operacional muito próximo daquele que poderia ser obtido caso não houvessem erros de informações sobre as áreas externas (ponto obtido pela otimização de referência). Os controles equivalentes internos são, de maneira geral, corrigidos pela introdução da área de amortecimento. Nos gráficos apresentados verifica-se que a correção na média dos cálculos dos controles internos devido à introdução de área de amortecimento promove correções acentuadas em fluxos de potência em linhas de transmissão e gerações de potência na área interna.

A determinação da dimensão de uma área de amortecimento deve atender às necessidades do centro de operação do sistema. Deve ser economicamente viável, uma vez que a obtenção de informações acerca da área externa depende de relações contratuais entre empresas; e deve garantir qualidade e confiabilidade da operação do sistema. Uma análise para determinação da dimensão da área de amortecimento pode envolver um estudo *off line* como o apresentado nesta seção. Assim, é possível detectar-se através de simulações, quais as regiões da área interna que são mais sensíveis aos erros de informação sobre a área externa, obtendo-se conhecimentos necessários para calcular uma relação custo/benefício para a área de amortecimento adotada.

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho abordou-se o problema de representação de redes externas em estudos de otimização. Os estudos apresentados e o modelo de otimização equivalente proposto são contribuições importantes e originais para a superação do problema de representação de redes externas em estudos de otimização. Foram realizados estudos de otimização reativa e ativo/reativa com os sistemas IEEE de 118 barras e Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras.

O modelo de otimização aqui proposto, o Fluxo de Potência Ótimo Equivalente generalizado (FPOEG) é uma generalização do Fluxo de Potência Ótimo Equivalente (FPOE) proposto em (Nepomuceno e Santos Jr., 1997) para estudos de otimização reativa. O FPOEG incorpora área de amortecimento e é aplicado em estudos de otimização reativa e ativo/reativa. Assim, inicialmente o trabalho enfocou o FPOE. Foram apresentados estudos para a avaliação de modelos de FPOE nos quais evidenciou-se a importância da adoção de referências adequadas para validar um modelo de otimização equivalente. Mostrou-se que uma referência usada de maneira imprópria pode levar a conclusões erradas e a validar um modelo que não é capaz de representar adequadamente respostas ativa e reativa de uma rede externa em problemas de otimização. Isto foi exemplificado com o modelo $FPOE_{II}$, que apresenta erros relativamente pequenos nos cálculos de controles equivalentes internos, caso estes controles sejam comparados com controles internos obtidos na solução do FPO_{II} . No entanto, foi mostrado que inclusive o FPO_{II} é uma referência inadequada para estudos de otimização, por não considerar controles e restrições de desigualdade no sistema externo. O $FPOE_{II}$ e o FPO_{II} são problemas de FPO em que: consideram-se apenas os controles internos no atendimento de um critério de otimização imposto à área interna, os controles da área externa são fixados em valores preestabelecidos e desconsideram-se as restrições na área externa, exceto a demanda de potência que é atendida no sistema como um todo.

Na avaliação de desempenho de modelos FPOE concluiu-se que o modelo $FPOE_{IG}$ é o mais adequado aos estudos de otimização, tanto pelos resultados numéricos obtidos, como pela sua formulação. Esta formulação representa uma situação prática em que um centro de controle esteja interessado em atender algum critério de operação do sistema

supervisionado (sistema interno) considerando a representação dos controles e das restrições de todo o sistema interligado. A influência de incertezas externas nos modelos de otimização equivalentes, avaliando individualmente como cada variável e parâmetro do problema influencia na obtenção de controles equivalentes ótimos, também foi investigada. Concluiu-se que incertezas em variáveis de controle do problema: magnitude de tensão, *taps* de transformadores e geração de potência ativa (em problema ativo/reactivo) são refletidas nas barras de fronteira através de injeções equivalentes obtidas no procedimento de casamento na fronteira, podendo deteriorar a resposta do modelo. Na análise sobre a importância do procedimento de casamento na fronteira, em estudos com o FPOE_{IG}, os ajustes de potências equivalentes nas barras de fronteira podem ser prescindíveis nos casos em que as incertezas externas em variáveis de controle do problema são preponderantes. Mostrou-se que o casamento na fronteira é um artifício importante para melhoria de desempenho aos modelos de FPOE nos casos em que as incertezas externas em cargas e geração de potência são preponderantes.

