

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

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO
PARAMÉTRICO

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por <u>Flávio Guilherme de Melo Lima</u> e aprovada pela Comissão Julgada em: <u>07 / 07 / 2000</u> <u>Secundino Soares F.</u> Orientador

Por: MSc. Flávio Guilherme de Melo Lima

Orientador: Prof. Dr. Secundino Soares Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Anésio dos Santos Jr.

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

Julho de 2000

Banca examinadora:

Prof. Dr. Secundino S. Filho(UNICAMP)
Prof. Dr. Carlos A. Castro Jr.(UNICAMP)
Prof. Dr. Takaaki Ohishi (UNICAMP)
Prof. Dr. Djalma Falcão (UFRJ)
Prof. Dr. Geraldo L. Torres (UFPE)
Profa. Dra. Kátia C. Almeida (UFSC)

485610000

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/Unicamp
	L629f
V.	Es.
TOMBO BC/	433,25
PROC.	278/2000
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREC.º	R\$ 11,00
DATA	30/12/2000
N.º CPD	

CM-00153683-2

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

L629f

Lima, Flávio Guilherme de Melo

Fluxo de potência ótimo paramétrico / Flávio
Guilherme de Melo Lima. --Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientadores: Secundino Soares Filho; Anésio dos
Santos Jr.

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

1. Newton-Raphson, Método 2. Sistemas de energia
elétrica - Controle. 3. Sistemas de energia elétrica -
Transmissão. 4. Otimização matemática. I. Soares
Filho, Secundino. II. Santos Jr., Anésio dos. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SECÃO CIRCULANTE

i

À minha família

Esta pesquisa teve o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (**FAPESP**) através do Projeto Temático de Equipe: Planejamento da Operação de Sistemas de Energia Elétrica com Predominância de Geração Hidroelétrica.

Agradecimentos

Mais uma etapa na minha vida concluída e que jamais poderia ter sido cumprida se não houvesse a compreensão, o carinho e a amizade de muitos amigos.

Ao Prof. Dr. Secundino o qual merece um agradecimento especial por acreditar na minha capacidade em finalizar este trabalho. Ao Prof. Dr. Anésio pelas valiosas sugestões ao trabalho.

A todos os colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMS que me apoiaram. Ao Departamento de Computação e Estatística que gentilmente cedeu seu espaço físico para elaboração e conclusão do programa computacional desenvolvido.

A todos os colegas do DENSIS que conviveram comigo durante minha estadia na UNICAMP.

A CAPES que me apoiou nos primeiros anos de doutorado.

Resumo

Este trabalho apresenta um método paramétrico de resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para sistemas de potência de grande porte. O trabalho é uma continuação das pesquisas anteriores em otimização paramétrica aplicada no FPO desenvolvidas na UNICAMP e na Universidade McGill, em Montreal, Canadá. A abordagem paramétrica consiste em relaxar o problema original (FPO) através da incorporação de termos paramétricos na função objetivo e nas restrições de igualdade e desigualdade dando surgimento ao problema relaxado (Fluxo de Potência Ótimo Paramétrico-FPOP). A relaxação do FPO assegura que qualquer solução inicial arbitrária, factível ou não no problema original, seja solução ótima do FPO relaxado. Através da variação de um parâmetro, uma família de problemas paramétricos é resolvida pelo método de Newton-Raphson, cujas soluções formam um caminho que parte do problema relaxado indo até a solução do problema original. Uma estratégia eficiente para a determinação do conjunto de restrições de desigualdade ativas de cada problema paramétrico foi desenvolvida. O método foi testado em duas versões do sistema elétrico brasileiro Sul-Sudeste, uma contendo 810 barras e uma outra com 2256 barras na qual está representada a interligação do Sul-Sudeste com o Norte-Nordeste. Foram considerados os problemas de minimização do custo de geração, minimização de perdas ativas e minimização de desvio de tensão. Os resultados mostraram que a abordagem paramétrica é uma técnica robusta e eficiente de resolução de problemas de FPO em sistemas de grande porte.

Abstract

The aim of this work is to present a parametric method for the resolution of the Optimal Power Flow (OPF) problem applied to large scale power systems. This research work on parametric optimization applied to OPF was developed at UNICAMP and at McGill University, in Montreal, Canada. The parametric approach consists of relaxing the original problem (OPF) by incorporating parametric terms to the objective function and to the equality and inequality constraints leading to a relaxed problem (Parametric Optimal Power Flow – POPF). The relaxation of the OPF assures that any arbitrary initial solution be the optimal solution of the relaxed OPF, even if this initial solution is feasible or not for the original problem. After a parameter change, a family of parametric problems is resolved by the Newton-Raphson method, whose solutions form a path from the relaxed problem up to the solution of the original problem. An efficient strategy was studied for the determination of the set of active inequality constraints for each parametric problem. The method was tested for two versions of the Brazilian South–Southeast power system, one containing 810 buses and another 2256 buses in which the South-Southeast to North-Northeast interconnection is represented. Problems concerned with minimization of generation costs, active losses and voltage profile were considered. The results showed that the parametric approach is a robust and efficient technique for the resolution of OPF problems for large scale power systems.

Conteúdo

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
Capítulo I - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação da Tese.....	7
1.2 Contribuição da Tese.....	10
1.3 Descrição da Tese.....	11
Capítulo II - FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO.....	14
2.1 Origem do Fluxo de Potência Ótimo.....	15
2.2 Formulação do Fluxo de Potência Ótimo	17
Capítulo III - ABORDAGEM PARAMÉTRICA DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO.....	29
3.1 Parametrização de um Problema.....	30
3.1.1 Introdução.....	30

3.1.2 Função Homotopia.....	31
3.1.3 A Existência do Caminho.....	33
3.1.4 Método Preditor-Corretor.....	33
3.2 Fluxo de Potência Ótimo Paramétrico.....	36
3.2.1 Introdução.....	36
3.2.2 Formulação.....	37
3.3 Condições de Otimalidade do Problema Paramétrico.....	41
3.4 Construção do Caminho.....	45
3.5 Fluxograma do FPOP.....	47
Capítulo IV - ESTRATÉGIAS DE EVOLUÇÃO DO PARÂMETRO E DETERMINAÇÃO DOS CONJUNTO ATIVOS.....	50
4.1 Introdução.....	51
4.2 Estratégia I.....	52
4.3 Estratégia II.....	53
4.4 Estratégia III.....	55
4.4.1 Algoritmo.....	56

4.5 Estratégia IV.....	63
4.6 Algoritmo Paramétrico.....	68
4.7 Resumo das Estratégias.....	70
4.8 Conclusão.....	70
Capítulo V - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
5.1 Introdução.....	73
5.2 Considerações Iniciais.....	74
5.3 Descrição dos Testes.....	77
5.3.1 Análise da Robustez da Metodologia Paramétrica.....	77
5.3.1.1 Termo Quadrático W	77
5.3.1.2 Parâmetro de Folga ε	78
5.3.1.3 Solução Inicial.....	79
5.3.2 Análise Global da Solução Final.....	81
5.3.2.1 Minimização de Perdas Ativas.....	81
5.3.2.2 Minimização do Custo de Geração.....	99
Capítulo VI - CONCLUSÕES.....	116

APÊNDICE A – TEOREMAS DA FUNÇÃO IMPLÍCITA E DO CAMINHO...	120
APÊNDICE B – FORMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO PARAMÉTRICO.....	122
APÊNDICE C – FUNÇÃO LAGRANGEANA DO FPOP E SUAS DERIVADAS.....	126
C.1 Função Lagrangeana.....	126
C.2 Derivada Primeira da Função Lagrangeana.....	128
C.2.1 Derivada em Relação ao Ângulo.....	128
C.2.2 Derivada em Relação a Magnitude de Tensão.....	129
C.2.3 Derivada em Relação a Admitância Shunt.....	130
C.2.4 Derivada em Relação ao Tap.....	130
C.3 Derivada Segunda da Função Lagrangeana.....	131
C.3.1 Derivada Ângulo x Ângulo.....	131
C.3.2 Derivada Magnitude de Tensão x Ângulo.....	132
C.3.3 Derivada Magnit. de Tensão x Magnit. de Tensão.....	132
C.3.4 Derivada Tap x Ângulo.....	133
C.3.5 Derivada Tap x Tap.....	134

C.3.6 Derivada Tap x Magnitude de Tensão.....	134
C.3.7 Derivada Magnit. de Tensão x Admitância Shunt.....	135
C.3.8 Derivada Admit. Shunt x Admitância Shunt.....	135
APÊNDICE D – MODELO PARA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	136
D.1 Introdução.....	136
D.2 O Programa.....	139
D.3 Comentário sobre as Subrotinas.....	140
BIBLIOGRAFIA.....	141

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Evolução do parâmetro na estratégia III.....	59
Tabela 4.2: Violações para $c = 0,99$	66
Tabela 5.1: Componentes dos sistemas elétricos em teste.....	74
Tabela 5.2: Resultados para a função objetivo perdas ativas.....	82
Tabela 5.3: Evolução do parâmetro - Sistema I - Perdas ativas - Matriz atualizada.....	84
Tabela 5.4: Evolução do parâmetro - Sistema I - Perdas ativas - Matriz constante.....	86
Tabela 5.5: Evolução do parâmetro - Sistema II - Perdas ativas - Matriz constante.....	87
Tabela 5.6: Evolução do parâmetro - Sistema II - Perdas ativas - Matriz atualizada.....	88
Tabela 5.7: Perfil de tensão para o sistema I.....	89
Tabela 5.8: Perfil de tensão para o sistema II.....	90
Tabela 5.9: Gerações reativas do sistema I no limite com admitâncias shunt fixas.....	95
Tabela 5.10: Tensões do sistema I no limite com admitâncias shunt fixas.....	95
Tabela 5.11: Gerações reativas do sistema I no limite com admitâncias shunt livres.....	96
Tabela 5.12: Tensões do sistema I no limite com admitâncias shunt livres.....	97
Tabela 5.13: Gerações reativas do sistema II no limite com admitâncias shunt livres.....	97
Tabela 5.14: Tensões do sistema II no limite com admitâncias shunt livres.....	98
Tabela 5.15: Gerações reativas do sistema II no limite com admitâncias shunt fixas.....	99
Tabela 5.16: Tensões do sistema II no limite com admitâncias shunt fixas.....	99
Tabela 5.17: Resultados para a função objetivo custo de geração.....	99

Tabela 5.18: Evolução do parâmetro - Sistema I - Custo de geração - Matriz constante.....	101
Tabela 5.19: Evolução do parâmetro - Sistema I - Custo de geração - Matriz atualizada.	102
Tabela 5.20: Evolução do parâmetro - Sistema II - Custo de geração - Matriz constante.	103
Tabela 5.21: Evolução do parâmetro - Sistema II - Custo de geração - Matriz atualizada.....	104
Tabela 5.22: Perfil de tensão para o sistema I.....	105
Tabela 5.23: Perfil de tensão para o sistema II.....	106
Tabela 5.24: Gerações ativas do sistema I no limite.....	109
Tabela 5.25: Tensões do sistema I no limite.....	109
Tabela 5.26: Gerações ativas do sistema II no limite.....	114
Tabela 5.27: Tensões do sistema II no limite.....	114

Lista de Figuras

Figura 3.1: Relação entre os problemas relaxado e original através do caminho $x(c)$	32
Figura 3.2: Possibilidades de caminhos descritos por $x(c)$	33
Figura 3.3: Passos preditor e corretor.....	34
Figura 3.4: Caminho da função Homotopia (3.11).....	36
Figura 3.5: Ilustração do processo de relaxação das restrições do FPO.....	40
Figura 3.6: Ilustração do processo de relaxação da função objetivo e da restrição de igualdade do FPO.....	41
Figura 3.7: Fluxograma do FPOP.....	48
Figura 4.1: Exemplo da estratégia I.....	53
Figura 4.2: Exemplo da estratégia II.	55
Figura 4.3: Reta secante para as restrições violadas.....	58
Figura 4.4: Magnitude de tensão - Custo de geração.....	60
Figura 4.5: Geração reativa - Custo de geração.....	60
Figura 4.6: Multiplicador de Lagrange associado a tensão - Custo de geração.....	61
Figura 4.7: Geração reativa - Perdas ativas.....	61
Figura 4.8: Magnitude de tensão - Perdas ativas.....	62
Figura 4.9: Passo corretor segundo a estratégia III.....	62
Figura 5.1: Função desvio de tensão para diferentes pontos de inicialização.....	80
Figura 5.2: Função perdas ativas para diferentes pontos de partida.....	81
Figura 5.3: Maiores tensões do fluxo de carga para o sistema I.....	91
Figura 5.4: Menores tensões do fluxo de carga para o sistema I.....	92
Figura 5.5: Maiores tensões do fluxo de carga para o sistema II.....	92
Figura 5.6: Menores tensões do fluxo de carga para o sistema II.....	93
Figura 5.7: Evolução da função perdas para o sistema I.....	93

Figura 5.8: Evolução da função perdas para o sistema II.....	94
Figura 5.9: Evolução da função custo de geração para o sistema I.....	106
Figura 5.10: Evolução da função custo de geração para o sistema II.....	107
Figura 5.11: Despacho de geração ativa no sistema I.....	115
Figura 5.12: Despacho de geração ativa no sistema II.....	115
Figura A.1: Todos os pontos vizinhos a (x_I, c_I) que satisfazem a função Homotopia.....	121
Figura D.1: Estrutura de armazenagem da matriz Hessiana.....	138

Capítulo I

Introdução

Um sistema de potência é constituído essencialmente de três partes que são os centros geradores, os centros consumidores e, fazendo um elo entre estes dois centros, o sistema de escoamento de fluxo de potência. Este último, por sua vez, se subdivide em outras três partes, que compreendem os sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição. Em cada uma destas partes existem limites de operação dos equipamentos elétricos de tal forma a assegurar uma determinada qualidade no fornecimento de energia elétrica aos centros consumidores.

Nos centros de geração, a preocupação é principalmente com a produção de potência ativa. O Brasil, possuindo predominância de geração hidroelétrica, constantemente se defronta com o risco do racionamento de energia elétrica. Entretanto, medidas vêm sendo tomadas com o propósito de amenizar este risco, como por exemplo o programa de expansão termoelétrico, que prevê a

implantação de 11.000 MW nos próximos cinco anos, a interligação do sistema Norte/Nordeste com o sistema Sul/Sudeste, o aumento da participação de fontes renováveis de energia e a exploração de pequenas centrais hidroelétricas.

Os benefícios da interligação elétrica entre as regiões brasileiras são vários, entre os quais pode-se citar o desenvolvimento de regiões que por natureza não possuem mananciais para a construção de novas hidrelétricas e o aumento da confiabilidade do sistema. Associa-se a confiabilidade dos sistemas interligados a uma maior segurança da operação, onde os riscos no fornecimento de energia elétrica são significativamente reduzidos, o que beneficia de modo direto a economia brasileira.

A predominância de geração hidráulica, com reservatórios de regularização plurianual e pertencentes a diferentes empresas, resulta na necessidade de ações integradas, visando a otimização eletroenergética do sistema, o aumento da eficiência e a obtenção do custo mínimo no fornecimento da energia elétrica. No Brasil a divisão das fontes de geração de energia elétrica compreende: 93,5% de hidroelétricas, 3,1% de derivados de petróleo, 2,3% de carvão e 1,1% de nuclear.

O sistema elétrico brasileiro está hoje segmentado em três sistemas distintos, a saber [Eletrobrás]:

- Sistema Interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste, com uma capacidade instalada de 44.706 MW em dez/98, considerando somente 50% da capacidade instalada na UHE Itaipu (6300 MW), possui 194 usinas hidrelétricas (41.102 MW – 92%) e 25 usinas termelétricas (3.604 MW – 8%).

A capacidade instalada hidrelétrica neste sistema representa 69% do total nacional em operação, dispondo ainda de um potencial da ordem de 45 GW, já inventariado para ser aproveitado.

Em termos de geração termelétrica, na Região Sul se localizam as usinas a carvão, que totalizam 1.387 MW instalados, e as usinas a óleo combustível, que totalizam 96 MW. Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste existem usinas térmicas a óleo combustível (1.441 MW) e a usina nuclear Angra I (657 MW).

A capacidade atual de transferência do sistema de transmissão que interconecta as regiões Sul e Sudeste/Centro-Oeste é da ordem de 3600 MW médios, no sentido Sul/Sudeste, e 3.900 MW médios, no sentido inverso. Esta interligação permite um intercâmbio de energia com característica marcadamente sazonal, com fluxos na direção Sudeste/Centro-Oeste durante o período de maio a novembro (período seco, Sistema Sudeste/Centro-Oeste) e na direção Sul, durante o período de dezembro a abril (período chuvoso, Sistema Sudeste/Centro-Oeste).

- Sistema Interligado Norte/Nordeste, que corresponde aos mercados da região do baixo Tocantins, Belém área de influência da UHE Tucuruí e toda a região Nordeste, com uma capacidade instalada de 14.716 MW, possui 17 usinas hidrelétricas (14.417 MW – 98%) e 3 usinas termelétricas (299 MW – 2%).

A capacidade instalada hidrelétrica representa 24% do total nacional em operação, dispondo ainda de um potencial de cerca de 61 GW, já inventariado para ser aproveitado.

A capacidade atual de transferência da interligação entre as duas regiões é da ordem de 600 MW médios na direção Norte/Nordeste, e 700 MW médios na direção Nordeste/Norte. Essa interligação também permite um intercâmbio de energia com característica marcadamente sazonal, com fluxos de energia na direção Nordeste no primeiro semestre do ano, quando existe abundância de água na bacia do rio Tocantins (UHE Tucuruí), e no sentido inverso no segundo semestre do ano, quando as vazões do Tocantins se reduzem e o

reservatório da UHE Tucuruí apresenta deplecionamento acentuado. Assim, durante o primeiro semestre a região Nordeste armazena energia nos seus reservatórios, aproveitando os excedentes de água da UHE Tucuruí que são “transportados” pela interligação na forma de energia elétrica, e devolve parte desta energia, da mesma forma, quando existe escassez de água no reservatório da UHE Tucuruí.

- Sistemas Isolados, que correspondem a mais de 300 localidades eletricamente isoladas uma das outras, a maioria na região Norte. A capacidade instalada total nos Sistemas Isolados é de 1.932 MW, em dez/98, dos quais 1.367 MW correspondem a usinas termelétricas e 565 MW a usinas hidrelétricas.

Cabe à iniciativa privada a expansão da oferta de energia elétrica na forma de construção de pequenas centrais hidrelétricas, de cogeração e de fontes alternativas de energia.

No aproveitamento de fontes renováveis de energia se destaca o Estado do Ceará onde há um enorme potencial eólico sendo explorado pela concessionária local em parceria com a Alemanha. Atualmente é injetada na rede elétrica cearense 15 MW provenientes de geradores eólicos. Em franca expansão, este tipo de energia reflete uma característica regional e coloca o país como o maior produtor de energia eólica da América Latina. Encontra-se em estado avançado de estudos a instalação de duas megafazendas eólicas de 200 MW (as maiores do mundo) uma no estado do Pará e a outra no Paraná. Em escala menor de aplicação, mas com uma tendência de crescimento, está o uso da energia solar.

O advento de novas fontes geradoras, a desregulamentação do setor elétrico oriundo da privatização e a participação de países vizinhos ao Brasil, como a Bolívia, Uruguai, Argentina e Venezuela, que disponibilizam uma maior

oferta de energia no mercado, tornam irreversível a mudança do cenário energético brasileiro.

O sistema de transmissão brasileiro, devido a extensão territorial do país e por ter um parque gerador hidráulico, se desenvolveu utilizando uma grande variedade de níveis de tensão. Essa variedade ocorreu porque a escolha de uma tensão é função da potência instantânea a transmitir e da distância entre as usinas geradoras e os centros de carga e da relação custo de implantação/benefício alcançado. Atualmente o sistema de transmissão brasileiro conta com uma extensão de 63.706 km, assim divididos:

De 230 kV até 440 kV	46.090 km
Em 500 kV ou acima	16.004 km
Elo de 600 kV CC	1.612 km

Novas tecnologias como os FACTS (Flexible AC Transmission Systems) vêm sendo estudadas como alternativas de mudança dos parâmetros das linhas de transmissão de tal forma a disponibilizar uma maior capacidade de transporte de potência pelas linhas, postergando-se a construção de novas [Ge e Chung, 1999].

O Fluxo de Potência Ótimo (FPO) se constitui numa ferramenta computacional baseada num modelo de problema de otimização não linear e não convexa que envolve os centros de geração, os centros de consumo, os equipamentos da rede elétrica como transformadores, reatores, capacitores, FACTS, representados por seus limites físicos de operação. O FPO contém um grande número de variáveis contínuas, tais como a geração ativa, geração reativa e a magnitude de tensão e de variáveis discretas, tais como os taps de transformadores e admitâncias shunt.

A utilidade do FPO reside no fato dele dar uma orientação ao operador ou planejador do sistema elétrico de como estas variáveis devem ser ajustadas de

modo que os centros de geração, os centros de consumo e os equipamentos que participam da transmissão estejam dentro de suas capacidades. Trata-se, portanto, de um problema bastante complexo e de difícil solução como mostram as inúmeras pesquisas nesse tema nas últimas três décadas. Ressalta-se que a busca de um programa computacional rápido e confiável é um objetivo comum a todas as metodologias empregadas na solução do FPO.

O campo de aplicação do FPO é bastante amplo e compreende o planejamento da operação e da expansão, e a operação em tempo real. A informação obtida por um FPO contempla a satisfação de um critério elétrico ou econômico, como por exemplo a minimização de perdas na transmissão ou a minimização do custo de geração, e sua solução envolve, em linhas gerais:

- a determinação de quais barras necessitam de compensação reativa do tipo síncrona ou estática (capacitiva ou indutiva);
- o despacho de potência ativa e reativa;
- a determinação dos valores dos taps em LTC e a obtenção do ângulo para transformadores defasadores;
- a determinação das magnitudes de tensão e dos ângulos das barras do sistema elétrico;
- a determinação dos fluxos ativos nas linhas de transmissão.
- o cálculo do máximo carregamento e do mínimo corte de carga para efeito de análise de colapso de tensão.
- em sistemas interligados, o cálculo da máxima potência a ser transferida com segurança de uma área a outra.

Os dois últimos tópicos citados acima tornam-se importantes no atual cenário de desregulamentação do setor elétrico onde os grandes consumidores têm livre acesso ao sistema de transmissão.

O aumento desordenado da carga dos sistemas elétricos, associado à falta de investimentos no setor, aumentam o risco de instabilidade de tensão,

fenômeno que provoca o colapso de tensão e a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Nessa situação, o FPO colabora como uma eficiente ferramenta na busca de um ponto de operação que otimiza os recursos disponíveis. Alguns estudos relativos a estabilidade de tensão podem ser encontrados em [Flatabo et ali, 1990], [Tiranuchit et ali, 1988], [Iba et ali., 1991], [Ajjarapu e Christy, 1992].

Atualmente o setor elétrico brasileiro possui uma perda total de 15% que envolve as perdas técnicas, oriundas dos sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição, e perdas comerciais, associadas a ligações clandestinas [Eletrobrás]. Esse percentual pode ser desprezível nos sistemas de distribuição mas, nos sistemas de transmissão e subtransmissão, que transportam grandes blocos de potência, torna-se significativo.

1.1 Motivação da Tese

Este trabalho é uma continuação da linha de pesquisa em otimização paramétrica no FPO, sendo fruto de uma parceria entre a UNICAMP e a Universidade McGill, em Montreal, Canadá, onde o Prof. Dr. Francisco Daniel Galiana lidera um grupo de pesquisa que vem estudando a aplicação da otimização paramétrica no FPO há duas décadas.

A otimização paramétrica consiste em relaxar o **FPO original** através da introdução de termos parametrizados na função objetivo e nas restrições de igualdade e desigualdade do problema, dando origem ao **FPO relaxado**. A parametrização é feita de modo que uma solução inicial arbitrária, factível ou não no FPO original, é ótima no FPO relaxado. Mediante a variação do parâmetro, um conjunto de problemas de FPO é estabelecido cujas soluções ótimas formam um caminho entre as soluções ótimas dos problemas relaxado e original. A solução do FPO original é então obtida por um procedimento iterativo que percorre o caminho de volta do FPO relaxado, cuja solução é conhecida, até o FPO original, cuja solução é procurada.

A otimização paramétrica foi empregada em [Lima,1993] e [Almeida,1994], onde foram testados sistemas de pequeno porte como o IEEE30 e o IEEE118. Nestes dois trabalhos foram analisados os comportamentos de todas as variáveis do FPO, como por exemplo a magnitude de tensão, diante da variação do parâmetro ao se fazer a transição do problema relaxado para o problema original.

Devido ao fato dos sistemas testes serem de pequeno porte e do interesse da pesquisa se concentrar na análise da robustez da otimização paramétrica, optou-se por desenvolver um protótipo de FPO paramétrico (FPOP) em MATLAB™. Isto propiciou uma grande economia de tempo no desenvolvimento de subrotinas, como por exemplo a inversão e armazenagem de matrizes, pois o MATLAB™ já possui várias subrotinas adequadas a operações com matrizes. Por outro lado, sistemas elétricos maiores não puderam ser testados devido ao tempo computacional elevado e as limitações deste ambiente.

A robustez da metodologia se comprovou quando diferentes soluções de partida, para se resolver o FPO, levavam a mesma solução final. Tal característica é independente da função objetivo escolhida: minimização de custo de geração, minimização de perdas ativas nas linhas de transmissão e minimização de desvio de tensão. Duas soluções iniciais foram testadas em [Almeida,1994] e [Lima,1993], uma oriunda da solução de um fluxo de carga e a outra obtida fazendo-se as magnitudes de tensão e seus ângulos, para todas as barras, iguais a 1.0 pu e zero, respectivamente, comumente chamada de inicialização *flat*.

O comportamento das variáveis do FPO diante da variação do parâmetro mostrou o forte acoplamento existente entre as variáveis ativas (Injeção de potência ativa - Ângulo de barra) e reativas (Injeção de potência reativa - Magnitude de tensão). Soma-se a esta característica intrínseca do problema o

fato de que as variáveis ativas apresentam uma variação mais suave que as variáveis reativas no caminho em direção à solução ótima.

Em [Almeida,1994] foi inserido um modelo de FACTS associado a simulação de contingências e, como uma tentativa de mostrar uma aplicação da metodologia paramétrica, foi feita uma simulação de um despacho on-line onde arbitrou-se uma curva de carga e a cada novo intervalo de variação de carga resolveu-se um FPOP. Os resultados obtidos foram satisfatórios e mostraram que para alguns intervalos de tempo a solução do FPOP é rápida tanto do ponto de vista de variação do parâmetro como do processo iterativo de solução.

Como o FPO é um problema não linear, não convexo e sujeito a singularidades [Monticelli e Liu, 1992], era de se esperar que o FPOP herdasse as mesmas deficiências do FPO original [Tinney et al, 1988]. Em [Almeida e Galiana, 1997] foram levantadas situações (pontos críticos) que levam a descontinuidade do caminho entre o FPO relaxado e o FPO original. Alguns pontos críticos explicam o motivo da não convergência do processo de solução do FPO relaxado para certos sistemas, enquanto que outros justificam o comportamento da metodologia paramétrica.