É apresentada neste trabalho uma metodologia para avaliação de impacto econômico de modelos equivalentes em estudos de otimização. A partir desta metodologia foram realizados estudos com o problema reativo e os resultados obtidos demonstram que a descentralização (aumento do número de centros de controle) pode contribuir para “desperdícios” de potência em linhas de transmissão. A avaliação de controles “ótimos” equivalentes obtidos em estudos de otimização realizados para cada centro de controle do sistema interligado, em simulações de implementação destes controles no sistema interligado como um todo, evidenciou “desperdícios” percentuais de perdas de potências ativa e reativa no sistema interligado. Os resultados obtidos nestes estudos mostram a importância do uso de modelos equivalentes adequados em estudos de otimização. Os controles equivalentes obtidos em estudos com o FPOE_{IG}, apresentaram desempenho bastante satisfatórios nestas avaliações. Em comparação com os controles equivalentes obtidos com o FPOE_{II}, constatou-se que há significantes vantagens econômicas e operacionais para cada área e para todo o sistema interligado caso o FPOE_{IG} seja usado.

Os estudos para apresentação de características da metodologia de solução proposta ao FPOEG e para avaliação da área de amortecimento proposta mostram que o FPOEG tem um grande potencial para uso em estudos de otimização em centros de controle de sistemas interligados. A metodologia de solução proposta é robusta e a área de amortecimento promove uma melhora sensível na precisão de controles internos equivalentes obtidos pelo FPOEG, em comparação com controles obtidos com o FPOE.

Como perspectivas de trabalhos futuros, mais imediatamente pretende-se aprofundar os estudos de problemas multi-objetivos, com o problema ativo/reactivo abordado neste trabalho, especificamente com sistemas operando perto do colapso de tensão. Planeja-se investigar o comportamento do modelo proposto em novos problemas de otimização.

Bibliografia

- Almeida, K. C. e Galiana, F. D. (1996). Critical cases in the optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**: 1509–1518.
- Almeida, K. C., Galiana, F. D. e Soares, S. (1994). A general parametric optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**: 540–547.
- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D. e Shetty, C. M. (1993). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, 2nd edn, John Wiley & Sons.
- Bose, A. (1984). Modeling of external networks for on-line security analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-103**: 2117–2125.
- Bose, A. (1986). The effects of external modeling errors on on-line security analysis, *IEEE Transactions on Power Systems* **PWRS-1**: 227–232.
- Carpentier, J. L. (1962). Contribution a l'étude du dispatching économique, *Bulletin de la Société Française des Electriciens* **3**: 431–447.
- Chattopadhyay, D. (1998). Daily generation scheduling: Quest for new models, *IEEE Transactions on Power Systems* **13**: 624–629.
- Cheung, K. W., Shamsollahi, P., Sun, D., Milligan, J. e Potishnak, M. (2000). Energy and ancillary service dispatch for the interim ISO New England electricity market, *IEEE Transactions on Power Systems* **15**: 968–974.
- Deckmann, S., Pizzolante, A., Monticelli, A., Stott, B. e Alsac, O. (1980a). Numerical testing of power system load flow equivalents, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-99**: 2292–2300.
- Deckmann, S., Pizzolante, A., Monticelli, A., Stott, B. e Alsac, O. (1980b). Studies on power system load flow equivalencing, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-99**: 2301–2310.
- Dommel, H. W. e Tinney, W. F. (1968). Optimal power flow solutions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-87**: 1866–1876.

- Dopazo, J. F., Dwarakanath, M., Li, J. J. e Sasson, A. M. (1977). An external system equivalent model using real-time measurements for system security evaluation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-96**: 431–446.
- Dopazo, J. F., Irisarri, G. e Sasson, A. M. (1979). Real-time external system equivalent for on-line contingency analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-98**: 2153–2171.
- Duran, H. e Arvanitidis, N. V. (1972). Simplifications for area security analysis: A new look at equivalence, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-91**: 670–679.
- Fang, R. S. e David, A. (1999). Optimal dispatch under transmission contracts, *IEEE Transactions on Power Systems* **14**: 732–737.
- Fu, Y. e Chung, T. S. (2000). A hybrid artificial neural network (ANN) and Ward equivalent approach for on-line power system voltage security assessment, *Elsevier Electric Power Systems Research* **53**: 165–171.
- Geisler, K. I. e Bose, A. (1983). State estimation based external network solution for on-line security analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-102**: 2447–2454.
- Granville, S. (1994). Optimal reactive dispatch through interior point methods, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**: 136–146.
- Hao, S. e Papalexopoulos, A. (1995). External network modeling for optimal power flow applications, *IEEE Transactions on Power Systems* **10**: 825–837.
- Housos, E. e Irisarri, G. (1981). Real time results with on-line network equivalents for control center applications, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-100**: 4830–4837.
- Kato, K., Dabbaghchi, I., Allemong, J. J., Robson, J. K., Singh, J. e Smith, R. A. (1992). Real time data exchange for on-line security assessment - A report by the IEEE Task Force on data exchange for security assessment, *IEEE Transactions on Power Systems* **7**: 1322–1332.
- Kato, K., Synder Jr., W. L., Vemuri, S., Papalexopoulos, A. D., Oatts, M. L., Contaxis, G. C., Singh, J., Smith, R. A. e Savulescu, S. C. (1994). External network modeling - Recent practical experience, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**: 216–228.
- Lo, K. L., Peng, L. J., Macqueen, J. F., Ekwue, A. O. e Cheng, D. T. Y. (1997). An extend Ward equivalent approach for power system security assessment, *Elsevier Electric Power Systems Research* **42**: 181–188.

- Marwali, M. K. C. e Shahidehpour, S. (2000a). Coordination between long-term and short-term generation scheduling with network constraints, *IEEE Transactions on Power Systems* **15**: 1161–1167.
- Marwali, M. K. C. e Shahidehpour, S. (2000b). Short-term transmission line maintenance scheduling in a deregulated system, *IEEE Transactions on Power Systems* **15**: 1117–1124.
- van Amerongen, R. A. M. e van Meeteren, H. (1982). A generalised Ward Equivalent for security analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-101**: 1519–1526.
- Momoh, J. A., El-Hawary, M. E. e Adapa, R. (1999). A review of select optimal power flow literature to 1993 - part i : Non linear and quadratic programming approaches, *IEEE Transactions on Power Systems* **14**: 96–104.
- Momoh, J. A., Koessler, R. J., Bond, M. S., Stott, B., Sun, D., Papalexopoulos, A. e Ristanovic, P. (1997). Challenges to optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**: 444–974.
- Monticelli, A. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Editora Edgard Blücher Ltda.
- Monticelli, A., Deckmann, S., Garcia, A. e Stott, B. (1979). Real-time external equivalents for static security analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-98**: 498–504.
- Monticelli, A. e Wu, F. F. (1985). A method that combines internal state estimation and external network modeling, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-104**: 91–103.
- Nepomuceno, L. (1997). *Modelos de Otimização Equivalentes Para Minimização de Perdas Através do FPO Newton*, Tese de doutorado, DSEE/FEE/UNICAMP - Campinas/SP/Brasil.
- Nepomuceno, L. e Santos Jr., A. (1997). Equivalent optimization model for loss minimization: A suitable analysis approach, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**: 1403–1412.
- Nepomuceno, L. e Santos Jr., A. (1996). Minimização de perdas via FCO Newton com representação das partes não observáveis através do modelo equivalente Ward Estendido, *XI Congresso Brasileiro de Automática-CBA* pp. 179–184.
- Papalexopoulos, A. D., Imparato, C. F. e Wu, F. F. (1989). Large-scale optimal power flow: Effects of initialization, decoupling & discretization, *IEEE Transactions on Power Systems* **4**: 748–759.