As técnicas de otimização empregadas no FPO têm se valido de penalidades e heurísticas que podem comprometer a qualidade da solução ótima. Os métodos que utilizam penalidades para tratar as restrições de desigualdade apresentam uma grande dificuldade na determinação do valor exato das penalidades, a tal ponto destes valores mudarem conforme a função objetivo e a dimensão do sistema. A abordagem paramétrica do FPO não introduz penalidades para o tratamento das restrições. Entretanto, para melhoria do condicionamento numérico do método, é introduzido na função objetivo um termo de desvios quadráticos das variáveis. Este termo é também parametrizado de modo a decrescer conforme o FPO relaxado se aproxima do FPO original. A necessidade da presença de um termo quadrático está associada à natureza da

solução do FPO pelo método de Newton-Raphson, que necessita de artifícios para um bom comportamento numérico [Monticelli e Liu, 1992].

No FPOP as variáveis de controle e restrições de desigualdade são parametrizadas, o que nos dá um controle sistemático e eficiente da evolução da solução do FPO e das mudanças do conjunto ativo à medida que o processo de otimização evolui.

1.2 Contribuição da Tese

Os trabalhos anteriores sobre otimização paramétrica se concentraram na investigação da potencialidade e viabilidade da parametrização no FPO em sistemas elétricos de pequeno porte [Lima,1993] [Almeida,1994]. Esta tese estende a abordagem paramétrica para sistemas de grande porte, com o desenvolvimento de um código computacional em linguagem científica, FORTRAN 77, e o uso de técnicas de esparsidade. O programa computacional foi desenvolvido numa estação de trabalho SUN ULTRA™ 60.

As estratégias de evolução do parâmetro na abordagem paramétrica, para aplicação em sistemas de pequeno porte, são muito simples mas relativamente eficientes. Entretanto, estas estratégias se mostraram demasiadamente lentas para sistemas de grande porte. Como forma de contornar tal dificuldade, é apresentado neste trabalho uma nova estratégia de evolução do parâmetro que se mostrou perfeitamente adequada à otimização de sistemas de qualquer tamanho. Associada à evolução do parâmetro, foi desenvolvida uma forma eficiente de identificar o conjunto de restrições de desigualdades ativas dos sucessivos problemas de FPOP.

O processo evolutivo de relaxação do FPO e seu retorno ao problema original é feito mediante a solução de diversos FPOP. Nota-se, portanto, que o tempo computacional total do processo de otimização paramétrica é igual a soma

dos tempos gastos para se resolver cada FPOP. Nos testes de sistemas de pequeno porte não se tinha a preocupação com o tempo computacional, pois o objetivo era a análise da robustez da metodologia. Entretanto, para sistemas de grande porte, o qual envolve milhares de variáveis e restrições, é de suma importância a solução do FPO de modo rápido. Neste trabalho foi aplicado um critério que apontou para um número menor de problemas FPOP a serem resolvidos de tal modo que o tempo computacional fosse pequeno mas que não comprometesse a qualidade da solução final. Tal modificação na metodologia, em relação aos trabalhos anteriores, torna viável uma possível aplicação no despacho *on-line*.

Para testar a metodologia foram considerados dois sistemas brasileiros, um sistema com 810 barras, derivado do sistema interligado Sul/Sudeste, e um outro com 2256 barras que já contempla a interligação de 500 KV dos sistemas Norte/Nordeste com o sistema Sul/Sudeste. Este último sistema foi adquirido junto à ENERSUL, concessionária local do Mato Grosso do Sul, e foi retirado de um estudo de planejamento da expansão da transmissão para o ano 2000 com carga pesada. A ferramenta computacional desenvolvida mostrou-se robusta, para os dois sistemas testados.

1.3 Descrição da Tese

No Capítulo II é apresentada a modelagem matemática do FPO. Comenta-se sobre a origem e as metodologias empregadas na solução do FPO como: Programação Não Linear, Programação Linear, Programação Quadrática, Métodos dos Pontos Interiores e Programação Paramétrica.

No Capítulo III é apresentada a metodologia paramétrica através do método da continuação, apontando as condições teóricas que asseguram sua aplicabilidade. Inicialmente aplica-se esta metodologia na resolução de um sistema de equação não lineares, e em seguida constrói-se o modelo

paramétrico do FPO associando as condições de Karush-Kuhn-Tucker e o método para resolvê-las.

No Capítulo IV são apresentadas as estratégias de evolução do parâmetro para sistemas elétricos de pequeno e grande porte. Em cada estratégia é comentado como o parâmetro evolui para se encontrar o conjunto de restrições de desigualdades ativas do FPO. São comentados os resultados obtidos para o sistema IEEE30.

No Capítulo V são apresentados os resultados para os sistemas elétricos brasileiros com 810 e 2256 barras. É analisado o desempenho do programa computacional desenvolvido para resolver três funções objetivos como minimização do desvio de tensão, minimização de custo de geração e minimização de perdas ativas nas linhas de transmissão. Gráficos e tabelas comparam as soluções iniciais e finais do FPO.

No Capítulo VI é apresentada a conclusão dos trabalhos desenvolvidos juntamente com as sugestões para continuidade das pesquisas relativas a otimização paramétrica no FPO.

No Apêndice A são apresentados dois teoremas importantes na compreensão da metodologia. São eles: o Teorema da Função Implícita e o Teorema do Caminho.

No Apêndice B é explicitada a modelagem paramétrica do FPO onde são mostradas todas as variáveis utilizadas.

No Apêndice C é construída a função Lagrangeana da modelagem paramétrica bem como também são fornecidas as fórmulas usadas nos cálculos das derivadas de primeira e segunda ordem da função Lagrangeana.

No Apêndice D é apresentado o modelo utilizado para implementação computacional do programa. São mostradas as matrizes participantes do processo iterativo e a forma como elas são armazenadas. Por fim são comentadas as principais subrotinas do programa ressaltando suas particularidades.

Capítulo II

Fluxo de Potência Ótimo

Neste capítulo é apresentado o problema do Fluxo de Potência Ótimo, sua origem e formulação. É apresentada também uma classificação das técnicas utilizadas para resolvê-lo. São citados vários trabalhos desde a década de 60 com o surgimento do método do gradiente de Dommel-Tinney [Dommel e Tinney, 1968] até as recentes metodologias que utilizam técnicas paramétricas e pontos interiores.

2.1 Origem do Fluxo de Potência Ótimo

O interesse de operar os sistemas elétricos obedecendo critérios econômicos vem desde a década de 20 [Davison,1922]. Historicamente, a solução do despacho econômico pelo método dos custos incrementais iguais pode ser considerado o precursor do FPO. O problema do despacho econômico visa alocar economicamente a carga entre as unidades geradoras (térmicas) com custos e características diferentes, de modo a atender a demanda global do sistema.

No início dos anos 30 , foi demonstrado que a solução mais econômica era operar todas as unidades geradoras ao mesmo custo marginal [Steinberg e Smith,1934]. Esta solução é obtida resolvendo-se o seguinte problema:

$$\min \sum_{i=1}^{ng} ct_i(p_{gi}) \quad (2.1)$$

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{i=1}^{ng} p_{gi} = p_d \quad (\lambda) \quad (2.2)$$

onde:

- $ct_i(.)$ - função de custo do gerador i
- p_{gi} - geração ativa no gerador i
- p_d - demanda total do sistema
- ng - número de unidades geradoras
- λ - multiplicador de Lagrange

A função Lagrangeana de (2.1)-(2.2) é dada por:

$$L = \sum_{i=1}^{ng} [ct_i(p_{gi}) - \lambda p_{gi}] + \lambda p_d \quad (2.3)$$

Sendo os custos de geração dados por funções convexas, a solução ótima do problema será dada pela condição de estacionariedade da função Lagrangeana:

$$\frac{\partial L}{\partial p_{gi}} = \frac{\partial ct_i(p_{gi})}{\partial p_{gi}} - \lambda = 0 \quad i=1,2,\dots,ng \quad (2.4)$$

ou seja:

$$\lambda = \frac{\partial ct_i(p_{gi})}{\partial p_{gi}} \quad i=1,2,\dots,ng \quad (2.5)$$

o que significa que todos os geradores devem operar com o mesmo custo marginal, dado pelo multiplicador de Lagrange λ , que representa assim o custo marginal de operação do sistema.

Nesta formulação, é considerado somente o atendimento da demanda global, não sendo representadas as restrições dos sistemas de geração e transmissão e nem as perdas elétricas. Posteriormente, o modelo de despacho econômico foi aprimorado com a introdução dos limites de geração das unidades. Isto altera a solução do problema pois embora o objetivo de igualar os custos marginais entre as unidades continue vigorando, os limites de geração podem impedir que algumas unidade operem no mesmo custo marginal do sistema. Outro aprimoramento foi a inclusão das perdas elétricas através de uma representação simplificada através de uma função quadrática da geração ativa.

Mais tarde, na década de 60, o problema do despacho econômico foi outra vez aperfeiçoado com a introdução da representação da rede elétrica, resultando no modelo de FPO, o qual é formulado matematicamente na seção seguinte.

2.2 Formulação do Fluxo de Potência Ótimo

O FPO é um termo genérico que envolve uma grande classe de problemas nos quais se busca otimizar uma função específica, satisfazendo restrições que são regidas por particularidades operacionais e físicas da rede elétrica. Ele pode ser modelado como o seguinte problema de programação não linear:

$$\begin{array}{ll} \min_x & f(x) \\ \text{sujeito a} & \end{array} \quad (2.6)$$

$$g(x) = 0 \quad (\lambda) \quad (2.7)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (\gamma) \quad (2.8)$$

onde:

$$x \in \mathcal{R}^n$$

$$f: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$$

$$g: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^m, m \leq n$$

$$h: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^p$$

$$f, g, h, \in C^2$$

O vetor de variáveis x pode ser dividido em variáveis de controle u e variáveis dependentes y . As variáveis de controle incluem geração de potência ativa, magnitude de tensão nas barras de geração, compensação síncrona, tap de transformador e admitância shunt que pode ser capacitor ou indutor. As variáveis dependentes incluem ângulo de tensão, magnitude de tensão em barras de carga e fluxo nas linhas de transmissão.

A função objetivo (2.6) representa critérios de desempenho da operação dos sistemas elétricos tais como custo de geração, perdas ativas nas linhas de transmissão, desvios de tensão a partir de um valor pré-estabelecido, ou uma combinação desses critérios.

As restrições de igualdade (2.7) representam as equações de balanço de potência nas barras de carga enquanto que as restrições de desigualdade (2.8) representam restrições funcionais tais como, limite de fluxo de potência ativa nas linhas, limites de potência ativa e reativa em barras de geração e os limites operacionais sobre o vetor x .

As restrições de igualdade (2.7) podem ser modeladas por injeções de potência ativa nas barras, semelhante ao modelo DC do fluxo de carga, neste caso chama-se o modelo de FPO de FPO DC e assim, o problema apenas reflete a parte ativa do sistema elétrico [Fahmideh-Vojdani e Galiana, 1983].

As variáveis e restrições do FPO podem ainda ser divididas em ativas e reativas. A consideração de somente uma parcela dessas variáveis e restrições dá origem aos problemas de FPO ativo e FPO reativo, de forma semelhante aos modelos desacoplados aplicados nas equações do fluxo de carga [Carpentier, 1987].

O problema ativo tem recebido grande atenção dos pesquisadores, o que faz com que o mesmo apresente métodos precisos e rápidos de solução

[Carpentier,1987]. No entanto, o mesmo não ocorre com o problema reativo ou mesmo o problema completo, ativo-reativo. Estes ainda não dispõem de uma metodologia eficiente, confiável e rápida, principalmente para uso no despacho em tempo real [Huneault e Galiana,1991].

O modelo adotado para o problema e o processo de otimização por ele utilizado diferenciam os métodos empregados para resolver o FPO [Carpentier,1987]. Pode-se classificar os tipos de modelagem em:

a) completa

segue o mesmo equacionamento (2.6)-(2.8)

b) reduzida

$$\begin{array}{l} \min_{u} f(u, y[u]) \\ \text{sujeito a} \end{array} \quad (2.9)$$

$$g(u, y[u]) = 0 \quad (\lambda) \quad (2.10)$$

$$h(u, y[u]) \leq 0 \quad (\gamma) \quad (2.11)$$

No modelo completo as variáveis de controle e dependentes são variáveis de decisão. No modelo reduzido as variáveis dependentes são escritas implicitamente dependentes das variáveis de controle. Quando se emprega o modelo reduzido, uma solução dada pelo fluxo de carga é necessária para calcular as variáveis dependentes.

Alguns artigos de revisão da literatura sobre o FPO foram publicados nas últimas décadas. Happ foi o primeiro a fazer uma revisão de trabalhos relativos as metodologias empregadas para resolver o FPO [Happ,1977]. Carpentier cita as metodologias que empregam a programação linear, a programação

quadrática, e comenta sobre o aparecimento da programação paramétrica como sendo uma técnica com grande potencial para ser empregada na operação em tempo real. Este artigo se concentra na operação em tempo real com restrições de segurança [Carpentier,1987]. Huneault e Galiana fizeram uma outra revisão bibliográfica e deram continuidade ao trabalho de Happ, atualizando a literatura sobre o FPO e incorporando as pesquisas voltadas a programação paramétrica que foram implementadas na década de 80 [Huneault e Galiana,1991]. Em 1999 surgem dois artigos que abrangem as técnicas de otimização mais recentes, especialmente os métodos de pontos interiores [Momoh et al.,1999]. Uma outra revisão, mais concentrada na aplicação dos métodos de pontos interiores envolvendo artigos, teses e pacotes computacionais disponíveis na Internet, é apresentado em [Quintana et al.,1998].

As técnicas de otimização empregadas no FPO podem ser classificadas como [Momoh et al.,1999]:

- a) Programação Não-Linear
- b) Programação Linear
- c) Programação Quadrática
- d) Pontos Interiores
- e) Programação Paramétrica

A seguir será apresentado um breve comentário sobre cada uma dessas técnicas, enfatizando a programação paramétrica onde o presente trabalho se insere.

a) Programação Não-Linear

O período clássico do despacho econômico finalizou com o aparecimento do trabalho de Carpentier, onde se tem uma formulação matemática mais rigorosa do FPO através do uso do teorema de Karush-Kuhn-Tucker, surgindo assim a primeira formulação do FPO como um modelo de programação não-linear [Carpentier, 1962].

Em 1968, Dommel e Tinney, aplicaram o método do gradiente reduzido para minimização do custo de geração e das perdas ativas nas linhas de transmissão. Neste trabalho as restrições de igualdade foram tratadas por redução no espaço das variáveis de controle e as de desigualdade por penalidades nas variáveis dependentes e restrições funcionais. As limitações do método do gradiente reduzido estão nos mecanismos de determinação do tamanho do passo do gradiente reduzido, além da baixa eficiência computacional dos métodos de otimização de primeira ordem [Dommel e Tinney, 1968].

Outra técnica de programação não linear também proposta para o FPO foi o método das penalidades. Esta técnica transforma o problema de otimização restrita (2.6)-(2.8) e (2.9)-(2.11) numa sequência de problemas de otimização irrestrita. Penalidades associadas tanto as restrições de igualdade como de desigualdade podem ser introduzidas na função objetivo. Em alguns trabalhos, a penalidade só incide sobre as restrições de desigualdade. Uma formulação geral para o problema (2.6)-(2.8) tratado por penalidades tem a seguinte característica:

$$\min_x \left\{ f(x) + \sum_i r_i \cdot g_i^2(x) + \sum_{k \in S} s_k \cdot h_k^2(x) \right\} \quad (2.12)$$

onde S é o conjunto de restrições de desigualdade violadas.

A técnica de penalidades foi proposta por Sasson [Sasson, 1969, 1971]. No primeiro trabalho foi empregado o método de Fletcher-Powell para resolver os diversos problemas irrestritos (2-12). Técnicas de penalidades mais eficientes foram propostas com a aplicação do método da Lagrangeana Aumentada [Santos et al., 1988].

Ainda que o tempo computacional relatado nos trabalhos anteriores seja pequeno, a grande dificuldade em se resolver o FPO por penalidades está na escolha adequada dos fatores de penalidades, os quais se mostram dependentes do sistema elétrico ou da função objetivo considerados. Isto requer do usuário o conhecimento dos valores mais adequados destes fatores para as aplicações particulares em questão. Além do que, na solução final estes fatores continuam presentes na função objetivo, o que pode influenciar a solução final.

b) Programação Linear

A programação linear no FPO foi empregada inicialmente para se resolver o problema ativo. Em Wells, a função objetivo e as restrições foram linearizadas e resolvidas usando o método simplex [Wells, 1968]. Entre os anos de 1970 e 1980 apareceram vários trabalhos de programação linear aplicada ao FPO, destacando-se os trabalhos de Stott [Stott e Hobson, 1978; Stott e Marinho, 1979]. No primeiro trabalho, o método dual simplex é aplicado no modelo reduzido do FPO ativo e no segundo é utilizado o método simplex modificado. O primeiro programa computacional comercial baseado em programação linear foi desenvolvido pela companhia francesa EDF [Huneault e Galiana, 1991].

O uso da programação linear também foi estendido para resolver o controle das magnitudes de tensão. Uma abordagem utilizando a programação linear sequencial foi apresentada em [Kirchen e Van Meeteren, 1988]. A programação linear também foi sugerida para resolver o FPO ativo onde a carga do sistema foi representada como uma variável fuzzy [Miranda e Saraiva, 1992].

c) Programação Quadrática

Uma proposta da aplicação da programação quadrática em sistemas de grande porte é feita em [Sun et al., 1984]. Através de heurísticas, este trabalho tenta identificar o conjunto de restrições de desigualdade ativas na solução ótima. Uma vez identificado este conjunto, o problema passa a ser o de resolver, pelo método de Newton-Raphson, um sistema de equações não-lineares extraído das condições de Karush-Kuhn-Tucker. Uma aplicação da programação quadrática sequencial, onde o FPO é representado, a cada iteração, por um problema de programação quadrática através da linearização das restrições e da aproximação quadrática da função objetivo é mostrada em [Burchett et al., 1984, 1988]. Uma abordagem que utiliza o método de Newton-Raphson aplicado nas condições de Karush-Kuhn-Tucker, sendo as restrições de desigualdade tratadas pela técnica da Lagrangeana Aumentada, é feito em [da Costa e Santos, 1992].

Uma discussão sobre as deficiências das abordagens que fazem uso do método de Newton-Raphson é apresentado em [Monticelli et al., 1992]. Ainda neste trabalho são apresentados alguns casos de não convergência do FPO devido a um mal condicionamento da matriz Hessiana da função Lagrangeana, sendo então proposta uma metodologia para contornar tal deficiência. Algumas estratégias de fatoração da matriz Hessiana de forma a melhorar o tempo de CPU nas abordagens que usam o método de Newton-Raphson, esquemas para evitar o mal condicionamento da matriz e heurísticas para tratar as restrições de desigualdade são comentados em [Hong, 1992]. Uma proposta para modelos de equivalentes aplicados no FPO reativo é apresentando em [Nepomuceno, 1997]. Neste trabalho são comentados que os erros introduzidos pela modelagem proposta são reduzidos.

d) Pontos Interiores

Na última década, o interesse na pesquisa dos métodos de pontos interiores (PI) cresceu muito e a prova disto é o aparecimento de mais de 2000 trabalhos entre teses e artigos publicados em revistas científicas. O interesse pelos métodos de PI surgiu com o trabalho de Karmarkar [Karmarkar,1984]. Desde então, surgiram algumas variantes desta metodologia as quais são: (i) método projetivo, (ii) método afim escala e (iii) método primal-dual [Fang e Puthenpura,1993]. O método projetivo inclui o algoritmo original de Karmarkar. O método afim escala surgiu de uma simplificação do método projetivo. O método mais empregado atualmente, entretanto, é o Primal-Dual, o qual modifica o problema (2.6)-(2.8) como:

$$\min \quad f(x) - \mu \sum_{i=1}^p \ln(s_i) \quad (2.13)$$

sujeito a

$$g(x) = 0 \quad (2.14)$$

$$h(x) + s = 0 \quad (2.15)$$

onde:

$\mu \geq 0 \rightarrow$ parâmetro de barreira logarítmica.

$s > 0 \rightarrow$ vetor variáveis de folga.

$p \rightarrow$ número de restrições de desigualdade.

O interesse na aplicação dos PI nos problemas de programação não linear [El-Bakry et. al, 1996], [Yamashita e Yabe, 1996] tem sido incentivada pelo bom desempenho desta metodologia em problemas de programação linear.

A otimização em sistemas de potência é uma das áreas onde o método dos PI tem sido aplicado intensamente. Clements foi um dos primeiros a

apresentar um estudo dos PI em sistemas de potência, voltado a estimação de estado [Clements et. al., 1991].

Na tese de doutorado de Torres é proposto o método dos PI primal-dual para resolver o FPO [Torres, 1998]. A solução do problema se inicia estabelecendo as condições de Karush-Kuhn-Tucker de primeira ordem no problema modificado (2.13)-(2.15), onde a condição de complementaridade é resolvida pelo método de Newton-Raphson. São apresentados testes em sistemas de pequeno e grande porte além de fomentar uma discussão relativa à modelagem do FPO por coordenadas polares ou retangulares. Outros trabalhos do mesmo autor podem ser encontrados em [Torres e Quintana,1998], [Torres e Quintana, 1999]. Um trabalho contendo portais na internet onde pode se encontrar pacotes computacionais disponíveis sobre o método dos pontos interiores é apresentado em [Quintana et. al,2000].

Como outras aplicações dos métodos PI em otimização de sistemas de potência, citam-se, [Wu, 1994], [Martinez, 1996], [Medina et al, 1997]. O problema do despacho econômico com restrições de segurança foi resolvido em [Vargas et al., 1992]. Granville aplicou o método dos pontos interiores associado à penalidades de modo a evitar possíveis singularidades atribuídas ao processo de otimização. Os testes contemplaram despacho de potência reativa em sistemas brasileiros de grande porte [Granville, 1994]. Uma aplicação do FPO para cálculo do mínimo corte de carga em sistemas de grande porte, usando o método primal-dual em PI, é feita em [Granville et al,1996]. A análise do máximo carregamento admissível pelo sistema elétrico é feito em [Irisarri et al, 1997].

Devido a problemas de incompatibilidade de banco de dados entre as concessionárias ou mesmo a dificuldade em se unir todos os dados num único arquivo, como por exemplo na aplicação em tempo real onde as distâncias geográficas separam as concessionárias, surge uma proposta de se resolver um FPO paralelizado [Baldick,1999]. Esta proposta trata da solução do FPO por

meio dos PI onde os dados do sistema de transmissão, geração e carga pertencentes a diferentes concessionárias são divididos por áreas sendo então, cada uma associada a uma estação SUN ULTRA™. Desta forma, ao invés de se resolver um sistema elétrico num único processador, ele é executado de forma paralela usando o pacote computacional PVM. A proposta calcula o ótimo para um problema global preservando a operação independente de cada área. Para sistemas de grande porte ficou demonstrada uma boa eficiência da metodologia paralela.

e) Programação Paramétrica

De um modo geral, a parametrização de um problema consiste em obter sua solução a partir de pontos representados como função de um parâmetro. Assim, todas as variáveis em estudo estão indexadas a este parâmetro, criando uma dependência, o que propicia uma análise do comportamento das variáveis. A principal motivação no uso de programação paramétrica na solução do FPO está na facilidade de obtenção do conjunto ativo associado à solução ótima, uma vez que o método não contempla heurísticas e penalidades que possam alterar a solução final [Sun et al., 1984].

Dillon foi o primeiro a utilizar a programação paramétrica no FPO [Dillon,1981]. Neste artigo o emprego de otimização paramétrica está associado a análise de sensibilidade em torno de um ponto que satisfaz as condições de Karush-Kuhn-Tucker. A sensibilidade pode ser verificada em relação a diversos parâmetros como por exemplo, a carga ou impedâncias de linhas.

Um grupo de pesquisadores, liderados pelo prof. Francisco Daniel Galiana da Universidade McGill, no Canadá, vem se destacando com diversas publicações em programação paramétrica no FPO. No primeiro trabalho do grupo é aplicada a metodologia paramétrica sobre o FPO DC [Fahmideh-Vojdani e Galiana, 1983]. Em seguida, se aplicou o método da continuação para o

despacho econômico [Ponrajah e Galiana, 1989]. Neste trabalho, o FPO parametrizado é inicialmente relaxado onde se aplica a técnica de reinício da Homotopia para se buscar o conjunto ativo do problema original. Um outro trabalho que mostra o comportamento das variáveis de controle do FPO como função do parâmetro de continuação e da variação da carga é dado em [Hunneault e Galiana, 1990].

Mais recentemente, na tese de doutorado de Almeida, são apresentadas várias aplicações da parametrização do FPO [Almeida,1994]. Esta pesquisa teve o propósito de levantar toda a potencialidade do método da continuação na solução do FPO. Foram testadas funções objetivo como perdas ativas nas linhas de transmissão e custo de geração. Analisou-se o comportamento das variáveis do FPO acrescentando os FACTS. Como uma possível aplicação do método da continuação no despacho on-line, foi feita uma simulação onde o programa desenvolvido acompanhava uma curva de carga e resolvia vários FPO parametrizados em intervalos pré-definidos. Deste trabalho resultou um protótipo de FPO no qual um programa computacional foi desenvolvido no ambiente MATLAB™. Os trabalhos [Almeida et al,1993], [Almeida e Galiana,1996] e [Almeida e Galiana,1997] estão sintetizados na referida tese [Almeida,1994]. Estes trabalhos se limitaram a testar sistemas de pequeno porte como os do IEEE com 30 e 118 barras.

O estudo da parametrização do FPO também foi realizado na UNICAMP, paralelamente ao trabalho na Universidade McGill, através de [Lima et al.,1993(2),1994,1999]. Na tese de mestrado do autor foram adotados diferentes modos de tratamento, tanto da evolução do parâmetro como da obtenção do conjunto ativo, em relação a tese de Almeida [Almeida,1994]. Para sistemas de pequeno porte, a metodologia se mostrou robusta e eficiente.

Uma aplicação da programação paramétrica associada ao método dos PI no problema de máximo carregamento é encontrado em [Almeida e

Salgado,2000]. Neste trabalho a parametrização se encontra na carga e o FPO é resolvido via método dos PI primal-dual. O programa foi desenvolvido no ambiente MATLAB™ e sistemas de pequeno porte foram tratados.

No capítulo seguinte é apresentado a formulação paramétrica do FPO. Através de uma interpretação geométrica será visualizada a relaxação causada pelo parâmetro na função objetivo e nas restrições de igualdade e desigualdade do FPO.

Capítulo III

Abordagem Paramétrica do Fluxo de Potência Ótimo

Neste capítulo, a abordagem paramétrica é apresentada inicialmente na resolução de um sistema de equações não lineares, e em seguida é feita sua extensão ao FPO. Na seção 3.1 são apresentados os conceitos básicos da parametrização na solução de um sistema de equações não lineares, e nas seções seguintes estes conceitos são aplicados no FPO. Na seção 3.2 o FPOP é formulado e a relaxação é interpretada geometricamente. Na seção 3.3 são mostradas as condições de Karush-Kuhn-Tucker do FPO e, na seção 3.4, é descrito o método para sua solução. Na seção 3.5 é apresentado o fluxograma básico de solução do FPOP.

A abordagem paramétrica quando aplicada em um sistema de equações não lineares amplia o espaço de inicialização do método de Newton-Raphson. No caso do FPO, a parametrização relaxa o problema original de modo que também um ponto qualquer possa ser escolhido como inicialização do processo de otimização pelo método de Newton-Raphson. Além disso a abordagem permite a identificação gradual do conjunto de restrições de desigualdades ativas na solução ótima.