- Papalexopoulos, A., Hao, S., Liu, E., Alaywan, Z. e Kato, K. (1994). Cost/benefits analysis of an optimal power flow: The PG&E experience, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**: 796–804.
- Ponrajah, R. A. e Galiana, F. D. (1989). The minimum cost optimal power flow problem solved via the restart homotopy continuation method, *IEEE Transactions on Power Systems* **4**: 139–148.
- Price, W. W., Ewart, D. N., Gulachenski, E. M. e Silva, R. F. (1975). Dynamic equivalents from on-line measurements, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-94**: 1349–1357.
- Savulescu, S. C. (1981). Equivalent for security analysis of power systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-100**: 2672–2682.
- Shawwash, Z. K., Siu, T. K. e Russell, S. O. D. (2000). The B. C. hydro short term hydro scheduling optimization model, *IEEE Transactions on Power Systems* **15**: 1125–1131.
- Shoults, R. R. e Bierck Jr., W. J. (1988). Buffer system selection of a steady-state external equivalent model for real-time power flow using an automated sensitivity analysis procedure, *IEEE Transactions on Power Systems* **3**: 1104–1111.
- Singh, H., Alvarado, F. L. e Liu, E. (1997). Constrained LAV state estimation using penalty functions, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**: 383–388.
- Sun, D. I., Ashley, B., Brewer, B., Hughes, A. e Tinney, W. F. (1984). Optimal power flow by Newton approach, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems* **PAS-103**: 2864–2880.
- Tinney, W. F., Bright, J. M., Demaree, K. D. e Hughes, B. A. (1988). Some deficiencies in optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Systems* **3**: 676–683.
- Ward, J. B. (1949). Equivalent circuits for power flow studies, *AIEE Transactions* **68**: 373–382.

Apêndice A

Casamento na Fronteira

O procedimento do casamento na fronteira é um artifício usado em estudos realizados em tempo real para impedir que os estados atuais (básicos) da rede interna e da fronteira sejam afetados pelo modelo equivalente da rede externa. Neste procedimento, um ajuste (casamento) na fronteira por meio de injeções de potências equivalentes, garante que os estados da rede interna e fronteira não sejam alterados. As injeções de potências equivalentes (Figura A.1) são obtidas rodando-se um programa de fluxo de carga para a rede externa equivalente e fronteira. O problema de fluxo de carga é então formulado pelas equações dadas em (2.5) e todas as barras de fronteira são consideradas como barras *slacks* (com tensões complexas especificadas nos valores do caso básico).

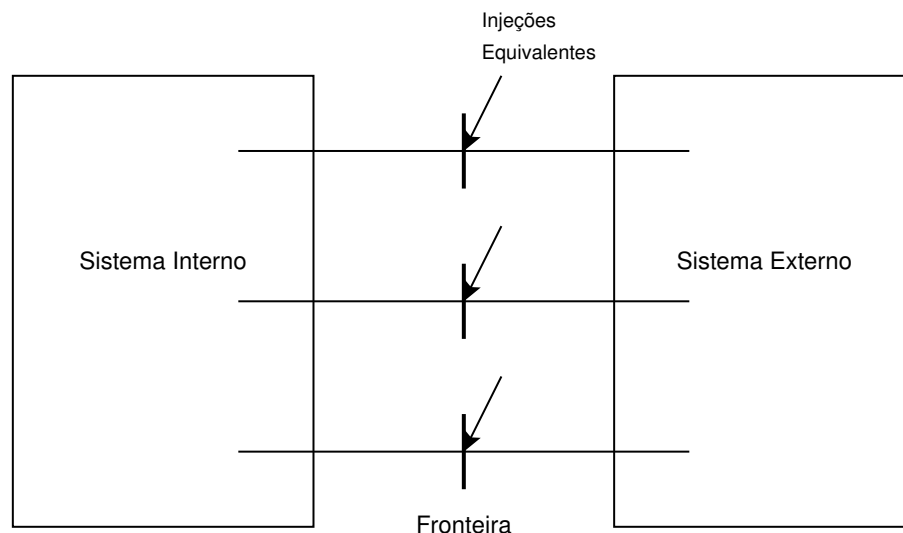


Figura A.1: Injeções de Potências Equivalentes

As injeções de potências equivalentes inseridas nas barras de fronteira para o ajuste do modelo equivalente são obtidas na solução do problema de fluxo de carga descrito acima. As expressões usadas no cálculo dessas injeções são apresentadas em (3.5) e (3.6).

Apêndice B

Parâmetro de Barreira

Como a introdução de técnicas de barreira, da forma como foi realizada neste trabalho, trata-se de uma nova proposta, características de alguns processos de otimização associadas aos parâmetros de barreira são apresentadas. Analisando-se o valor assumido pela função objetivo a cada iteração Newton, durante o processo de solução do FPOEG em quatro casos estudados, procura-se evidenciar características conferidas aos processos de otimização devido à introdução da técnica de barreira proposta. Para cada um desses processos de otimização foram arbitrados diferentes valores iniciais e finais de parâmetros de barreira.