3.1 Parametrização de um Problema

3.1.1 Introdução

O método de Newton-Raphson é um procedimento eficiente para se obter a solução de um sistema de equações não lineares, dada a sua convergência quadrática. Entretanto é sabido que o sucesso deste método está atrelado ao fato do ponto de partida, do processo iterativo, necessitar estar próximo da solução procurada. Além disso, para que o método funcione a matriz Jacobiana do sistema resolvido deve ser não singular a cada iteração.

Para problemas de grande porte, a tarefa de se obter o ponto de partida pode não ser fácil. Por outro lado, se a partir deste problema, chamado de **problema original**, cuja solução inicial não é trivial, for possível construir um segundo problema, chamado de **problema relaxado**, que possua uma solução trivial, então é possível construir um terceiro problema que combina os outros dois através da introdução de um parâmetro. Este último problema é chamado de **problema paramétrico**.

A evolução do parâmetro produz vários problemas paramétricos cujas soluções caminham desde a solução trivial, do problema relaxado, até a solução do problema original. A parametrização do problema original contorna a dificuldade da obtenção do ponto inicial do processo iterativo do método de Newton-Raphson.

O método de solução de um sistema de equações não lineares com o auxílio da parametrização é chamado Método da Continuação e o parâmetro introduzido é denominado parâmetro de continuação. As seções 3.1.2 à 3.1.4 têm como referência [Garcia e Zangwill, 1981].

3.1.2 Função Homotopia

Seja o problema de resolver um sistema de equações não lineares

$$F(x) = 0 \quad (3.1)$$

onde $x \in \mathfrak{R}^n$ e $F: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$, $F \in C^1$. Associado ao problema (3.1), seja o problema relaxado (3.2), cuja solução x^0 é conhecida e arbitrária

$$E(x) = 0 \quad (3.2)$$

onde $E: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ e $E(x^0) = 0$. Fazendo uma combinação linear convexa dos sistemas (3.1) e (3.2) através da introdução de um parâmetro c , $0 \leq c \leq 1$, é obtido o seguinte sistema paramétrico

$$H(x, c) = cF(x) + (1 - c)E(x) = 0 \quad (3.3)$$

onde $H: \mathfrak{R}^{n+1} \rightarrow \mathfrak{R}^n$ é chamada de função Homotopia.

Dependendo da escolha da função $E(x)$ podem ser definidas diferentes Homotopias. Uma Homotopia possível, e que é empregada nesta tese, é a Homotopia Newton onde

$$E(x) = F(x) - F(x^0) = 0 \quad (3.4)$$

Uma outra possibilidade é dada pela Homotopia Ponto Fixo, onde a escolha é

$$E(x) = x - x^0 = 0 \quad (3.5)$$

O Método da Continuação resolve o sistema de equações não lineares partindo de um problema relaxado ($c=0$), $H(x,0) = E(x) = 0$, cuja solução x^0 é conhecida, e indo até o problema original ($c=1$), $H(x,1) = F(x) = 0$, cuja solução x^* é procurada. Os valores intermediários do parâmetro de continuação formam uma família de problemas paramétricos cujas soluções obtidas pelo método de Newton-Raphson, formam um caminho $x(c)$. (figura 3.1).

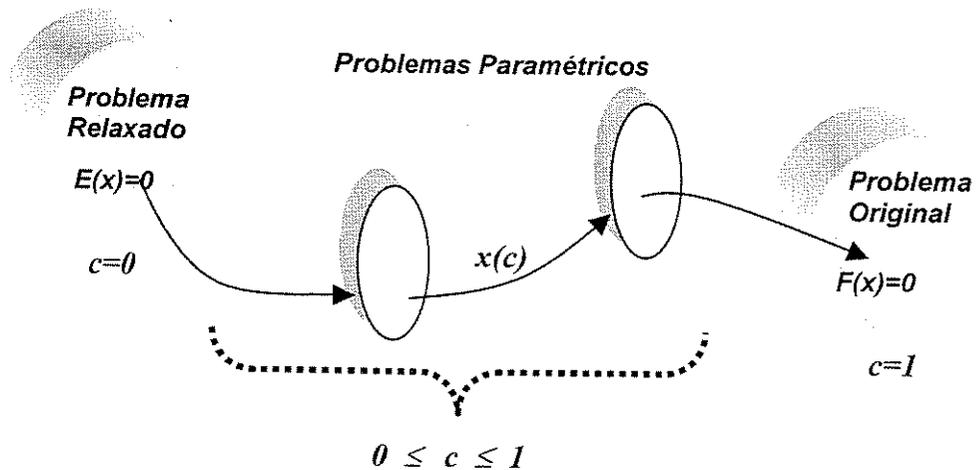


Figura 3.1: Relação entre os problemas relaxado e original através do caminho $x(c)$.

O ponto de partida usado pelo método de Newton-Raphson em cada problema intermediário (paramétrico) é obtido da solução do problema paramétrico correspondente ao parâmetro anterior. Assim, basta que se conheça o ponto inicial $(x^0, 0)$, correspondente ao primeiro problema paramétrico, para que se possa resolver a família de problemas paramétricos e se chegar na solução procurada de (3.1), que corresponde a $c=1$ em (3.3).

3.1.3 A Existência do Caminho

O caminho gerado pela função Homotopia poderá não ser bem comportado. Nos casos mal comportados, ele poderá consistir de pontos isolados, bifurcações ou então de espirais infinitas conforme a figura 3.2.

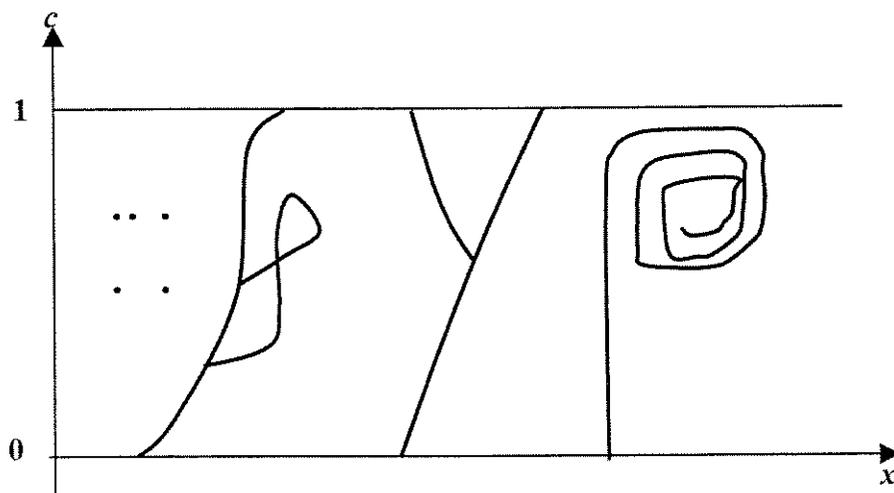


Figura 3.2: Possibilidades de caminhos descritos por $x(c)$

As condições para que esses tipos de comportamentos não ocorram, bem como a própria existência do caminho, são estabelecidas pelos Teoremas da Função Implícita e do Caminho (Apêndice A).

3.1.4 Método Preditor-Corretor

A evolução do parâmetro de continuação c e a atualização da variável x são feitos pelo método preditor-corretor. Suponha que seja conhecido o ponto x^k , que satisfaz $H(x^k, c^k) = 0$, como na figura 3.3. O passo preditor consiste em incrementar o valor do parâmetro de continuação mantendo a variável x^k constante.

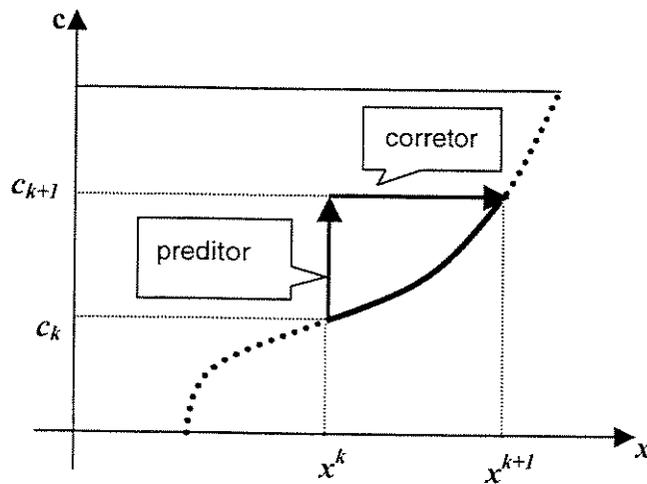


Figura 3.3: Passos preditor e corretor.

A variação $c_k \rightarrow c_{k+1}$ dá origem a um ponto que está fora da trajetória e por conseguinte não satisfaz a equação da função Homotopia, ou seja,

$$H(x^k, c_{k+1}) \neq 0 \quad (3.6)$$

O passo corretor encontra um novo valor de x tal que a função Homotopia volte a ser satisfeita. Mantendo o parâmetro fixo em c_{k+1} deve-se resolver o sistema (3.8) pelo método de Newton-Raphson de tal modo a se achar um novo par (x^{k+1}, c_{k+1}) tal que

$$H(x^{k+1}, c_{k+1}) = 0 \quad (3.7)$$

A fórmula de recorrência utilizada pelo método de Newton-Raphson e que corresponde ao passo corretor é dada por

$$x_{i+1}^{k+1} = x_i^{k+1} - \left[\frac{\partial H(x_i^{k+1}, c_{k+1})}{\partial x} \right]^{-1} H(x_i^{k+1}, c_{k+1}) \quad (3.8)$$

com o ponto inicial dado por $x_0^{k+1} = x^k$.

Para ilustrar a parametrização, suponha que se deseja resolver o sistema de equações não lineares (3.9) cuja solução inicial, para o uso do método de Newton-Raphson, não é trivial.

$$\begin{cases} x_1^3 - 3x_1^2 + 8x_1 + 3x_2 - 36 = 0 \\ x_1^2 + x_2 + 4 = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

A partir de (3.9), entretanto, é possível construir o seguinte sistema de equações não lineares

$$\begin{cases} x_1^3 + 8x_1 + 3x_2 = 0 \\ x_2 = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

onde uma solução óbvia é dada por $(x_1, x_2) = (0, 0)$. A parametrização aplicada em (3.9) combina os sistemas (3.9) e (3.10) através de um escalar c , o que resulta na função Homotopia (3.11)

$$\begin{cases} x_1^3 + 8x_1 + 3x_2 - c(3x_1^2 + 36) = 0 \\ x_2 + c(x_1^2 + 4) = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

O Método da Continuação consiste em resolver o sistema (3.11) variando o parâmetro c entre 0 e 1. Para $c=0$ se recai no sistema (3.10) cuja solução é óbvia, e para $c=1$, se recai no sistema (3.9) cuja solução se busca. Os valores intermediários do parâmetro de continuação fazem com que as variáveis do sistema (3.11) descrevam um caminho cujo equacionamento obedece a

$$\begin{cases} x_1(c) = 6c \\ x_2(c) = -36c^3 - 4c \end{cases} \quad (3.12)$$

A figura 3.4 apresenta o caminho descrito por todas as soluções obtidas pela família de problemas parametrizados ao se variar $0 \leq c \leq 1$. Assim, a solução do sistema original (3.9) é dada por $(x_1(1), x_2(1)) = (6, -40)$.

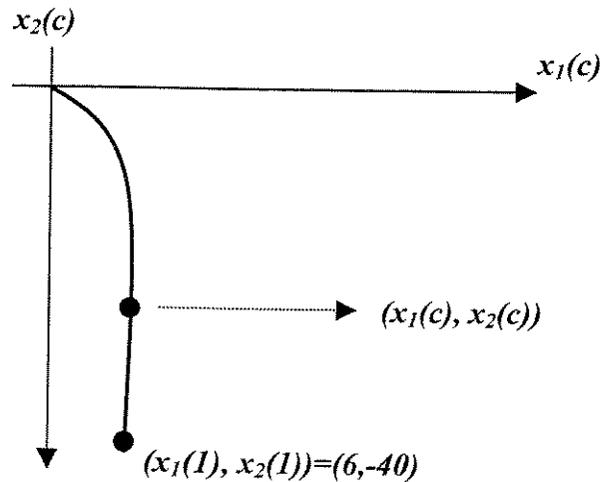


Figura 3.4: Caminho da função Homotopia (3.11)

3.2 Fluxo de Potência Ótimo Paramétrico

3.2.1 Introdução

A maior dificuldade encontrada pelos algoritmos usados para resolver o FPO é identificar o correto conjunto de restrições de desigualdade ativas na solução ótima [Sun et al. 1984]. Atribui-se isto ao grande número de desigualdades e ao fato de que poucas destas são ativas na solução ótima, dando ao problema uma característica combinatória. Por outro lado, uma vez conhecidas quais restrições de desigualdades são ativas, o FPO pode ser resolvido a partir da solução do sistema de equações não lineares que resulta das condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) do problema.

A parametrização do FPO contorna a dificuldade encontrada na determinação do conjunto de restrições de desigualdades ativas do FPO pois, ao invés de resolver diretamente o problema original, uma família de problemas paramétricos é resolvida cujas soluções estão solidariamente ligadas, de modo que a solução de um problema paramétrico é usada para resolver o problema paramétrico seguinte. Nesta transição de problemas, o conjunto de restrições de desigualdades ativas é monitorado.

A principal motivação para a utilização da abordagem paramétrica no FPO está na habilidade da técnica em determinar o conjunto de restrições de desigualdade ativas na solução ótima sem o emprego das penalidades ou outros artifícios que dependem do critério de otimização ou da dimensão dos sistemas adotados. Uma outra motivação é a facilidade de inicialização do método que pode partir de um ponto arbitrário factível ou não.

A parametrização se inicia relaxando o **problema original** (2.6)-(2.8) através do acréscimo de termos parametrizados na função objetivo e nas restrições de igualdade e desigualdade, dando origem ao **problema relaxado**.

De modo semelhante ao que foi exposto na seção 3.1.2, a evolução do parâmetro parte do problema relaxado ($c=0$) e vai até o problema original ($c=1$). Entre estes dois valores do parâmetro de continuação é estabelecida uma família de problemas paramétricos.

3.2.2 Formulação

O modelo de Fluxo de Potência Ótimo Paramétrico (FPOP(c)) adotado neste trabalho é dado como:

$$\begin{cases}
 \min_x F(x, c) & (3.13) \\
 \text{sujeito a} \\
 G(x, c) = 0 & (\lambda) \quad (3.14) \\
 H(x, c) \leq 0 & (\gamma) \quad (3.15)
 \end{cases}$$

onde:

$$F(x, c) = f(x) - (1-c)f_o^T x + (1-c) \frac{1}{2} W \|x - x^o\|^2 \quad (3.16)$$

$$G(x, c) = g(x) - (1-c)g(x^o) \quad (3.17)$$

$$H(x, c) = h(x) - (1-c)\Delta h \quad (3.18)$$

$$f_o = \frac{\partial f(x^o)}{\partial x} + \frac{\partial g^T(x^o)}{\partial x} \lambda^o \quad (3.19)$$

$$\Delta h_i \begin{cases} 0, & \text{se } h_i(x^o) < 0 \\ h_i(x^o) + \varepsilon, & \text{se } h_i(x^o) \geq 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Conforme pode ser observado, o problema (3.13)-(3.15) é idêntico a (2.6)-(2.8) para $c=1$. Com isso pode-se dizer que o problema original (2.6)-(2.8) é um caso particular do problema paramétrico (3.13)-(3.15).

No modelo aqui adotado para o FPOP há o controle do problema de uma maneira global, pois são parametrizados tanto a função objetivo (3.16) como as

restrições de igualdade (3.17) e as restrições de desigualdade (3.18). O modelo paramétrico (3.13)-(3.15) foi construído com um único parâmetro ϵ de tal modo que a factibilidade e a otimalidade são relaxadas segundo um mesmo parâmetro. Entretanto, a abordagem permite diferentes parâmetros para a função objetivo e as restrições relaxadas, o que gera inúmeros e diferentes caminhos para se alcançar a solução do FPO.

O parâmetro de folga ϵ em (3.20) tem o propósito de tornar estritamente factíveis as restrições de desigualdade inactivas e as restrições de desigualdade factíveis ativas em x^0 . Isto é atingido através da relaxação dos limites que são violados no ponto inicial de tal forma que para o FPOP(0) o ponto x^0 passa a ser estritamente factível. Note que em princípio nem todas as restrições de desigualdade são inactivas em x^0 , o que significa que nem todas serão relaxadas e parametrizadas. O conjunto de restrições de desigualdade pode assim ser dividido em dois grupos: restrições de desigualdade parametrizadas e restrições de desigualdade não parametrizadas.

A figura 3.5 ilustra geometricamente o processo de relaxação do FPO. Note que (3.17) representa uma relaxação em (2.7) e que (3.18) representa uma relaxação somente para as restrições de desigualdade (2.8) que são inactivas em x^0 . A evolução do parâmetro de continuação no intervalo $0 \leq \epsilon \leq 1$ produz uma sequência de problemas de FPOP(ϵ) cujas soluções formam um caminho $x(\epsilon)$ onde $x(0) = x^0$ e $x(1) = x^*$ (solução que se procura). Durante esta evolução, as restrições de igualdade e desigualdade relaxadas retornam aos seus valores originais (2.7)-(2.8).

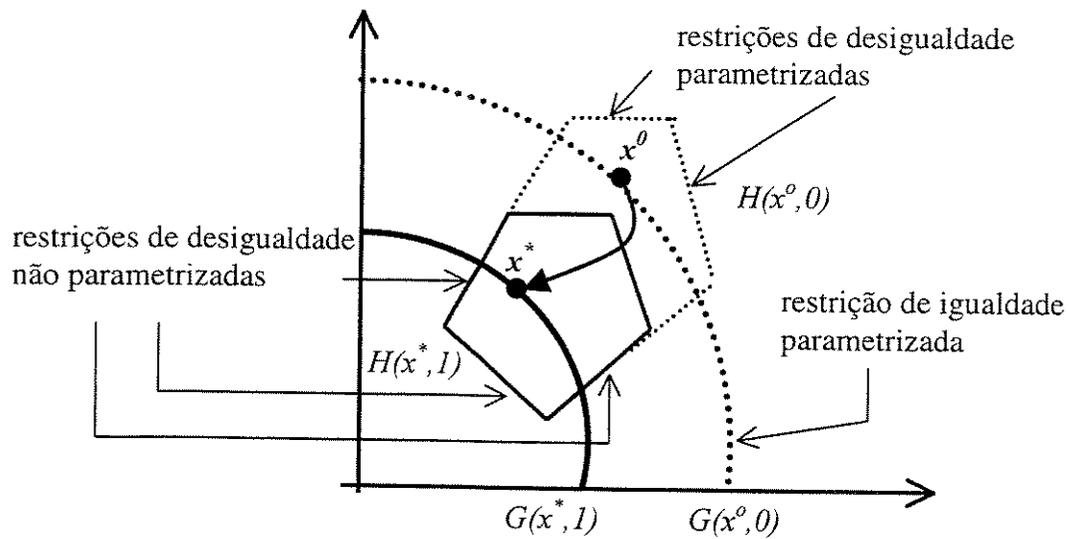


Figura 3.5: Ilustração do processo de relaxação das restrições do FPO.

A figura 3.6 ilustra o processo de relaxação da função objetivo e da restrição de igualdade do FPO. Na função objetivo existem dois termos parametrizados, um termo linear e um termo quadrático. O termo linear provoca uma translação na função de modo a tornar a solução x^o um ponto que satisfaz as condições de KKT em $c = 0$. O valor de f_0 em (3.19) é calculado justamente de modo a garantir essas condições.

O termo quadrático, por sua vez, tem por finalidade assegurar a convexidade da função objetivo (3.16), e conseqüentemente garantir que o ponto x^o seja um mínimo local de FPOP(0). Além disso, contribui para que haja um melhor comportamento numérico do método. Estes termos adicionados na função objetivo original são gradualmente eliminados com o crescimento do parâmetro de continuação, ou seja, com a aproximação da solução do problema original. Note que para $c=1$ em (3.16), o termo quadrático desaparece totalmente o que torna a solução final independente do fator de penalidade W .

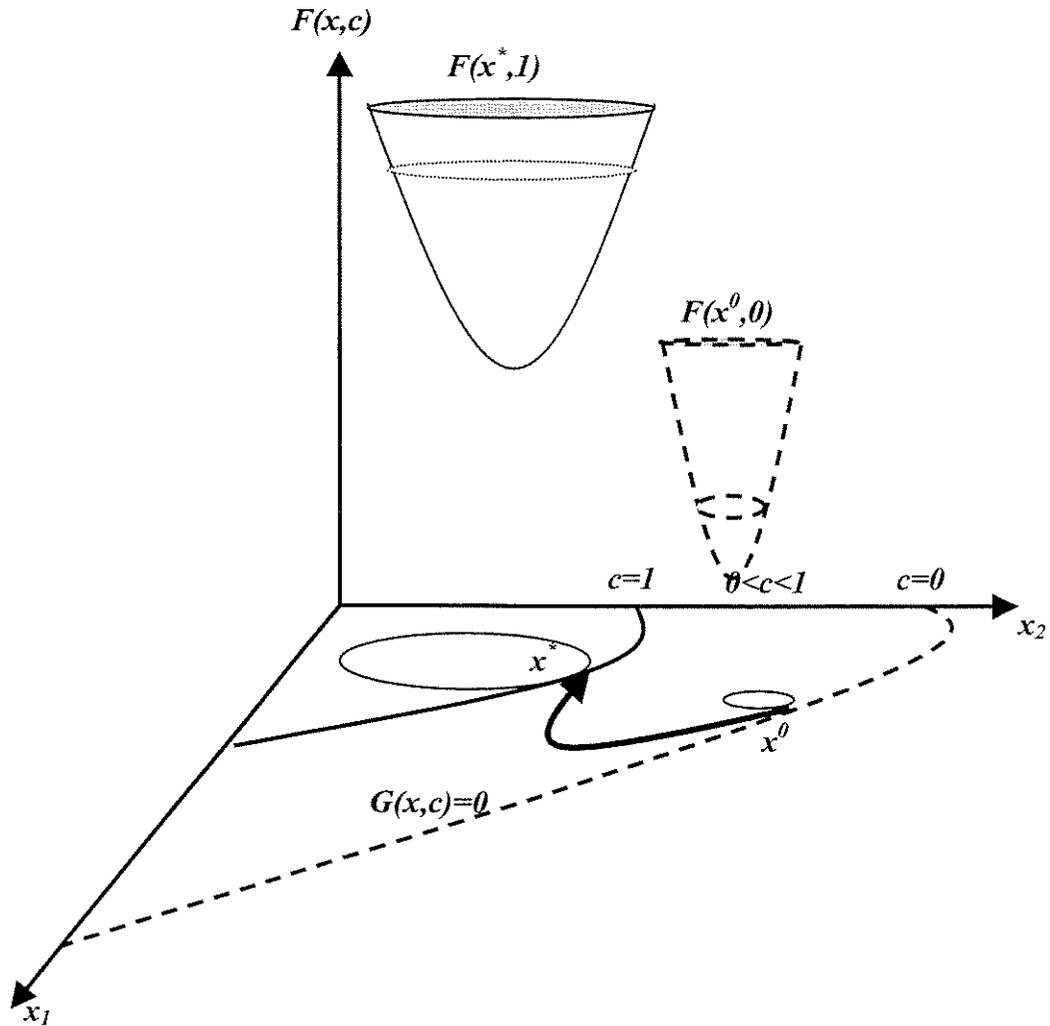


Figura 3.6: ilustração do processo de relaxação da função objetivo e da restrição de igualdade do FPO.

A seguir, é apresentada a formulação das condições de KKT para a família de problemas paramétricos (3.13)-(3.15).

3.3 Condições de Otimalidade do Problema Paramétrico

Para expressar as condições de otimalidade como função do parâmetro de continuação, o conjunto de restrições de desigualdade na solução ótima do

FPOP(c) é particionado nos conjuntos de restrições ativas (I) e folgadas (J), ou seja

$$H_I(x, c) = 0 \quad (3.21)$$

$$H_J(x, c) < 0 \quad (3.22)$$

Com a evolução gradual do parâmetro, os limites parametrizados (figura 3.5) vão sendo levados de volta a seus valores reais. A obtenção dos novos pontos que formam o caminho das soluções dos FPOP, poderá levar ao surgimento de violação em uma restrição folgada, que deverá então ser transferida para o conjunto das restrições ativas, alterando os conjuntos I e J . Da mesma forma, uma restrição de desigualdade ativa cujo multiplicador de Lagrange associado se torna negativo, passará ao conjunto das restrições folgadas. Estas alterações nos conjuntos ativo e folgado são monitoradas sistematicamente à medida que o parâmetro evolui.

As restrições de desigualdade que tiveram seus limites relaxados em $c=0$ poderão se tornar ineficazes ao longo do caminho. Nesta ocasião, elas passarão a integrar o conjunto ativo de forma parametrizada. Já as restrições de desigualdade que não foram relaxadas no início do processo de otimização e que porventura se tornem ineficazes entrarão no conjunto ativo de forma não parametrizada.

A função Lagrangeana e as condições de KKT para um mínimo local do problema paramétrico, em um dado valor de c , são apresentadas como:

Função Lagrangeana

$$L(x, \lambda, \gamma) = F(x, c) + \lambda^T \cdot [g(x) - (1-c) \cdot g(x^0)] + \gamma_I^T \cdot [h_I(x) - (1-c) \Delta h_I] \quad (3.23)$$

Condições de Karush-Kuhn-Tucker

$$\gamma_I \geq 0 \quad (3.24)$$

$$h_J(x) - (1-c)\Delta h_J < 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial F(x,c)}{\partial x} + \frac{\partial g^T(x)}{\partial x} \lambda + \frac{\partial h_I^T(x)}{\partial x} \gamma_I = 0 \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma_I} = h_I(x) - (1-c)\Delta h_I = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(x) - (1-c)g(x^o) = 0 \quad (3.28)$$

Note que a solução inicial $x(\theta) = x^o$, $\gamma(\theta) = 0$ e $\lambda(\theta) = \lambda^o$ onde λ^o é qualquer, é um ponto KKT para $c=0$ pois:

- (i) O conjunto ativo é vazio e todas as restrições de desigualdade são folgadas, logo (3.25) é satisfeita e (3.24) e (3.27) não existem;
- (ii) Os valores x^o e λ^o satisfazem a equação (3.26), uma vez que

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial f(x^o)}{\partial x} - \left\{ \frac{\partial f(x^o)}{\partial x} + \frac{\partial g^T(x^o)}{\partial x} \lambda^o \right\} + W \|x^o - x^o\| + \frac{\partial g^T(x^o)}{\partial x} \lambda^o = 0 \quad (3.29)$$

- (iii) O valor de x^o satisfaz a equação (3.28)

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(x^o) - g(x^o) = 0 \quad (3.30)$$

De modo a garantir a condição de otimalidade de segunda ordem, a derivada segunda da função Lagrangeana

$$\frac{\partial^2 L}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 F(x, c)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (g^T(x)\lambda)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (h_I^T(x)\gamma_I)}{\partial x^2} \quad (3.31)$$

deve ser positiva definida no espaço nulo dos gradientes das restrições de igualdade e de desigualdade ativas.