O método clássico de barreira logarítmica adotado neste trabalho, mostrou necessitar de muitos testes com cada um dos sistemas estudados, para determinar-se condições iniciais do processo iterativo e política satisfatória de atualização dos parâmetros de barreira, ou seja, que possibilitaram condições de solução adequadas, tais como número razoável de iterações Newton e ponto ótimo local aceitável segundo critérios apropriados para avaliar o mérito da otimização. No entanto, uma vez que estes conhecimentos foram conseguidos, para cada um dos sistemas, a introdução de técnicas de barreira conferiu robustez aos processos de otimização, de forma que foi possível, obter soluções em processos de otimização em que o sistema foi submetido a diferentes condições operacionais, sem que fosse necessário redefinir critérios de otimização. Foi observado nos testes realizados, que para cada sistema, é possível definir-se uma faixa de valores iniciais e finais adequados de μ , ou seja, valores com os quais, processos de otimização podem ser realizados para diferentes condições operacionais de tais sistemas. Nos estudos realizados com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras, estas faixas mostradas nestes estudos de casos apresentados neste apêndice, foram consideradas satisfatórias.

Os casos de estudos apresentados, são referentes a processos de solução do FPOEG, realizados com o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 810 barras, e são referentes a problemas de FPOEG em que perdas aparentes em elementos série de linhas de transmissão são minimizadas (3.3). As diferenças entre tais casos, são mostradas a seguir, pelos valores iniciais e finais de parâmetros de barreira, arbitrados para cada um dos casos:

- **Caso 1-** Valores iniciais: $\mu_{v_{pv}}^0 = 400,00$, $\mu_t^0 = 400,00$ e $\mu_{v_{pq}}^0 = 300,00$. Valores

finais: $\mu_{v_{pv}}^f = 40,00$, $\mu_t^f = 40,00$ e $\mu_{v_{pq}}^f = 30,00$.

- **Caso 2-** Valores iniciais: $\mu_{v_{pv}}^0 = 400,00$, $\mu_t^0 = 400,00$ e $\mu_{v_{pq}}^0 = 300,00$. Valores finais: $\mu_{v_{pv}}^f = 60,00$, $\mu_t^f = 60,00$ e $\mu_{v_{pq}}^f = 60,00$.
- **Caso 3-** Valores iniciais: $\mu_{v_{pv}}^0 = 100,00$, $\mu_t^0 = 100,00$ e $\mu_{v_{pq}}^0 = 100,00$. Valores finais: $\mu_{v_{pv}}^f = 60,00$, $\mu_t^f = 60,00$ e $\mu_{v_{pq}}^f = 60,00$.
- **Caso 4-** Valores iniciais: $\mu_{v_{pv}}^0 = 100,00$, $\mu_t^0 = 100,00$ e $\mu_{v_{pq}}^0 = 100,00$. Valores finais: $\mu_{v_{pv}}^f = 40,00$, $\mu_t^f = 40,00$ e $\mu_{v_{pq}}^f = 30,00$.

Em todos os casos, durante o processo iterativo, os parâmetros de barreira foram atualizados com $\mu = 0,90$. Os índices v_{pq} , indicam que o parâmetro está associado à magnitude de tensão de barra de carga, e v_{pv} à magnitude de tensão de barra de geração. E os índices t indicam que o parâmetro está associado ao *tap* de transformadores. Os índices 0 e f indicam valores iniciais e finais de parâmetros de barreira.

Embora sob o ponto de vista da função objetivo, os quatro processos de otimização sejam bastante próximos, as parcelas de potências ativa e reativa que compõem o montante de perdas de potência aparente obtido na minimização realizada em cada um dos casos, apresentam algumas diferenças, e essa característica evidenciada nas Figuras B.2 e B.3 explicam como valores de parâmetros de barreira diferentes podem definir processos de otimização em que são obtidos valores de função objetivos iguais. Observa-se que a diferença entre os casos 1 e 2, e entre os casos 3 e 4, está nos valores finais de parâmetros de barreira. Os valores finais dos parâmetros de barreira no caso 1 são menores que os do caso 2, o mesmo acontece com o caso 4 em relação ao caso 3, isto significa que nos processos de otimização dos casos 1 e 4, a procura pela solução é feita por pontos de operação nos quais variáveis de controle atingem valores mais próximos de seus limites operacionais. Nesta condição, pela análise da Figura B.2, vê-se que existe uma tendência de obter-se uma parcela maior de potência ativa no montante de perdas de potência aparente.