Para $c=0$, e atribuindo um valor suficientemente grande para W , a matriz Hessiana (3.31) se torna diagonalmente dominante e portanto seus autovalores são positivos [Almeida, 1994]. Desta forma, para o primeiro problema paramétrico FPOP(0), o ponto $[x(0) \ \gamma(0) \ \lambda(0)]^T$ é forçadamente um ponto de mínimo local, haja visto que atende as condições de otimalidade de primeira e segunda ordem.

Neste trabalho o caminho $[x(c) \ \gamma(c) \ \lambda(c)]^T$ atende somente as condições de otimalidade de primeira ordem. Para verificar se as condições de otimalidade de segunda ordem também são satisfeitas seria necessário um grande esforço computacional no cálculo dos autovalores da matriz projeção de (3.31) no espaço nulo dos gradientes das restrições de igualdade e de desigualdade ativas, o que é inviável em sistemas de grande porte.

3.4 Construção do Caminho

De modo semelhante ao algoritmo do método preditor-corretor, apresentado na seção 3.1.4, o termo k será usado para indicar a iteração na qual o parâmetro c muda de valor.

Suponha que são conhecidos o conjunto ativo I_k e o ponto $[x(c_k) \gamma_I(c_k) \lambda(c_k)]^T$ solução do FPOP(c_k), na iteração k . Incrementando o valor do parâmetro por $c_{k+1} = c_k + \delta c_k$ e supondo que o conjunto ativo I_k permanece o mesmo, o novo ponto $[x(c_{k+1}) \gamma_I(c_{k+1}) \lambda(c_{k+1})]^T$ pode ser obtido resolvendo o sistema (3.26)-(3.28), ou seja,

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x} \\ \frac{\partial L}{\partial \gamma_I} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.32)$$

pelo método de Newton-Raphson, cuja equação iterativa é dada por :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial x \cdot \partial \gamma_I} & \frac{\partial^2 L}{\partial x \cdot \partial \lambda} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_I \cdot \partial x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \cdot \partial x} & 0 & 0 \end{bmatrix}^i \cdot \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta \gamma_I \\ \delta \lambda \end{bmatrix}^i = - \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x} \\ \frac{\partial L}{\partial \gamma_I} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix}^i \quad (3.33)$$

sendo as atualizações dadas por:

$$x^{i+1}(c_{k+1}) = x^i(c_{k+1}) + \delta x^i \quad (3.34)$$

$$\gamma_I^{i+1}(c_{k+1}) = \gamma_I^i(c_{k+1}) + \delta \gamma_I^i \quad (3.35)$$

$$\lambda^{i+1}(c_{k+1}) = \lambda^i(c_{k+1}) + \delta \lambda^i \quad (3.36)$$

A inicialização do método de Newton-Raphson é feita no ponto do caminho obtido na iteração anterior $[x(c_k) \ \gamma(c_k) \ \lambda(c_k)]^T$. Se o ponto $[x(c_{k+1}) \ \gamma(c_{k+1}) \ \lambda(c_{k+1})]^T$ obtido não satisfaz as restrições (3.24)-(3.25), então o conjunto ativo I_k é modificado através:

- (i) da liberação das restrições cujos multiplicadores de Lagrange não satisfazem (3.24);
- (ii) da incorporação de restrições que não satisfazem (3.25).

Esta modificação de I_k resulta num novo conjunto ativo I_{k+1} . Novamente se aplica o método de Newton-Raphson para o sistema (3.32). Este processo se repete até que não hajam mais alterações nos conjuntos ativo e folgado, quando então o parâmetro é novamente incrementado. Nota-se que este processo é semelhante ao método preditor-corretor apresentado na seção 3.1.4.

Para que o caminho descrito pelas soluções dos FPOP(c) exista, é preciso que os teoremas da Função Implícita e do Caminho sejam satisfeitos (Apêndice A). Esses teoremas basicamente asseguram que se para algum valor do parâmetro, c_k , é conhecido um ponto $[x(c_k) \ \gamma(c_k) \ \lambda(c_k)]^T$, solução de FPOP(c_k), então para todo c na vizinhança de c_k existe uma solução para FPOP(c) desde que a matriz Hessiana da função Lagrangeana seja não singular neste ponto. Isto garante a existência, a continuidade e a diferenciabilidade do caminho

formado pelas soluções da família de problemas paramétricos, enquanto o conjunto ativo não se altera.

Em [Almeida, 1994] são discutidos pontos críticos associados: a natureza combinatorial do FPO, no tratamento das restrições de desigualdade; e singularidade da matriz Hessiana.

A dimensão dos sistemas (3.32) e (3.33) mudará de acordo com as alterações no conjunto ativo. Por exemplo, se ocorrer uma violação em x (variável canalizada) é feita a retirada de uma variável de otimização e, conseqüentemente há redução da dimensão dos sistemas (3.32) e (3.33). Situação oposta ocorre quando uma restrição funcional $h(x)$ viola seu limite. Neste caso se tem o aumento da dimensão dos sistemas (3.32) e (3.33).

3.5 Fluxograma do FPOP

Na figura 3.7 se apresenta o fluxograma usado nos trabalhos de [Lima, 1993(2),1994] e [Almeida,1994] para se resolver o FPOP. Estes trabalhos desenvolveram estratégias de evolução do parâmetro e de tratamento das mudanças no conjunto ativo para sistemas de pequeno porte. Este mesmo fluxograma pode ser aplicado em sistemas de grande porte. Entretanto, são necessárias alterações para reduzir o tempo computacional na solução dos diversos FPOP.

O tempo computacional dispendido na solução da família de FPOP está intimamente associado ao tempo dispendido na resolução do sistema (3.32). Do algoritmo apresentado na figura 3.7 se observa que este sistema é resolvido sempre que houver uma alteração do parâmetro ou uma alteração do conjunto ativo. Com o propósito de reduzir o tempo computacional deve-se, portanto, encontrar uma forma de reduzir a quantidade de vezes que o parâmetro é alterado para ir do problema relaxado ao problema original, assim como a

quantidade de alterações do conjunto ativo necessária para se chegar ao conjunto ativo de cada FPOP. Desta explanação conclui-se que é necessário trabalhar de modo conjunto a evolução do parâmetro e a atualização do conjunto ativo, o que caracteriza uma estratégia.

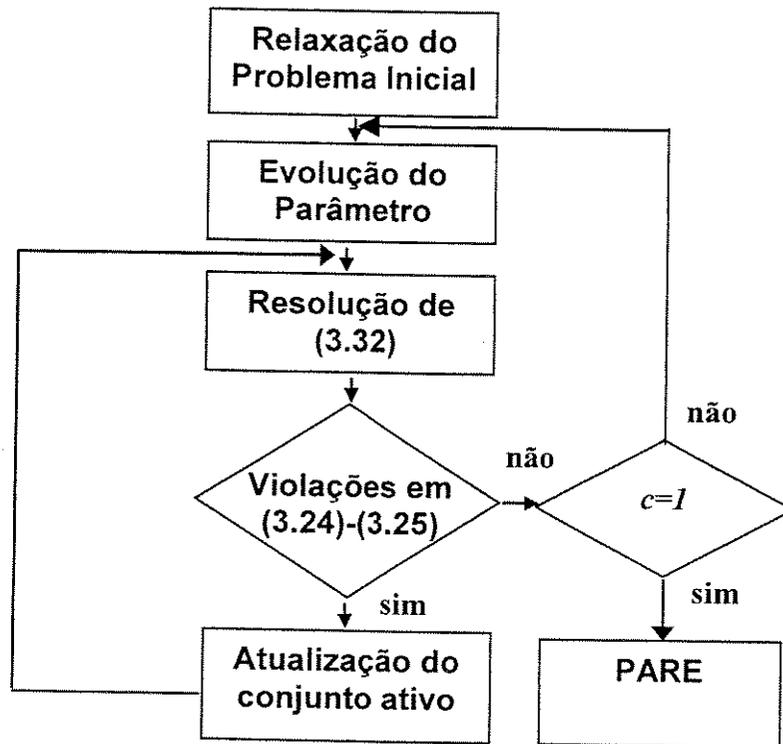


Figura 3.7: Fluxograma do FPOP

As estratégias desenvolvidas nos trabalhos anteriores e neste podem ser classificadas em estratégias conservadoras e arrojadas. Nas estratégias conservadoras a diferença entre dois FPOP sucessivos está no fato de haver **uma única alteração** no conjunto ativo devido a uma única violação nas condições (3.24)-(3.25). Para um problema que apresenta poucas restrições de desigualdade as estratégias conservadoras são capazes de resolver o FPOP num tempo computacional razoável. Entretanto, quando se propõem a executar um sistema de grande porte, que apresenta centenas de restrições de desigualdades candidatas a entrarem no conjunto ativo, nota-se que o conservadorismo das estratégias irá comprometer demasiadamente o tempo

computacional. Com base neste aspecto, foram desenvolvidas estratégias arrojadas que mudam o conjunto ativo não apenas quando ocorre **uma única violação** em (3.24)-(3.25) mas também quando ocorre **um grupo de violações**.

Nas estratégias conservadoras há diversas alterações do parâmetro para se encontrar uma única violação enquanto que nas estratégias arrojadas poucas alterações são efetuadas. Todas as estratégias desenvolvidas, conservadoras e arrojadas, são alvo de discussão no próximo capítulo.

Capítulo IV

Estratégias de Evolução do Parâmetro e Determinação dos Conjuntos Ativos

Neste capítulo são apresentadas quatro estratégias desenvolvidas para a evolução do parâmetro e determinação dos conjuntos ativos. Estas estratégias são classificadas como conservadoras e arrojadas. As seções 4.2 à 4.5 são dedicadas à explanação destas estratégias. Na seção 4.5 são comentadas as soluções encontradas para o caso de divergência do método de Newton-Raphson empregando a estratégia implementada em sistema de grande porte. Na seção 4.6 é dado o algoritmo de solução para a família de problemas paramétricos. Na seção 4.7 é apresentado um resumo das estratégias apresentadas ressaltando suas diferenças.

4.1 Introdução

Desde os primeiros trabalhos que utilizaram o MATLAB como ferramenta para construção de um protótipo de FPO paramétrico, foram desenvolvidas quatro estratégias que serão denominadas de estratégia I, II, III, e IV. Estas estratégias podem ser classificadas com relação à maneira como são obtidos os conjuntos ativos entre o FPO relaxado e o FPO original. Nas estratégias I e II, denominadas conservadoras, são determinados todos os conjuntos ativos, ao passo que nas estratégias III e IV, denominadas arrojadas, isso não é feito, podendo-se “pular” conjuntos ativos.

As estratégias I e II avançam e recuam o parâmetro com o propósito de assegurar a obtenção de todos os conjunto ativos. A forma como estas estratégias obtém os conjuntos ativos é bastante conservadora pois um novo conjunto I_{k+1} , associado a um problema paramétrico, difere do conjunto anterior I_k de uma única restrição. Assim, na transição do FPOP(c_k) para FPOP(c_{k+1}), ou uma restrição saiu do conjunto ativo, pois seu multiplicador se tornou negativo e violou (3.24), ou uma restrição entrou no conjunto ativo pois violou (3.25).

A estratégia III obtém, por meio de uma linearização das condições (3.26)-(3.28), um avanço do parâmetro que gere um grupo de violações. Em seguida, o conjunto ativo de cada FPOP(c_k) é determinado eliminando uma a uma as violações, sem haver necessidade do recuo do parâmetro. A estratégia IV também evolui o parâmetro com o intuito de encontrar um grupo de violações, com a diferença de que o conjunto ativo é obtido eliminando-se diversas violações simultaneamente de tal forma a se ter poucas alterações de conjuntos ativos. Nesta última estratégia o recuo do parâmetro é realizado apenas quando, após o parâmetro ter sido incrementado, o sistema (3.33) divergir.

As estratégias I e II foram apresentadas em [Almeida,1994] enquanto que a estratégia III foi desenvolvida na tese de mestrado do autor [Lima, 1993]. Estas

três estratégias foram testadas em sistemas de pequeno porte, onde o maior sistema avaliado foi o IEEE118. Para sistemas de grande porte foi desenvolvida nesta pesquisa a estratégia IV que possui maior agilidade na busca do conjunto ativo final. A seguir serão detalhadas todas as quatro estratégias.

4.2 Estratégia I

Esta estratégia possui uma implementação computacional muito simples. Ela se caracteriza pelo avanço e recuo do parâmetro em busca de se encontrar todos os conjunto ativos associados aos FPOP.

Uma ilustração desta estratégia é dada na figura 4.1, a qual representa um caminho hipotético percorrido por três magnitudes de tensão que violam o seu limite máximo (v^{max}). O conjunto ativo inicial I_0 é vazio. Evoluindo o parâmetro de c_0 para c_1 , são encontradas duas violações em $v_1(c_1) > v^{max}$ e $v_2(c_1) > v^{max}$. É feito o recuo do parâmetro para c_2 onde se encontra apenas uma violação dada por $v_2(c_2) > v^{max}$. Incorpora-se esta restrição ao conjunto ativo $I_1 = \{v_2\}$ e se resolve o sistema (3.32) cuja solução acarreta uma descontinuidade no caminho das três magnitudes de tensão. Aumenta-se o parâmetro para c_3 onde não há nenhuma violação e portanto nenhuma alteração do conjunto ativo é realizada. Dando prosseguimento ao caminho, verifica-se que em c_4 há uma nova violação dada por $v_3(c_4) > v^{max}$. Novas descontinuidades nos caminhos de $v_1(c)$ e $v_3(c)$ são resultantes da solução de (3.32) com o novo conjunto ativo dado por $I_2 = \{v_2, v_3\}$. Os caminhos descritos pelas variáveis são contínuos e diferenciáveis até o momento em que há uma mudança do conjunto ativo.

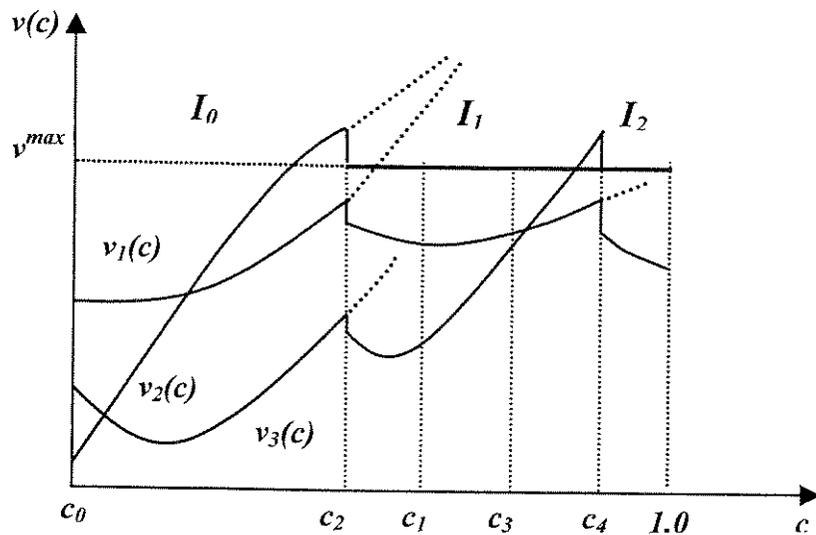


Figura 4.1: Exemplo da estratégia I

4.3 Estratégia II

A estratégia II se constitui numa melhoria sobre a estratégia anterior pois, enquanto a estratégia I avança e recua o parâmetro sem nenhum indicativo de que este processo implicará em uma única mudança do conjunto ativo, a estratégia II procura avançar e recuar o parâmetro em função de informação sobre o caminho que está sendo percorrido e sobre a estimativa da próxima violação.

Fazendo-se uma linearização das condições (3.26)-(3.28) tem-se o sistema (4.1), o qual mostra a dependência entre a correção das variáveis $[\hat{\alpha}_k \delta\gamma_k \delta\lambda_k]^T$ e o incremento dado ao parâmetro $\hat{\alpha}_k$. Assim, conhecendo-se as folgas nas condições (3.24)-(3.25) pode-se obter o valor do parâmetro para o qual ocorreria a primeira violação.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial \gamma_I} & \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial \lambda} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_I \partial x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial x} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta \gamma_{Ik} \\ \delta \lambda_k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f^o - W \cdot \|x - x^o\| \\ \Delta h_I \\ g(x^o) \end{bmatrix} [\delta \hat{x}_k] \quad (4.1)$$

Nesta estratégia, o avanço e o recuo do parâmetro são dados por uma predição linear. A figura 4.2 exemplifica a predição linear através de um caminho hipotético percorrido por duas magnitudes de tensão. Nesta figura, o avanço do parâmetro é indicado pela reta tracejada e o recuo é indicado pela reta cheia. A partir de uma solução conhecida em c_1 e da relação estabelecida pelo sistema (4.1), é possível determinar os valores c_2 e c_3 para os quais estas restrições se tornariam violadas. É escolhido o menor valor do parâmetro, c_2 , pois se procura a primeira violação. Em seguida é resolvido o sistema (3.32) para c_2 , cuja solução apresenta duas infactibilidades. Novamente é feita a predição linear, agora para recuar o parâmetro, e são determinados dois valores tomando-se o menor deles, c_5 . Resolve-se agora o sistema (3.32) para c_5 , o qual apresenta uma única violação, que é então incorporada ao conjunto ativo para finalmente se obter a solução do FPOP(c_5).

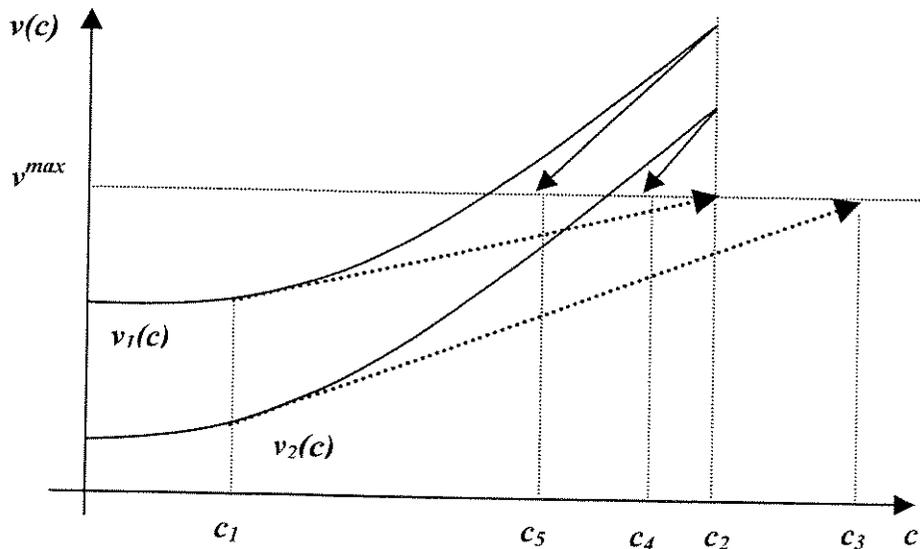


Figura 4.2: Exemplo da estratégia II.

4.4 Estratégia III

A estratégia III pertence à classe das estratégias arrojadas cuja característica é percorrer o caminho entre os problemas relaxado e original sem a restrição de passar por todos os conjunto ativos. Nesta estratégia o parâmetro somente avança e as violações que porventura ocorram são eliminadas sem o recuo do parâmetro.

A estratégia III usa como incremento do parâmetro um valor obtido por tentativa e erro que, segundo a predição linear dada pelo sistema (4.1), acarreta pelo menos mais de uma violação. Para tal intento, atribui-se um incremento arbitrário no parâmetro no sistema (4.1) do qual se retira a informação para a atualização das variáveis como

$$x(c_k + \delta c_k) = x(c_k) + \delta x_k \quad (4.2)$$

$$\gamma_I(c_k + \delta c_k) = \gamma_I(c_k) + \delta \gamma_{Ik} \quad (4.3)$$

$$\lambda(c_k + \delta c_k) = \lambda(c_k) + \delta \lambda_k \quad (4.4)$$

No ponto dado por (4.2)-(4.4) são verificadas as condições (3.24)-(3.25). Caso ocorra nenhuma ou uma única violação, um novo incremento maior no parâmetro é dado. Caso ocorra mais de uma violação, se inicia a solução do sistema (3.33) usando como ponto de partida os valores dados por (4.2)-(4.4).

A identificação das violações de um novo problema parametrizado via predição linear tem o objetivo de antecipar a possível alteração no conjunto ativo. No entanto, nem todas as violações previstas por esta estratégia para a inicialização do novo problema FPOP(c_{k+1}) permanecerão na sua solução. Por isto, a variação para δc_k em (4.1) é dada para se obter mais de uma violação. Pode-se agora enumerar os passos dados pelo processo de tentativa e erro associado a predição linear.

4.4.1 Algoritmo

Suponha conhecida a solução $[x(c_k) \ \gamma(c_k) \ \lambda(c_k)]^T$ do FPOP(c_k).

1. Dê um incremento δc_k .
2. Determine $[\delta x_k \ \delta \gamma_k \ \delta \lambda_k]^T$ resolvendo o sistema (4.1).
3. Atualize as variáveis conforme (4.2)-(4.4).
4. Verifique (3.24)-(3.25):
 - Se não existem violações ou existe uma única violação então, dê um incremento maior para δc_k . Retorne para o passo 2;
 - Se existe mais que uma violação então faça

$$c_{k+1} = c_k + \delta c_k$$
5. Resolva o FPOP(c_{k+1})

Após a estimativa das violações pela predição linear, o passo seguinte diz respeito a resolução do novo problema FPOP(c_{k+1}) e conseqüente determinação

do novo conjunto ativo, a qual é feita em duas etapas. Na primeira, aplica-se o método de Newton-Raphson no sistema (3.32) considerando o mesmo conjunto ativo do problema anterior, tendo como inicialização o ponto obtido pela predição linear (4.2)-(4.4). Na segunda etapa, é analisada a factibilidade (3.24)-(3.25) da solução obtida na primeira etapa e, havendo violações se realiza um processo de identificação da restrição de desigualdade que sairá ou entrará primeiro no conjunto ativo. Se a solução obtida na primeira etapa for factível, isto significa que a predição de um conjunto de violações não se concretizou e então, prossegue-se para a solução de um novo problema parametrizado sem alterar o conjunto ativo.

Nas estratégias I e II é feito um recuo do parâmetro sempre que a solução do sistema (3.32) apresente múltiplas violações. Na estratégia III o tratamento das violações é feito sem o recuo do parâmetro. O parâmetro é mantido fixo enquanto são incorporadas ou retiradas do conjunto ativo uma a uma as restrições.

De posse das soluções em c_k e c_{k+1} , das restrições (3.24)-(3.25) violadas em c_{k+1} é construída uma reta secante de onde são determinados os pontos de interseções destas retas com o eixo do parâmetro. Um exemplo da determinação do conjunto ativo na estratégia III é dado na figura 4.3. Nela são considerados os caminhos descritos por duas restrições $H_1(x,c) \leq 0$ e $H_2(x,c) \leq 0$ infactíveis em c_{k+1} .

A restrição que se tornar infactível para o menor incremento δc_k no intervalo $c_k < c < c_{k+1}$, é incorporada primeiro ao conjunto ativo. Na figura 4.3 a reta secante correspondente a restrição $H_1(x,c)$ intersecciona primeiro o eixo do parâmetro, sendo portanto esta restrição a primeira a ser incorporada ao conjunto ativo.

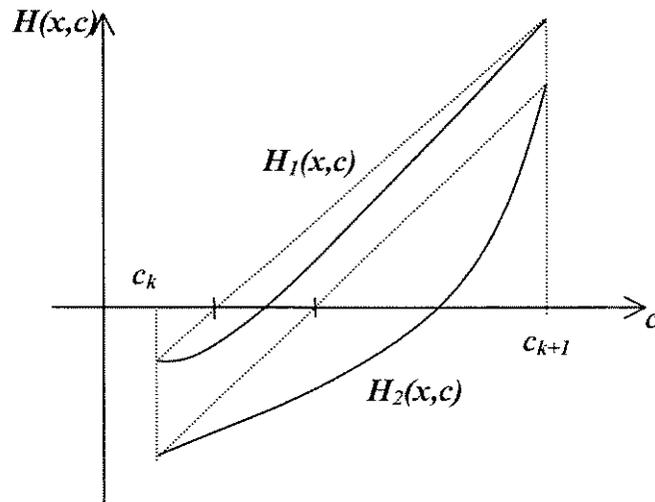


Figura 4.3: Reta secante para as restrições violadas.

Ressalta-se que uma vez identificada qual a mudança a ser feita no conjunto ativo, o parâmetro não recua, permanecendo o mesmo, ao contrário do que ocorre com as estratégias I e II. Assim, para o exemplo da figura 4.3, a restrição $H_1(x,c)$ entra no conjunto ativo e o sistema (3.32) é resolvido para c_{k+1} .

A tabela 4.1 mostra o modo de evoluir o parâmetro na estratégia III para o sistema IEEE30, com função objetivo de minimização do custo de geração, adotando como x^o a solução dada com magnitudes de tensão iguais a 1.0 pu e ângulos iguais a zero. Nesta tabela consta o número de iterações para resolver cada sistema (3.32) bem como as respectivas violações que surgem nas condições (3.24)-(3.25). Note que um novo FPOP é resolvido após o sistema (3.32) não apresentar mais violações [Lima, 1993].

c_k	Iterações	Violações
0.0	0	0
0.1	3	0
0.5	5	1
0.5	2	0
0.8	5	3
0.8	3	1
0.8	2	0
0.9	4	3
0.9	3	2
0.9	3	1
0.9	2	0
0.99	5	2
0.99	3	1
0.99	2	0
0.999	3	1
0.999	3	0
0.9999	2	0
1.0	1	0

Tabela 4.1: Evolução do parâmetro na estratégia III.

As figuras 4.4 à 4.8 apresentam os resultados obtidos para o sistema elétrico IEEE30 [Lima,1993]. Elas mostram o caminho descrito por algumas variáveis de otimização quando se minimizou o custo de geração e as perdas ativas nas linhas de transmissão. As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 se referem ao resultado obtido da função custo de geração, enquanto que as figuras 4.7 e 4.8 se referem a função perdas ativas. Destas figuras se observa a sensibilidade de algumas variáveis de otimização em relação ao parâmetro de continuação, onde fica claro a não linearidade do problema ao se resolver o FPO. Note que os pontos de descontinuidades representam as mudanças obtidas no conjunto ativo. A figura 4.6 mostra o comportamento dos multiplicadores de Lagrange associados a magnitude de tensão. Os valores positivos destes informam que as magnitudes de tensão estão fixadas no limite superior.

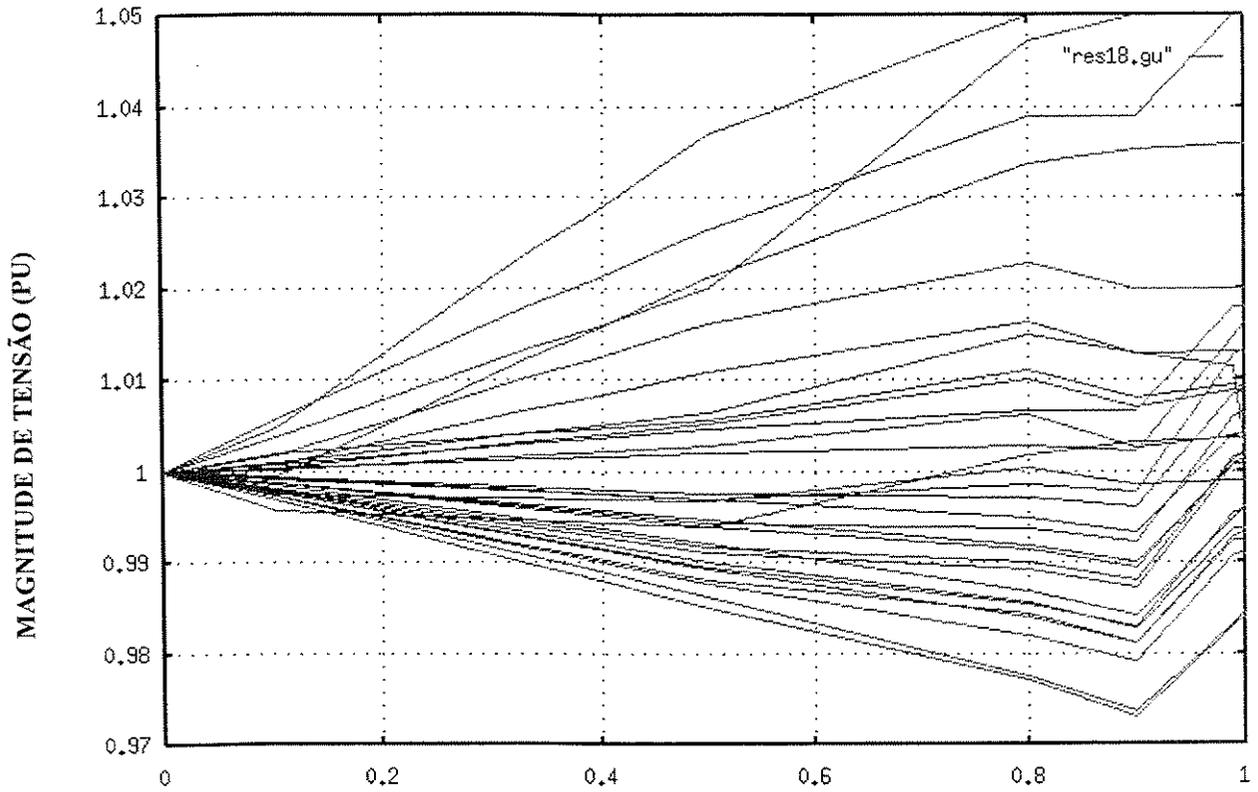


Figura 4.4: Magnitude de tensão - Custo de geração.

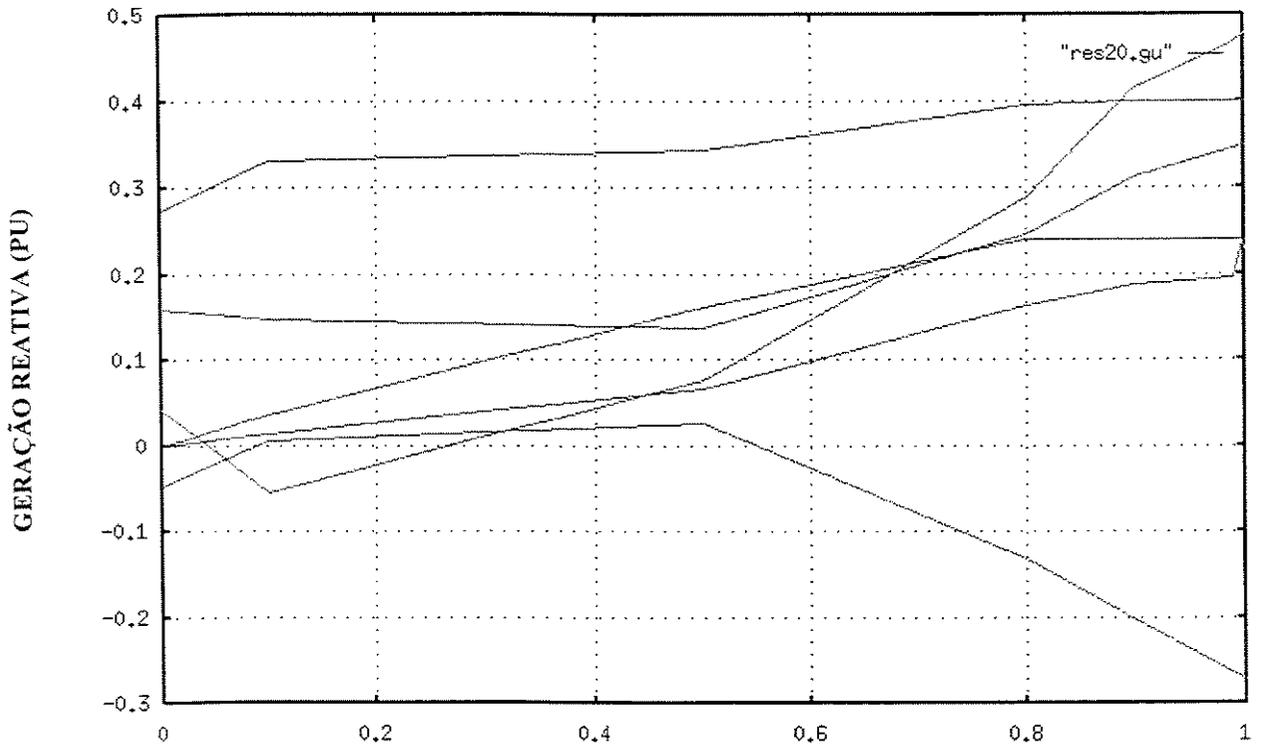


Figura 4.5: Geração reativa - Custo de geração

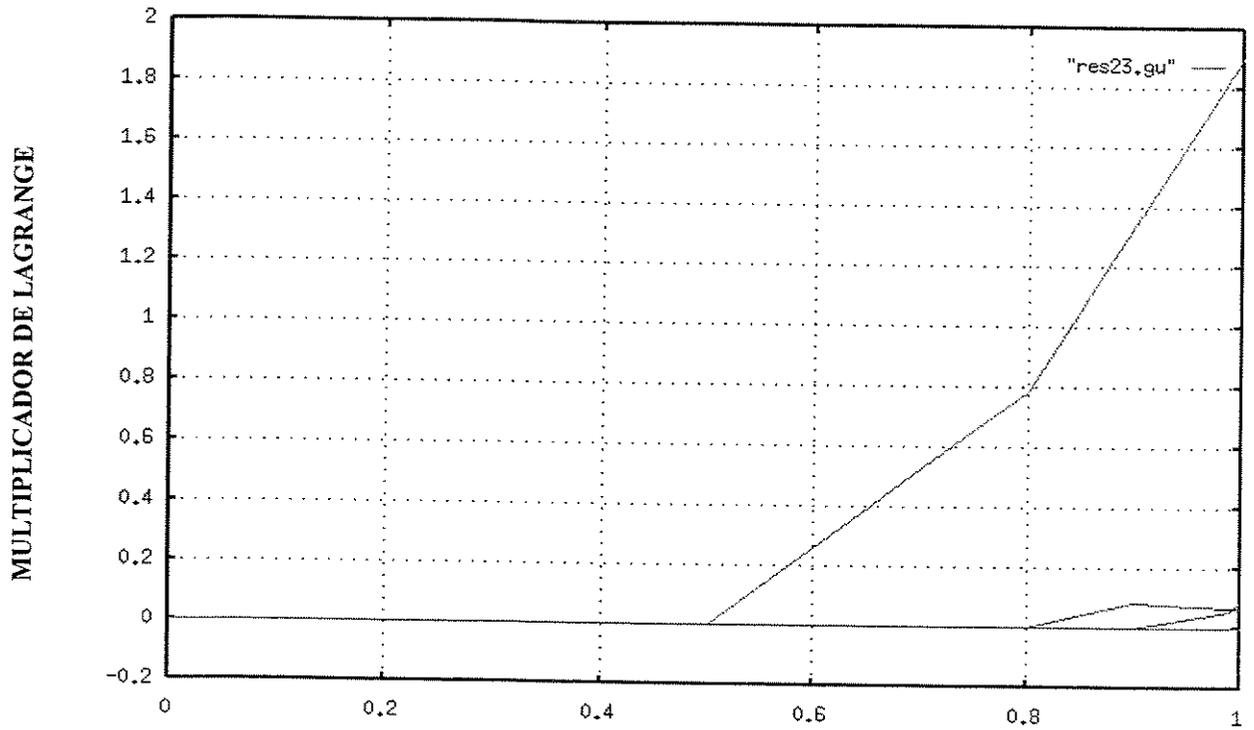


Figura 4.6: Multiplicador de Lagrange associado a tensão - Custo de geração.

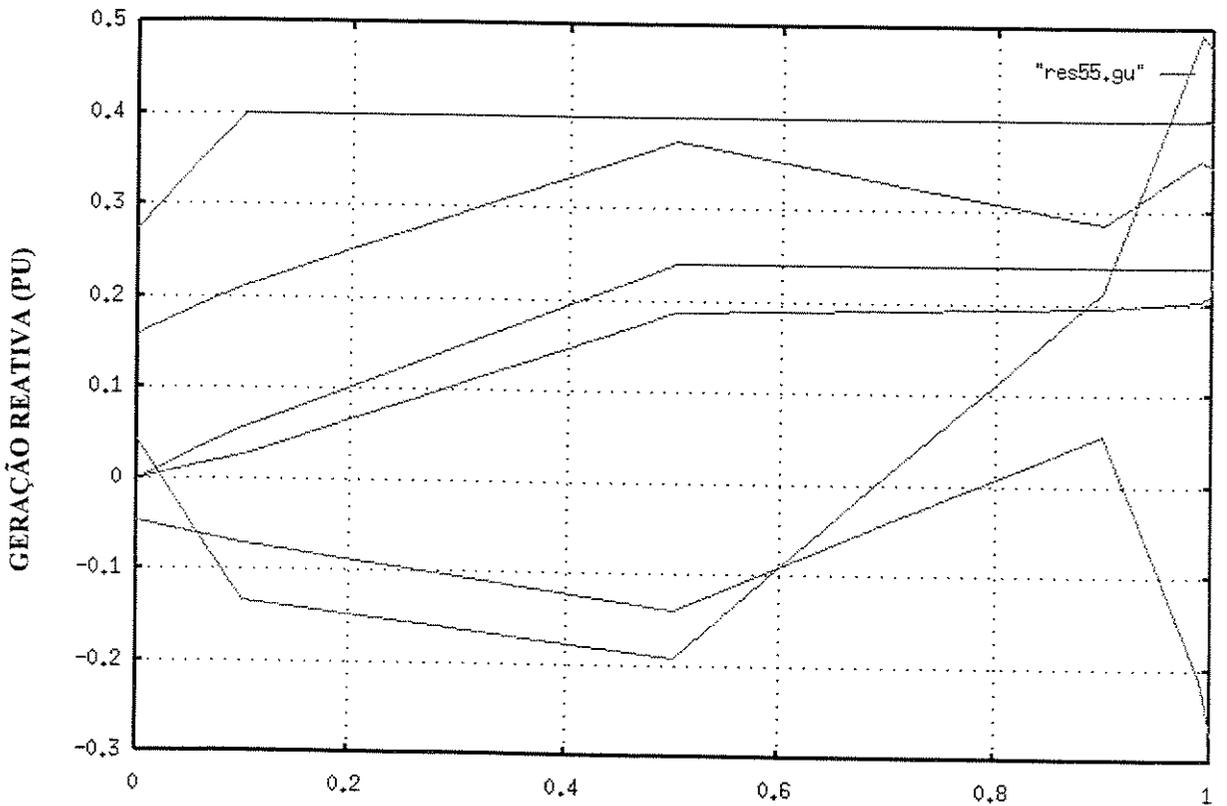


Figura 4.7: Geração reativa - Perdas ativas.

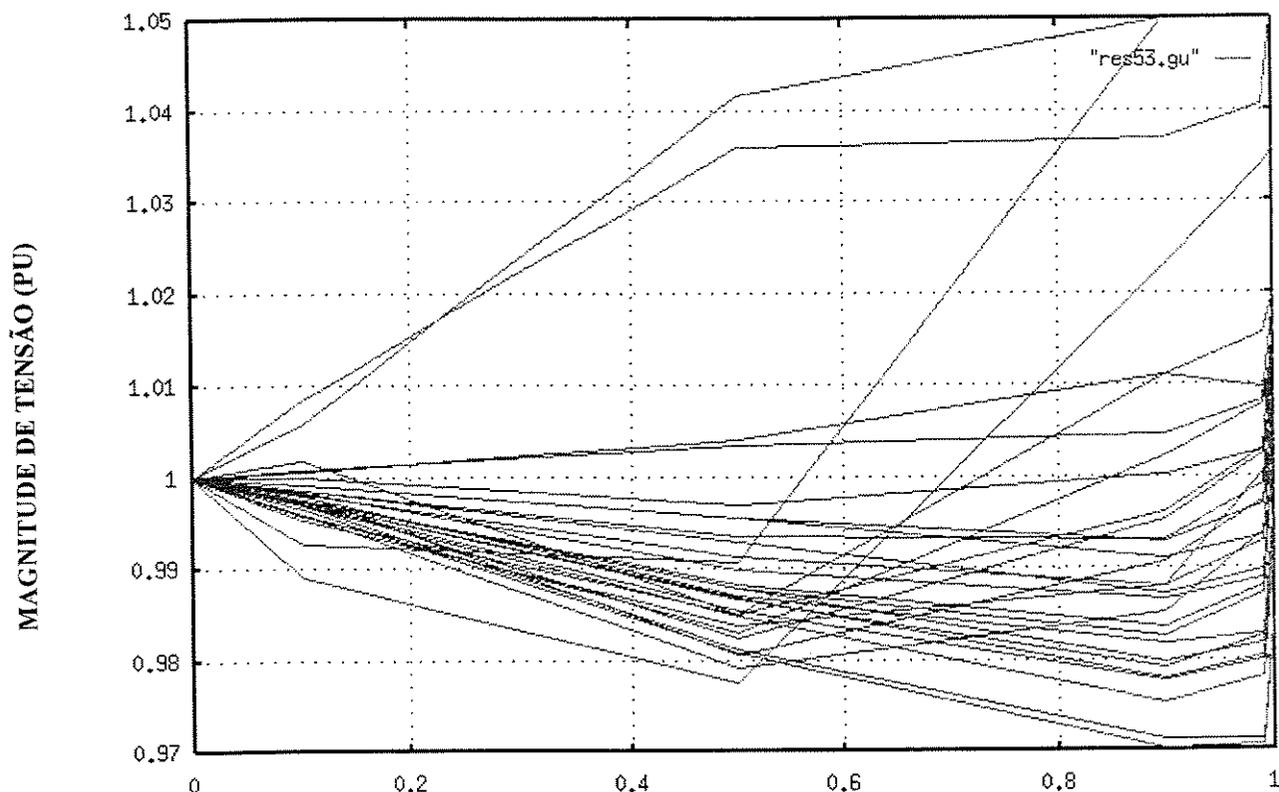


Figura 4.8: Magnitude de tensão - Perdas ativas.

A figura 4.9 ilustra o passo corretor da estratégia III. Ao contrário do método preditor-corretor clássico, onde a inicialização do passo corretor é feita a partir da solução do problema anterior, a inicialização do passo corretor da estratégia III é feita da solução dada pela predição linear. Esta forma de inicialização pode também ser estendida à estratégia II.

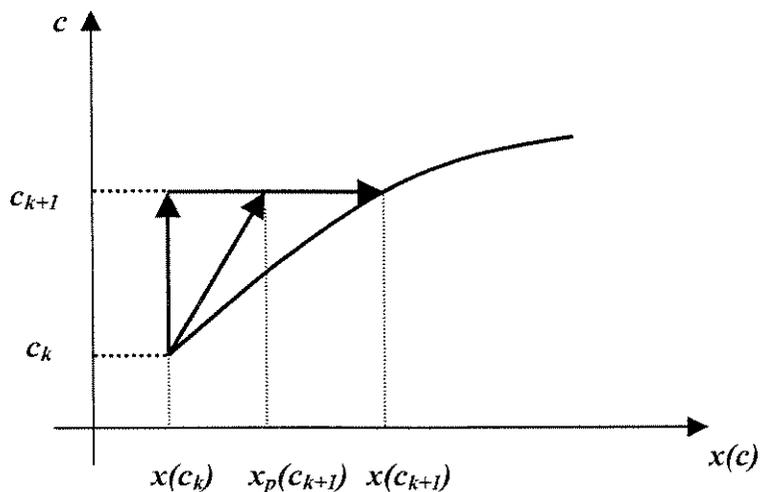


Figura 4.9: Passo corretor segundo a estratégia III.

4.5 Estratégia IV

Esta estratégia foi desenvolvida com o propósito de resolver sistemas de grande porte com menor tempo computacional. Para isto foram empregadas inovações tanto no intervalo de evolução do parâmetro como no modo de formar o conjunto ativo dos problemas paramétricos.

A presença do termo quadrático na função objetivo (3.16) dá ao algoritmo paramétrico uma boa estabilidade numérica evitando situações de singularidade da matriz Hessiana em (3.33) ou de divergência do método de Newton-Raphson. A otimização paramétrica quando aplicada em sistemas de grande porte requer o emprego de valores elevados para W .

A equação (3.16) mostra que para pequenos valores de W o termo quadrático tem pouca influência sobre a função objetivo do problema original. Por outro lado, para valores mais elevados de W o termo quadrático torna-se mais importante em relação a função objetivo do problema original fazendo com que as soluções ótimas dos problemas paramétricos e os conjunto ativos a eles associados pouco mudem quando o parâmetro evolui. Com base nesta observação, é possível reduzir o número de parâmetros de continuação de tal forma que se chegue de modo mais rápido na solução do FPO. Assim pode-se formalizar uma equação de atualização do parâmetro quando W é elevado, como

$$c_{k+1} = c_k + \frac{9}{10^k} \quad k=1,2,\dots \quad (4.5)$$

onde $c_1=0$. O parâmetro evolui de $c_1=0$ para $c_2=0,9$ dando seqüência para $c_3=0.99$, $c_4=0.999$, $c_5=0.9999$, ..., .

O critério de parada adotado para o valor de k passa por uma análise comparativa entre o valor atual $f(x(c_k))$ e o valor anterior $f(x(c_{k-1}))$ da função

objetivo correspondente ao problema original $f(x)$. Assim se forem satisfeitas as condições $c_k \geq 0.9999$ e $|f(x(c_{k-1})) - f(x(c_k))| \leq 10^{-2}$ então, considera-se a solução obtida como a solução do FPO. Desta forma o parâmetro de continuação não necessita ir até 1. De fato, os testes realizados e apresentados no capítulo V mostram que a tolerância atribuída para análise dos valores atual e anterior da função objetivo é atendida antes do parâmetro $c_k = 1$.

Uma investigação mais detalhada entre os pontos obtidos em $c_k = 1$ e $0.9999 \leq c_k < 1$ mostra que a diferença é desprezível sendo da ordem de 10^{-4} . Se a mesma investigação for estendida ao conjunto ativo se verificará que as diferenças se resumem ao fato de que algumas restrições estão no limiar de saírem do conjunto ativo pois seu multiplicador de Lagrange possui uma tendência que aponta para isto, ou então o contrário, algumas restrições estão no limiar para entrar no conjunto ativo.

A atualização do conjunto ativo da estratégia IV é feita em duas etapas. Na primeira etapa é construída uma lista ordenada de todas as restrições violadas de tal forma que a primeira restrição a integrar esta lista apresenta o maior desvio em relação ao seu limite, e a última, o menor desvio. Na segunda etapa são procuradas nesta lista as violações que causariam mal condicionamento numérico na matriz Hessiana em (3.33) caso fossem incorporadas simultaneamente ao conjunto ativo.

Uma situação que leva a um mal condicionamento da matriz Hessiana ocorre quando numa mesma barra de geração, e para um mesmo c_k , tanto a geração reativa como a magnitude de tensão ultrapassam seus limites operacionais. Neste caso se forem incorporadas ao conjunto ativo estas duas violações a matriz Hessiana ficará mal condicionada e o método de Newton-Raphson não encontrará uma solução que atenda este conjunto ativo pois o processo iterativo divergirá. Por outro lado, se estas duas restrições violadas

ocorrerem em parâmetros diferentes o processo iterativo não divergiria pois, caso exista uma solução, uma delas deixaria o conjunto ativo.

Com base no que foi exposto, a atualização do conjunto ativo na estratégia IV passa por uma análise da existência de ligações do tipo geração reativa-magnitude de tensão ($q_{gl} - v_l$) entre as barras que apresentam restrições violadas. Se não houver este tipo de ligação, então todas as restrições são incorporadas (removidas) do conjunto ativo.

A tabela 4.2 apresenta as violações que surgem, para $c=0.99$, no sistema com 810 barras tendo como função objetivo uma combinação da função perdas ativas ($w_2=1$) e da função desvio de tensão ($w_3=10$) (B.2-Apêndice B). O termo W foi feito igual a 10^3 . As violações estão apresentadas em ordem decrescente dos seus desvios em relação a seus limites. Nesta tabela, nota-se que na 4ª posição ocorre uma violação de geração reativa na barra 768 e na 29ª posição ocorre uma violação de tensão na mesma barra. Se forem incorporadas todas as 33 violações, então se estaria fixando na barra 768 tanto sua geração reativa como sua magnitude de tensão o que provocaria um mal condicionamento numérico na matriz Hessiana. Para evitar este problema, incorpora-se ao conjunto ativo as violações compreendidas entre a 1ª a 28ª posição sem que haja divergência no sistema (3.33).

- 1° - GERACAO REATIVA DA BARRA 1421 NO MAXIMO
- 2° - GERACAO REATIVA DA BARRA 1249 NO MINIMO
- 3° - GERACAO REATIVA DA BARRA 673 NO MINIMO
- 4° - GERACAO REATIVA DA BARRA 768 NO MAXIMO
- 5° - GERACAO REATIVA DA BARRA 1113 NO MAXIMO
- 6° - GERACAO REATIVA DA BARRA 399 NO MAXIMO
- 7° - GERACAO REATIVA DA BARRA 19 NO MAXIMO
- 8° - GERACAO REATIVA DA BARRA 1242 NO MAXIMO
- 9° - GERACAO REATIVA DA BARRA 152 NO MAXIMO
- 10° - GERACAO REATIVA DA BARRA 340 NO MAXIMO
- 11° - GERACAO REATIVA NA BARRA 1181 NO MINIMO
- 12° - GERACAO REATIVA DA BARRA 145 NO MAXIMO

13°	- GERACAO REATIVA DA BARRA 199 NO MAXIMO
14°	- GERACAO REATIVA NA BARRA 1104 NO MINIMO
15°	- GERACAO REATIVA DA BARRA 1263 NO MAXIMO
16°	- TAP 148 NO MAXIMO, LINHA 1161--1158
17°	- SHUNT DA BARRA 346 NO MAXIMO
18°	- SHUNT DA BARRA 650 NO MAXIMO
19°	- TAP 155 NO MINIMO, LINHA 1176--1177
20°	- TAP 202 NO MINIMO, LINHA 1456--1457
21°	- TAP 198 NO MAXIMO, LINHA 1449--1421
22°	- TAP 9 NO MAXIMO, LINHA 45--44
23°	- TAP 203 NO MAXIMO, LINHA 1463--1462
24°	- SHUNT DA BARRA 361 NO MAXIMO
25°	- TENSÃO NA BARRA 1250 NO MAXIMO
26°	- TAP 5 NO MINIMO, LINHA 19-- 28
27°	- TAP 6 NO MINIMO, LINHA 19-- 28
28°	- TAP 44 NO MINIMO, LINHA 355-- 353
29°	- TENSÃO NA BARRA 768 NO MAXIMO
30°	- TENSÃO NA BARRA 1241 NO MAXIMO
31°	- TAP 146 NO MAXIMO, LINHA 1161--1157
32°	- TAP 110 NO MAXIMO, LINHA 833-- 834
33°	- MULTIPLICADOR DA GER.REAT.DA BARRA 1430 NO MINIMO

Tabela 4.2: Violações para $c=0,99$

Existem outras situações que também podem levar a um mal condicionamento da matriz Hessiana em (3.33) estas podem ser atribuídas a :

- a) um incremento exagerado dado ao parâmetro de continuação;
- b) formação do conjunto ativo.

Na primeira situação é restaurada a solução anterior para o qual o FPOP converge e então o parâmetro é recuado, dando-se prosseguimento ao processo de otimização. O valor do parâmetro recuado é obtido através do valor médio compreendido entre o parâmetro no qual ocorreu o mal condicionamento e o parâmetro anterior no qual se tem uma solução convergida.

Na segunda situação é restaurada tanto a solução anterior como o conjunto ativo do último FPOP convergido. O caso b se subdivide em dois outros:

- b.1) parâmetro e conjunto ativo mudam;
- b.2) parâmetro está fixo e conjunto ativo muda.

O item b.1 é o caso de se variar o parâmetro e , após análise de (3.24)-(3.25), verifica-se que todas ou algumas violações devem ser incorporadas ao conjunto ativo. Se o sistema (3.32) divergir para este novo conjunto ativo, recua-se o parâmetro, resolve-se (3.32) e (3.24)-(3.25). Os recuos são realizados até que não haja mais divergência.

O item b.2 ocorre quando, no parâmetro c_k , são realizadas várias mudanças no conjunto ativo, I_m, I_{m+1}, I_{m+2} . Se, por exemplo, após a mudança do conjunto ativo I_{m+2} o sistema (3.32) divergir, volta-se a solução correspondente ao conjunto ativo I_{m+1} , verifica-se (3.24)-(3.25) e incorpora-se (retira-se) a metade do número de violações que foram incorporadas (retiradas) quando da montagem de I_{m+2} . Define-se um novo conjunto ativo I_{m+3} e resolve-se (3.32). Se não divergir, verifica-se (3.24)-(3.25). Não havendo violações, aumenta-se o parâmetro e resolve-se um novo FPOP(c_{k+1}). Desta forma para que o sistema (3.32) volte a convergir diminui-se pela metade o número de violações a serem removidas até que este sistema apresente convergência.

Ainda que se possa evitar a incorporação de violações que possuam ligações ($q_{gl} - v_l$) é possível que permaneçam situações de mal condicionamento da matriz Hessiana devido a formação do conjunto ativo. De fato a otimização paramétrica, ao variar o parâmetro, tenta encontrar um conjunto de restrições de desigualdade ativas que forme, juntamente com as restrições de igualdade, o sistema (3.32). Ao se adotar a meta de se incorporar (retirar) a maior quantidade possível de violações ao conjunto ativo é possível que alguma violação não seja adequada a pertencer a um determinado conjunto ativo e isto se reflete num mal condicionamento da matriz Hessiana, o que não representa uma dificuldade para

a metodologia paramétrica pois se consegue tomando algumas medidas restaurar a condição de convergência do método de Newton-Raphson.

Em [Lima,1999] a meta principal é incorporar (retirar) todas as violações presentes em cada FPOP e, quando ocorre alguma divergência no método de Newton-Raphson refaz-se o conjunto ativo incorporando (retirando) 50% ou 25% das maiores violações integrantes da lista ordenada. Esta redução do conjunto ativo restaura ao FPOP a condição de convergência. Esta forma de tratar o conjunto ativo se mostra adequada para otimizar sistemas de grande porte, no entanto, quando se introduz a verificação de prováveis situações que podem levar a divergência ganha-se muito no tempo computacional pois agora existem critérios mais organizados para trabalhar com a dimensão do conjunto ativo.