Uma análise da evolução dos valores de perdas de potência aparente, mostrados na Figura B.1, para cada um dos casos estudados, evidenciam que: os casos 1 e 4, que se diferenciam somente em relação aos valores iniciais dos parâmetros de barreira, apresentam número total de iterações Newton diferentes, e convergem para o mesmo valor da função objetivo; os casos 2 e 3, que se diferenciam também nos valores iniciais dos parâmetros de barreira também apresentam número total de iterações Newton diferentes, e convergem para o mesmo valor da função objetivo. E para todos os casos, determinou-se valores finais de função objetivo muito próximos. Estes gráficos demonstram que o processo de solução, não é sensível (em relação a capacidade de convergência para determinados mínimos locais, aos quais associa-se valores de função objetivo muito próximos) a alterações de valores iniciais e finais dos parâmetros de barreira, dentro de uma determinada faixa especificada para cada sistema.

Os valores das parcelas de potência reativa mostradas na Figura B.3 mostram que o comportamento dessas parcelas é oposto ao comportamento das parcelas de potência

ativa; este comportamento, de certo modo, de complementariedade dos valores de potências ativa e reativa, que compõem o montante de perdas aparente, é que permite que mesmo para casos diferentes, valores finais da função objetivo de perdas aparentes possam ser iguais. É importante ressaltar que, mesmo tendo pontos ótimos locais nos quais o valor da função objetivo é igual, trata-se de pontos operacionais muito próximos, no entanto diferentes.