Os recursos de redução do tamanho do conjunto ativo ou do parâmetro, no caso de mal condicionamento, servem como uma proteção do algoritmo pois a partir das mudanças do conjunto I ou do parâmetro dá-se prosseguimento a otimização do FPO. A seguir é detalhado o algoritmo paramétrico para resolver a família de problemas paramétricos empregando a estratégia IV.

4.6 Algoritmo Paramétrico

1. Faça $c_0=0$, $k=1$. Calcule $f(x(c_0))$

Considere um ponto inicial: $x(0)=x^0$; $\gamma_I(0)=0$; $\lambda(0)=\lambda^0$ qualquer.

Escolha W e ε .

2. Incremente o parâmetro de continuação através de (4.5).

3. Resolva o sistema (3.32).

Seja a solução dada por:

$$[x(c_k^{i+1}), \gamma_I(c_k^{i+1}), \lambda(c_k^{i+1})]^T$$

4. Monitore as violações.

Se não há violações em (3.24)-(3.25), então vá para o passo 5.

Se há uma violação em (3.24), então vá para o passo 6.

Se há uma violação em (3.25), então vá para o passo 7.

Se há múltiplas violações em (3.24)-(3.25), então vá para o passo 8.

5. Calcule o valor da função objetivo $f(x(c_k))$.

Se $|f(x(c_{k-1})) - f(x(c_k))| \leq 10^{-2}$ e $c_k \geq 0,9999$, então PARE.

A solução $[x(c_k), \gamma(c_k), \lambda(c_k)]^T$ é a solução do FPO.

Senão, faça $k=k+1$ e vá para o passo 2.

6. Se $\gamma_i < 0$ para $i \in I$, então transfira o índice i do conjunto ativo para o conjunto folgado.

Vá para o passo 3.

7. Se $H_j(x, c) > 0$ para $j \in J$, então transfira o índice j do conjunto folgado para o conjunto ativo.

Vá para o passo 3.

8. Ordene em ordem decrescente os desvios das restrições violadas em relação aos seus limites.

9. Verifique se existem ligações do tipo $(q_{gl} - v_l)$.

Se há ligações:

Verifique as posições correspondentes as ligações. Incorpore (retire) todas as violações nas posições anteriores a posição correspondente a primeira ligação encontrada, excluindo esta.

Vá para o passo 3

Se não há ligação:

Incorpore as violações ao conjunto ativo com índice j tal que, $j \in J$ e $H_j(x, c) > 0$;

Retire as violações do conjunto folgado com índice i tal que, $i \in I$ e $\gamma_i < 0$.

Vá para o passo 3.

4.7 Resumo das estratégias

<i>ESTRATÉGIA</i>	<i>EVOLUÇÃO DO PARÂMETRO</i>	<i>DETERMINAÇÃO DOS CONJUNTOS ATIVOS</i>
<i>I</i>	Avanço e recuo.	Encontra-se uma violação e muda-se este conjunto.
<i>II</i>	Avanço e recuo obtidos com o auxílio da predição linear.	Encontra-se uma violação e muda-se este conjunto.
<i>III</i>	Avanço com o auxílio da predição linear. Não há recuo.	Encontra-se um grupo de violações que são incorporadas (retiradas) uma a uma ao conjunto ativo
<i>IV</i>	Só avanço. Somente em caso de divergência de (3.33) há o recuo.	Encontra-se um grupo de violações que são incorporadas (retiradas) em grupos maiores ou menores ao conjunto ativo, conforme a existência de ligações $(q_{gl} - v_l)$ entre as violações.

4.8 Conclusão

Neste capítulo são apresentadas quatro estratégias das quais três já foram amplamente divulgadas e testadas em sistemas de pequeno porte e a última desenvolvida para sistemas de grande porte mas que também se adequa perfeitamente a qualquer dimensão do sistema em estudo.

As estratégias são classificadas em dois grupos com relação ao modo de determinação do conjunto ativo de cada FPOP. As estratégias conservadoras I e II visam construir o caminho da Homotopia através da obtenção de todos os conjuntos ativos. O processo de otimização paramétrico é mais lento pois trabalham com o avanço e recuo do parâmetro. Já as estratégias arrojadas III e IV buscam construir o caminho que leva a solução do FPO com poucas alterações do conjunto ativo. Na estratégia IV são levantadas situações bastante comuns que podem levar o algoritmo a falhar. Para cada situação é determinada um modo de solução de tal forma que todos os problemas paramétricos possam ser resolvidos. No capítulo seguinte são apresentados os resultados referentes a sistemas de grande porte empregando a estratégia IV.

Capítulo V

Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no sistema elétrico de transmissão Sul/Sudeste nas versões de 810 e 2256 barras. São apresentados os testes relativos a minimização de perdas ativas em linhas de transmissão, minimização de custo de geração e minimização de desvio de tensão em relação a 1.0 pu. Inicialmente é feita uma análise da robustez da metodologia paramétrica e em seguida são mostrados os resultados sintetizados onde é possível verificar o perfil de tensão, o despacho de potência ativa e reativa em cada função objetivo otimizada.

5.1 Introdução

Nos trabalhos que utilizaram como testes sistemas de pequeno porte foi observado que a parametrização do FPO apresenta como características: a independência da solução final diante de diferentes soluções iniciais; a independência da solução final com respeito a escolha do termo quadrático W em (3.16); a possibilidade do uso de quaisquer valores iniciais para os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade [Lima,1993][Almeida,1994].

Como continuação da pesquisa em otimização paramétrica, são apresentados, nesta tese, testes com sistemas de grande porte. Para isto um modelo computacional foi implementado em FORTRAN 77 empregando técnicas de armazenamento compacto e fatoração LDU para solução do sistema (3.33). Com esta rotina computacional foram realizados os estudos com sistemas elétricos de potência de dimensões reais. No apêndice D se encontra o arranjo adotado para armazenar a matriz do sistema (3.33).

Os testes foram realizados sobre o sistema brasileiro Sul/Sudeste em duas versões, uma reduzida contendo 810 barras e uma outra versão contendo 2256 barras. A segunda versão do sistema Sul/Sudeste foi cedida pela ENERSUL, concessionária de energia elétrica do Estado de Mato Grosso do Sul e corresponde a um nível de carga pesada planejado para o ano 2000. Os dois sistemas envolvem os seguintes níveis de tensão (em kV): 34, 69, 138, 230, 345, 440, 500 e 750. O maior sistema contempla as usinas termelétricas que utilizarão o gás natural oriundo da Bolívia bem como também a interligação com o sistema Norte/Nordeste. As dimensões das componentes integrantes destes dois sistemas são dadas pela tabela 5.1.

SISTEMA	NB	NAG	NRG	NR	NT	NSH
I	810	96	114	1340	205	188
II	2256	226	200	3508	1020	652

Tabela 5.1: Componentes dos sistemas elétricos em teste.

onde:

NB → número de barras da rede elétrica

NAG → número de geradores de potência ativa

NRG → número de geradores de potência reativa

NR → número de ramos

NT → número de transformadores

NSH → número de admitâncias shunt

5.2 Considerações Iniciais

Os testes foram realizados para os problemas de minimização de perdas ativas nas linhas de transmissão, minimização do custo de geração e minimização do desvio de tensão em relação a 1.0 pu. A equação B.2 (Apêndice B) mostra que por meio de pesos é possível se minimizar uma delas ou uma combinação entre elas. Todos os testes foram realizados numa estação de trabalho SUN ULTRA™ 60 e a solução inicial x^0 , para todos os problema resolvidos, foi fornecida por um modelo do fluxo de carga.

Na formulação do FPOP foi implementado um modelo reduzido onde as equações de igualdade representam apenas as barras de carga (Apêndice B). As barras de geração se encontram implicitamente representadas através das equações de desigualdade.

Na função minimização do custo de geração, as variáveis de otimização são ângulos e magnitudes de tensão. As restrições funcionais são representadas pelos limites de magnitudes de tensão e limites de geração ativa e reativa.

Na função minimização das perdas ativas as variáveis de otimização são ângulos, magnitudes de tensão, taps e admitâncias shunt cuja influência no problema será investigada mantendo-as fixas e livres. As restrições funcionais são representadas pelos limites das variáveis de otimização e limites de geração reativa.

Adotou-se a tolerância de 10^{-3} como critério de convergência do método de Newton-Raphson para resolver (3.32). A matriz Hessiana em (3.33) é tratada de dois modos:

- (a) Com atualização e refatoração da matriz Hessiana em (3.33) após cada iteração do método de Newton-Raphson, a qual será tratada simplesmente por **matriz atualizada**. O valor máximo admitido para convergência do sistema (3.32) neste caso é de 15 iterações.
- (b) Com atualização e refatoração desta matriz somente após uma evolução do parâmetro e/ou uma mudança no conjunto ativo ou ainda, quando houver uma divergência no método de Newton-Raphson. Neste caso a matriz Hessiana será tratada por **matriz constante** pois após a atualização desta matriz, nas situações já citadas acima, ela não é mais recalculada. O valor máximo admitido para convergência do sistema (3.32) neste caso é de 30 iterações.

O número 15 foi escolhido pois o sistema II algumas vezes necessita da ordem de 10 iterações para convergir, ao contrário do sistema I que converge com 2 ou 4 iterações.

Os valores limites máximo (b_k^{max}) e mínimo (b_k^{min}) para as admitâncias shunt de barra foram escolhidos como:

$$\begin{aligned} b_k^{\max} &= 1,5 \cdot |b_k| \\ b_k^{\min} &= -1,5 \cdot |b_k| \end{aligned} \quad k=1, \dots, NSH \quad (5.1)$$

Onde b_k é lido do banco de dados do sistema em teste.

Os valores considerados para limites de tensão foram diferentes para cada estudo. Eles mudaram conforme a função objetivo e o sistema em teste. Para o sistema I adotou-se $0.94 < v < 1.05 \text{ pu}$ quando se minimiza perdas com admitâncias shunt com liberdade para variar dentro dos limites dados em (5.1) e, $0.9 < v < 1.09$ com admitâncias shunt fixas. Ainda neste sistema, e para a função custo de geração, os limites foram $0.9 < v < 1.09 \text{ pu}$.

Para o sistema II os limites foram $0.9 < v < 1.09 \text{ pu}$ quando se minimiza perdas com admitâncias shunt livres ou fixas e $0.85 < v < 1.15 \text{ pu}$ quando se minimiza custo de geração.

A variação de tap para o sistema I é dada por $0.94 < a < 1.06 \text{ pu}$ e para o sistema II os limites são os presentes no banco de dados.

O multiplicador de Lagrange λ (3.14) se divide em dois outros (α e β) conforme pode ser visto no Apêndice B através de (B.4) e (B.5). Para $c=0$ estes dois valores são arbitrários e feitos iguais a zero.

A função custo de geração utilizada para os dois sistemas em estudo foi arbitrada de modo a ter uma característica particular. Ela possui somente um termo quadrático como:

$$ct_i(p_{g_i}) = a_i \cdot p_{g_i}^2 \quad i=1, \dots, NAG \quad (5.2)$$

Nos bancos de dados dos sistemas em teste não estão disponíveis os coeficientes a_i em (5.2) e assim, estes foram arbitrados de tal modo que os primeiros geradores, lidos na sequência em que se encontram dispostos no banco de dados, são os mais baratos e portanto, devem gerar mais potência ativa enquanto que os últimos geradores são os mais caros e portanto, devem gerar menos potência ativa. O coeficiente a_i da função 5.2 é retirado da expressão:

$$a_i = \frac{i}{NAG} \quad i=1,..NAG \quad (5.3)$$

5.3 Descrição dos Testes

Os testes realizados sobre sistemas de grande porte são divididos em duas partes. Na primeira parte se analisa a robustez da metodologia paramétrica através da influência: do termo quadrático W na função objetivo; do parâmetro de folga ε nas restrições de desigualdade; e finalmente, do uso de diferentes soluções de partida. Na segunda parte, com base nas conclusões extraídas da primeira parte, são detalhados os resultados onde se verifica, entre outros aspectos, o tempo computacional e a qualidade da solução final.

5.3.1 Análise da Robustez da Metodologia Paramétrica

5.3.1.1 Termo Quadrático W

Como dito no capítulo 3, a presença deste termo na função objetivo do problema relaxado está associada à melhoria do condicionamento numérico do método ao resolver a família de problemas paramétricos. Com o intuito de identificar as faixas de variação deste termo para os quais os sistemas elétricos em teste tenham solução, é feita uma simulação para cada função objetivo atribuindo valores para W como: 1, 10, 100, 1.000, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 50.000 e 100.000.

Função Objetivo: Minimização do Custo de Geração ($w_1=1$)

O sistema I admite o uso de termos quadráticos indo de $W=1.000$ até $W=100.000$, enquanto que o sistema II admite uma faixa indo de $W=10.000$ até $W=100.000$.

Função Objetivo: Minimização de Perdas Ativas nas Linhas de Transmissão ($w_2=1$)

Os sistemas I e II admitem uma faixa de termos quadráticos indo de $W=1.000$ até $W=100.000$.

Função Objetivo: Minimização do Desvio de Tensão ($w_3=1$)

O sistema I admite uma ampla faixa de termos quadráticos indo de $W=1$ até $W=100.000$, enquanto que o sistema II admite uma faixa indo de $W=10$ até $W=100.000$.

Para alguns sistemas elétricos, ao se minimizar custo de geração ou perdas ativas nas linhas de transmissão, é necessária a inclusão da função desvio de tensão na função objetivo do problema relaxado. Nos sistemas brasileiros testados não se encontra uma solução, para estas funções objetivos, sem a participação da função desvio de tensão. Nos sistemas de pequeno porte não é necessária a presença desta função quando se minimiza perdas ativas ou custo de geração [Lima,1993], o que se conclui que sua presença não segue uma regra geral mas sim depende do sistema em estudo.

5.3.1.2 Parâmetro de folga ε

O parâmetro de folga ε é responsável pelo grau de relaxação sofrido pelas restrições de desigualdade inactiváveis e factíveis ativas no início do processo de otimização. Conforme o valor assumido por este termo, as restrições de

desigualdade relaxadas (parametrizadas) podem vir a integrar o conjunto ativo em diferentes valores do parâmetro de continuação. Assim, para pequenos valores de ε , as restrições parametrizadas podem vir a se tornarem ativas no início do caminho ao passo que para grandes valores, estas restrições podem vir a se tornarem ativas no final.

As restrições de desigualdade relaxadas no início do caminho só retornaram a seus limites verdadeiros após o parâmetro de continuação chegar ao valor $c=1$ conforme indica a equação (3.18). Entretanto, na estratégia IV, o processo de otimização paramétrica finaliza antes de $c=1$. O uso de valores elevados para o parâmetro de folga faria com que os limites das restrições relaxadas estivessem demasiadamente fora dos limites verdadeiros na solução final. Assim, é necessário o uso de valores pequenos para o parâmetro de folga pois desta forma, e dentro de uma precisão, se terá no final do caminho todos os limites retornados aos seus valores anteriores a relaxação. O valor $\varepsilon=10$ se mostrou eficiente para todas as funções e sistemas testados.

5.3.1.3 Solução Inicial

Em sistemas de pequeno porte foi mostrado que o método paramétrico leva a mesma solução final partindo de soluções diferentes [Lima,1993], [Almeida,1994]. Para averiguar a característica de independência da solução final diante da solução inicial em sistemas de grande porte, são testadas neste trabalho, mantendo as admitâncias shunt fixas, três inicializações para as funções desvio de tensão e perdas ativas.

Os testes utilizaram como inicialização os ângulos das tensões como dados pelo fluxo de carga, e foi feita a combinação destes com três valores de magnitudes de tensão. Para todas as barras as magnitudes de tensão foram feitas iguais a (i)1,02 pu, (ii)1,05 pu e (iii) valor dado pelo fluxo de carga. Os resultados para o sistema I são mostrados nas figuras 5.1 e 5.2. Na figura 5.1 é

apresentada a evolução da função desvio de tensão em função do número de iterações dadas para atualizar o parâmetro conforme (4.5). Na figura 5.2 é apresentado o resultado para a função perdas ativas.

O valor final da função desvio de tensão é 0,25 pu e os valores iniciais são, conforme a inicialização (i) 0,32, (ii) 2,02 e (iii) 0,9. O valor final da função perdas ativas é 4,69% e os valores iniciais são, conforme a inicialização (i) 4,62%, (ii) 4,89% e (iii) 4,76%.

As figuras 5.1 e 5.2 demonstram que para as duas funções objetivos a otimização paramétrica leva para um mesmo ponto solução. Uma outra observação que pode ser tirada destas duas figuras se refere ao processo de otimização ter um esforço maior ou menor para achar a solução do FPO conforme a inicialização escolhida. Assim, para as duas funções objetivos, o menor esforço, que se traduz através de um menor número de vezes que o parâmetro é atualizado, acontece quando a inicialização é feita por uma solução do fluxo de carga. O número de problemas paramétricos resolvidos, para a função desvio de tensão (Figura 5.1), é 9 para a inicialização (i), 13 para a (ii) e 7 para a (iii). Já para a função perdas ativas, o número de problemas paramétricos é 9 para a inicialização (i), 10 para a (ii) e 7 para a (iii).

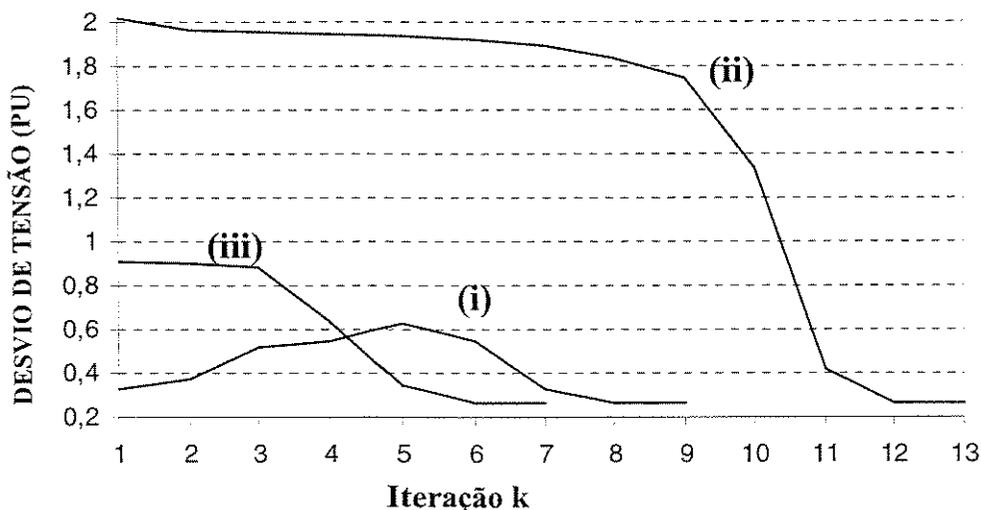


Figura 5.1: Função desvio de tensão para diferentes pontos de inicialização.

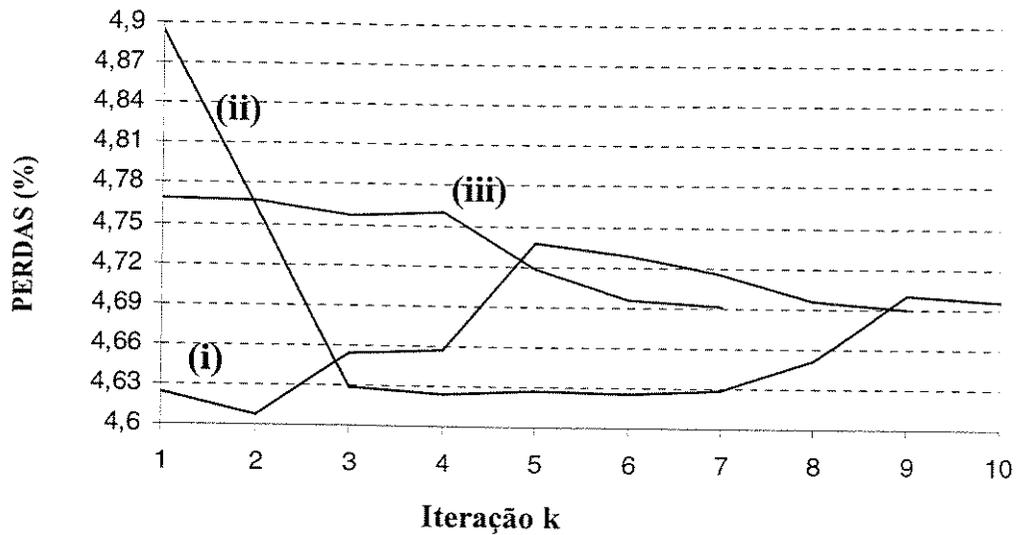


Figura 5.2: Função perdas ativas para diferentes pontos de partida.

5.3.2 Análise Global da Solução Final

Nesta seção são analisados o tempo computacional e a solução final para as funções objetivos perdas ativas e custo de geração. Na minimização da função perdas ativas é verificada a capacidade do modelo paramétrico encontrar uma solução ótima deixando todas as admitâncias livres para variar nos limites (5.1) e num segundo cenário as admitâncias são todas fixas.

5.3.2.1 Minimização de Perdas Ativas ($w_2=1$)

Esta função objetivo é resolvida com a participação da função desvio de tensão, sendo que na tabela 5.2 se encontra o peso adotado para ela nos dois sistemas testes. Ainda nesta tabela se encontra o valor do termo quadrático W em (3.16), as iterações do método de Newton-Raphson considerando admitâncias shunt livres, e o tempo computacional para os casos da matriz Hessiana constante e atualizada. Para o sistema I o termo w_3 referente a função desvio não se altera ao mudar o modo de tratamento da matriz Hessiana. Por outro lado, para o sistema II, é necessário aumentar este termo, para que haja

convergência, quando a matriz Hessiana é tratada como atualizada. Em decorrência deste aumento, o valor final da função perdas para o sistema II é diferente conforme a matriz Hessiana seja constante (5,16%) e atualizada (5,30%).

SIST.	PESOS				TEMPO (segundos)		ITERAÇÕES (Newton-Raphson)	
	constante		atualizada		constante	atualizada	constante	atualizada
	w_3	W	w_3	W				
I	3	10^4	3	10^4	55	83	142	77
II	3	10^4	9	10^4	244	620	186	220

Tabela 5.2: Resultados para a função objetivo perdas ativas.

No sistema II já se constata a influência do termo w_3 no valor final da função objetivo. Quanto maior seu valor, maior será o valor das perdas pois está se dando mais prioridade ao desvio de tensão em relação a 1 pu.

Da tabela 5.2 se observa que para os dois sistemas o tempo de CPU é menor quando se mantém a matriz Hessiana constante. Para o sistema II este tempo chega a ser 60% menor do que no caso em que a matriz Hessiana é atualizada.

As tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram a evolução do parâmetro para os sistemas I e II nos dois modos de tratamento da matriz Hessiana. Arelada à evolução do parâmetro, nesta tabela se encontra o número de violações que surgem e as que são removidas, o número de iterações e uma coluna informativa quando ocorre divergência. Entende-se por remoção de violação a incorporação das restrições ao conjunto ativo que não satisfazem (3.25) ou a retirada do conjunto ativo das restrições que não satisfazem (3.24).

No final da seção 4.5 são relatados três casos que podem levar a um mal condicionamento numérico. O **caso a** é aquele que devido a um aumento exagerado no parâmetro o método de Newton-Raphson não converge. Os **casos**

b.1 e **b.2** se referem a um mal condicionamento devido à atualização do conjunto ativo, sendo que no caso b.1 o parâmetro é atualizado e, no caso b.2 o parâmetro não é atualizado quando ocorre a divergência no método de Newton-Raphson. Assim, caso num determinado c_k ocorra divergência, na coluna intitulada diagnóstico aparecerá a frase **caso a**, **caso b.1** ou **caso b.2** informando o motivo da divergência. Os casos de divergência foram mais frequentes no sistema II, conforme atestam as tabelas 5.5 e 5.6.

A tabela 5.3 mostra que inicialmente o parâmetro é incrementado de $c=0$ para $c=0,9$ levando 2 iterações para encontrar a solução correspondente a este novo parâmetro. Esta solução possui 2 violações as quais por não terem nenhuma ligação ($q_{gl} - v_l$), conforme explicado na seção 4.5, são removidas simultaneamente. A partir de $c=0,9$ o parâmetro é novamente incrementado para $c=0,99$ levando 2 iterações para convergir o método de Newton-Raphson. A solução encontrada possui 12 violações e da mesma forma que no caso anterior são todas removidas simultaneamente. Após 3 iterações, a solução do FPOP(0,99) apresenta 6 violações que são todas removidas. Em seguida, outras 3 iterações são realizadas onde se obtém 3 violações. É feita a remoção simultânea destas 3 violações e após 2 iterações não há mais violações e o parâmetro é incrementado para $c=0,999$.

Ainda na tabela 5.3 e para $c=0,999$ após 3 iterações ocorrem 46 violações das quais apenas 41 foram removidas. Isto foi feito porque neste conjunto de violações foi encontrada pelo menos uma ligação ($q_{gl} - v_l$) e, para não comprometer a convergência, foi reduzido o número de violações a serem removidas. Após 3 iterações aparecem mais 19 violações as quais são todas removidas. O processo de remoção de violações prossegue até que não hajam mais violações e o parâmetro possa então ser incrementado.

SISTEMA I

PARÂMETRO	VIOLAÇÕES		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.9000000000	0	0	2	
0.9000000000	2	2	2	

0.9900000000	0	0	2	
0.9900000000	12	12	3	
0.9900000000	6	6	3	
0.9900000000	3	3	2	

0.9990000000	0	0	3	
0.9990000000	46	41	3	
0.9990000000	19	19	3	
0.9990000000	14	14	3	
0.9990000000	7	7	2	
0.9990000000	3	3	2	
0.9990000000	3	3	2	

0.9999000000	0	0	3	
0.9999000000	48	48	3	
0.9999000000	16	16	3	
0.9999000000	2	2	2	
0.9999000000	1	1	2	

0.9999900000	0	0	3	
0.9999900000	55	55	3	
0.9999900000	12	12	2	
0.9999900000	2	2	1	

0.9999990000	0	0	2	
0.9999990000	34	34	2	
0.9999990000	5	5	2	

0.9999999000	0	0	4	
0.9999999000	27	27	3	
0.9999999000	15	15	2	
0.9999999000	5	5	1	

0.9999999900	0	0	2	
0.9999999900	30	30	3	
0.9999999900	6	6	2	
0.9999999900	2	2	0	

Tabela 5.3: Evolução do parâmetro - Sistema I - Perdas ativas - Matriz atualizada.

As tabelas 5.3 e 5.4 são semelhantes, em termos do número de violações que surgem, até o sexto valor do parâmetro. Na tabela 5.4 ocorrem duas divergências devido a variação do parâmetro. Nas duas ocorrências, opta-se por

reduzir o parâmetro de continuação ao invés de reduzir o conjunto ativo. Se for reduzido só o conjunto ativo a divergência pode persistir e assim, novas reduções neste conjunto devem ser feitas o que acarretaria várias iterações.

Na primeira ocorrência, mesmo recuando o parâmetro ainda permanecem 27 violações que são também simultaneamente eliminadas. Só que agora o sistema apresenta convergência. Isto comprova que a decisão de recuar o parâmetro é bem adequada. Na segunda ocorrência, a divergência surge devido a variação do parâmetro e a incorporação simultânea de 23 violações. Para voltar a situação de convergência é feito também um recuo do parâmetro.

Após realizado o recuo, e resolvido o problema paramétrico associado ao novo parâmetro, este volta a assumir o valor que ocasiona divergência. Na maioria das vezes basta um recuo para que o sistema restabeleça a situação de convergência, mas se um recuo não for suficiente outros devem ser dados. O recuo do parâmetro corresponde a se buscar um conjunto ativo que associado a um determinado parâmetro faça o sistema (3.32) convergir para uma solução. Ainda na tabela 5.4 é observado que na segunda divergência do parâmetro este é recuado mas não é preciso mais avançá-lo pois o ponto ótimo já foi atendido.

Na tabela 5.5 os casos de divergência do método de Newton-Raphson são todos devidos a um aumento exagerado do parâmetro. Ainda nesta tabela se verifica que foram necessários 7 recuos ao variar o parâmetro de $c=0.999$ até $c=0.9999$. Os valores dos parâmetros recuados são obtidos da mesma forma que na estratégia I ou seja, eles são um valor médio entre o parâmetro no qual o sistema (3.32) convergiu e o valor do parâmetro no qual se situa a divergência.

Na tabela 5.6 os problemas de divergências encontrados são devidos tanto ao aumento do parâmetro como à atualização do conjunto ativo. Isto mostra que no caminho em busca da solução do FPO várias situações de mal

condicionamento numérico podem ser determinadas não havendo uma tendência para uma ou outra situação.

SISTEMA I

PARÂMETRO	VIOLAÇÕES		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.9000000000	0	0	3	
0.9000000000	2	2	3	

0.9900000000	0	0	3	
0.9900000000	12	12	4	
0.9900000000	6	6	5	
0.9900000000	3	3	2	

0.9990000000	0	0	6	
0.9990000000	46	41	7	
0.9990000000	19	19	5	
0.9990000000	14	14	4	
0.9990000000	7	7	2	
0.9990000000	3	3	3	
0.9990000000	3	3	2	

0.9999000000	0	0	5	
0.9999000000	48	48	4	
0.9999000000	16	16	3	
0.9999000000	2	2	2	
0.9999000000	1	1	3	

0.9999900000	0	0	4	
0.9999900000	55	55	4	
0.9999900000	12	12	3	
0.9999900000	2	2	1	

0.9999990000	0	0	3	
0.9999990000	34	34	3	
0.9999990000	5	5	2	

0.9999999000	0	0	3	
0.9999999000	27	27	7	Caso b.1

0.9999994500	27	27	2	
0.9999994500	15	15	2	
0.9999994500	2	2	1	

0.9999999000	0	0	3	
0.9999999000	23	23	31	Caso b.1

0.9999996750	23	23	2	
0.9999996750	11	11	3	
0.9999996750	7	7	2	

Tabela 5.4: Evolução do parâmetro - Sistema I - Perdas ativas - Matriz constante.

PARÂMETRO	SISTEMA II		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	VIOLAÇÕES ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.9000000000	0	0	8	
0.9000000000	1	1	6	
0.9900000000	0	0	5	
0.9900000000	11	11	5	
0.9900000000	2	2	1	
0.9990000000	0	0	8	
0.9990000000	31	31	5	
0.9990000000	2	2	2	
0.9999000000	0	0	2	Caso a
0.9994500000	0	0	5	
0.9994500000	56	56	3	
0.9994500000	8	8	2	
0.9994500000	6	6	3	
0.9994500000	2	2	3	
0.9999000000	0	0	9	Caso a
0.9996750000	0	0	5	
0.9996750000	56	56	2	
0.9996750000	5	5	1	
0.9999000000	0	0	5	Caso a
0.9997875000	0	0	4	
0.9997875000	50	50	20	
0.9997875000	3	3	1	
0.9999000000	0	0	13	Caso a
0.9998437500	0	0	3	
0.9998437500	41	41	2	
0.9999000000	0	0	7	Caso a
0.9998718750	0	0	4	
0.9998718750	25	25	13	
0.9998718750	2	2	1	
0.9999000000	0	0	3	Caso a
0.9998859375	0	0	10	
0.9998859375	23	23	2	
0.9999000000	0	0	6	Caso a
0.9998929687	0	0	6	
0.9998929687	15	15	1	
0.9999000000	0	0	9	
0.9999000000	22	22	1	

Tabela 5.5: Evolução do parâmetro - Sistema II - Perdas ativas - Matriz constante.

PARÂMETRO	SISTEMA II		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	VIOLAÇÕES ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.9000000000	0	0	5	
0.9000000000	1	1	6	
0.9900000000	0	0	6	
0.9900000000	12	12	5	
0.9900000000	2	2	1	
0.9990000000	0	0	7	
0.9990000000	66	66	3	
0.9990000000	9	9	2	
0.9990000000	4	4	3	
0.9990000000	2	2	2	
0.9999000000	0	0	16	Caso a
0.9994500000	0	0	8	
0.9994500000	76	76	16	Caso b.1
0.9992250000	76	76	7	
0.9992250000	67	67	13	
0.9992250000	10	10	3	
0.9992250000	1	1	1	
0.9994500000	0	0	12	
0.9994500000	54	54	3	
0.9999000000	0	0	5	
0.9999000000	94	94	16	Caso b.1
0.9996750000	94	94	5	
0.9996750000	48	48	11	
0.9996750000	4	4	1	
0.9996750000	1	1	1	
0.9999000000	0	0	10	
0.9999000000	64	64	3	
0.9999000000	5	5	2	
0.9999900000	0	0	16	Caso a
0.9999450000	0	0	16	Caso a
0.9999225000	0	0	13	
0.9999225000	38	38	2	

Tabela 5.6: Evolução do parâmetro - Sistema II - Perdas ativas - Matriz atualizada.

Através da análise das quatro maiores e quatro menores magnitudes de tensão, correspondentes as barras de geração (PV) e barras de carga (PQ), e do

valor médio de todas as magnitudes de tensão das barras PV e PQ do sistema em teste, tem-se uma amostragem bem fiel do comportamento destas obtidas do fluxo de carga e otimizadas com admitâncias shunt livres e com admitâncias shunt fixas. Nas tabelas 5.7 e 5.8 estes valores são organizados conforme o sistema em teste.

		SISTEMA I						
		FLUXO DE CARGA		SHUNT FIXO		SHUNT LIVRE		
		BARRA	TENSÃO	BARRA	TENSÃO	BARRA	TENSÃO	
B A R R A S P V	Máximos	1420	1,0770	1241	1,0867	94	1,0500	
		1430	1,0600	1250	1,0850	722	1,0500	
		1431	1,0540	722	1,0745	710	1,0500	
		67	1,0500	1253	1,0723	720	1,0500	
	Mínimos	38	0,9800	152	0,9695	1130	0,9893	
		82	0,9800	1431	0,9492	756	0,9777	
		835	0,9700	1428	0,9475	1438	0,9716	
		1131	0,9380	1438	0,9017	152	0,9604	
	Média	1,0258		1,0120		1,0129		
	B A R R A S P Q	Máximos	1439	1,1985	1439	1,0900	736	1,0500
			1440	1,1985	1440	1,0900	1141	1,0500
			1102	1,1684	1110	1,0790	1214	1,0500
1427			1,1520	736	1,0596	1227	1,0500	
Mínimos		1366	0,9275	1464	0,9386	355	0,9496	
		1364	0,9263	355	0,9380	1324	0,9476	
		1357	0,9247	1448	0,9333	63	0,9436	
		1365	0,9243	1423	0,9165	151	0,9411	
Média		1,0030		1,005		1,0061		
Perdas(%)		4,76		4,69		4,63		

Tabela 5.7: Perfil de tensão para o sistema I.

Na tabela 5.7, para as admitâncias shunt livres, o perfil de tensão é bastante melhorado em relação ao caso com admitâncias shunt fixas o que leva a se concluir que o sistema ainda necessita de mais fontes de reativos para manter as magnitudes de tensão dentro dos limites $0.95 \leq v \leq 1.05 pu$. O valor da função perdas apresentou maior redução quando as admitâncias shunt ficaram

livres. Isto já era de se esperar pois nesta configuração os reativos que o sistema necessita são gerados localmente, o que evita sua circulação nas linhas de transmissão.

Na tabela 5.8 não houve uma grande alteração nos valores da função perdas ou mesmo das magnitudes de tensões com as admitâncias shunt fixas ou livres. A razão para isso reside no fato do sistema II, do ponto de vista de reativos, estar bem planejado, não havendo necessidade de variar as admitâncias shunt para atender os limites de tensão impostos.

		SISTEMA II						
		FLUXO DE CARGA		SHUNT FIXO		SHUNT LIVRE		
		BARRA	TENSÃO	BARRA	TENSÃO	BARRA	TENSÃO	
B A R R A S P V	Máximos	1068	1,0800	2715	1,0804	2715	1,0750	
		33	1,0800	1065	1,0692	1065	1,0654	
		1071	1,0750	2768	1,0547	1071	1,0545	
		1065	1,0700	1071	1,0560	1068	1,0508	
	Mínimos	2357	0,9360	17	0,9833	196	0,9818	
		6	0,9310	196	0,9825	1686	0,9753	
		8	0,9100	1686	0,9761	1211	0,9684	
		5	0,885	45	0,9379	45	0,9309	
	Média	1,0245		1,0146		1,0120		
	B A R R A S P Q	Máximos	1182	1,1301	169	1,0900	169	1,0900
			1181	1,1282	2701	1,0900	2701	1,0900
			1992	1,1091	339	1,0841	339	1,0856
1993			1,1091	2765	1,0839	2765	1,0835	
Mínimos		1889	0,8154	1795	0,9008	1888	0,9029	
		1894	0,7973	1660	0,9000	1795	0,9021	
		1875	0,7932	1888	0,9000	1660	0,9000	
		1888	0,7875	1896	0,9000	1896	0,9000	
Média		1,0077		1,0043		1,0040		
Perdas(%)		5,23		5,17		5,16		

Tabela 5.8: Perfil de tensão para o sistema II.

As figuras 5.3 a 5.6 mostram uma comparação entre as dez maiores e as dez menores magnitudes de tensão obtidas do fluxo de carga e suas correspondentes oriundas da solução do FPOP considerando as admitâncias shunt fixas e livres. Na figura 5.3 se verifica que há uma grande diferença entre os valores com admitâncias shunt livres e fixas, ao contrário do que indica a figura 5.4 para as menores tensões. Assim pode-se concluir que o sistema I necessita de mais fontes reativas indutivas para conter as maiores magnitudes de tensão. Já para o sistema II não há grandes variações para as magnitudes de tensão para os dois casos de admitâncias shunt, conforme mostram as figuras 5.5 e 5.6.

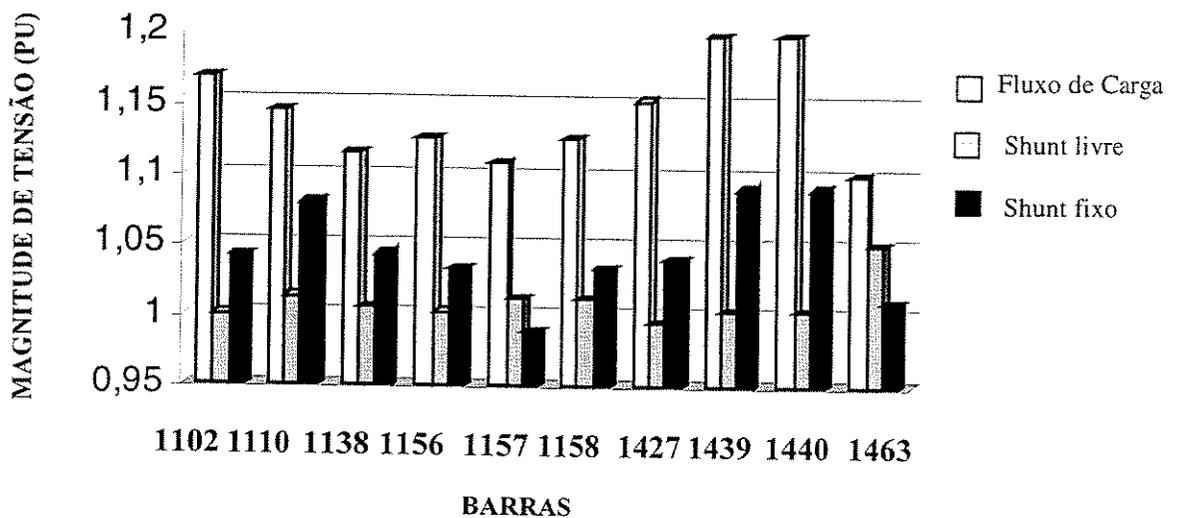


Figura 5.3: Maiores tensões do fluxo de carga para o sistema I.

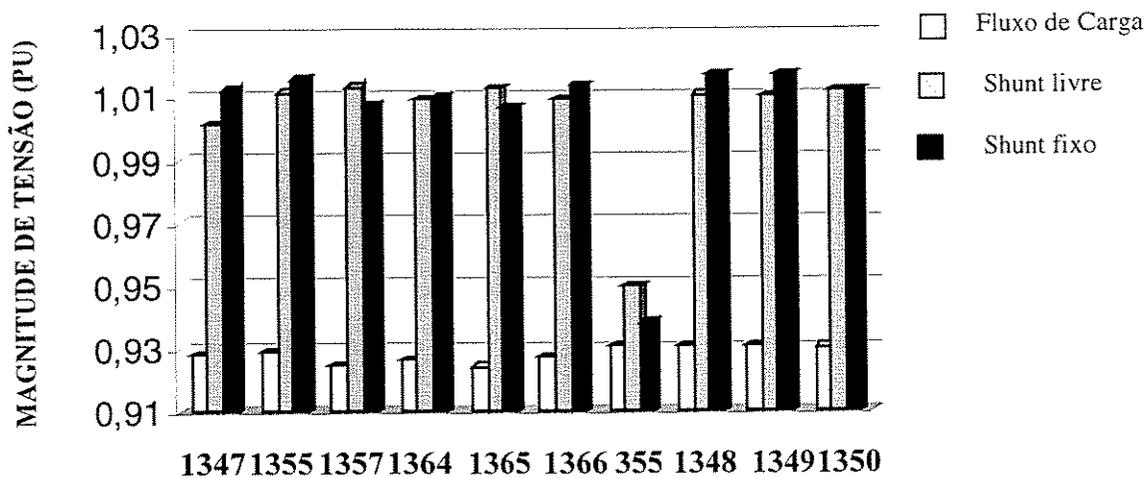


Figura 5.4: Menores tensões do fluxo de carga para o sistema I.

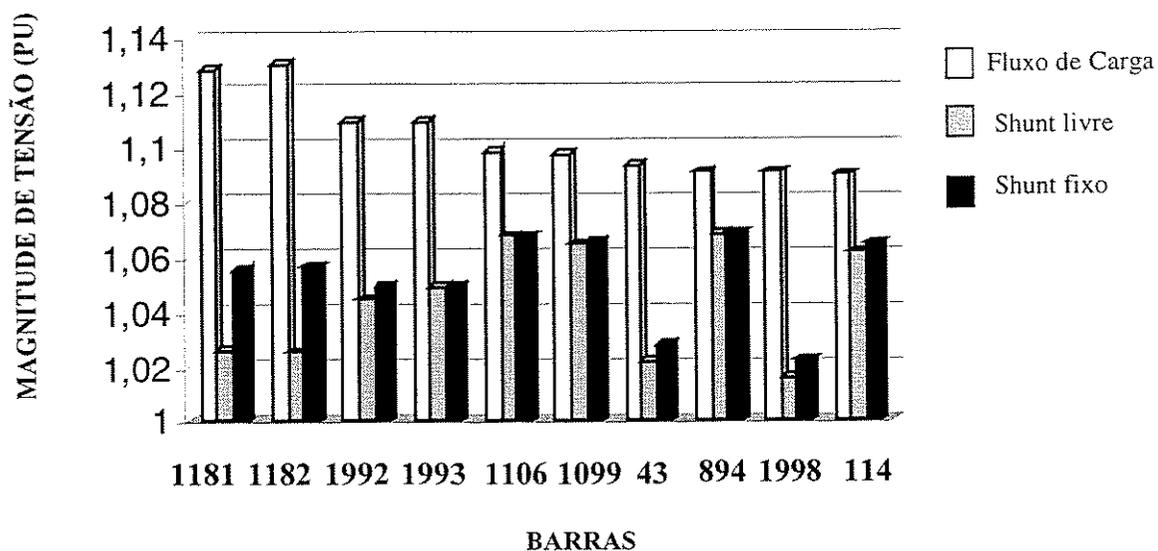


Figura 5.5: Maiores tensões do fluxo de carga para o sistema II.

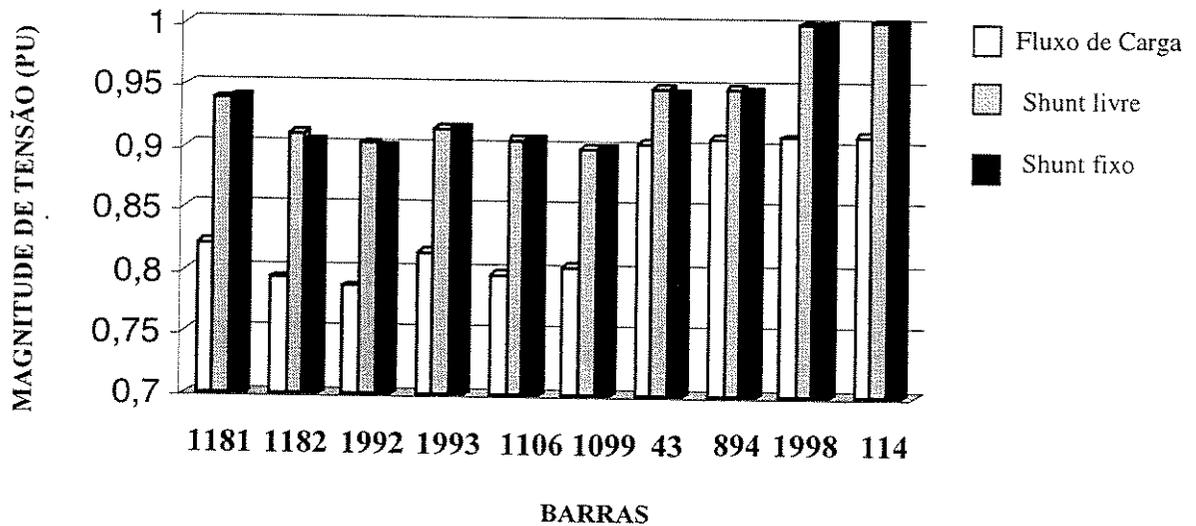


Figura 5.6: Menores tensões do fluxo de carga para o sistema II.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram a evolução da função perdas em percentual para os sistemas I e II, respectivamente, com admitâncias shunt livres.

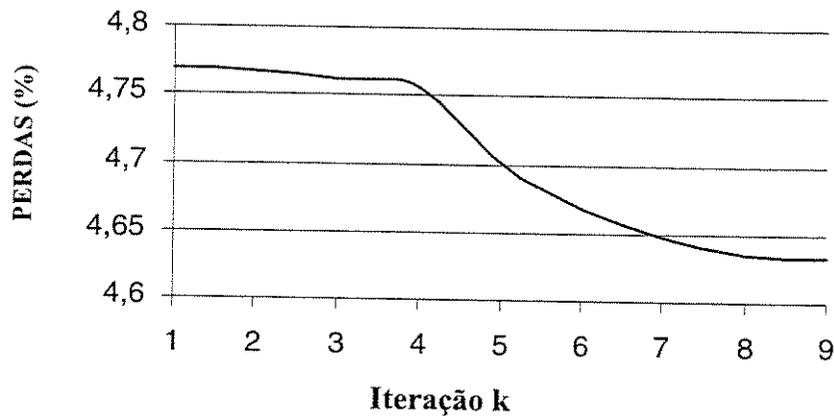


Figura 5.7: Evolução da função perdas para o sistema I.

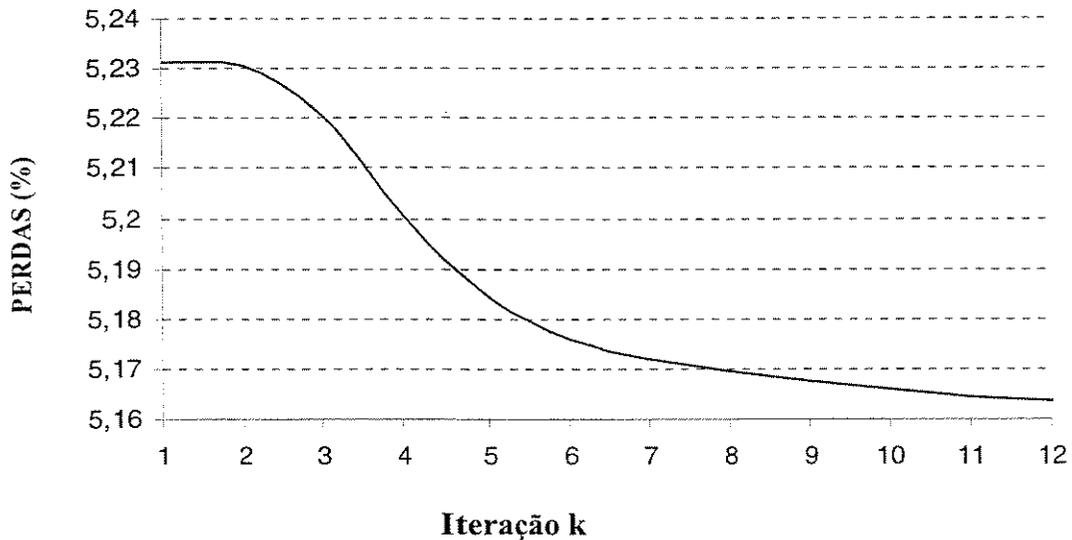


Figura 5.8: Evolução da função perdas para o sistema II.

As tabelas 5.9 a 5.16 mostram o conjunto ativo das gerações reativas e magnitudes de tensão para os dois sistemas com admitâncias shunt livres e fixas. No sistema I, representado nas tabelas 5.9 e 5.11, há uma pequena diferença no número de geradores (3 geradores) no limite conforme é mudada o tratamento das admitâncias shunt. Já para o sistema II houve um aumento considerável na geração reativa (10 geradores) conforme se mudam as admitâncias shunt.

O conjunto ativo relativo às magnitudes de tensão só mudou para o sistema I (tabelas 5.10 e 5.12) haja visto que os limites de tensão para o caso de admitâncias shunt livres foi menor que o caso com admitâncias shunt fixas. Para o sistema II não houve alteração expressiva no conjunto ativo relativo as magnitudes de tensão (tabelas 5.14 e 5.16).

SISTEMA I

BARRA	TENSÃO (pu)	GERAÇÃO (Mvar)	MULTIPLICADOR (pu)
19	1.0000	30.00	0.03720
29	1.0117	26.00	0.01403
38	1.0136	30.00	0.04042
82	1.0366	100.00	0.01749
94	1.0436	60.00	0.00058
145	1.0125	30.00	0.03389
152	0.9665	19.00	0.19915
199	1.0155	19.00	0.03826
245	1.0127	19.00	0.02824
340	1.0143	4.50	0.02215
349	1.0209	14.50	0.04498
399	0.9955	1.00	0.06832
756	0.9859	10.00	0.03544
768	1.0365	100.00	0.03301
1104	1.0282	10.00	0.00008
1113	0.9970	65.00	0.02170
1126	1.0000	70.00	0.00036
1242	1.0000	100.00	0.01485
1420	1.0402	208.00	0.00047
1421	1.0006	89.00	0.00247
1436	1.0000	89.00	0.00094
175	1.0198	-28.00	-0.00132
673	1.0316	-80.00	-0.00603
983	1.0000	-2.60	-0.01349
1134	1.0372	-300.00	-0.00082
1181	0.9722	-100.00	-0.00073
1249	1.0284	-175.00	-0.00272
1257	1.0444	-300.00	-0.00027

Tabela 5.9: Gerações reativas do sistema I no limite com admitâncias shunt fixas.

BARRA	TENSÃO (pu)	MULTIPLICADOR (pu)
1439	1.0900	3.75655
1440	1.0900	3.75655

Tabela 5.10: Tensões do sistema I no limite com admitâncias shunt fixas.

SISTEMA I

BARRA	TENSÃO (pu)	GERAÇÃO (Mvar)	MULTIPLICADOR (pu)
19	1.0000	30.00	0.10133
29	1.0122	26.00	0.07943
38	1.0079	30.00	0.09839
82	1.0338	100.00	0.07498
94	1.0500	60.00	0.00268
145	1.0134	30.00	0.09720
152	0.9604	19.00	0.63556
199	1.0159	19.00	0.10462
245	1.0129	19.00	0.07253
340	1.0139	4.50	0.01726
349	1.0208	14.50	0.03927
399	0.9959	1.00	0.05756
702	1.0354	19.00	0.05307
756	0.9777	10.00	0.08889
768	1.0322	100.00	0.09641
1104	1.0349	10.00	0.00038
1113	0.9963	65.00	0.02930
1242	1.0000	100.00	0.01439
1391	1.0000	58.00	0.00000
1421	1.0004	89.00	0.00181
1436	1.0000	89.00	0.00038
175	1.0254	-28.00	-0.00222
673	1.0240	-80.00	-0.00456
983	0.9986	-2.60	-0.00500
1130	0.9893	-200.00	-0.00018
1134	1.0206	-300.00	-0.00210
1181	0.9957	-100.00	-0.00045
1249	1.0237	-175.00	-0.00187
1257	1.0395	-300.00	-0.00041
1260	1.0266	-175.00	-0.00101
1389	1.0000	-100.00	-0.00011

Tabela 5.11: Gerações reativas do sistema I no limite com admitâncias shunt livres.

BARRA	TENSÃO (pu)	MULTIPLICADOR (pu)
94	1.0500	0.40187
151	0.9400	-1.10487
153	0.9400	-1.10742
710	1.0500	0.08773
720	1.0500	0.05171
722	1.0500	1.68295
736	1.0500	1.82911

1117	1.0500	0.10695
1141	1.0500	0.79519
1214	1.0500	0.20935
1227	1.0500	0.20223
1241	1.0500	0.13500
1250	1.0500	0.59560
1253	1.0500	0.11170
1286	1.0500	0.01834
1309	1.0500	0.01515
1420	1.0500	0.07597
1429	1.0500	0.00373
1430	1.0500	0.27817
1453	1.0500	0.39123
1463	1.0500	0.88874

Tabela 5.12: Tensões do sistema I no limite com admitâncias shunt livres.

SISTEMA II			
BARRA	TENSÃO (pu)	GERAÇÃO (Mvar)	MULTIPLICADOR (pu)
4	1.0466	250.00	0.00382
196	0.9818	-234.99	0.00936
370	1.0113	18.01	0.04230
851	0.9931	46.00	0.01154
853	1.0328	175.00	0.00232
1067	1.0146	46.00	0.00020
1491	0.9978	2.31	0.00785
1524	1.0016	4.81	0.00005
1670	1.0187	25.30	0.01120
1686	0.9753	3.01	0.14452
1697	1.0024	4.50	0.05521
1835	0.9949	12.00	0.01508
1907	0.9920	12.01	0.08277
2029	1.0142	26.01	0.00324
2071	0.9915	1.01	0.01063
2087	1.0014	1.01	0.04706
2245	1.0091	18.01	0.02177
2340	1.0071	7.50	0.00683
2357	1.0023	3.30	0.02200
2421	1.0021	7.50	0.00166
2704	0.9999	38.01	0.00277
1676	1.0237	-1.01	-0.01813
1694	1.0335	-1.00	-0.04402
1698	1.0130	-1.00	-0.00602
1771	1.0210	7.00	-0.00392
2152	1.0093	-9.00	-0.00487

Tabela 5.13: Gerações reativas do sistema II no limite com admitâncias shunt livres.