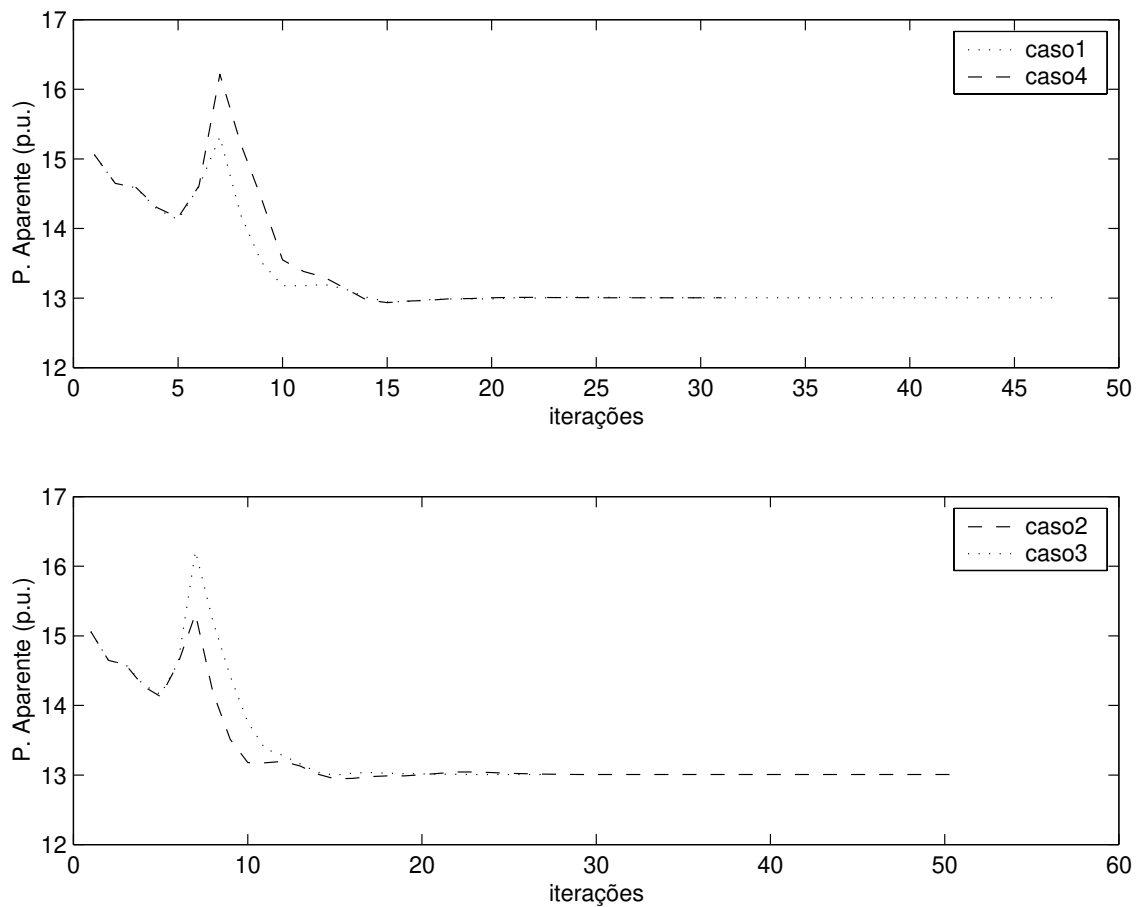


Figura B.1: Perdas Aparentes e Parâmetros de Barreira

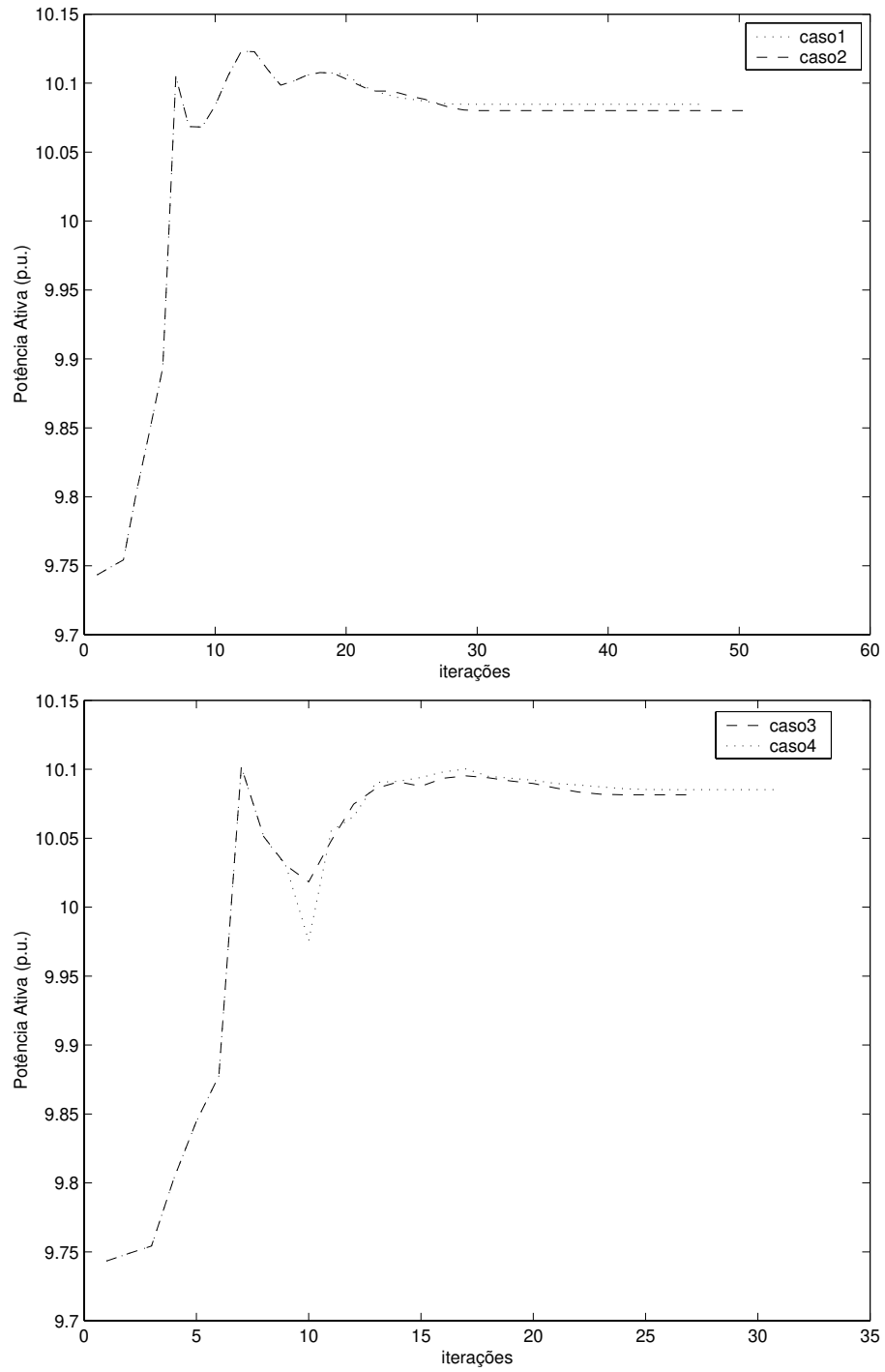


Figura B.2: Perdas Ativas e Parâmetros de Barreira

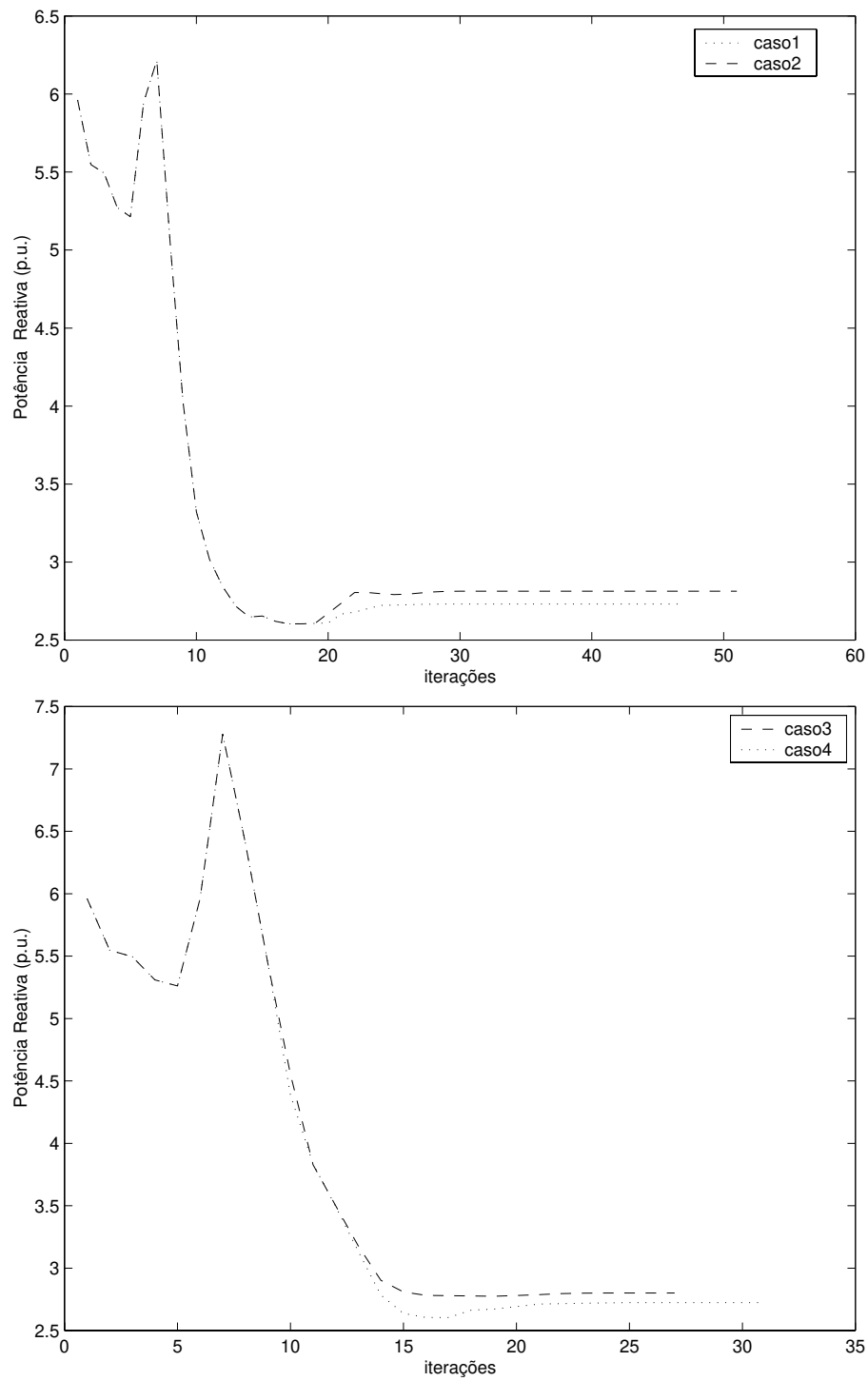


Figura B.3: Perdas Reativas e Parâmetros de Barreira