BARRA	TENSÃO (pu)	MULTIPLICADOR (pu)
169	1.0900	1.11624
1660	0.9000	-0.22062
1896	0.9000	-1.31642
2701	1.0900	0.01288

Tabela 5.14: Tensões do sistema II no limite com admitâncias shunt livres.

SISTEMA II			
BARRA	TENSÃO (pu)	GERAÇÃO (Mvar)	MULTIPLICADOR (pu)
4	1.0492	250.00	0.00794
196	0.9825	-234.99	0.00925
370	1.0116	18.01	0.04396
851	0.9931	46.00	0.01226
853	1.0328	175.00	0.00303
1403	1.0302	56.00	0.01312
1484	1.0329	140.00	0.00060
1491	0.9992	2.31	0.01589
1493	0.9909	1.60	0.30730
1524	0.9914	4.81	0.22478
1565	1.0322	72.00	0.00001
1670	1.0192	25.30	0.01012
1686	0.9761	3.01	0.13634
1689	0.9950	13.80	0.07001
1697	1.0032	4.50	0.04719
1771	1.0120	7.01	0.05163
1835	0.9935	12.00	0.03533
1907	0.9922	12.01	0.09291
1990	1.0471	30.00	0.01942
2029	1.0146	26.01	0.00571
2071	0.9930	1.01	0.00993
2087	1.0015	1.01	0.05060
2245	1.0091	18.01	0.02393
2276	1.0114	8.01	0.00286
2340	1.0074	7.50	0.01532
2357	0.9983	3.30	0.12940
2421	1.0029	7.50	0.00880
2704	1.0001	38.01	0.00791
2710	1.0395	74.01	0.00407
1676	1.0236	-1.01	-0.01733
1694	1.0302	-1.00	-0.03610
1696	1.0240	-1.00	-0.00221
1698	1.0134	-1.00	-0.00571

1802	1.0209	-7.00	-0.18684
1850	1.0182	-30.00	-0.00601
2152	1.0092	-9.00	-0.00119

Tabela 5.15: Gerações reativas do sistema II no limite com admitâncias shunt fixas.

BARRA	TENSÃO (pu)	MULTIPLICADOR (pu)
169	1.0900	1.36958
1660	0.9000	-0.51714
1888	0.9000	-2.90329
2701	1.0900	0.05293

Tabela 5.16: Tensões do sistema II no limite com admitâncias shunt fixas.

5.3.2.2 Minimização do Custo de Geração ($w_I = I$)

Da mesma forma que a função anterior, a função custo de geração necessita do auxílio da função desvio de tensão para realizar a otimização. Na tabela 5.17 são dispostos os mesmos termos usados na tabela 5.2. Os limites de geração ativa adotados para os dois sistemas foram estipulados como sendo 1,05 e 0,95 do valor da geração ativa de cada barra.

Nesta tabela o tempo de CPU é menor para os dois sistemas com a matriz Hessiana constante. No sistema II a redução do tempo atinge 60% com a matriz Hessiana constante. Pode-se notar que o número de iterações para matriz Hessiana constante é superior ao número de iterações quando esta matriz é atualizada.

SIST.	PESOS		TEMPO (segundos)		ITERAÇÕES (Newton-Raphson)	
	w_3	W	constante	atualizada	constante	atualizada
I	10	10000	60	94	134	59
II	10	10000	289	720	156	119

Tabela 5.17: Resultados para a função objetivo custo de geração.

Além da divergência devido a um aumento exagerado do parâmetro, é possível se ter também divergência devido a escolha do conjunto ativo. De fato, durante a otimização está se buscando o conjunto de restrições de desigualdades ativas que juntamente com as restrições de igualdade formam o sistema (3.32). Se uma restrição é incorporada ou retirada indevidamente isto pode se refletir num mal condicionamento da matriz Hessiana de (3.32) levando à divergência do método de Newton-Raphson. Uma tentativa de minimizar o aparecimento de mal condicionamento desta matriz é feita através da verificação da existência de ligações do tipo geração reativa-magnitude de tensão numa mesma barra. Por outro lado, caso não haja ligações do tipo acima descrito e o sistema (3.33) tenha divergência, então o problema dispõe de um meio para voltar a convergência. É feita uma redução no número de violações que foram removidas e que causaram divergência.

Entre as tabelas 5.18 e 5.19 não há grandes alterações, ao contrário do que ocorre com as tabelas 5.20 e 5.21. Na tabela 5.18, para $\epsilon=0.999$, o método de Newton-Raphson executa 7 iterações e encontra 45 violações as quais são todas removidas levando o sistema (3.33) a executar 26 iterações e, cuja solução possui 32 violações. Destas violações apenas 8 são removidas pois é encontrada alguma barra com violações simultâneas de geração reativa e magnitude de tensão. Entretanto, ao removê-las o sistema (3.33) diverge, atingindo o limite máximo de iterações. Nesta situação o conjunto ativo é reduzido pela metade. Assim, volta-se ao ponto com 32 violações e removem-se 4 violações. Após 4 iterações surgem 17 violações. A partir daí se verifica que o problema volta a convergir. O processo prossegue de modo semelhante ao comentado para as tabelas 5.3 a 5.6.

SISTEMA I

PARÂMETRO	VIOLAÇÕES		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.9000000000	0	0	6	
0.9000000000	26	26	3	
0.9000000000	2	2	3	

0.9900000000	0	0	5	
0.9900000000	46	46	5	
0.9900000000	16	16	3	
0.9900000000	4	4	2	
0.9900000000	1	1	1	

0.9990000000	0	0	7	
0.9990000000	45	45	26	
0.9990000000	32	8	31	Caso b.2

0.9990000000	32	4	4	
0.9990000000	17	2	0	
0.9990000000	15	15	8	
0.9990000000	4	4	3	
0.9990000000	1	1	0	

0.9999000000	0	0	7	
0.9999000000	22	22	3	
0.9999000000	7	7	3	

0.9999900000	0	0	4	
0.9999900000	14	14	4	
0.9999900000	3	3	2	
0.9999900000	1	1	1	

0.9999990000	0	0	2	
0.9999990000	1	1	1	

Tabela 5.18: Evolução do parâmetro - Sistema I - Custo de geração - Matriz constante.

SISTEMA I

PARÂMETRO	VIOLAÇÕES		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.90000000000	0	0	3	
0.90000000000	26	26	2	
0.90000000000	2	2	3	

0.99000000000	0	0	3	
0.99000000000	46	46	3	
0.99000000000	16	16	3	
0.99000000000	4	4	2	
0.99000000000	1	1	1	

0.99900000000	0	0	3	
0.99900000000	45	45	4	
0.99900000000	33	8	4	
0.99900000000	20	20	3	
0.99900000000	4	4	3	
0.99900000000	1	1	1	

0.99990000000	0	0	3	
0.99990000000	23	23	3	
0.99990000000	7	7	2	

0.99999000000	0	0	3	
0.99999000000	14	14	3	
0.99999000000	3	3	2	
0.99999000000	1	1	1	

0.99999900000	0	0	3	
0.99999900000	1	1	1	

Tabela 5.19: Evolução do parâmetro - Sistema I - Custo de geração - Matriz atualizada.

Na tabela 5.20, para $c=0.999$, ocorrem 118 violações que são todas eliminadas o que provoca divergência. Como este é o primeiro conjunto ativo opta-se por reduzir o parâmetro ao invés de reduzir o conjunto ativo. Recua-se o parâmetro para $c=0.9945$ e após 4 iterações ainda continuam as 118 violações que são novamente todas de uma só vez eliminadas só que desta vez o sistema apresenta convergência. Na tabela 5.21 ocorre o mesmo problema de divergência só que para outro valor do parâmetro assim, a mesma decisão é tomada.

SISTEMA II

PARÂMETRO	VIOLAÇÕES		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.9000000000	0	0	5	
0.9000000000	49	49	4	
0.9000000000	22	22	4	
0.9000000000	10	10	3	
0.9000000000	1	1	0	

0.9900000000	0	0	4	
0.9900000000	110	110	16	
0.9900000000	51	51	11	
0.9900000000	31	31	6	
0.9900000000	9	9	2	
0.9900000000	1	1	2	

0.9990000000	0	0	5	
0.9990000000	118	118	6	Caso b.1

0.9945000000	118	118	4	
0.9945000000	75	75	4	
0.9945000000	41	41	3	
0.9945000000	10	10	2	
0.9945000000	1	1	1	

0.9990000000	0	0	5	
0.9990000000	79	27	7	
0.9990000000	65	65	4	
0.9990000000	37	37	4	
0.9990000000	9	9	2	
0.9990000000	1	1	0	

0.9999000000	0	0	7	
0.9999000000	77	77	7	
0.9999000000	35	35	4	
0.9999000000	13	13	3	
0.9999000000	3	3	2	

0.9999900000	0	0	5	
0.9999900000	33	33	5	
0.9999900000	15	15	3	
0.9999900000	4	4	2	

0.9999990000	0	0	4	
0.9999990000	14	14	4	
0.9999990000	2	2	2	
0.9999990000	2	2	2	

0.9999999000	0	0	2	

Tabela 5.20: Evolução do parâmetro - Sistema II - Custo de geração - Matriz constante.

SISTEMA II

PARÂMETRO	VIOLAÇÕES		ITERAÇÕES	DIAGNÓSTICO
	ENCONTRADAS	REMOVIDAS		
0.90000000000	0	0	2	
0.90000000000	10	10	3	
0.90000000000	1	1	0	

0.99000000000	0	0	3	
0.99000000000	58	58	3	
0.99000000000	15	15	3	
0.99000000000	10	10	3	

0.99900000000	0	0	3	
0.99900000000	112	112	4	
0.99900000000	127	24	5	
0.99900000000	57	57	4	
0.99900000000	34	14	4	
0.99900000000	32	32	4	
0.99900000000	10	10	3	
0.99900000000	5	5	3	

0.99990000000	0	0	4	
0.99990000000	110	110	3	
0.99990000000	58	58	4	
0.99990000000	24	24	3	
0.99990000000	5	5	3	
0.99990000000	1	1	0	

0.99999000000	0	0	3	
0.99999000000	97	97	1	Caso b.1

0.99994500000	97	97	4	
0.99994500000	66	66	3	
0.99994500000	21	21	3	
0.99994500000	2	2	2	

0.99999000000	0	0	3	
0.99999000000	59	59	3	
0.99999000000	23	23	3	
0.99999000000	9	9	3	
0.99999000000	1	1	1	

0.99999900000	0	0	4	
0.99999900000	24	24	4	
0.99999900000	14	14	3	
0.99999900000	1	1	1	

0.99999990000	0	0	3	
0.99999990000	15	15	3	
0.99999990000	3	3	3	
0.99999990000	2	2	2	

0.99999999000	0	0	3	

Tabela 5.21: Evolução do parâmetro - Sistema II - Custo de geração - Matriz atualizada.

As tabelas 5.22 e 5.23 mostram o perfil de tensão das quatro maiores e quatro menores barras de carga (PQ) e de geração (PV), seguido dos valores médios de tensão de todas as barras PQ e PV, encontradas no fluxo de carga e na solução do FPOP. Na função custo de geração os valores das magnitudes de tensão são bem diferentes dos obtidos para a função perdas pois os taps e admitâncias shunt estão fixos, nos valores encontrados no banco de dados, fazendo com que se adote limites mais abertos para os sistemas I e II. As figuras 5.9 e 5.10 mostram a evolução da função custo de geração.

		SISTEMA I				
		FLUXO DE CARGA		CUSTO DE GERAÇÃO		
		BARRA	TENSÃO	BARRA	TENSÃO	
B A R R A S P V	Máximos	1420	1,0770	722	1,09	
		1430	1,0600	720	1,0703	
		1431	1,0540	1134	1,0703	
		67	1,0500	176	1,0526	
	Mínimos	38	0,9800	1181	0,9478	
		82	0,9800	152	0,9478	
		835	0,9700	1438	0,9449	
		1131	0,9380	1113	0,9273	
	Média	1,0258		1,0120		
	B A R R A S P Q	Máximos	1439	1,1985	1102	1,09
			1440	1,1985	1110	1,09
			1102	1,1684	1439	1,09
1427			1,1520	1440	1,09	
Mínimos		1366	0,9275	153	0,9260	
		1364	0,9263	1232	0,9233	
		1357	0,9247	1423	0,9124	
		1365	0,9243	1185	0,9047	
Média		1,0030		0,9994		
Custo(\$)		224,07		219,16		

Tabela 5.22: Perfil de tensão para o sistema I.

		SISTEMA II				
		FLUXO DE CARGA		CUSTO DE GERAÇÃO		
		BARRA	TENSÃO	BARRA	TENSÃO	
B A R R A S P V	Máximos	1068	1,0800	33	1,1395	
		33	1,0800	1918	1,1061	
		1071	1,0750	1802	1,0993	
		1065	1,0700	1990	1,0963	
	Mínimos	2357	0,9360	48	0,9556	
		6	0,9310	1907	0,9553	
		8	0,9100	6	0,9355	
		5	0,8850	2087	0,9244	
	Média	1,0245		1,0180		
	B A R R A S P Q	Máximos	1182	1,1301	1794	1,1304
			1181	1,1282	1796	1,1304
			1992	1,1091	1804	1,1123
1993			1,1091	34	1,1140	
Mínimos		1889	0,8154	1875	0,8554	
		1894	0,7973	1660	0,8500	
		1875	0,7932	1888	0,8500	
		1888	0,7875	1894	0,8500	
Média		1,0077		1,0044		
Custo(\$)		165,77		152,69		

Tabela 5.23: Perfil de tensão para o sistema II.

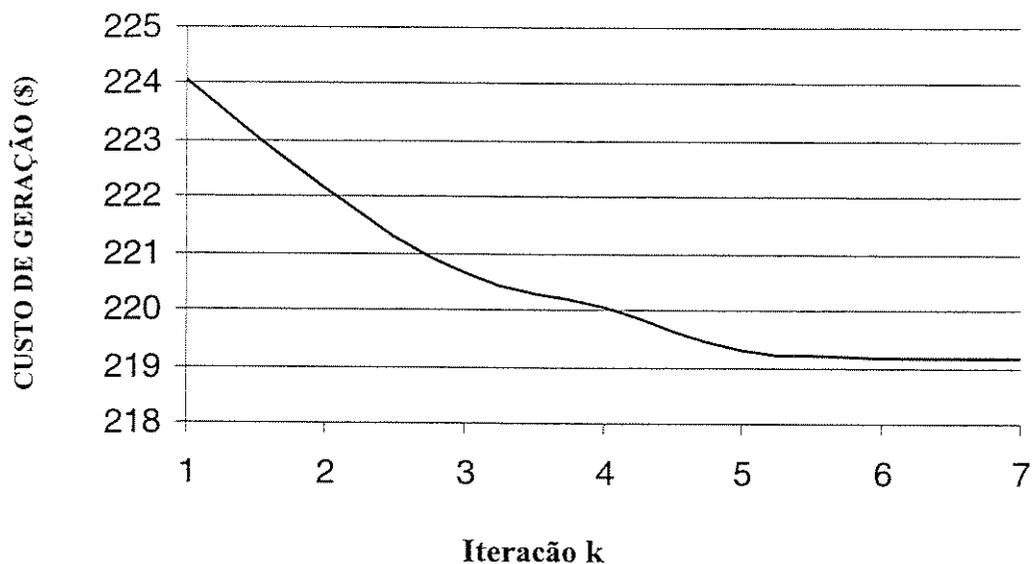


Figura 5.9: Evolução da função custo de geração para o sistema I.

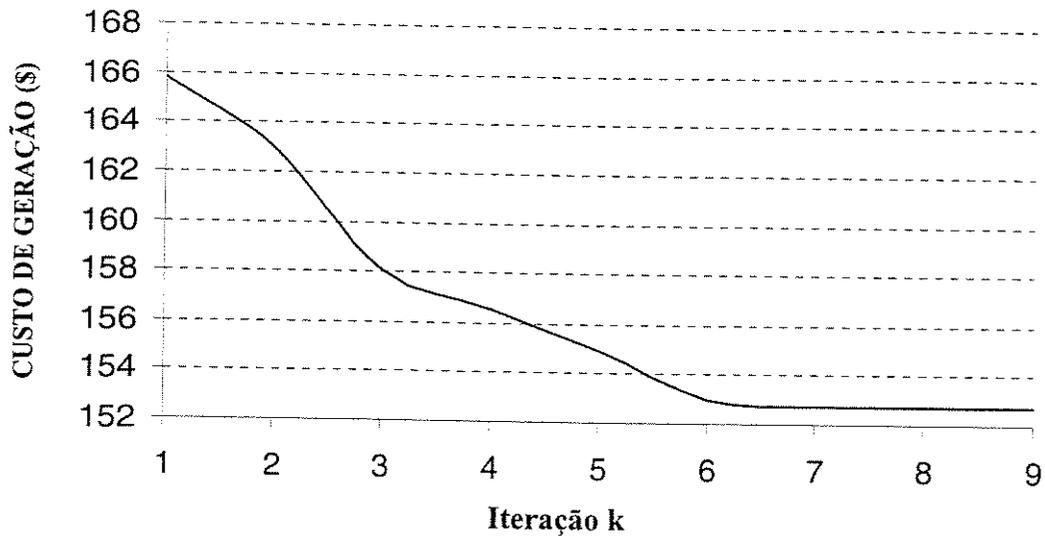


Figura 5.10: Evolução da função custo de geração para o sistema II.

As tabelas 5.24 a 5.27 mostram o conjunto ativo relativo as gerações de potência ativa obtido para a função custo de geração. Estas tabelas mostram que os primeiros geradores são os mais baratos estando de acordo com (5.3) e, portanto, como mostram os multiplicadores de Lagrange associados, devem despachar o máximo de potência ativa. De modo contrário, os últimos geradores que são os mais caros, devem despachar o mínimo de potência ativa.

SISTEMA I

BARRA	TENSÃO (pu)	GERAÇÃO (MW)	MULTIPLICADOR (\$/pu)
29	1.0092	39.90	1.21716
46	1.0329	330.75	0.88515
67	1.0068	128.10	0.91959
71	0.9617	2.10	1.15316
94	1.0368	472.50	0.88533
99	0.9999	187.95	0.87110
175	1.0272	117.60	0.78001
176	1.0526	304.50	0.75747
183	1.0241	132.30	0.81267
219	0.9702	3.15	1.08329
266	1.0075	7.14	0.88578
298	1.0161	13.65	0.86523

340	1.0256	5.24	0.87912
349	1.0240	21.00	0.95080
353	0.9630	1.05	1.30655
363	1.0079	2.84	1.06087
371	1.0469	1.99	0.72215
399	0.9937	3.78	0.77912
493	1.0063	19.11	0.77120
539	1.0042	7.88	0.77056
557	0.9940	1.89	0.69606
560	1.0358	6.30	0.89907
569	1.0438	1581.30	0.60788
573	1.0068	233.10	0.62569
578	1.0010	40.95	0.54149
586	0.9816	1.47	0.76528
599	0.9973	0.84	0.66683
600	1.0008	10.50	0.62183
625	1.0016	4.20	0.61469
641	0.9857	2.10	0.57967
673	1.0398	708.75	0.42333
674	1.0119	787.50	0.40387
690	0.9801	0.84	0.60472
702	1.0232	63.00	0.40984
704	1.0186	94.50	0.32160
705	1.0037	126.00	0.30532
706	1.0053	231.00	0.28333
707	1.0325	330.75	0.26184
710	1.0516	210.00	0.24801
711	1.0080	567.00	0.05404
712	1.0494	987.00	0.14018
714	1.0034	1155.00	0.18554
718	1.0366	756.00	0.17749
720	1.0703	1134.00	0.14728
722	1.0900	708.75	0.12312
768	1.0205	330.75	0.13830
863	0.9787	0.84	0.87545
983	0.9985	9.98	0.23597
984	0.9977	21.00	0.21528
1103	0.9743	564.90	0.24777
1112	1.0007	840.00	0.14014
1113	0.9273	204.75	0.22017
1114	0.9742	978.60	0.12294
1124	1.0013	210.00	0.01443
1125	0.9878	178.50	0.01514
1241	1.0471	1178.00	-0.04806
1245	1.0000	57.95	-0.00761
1246	1.0427	256.50	-0.13997
1247	1.0173	551.00	-0.17844

1248	0.9993	72.20	-0.07135
1250	1.0326	2090.00	-0.19310
1253	1.0276	1026.00	-0.23767
1254	1.0239	133.00	-0.26127
1255	1.0177	47.50	-0.16415
1256	1.0103	93.10	-0.06736
1257	1.0292	1045.00	-0.35649
1258	1.0299	175.65	-0.07986
1259	1.0246	213.75	-0.42757
1261	1.0244	513.00	-0.37602
1262	1.0043	403.75	-0.42908
1263	1.0445	275.40	-0.31588
1389	0.9656	223.25	-0.33927
1391	0.9958	95.00	-0.34883
1393	0.9874	280.25	-0.36858
1420	1.0294	351.50	-0.47863
1421	0.9705	751.45	-0.48571
1422	0.9906	85.40	-0.42096
1424	0.9823	78.85	-0.38553
1425	0.9937	377.15	-0.50297
1429	1.0242	366.70	-0.69070
1430	1.0123	314.45	-0.55629
1433	0.9393	17.10	-0.54604
1434	0.9958	84.55	-0.52348
1436	0.9839	1330.00	-0.67092
1437	0.9908	314.45	-0.51882
1441	1.0085	305.80	-0.66919

Tabela 5.24: Gerações ativas do sistema I no limite.

BARRA	TENSÃO (pu)	MULTIPLICADOR (pu)
722	1.0900	0.19173
1102	1.0900	7.82959
1110	1.0900	10.80842
1439	1.0900	7.97316
1440	1.0900	7.97316

Tabela 5.25: Tensões do sistema I no limite.

SISTEMA II

BARRA	TENSÃO (pu)	GERAÇÃO (MW)	MULTIPLICADOR (\$/pu)
4	1.0387	630.00	0.33824
11	0.9961	1007.58	0.25779
12	1.0449	163.80	0.37701
13	1.0169	1240.05	0.24372
16	1.0123	5939.85	0.18696
17	0.9911	2119.95	0.19795
21	0.9732	1089.90	0.20490
23	1.0083	227.53	0.20433
24	1.0200	133.98	0.20638
25	1.0368	242.45	0.15687
28	1.0135	47.25	0.31643
29	0.9830	47.25	0.30775
42	1.0160	283.92	0.12887
45	1.0145	964.85	0.10668
48	0.9556	334.00	0.11261
152	1.0094	304.50	0.32339
170	1.0524	4947.60	0.13062
176	1.0186	53.34	0.14562
179	1.0430	478.59	0.06327
185	1.0461	266.38	0.10689
188	1.0445	107.41	0.09131
189	0.9806	1027.42	0.05060
191	1.0313	2073.75	0.03524
192	1.0079	1166.55	0.02210
194	0.9792	599.87	0.01459
229	0.9635	441.00	0.01554
370	0.9882	21.32	0.20888
376	1.0470	63.84	0.01542
481	1.0016	11.55	0.00518
1454	0.9913	1.89	0.07431
1491	0.9728	7.45	0.27776
1493	0.9868	4.94	1.41018
1524	0.9901	13.02	0.49419
1535	0.9585	0.42	0.90260
1870	1.0413	3.57	0.17645
1907	0.9553	26.25	0.08183
225	1.0077	44.37	-0.01114
291	1.0067	88.54	-0.01608
292	0.9833	135.56	-0.05367
293	1.0239	178.03	-0.00663
329	1.0444	119.22	-0.09596
330	1.0444	119.22	-0.10437
403	1.0153	21.18	-0.00669
404	1.0560	97.94	-0.00541

405	1.0041	53.87	-0.04737
406	1.0227	51.30	-0.04263
407	1.0149	96.23	-0.06037
851	0.9951	66.50	-0.11055
853	1.0222	308.75	-0.11800
856	1.0304	460.75	-0.13668
877	0.9982	19.00	-0.13826
878	1.0002	28.50	-0.14724
888	1.0188	427.50	-0.15593
1028	1.0174	128.91	-0.03694
1030	1.0402	255.83	-0.04460
1036	1.0096	85.40	-0.05800
1044	1.0286	32.77	-0.09365
1056	0.9957	110.77	-0.05763
1065	1.0464	737.20	-0.24254
1067	1.0106	269.42	-0.23779
1068	0.9944	1487.70	-0.26520
1069	1.0374	255.83	-0.26119
1071	1.0265	343.52	-0.27206
1145	0.9870	5.32	-0.25183
1149	0.9805	5.32	-0.25152
1180	1.0045	66.97	-0.29776
1188	1.0148	4.75	-0.31873
1192	1.0026	81.80	-0.31147
1193	1.0143	42.75	-0.31643
1200	0.9894	0.76	-0.32789
1205	0.9953	94.33	-0.33505
1213	1.0180	87.40	-0.30654
1215	1.0047	55.9	-0.38976
1216	1.0124	263.15	-0.43879
1237	0.9941	9.21	-0.36059
1241	1.0008	10.45	-0.37059
1243	1.0098	14.25	-0.38862
1248	1.0058	109.63	-0.40428
1249	0.9970	36.95	-0.39557
1250	0.9999	40.38	-0.40905
1268	1.0111	4.37	-0.44736
1270	0.9872	1.33	-0.44349
1279	1.0092	17.10	-0.46576
1291	1.0222	141.45	-0.48410
1294	1.0403	262.68	-0.49219
1321	0.9952	12.35	-0.44944
1322	1.0149	355.29	-0.47272
1345	1.0235	242.53	-0.47037
1348	0.9897	2.38	-0.13610
1353	1.0195	0.85	-0.47551
1367	1.0031	76.00	-0.44987

1393	1.0591	67.36	-0.49001
1395	1.0554	5.21	-1.11424
1403	1.0281	131.57	-0.44280
1404	0.9788	1.33	-0.40294
1408	1.0211	0.47	-0.64337
1498	1.0106	14.82	-0.04660
1542	1.0017	17.10	-0.01624
1560	1.0081	32.30	-0.70879
1561	1.0000	49.40	-0.69992
1562	1.0224	70.21	-0.72480
1563	1.0000	215.45	-0.71674
1565	1.0288	121.22	-0.72514
1670	1.0199	32.40	-0.54308
1676	1.0215	35.43	-0.59952
1677	1.0009	5.04	-0.56763
1686	0.9757	3.80	-0.22857
1689	0.9802	17.48	-0.07165
1693	1.0189	11.69	-0.58420
1694	1.0375	50.73	-0.64611
1696	1.0231	19.00	-0.71046
1697	1.0035	5.60	-0.54608
1698	1.0116	37.05	-0.64359
1734	1.0077	4.27	-0.54176
1736	1.0486	18.05	-0.65562
1751	0.9664	52.25	-0.52220
1758	1.0323	8.17	-0.60218
1771	1.0090	31.82	-0.61187
1798	1.0816	3.80	-0.46887
1821	1.0149	38.95	-0.95606
1822	1.0149	38.95	-0.96530
1823	1.0149	38.95	-0.97370
1835	1.0107	14.25	-0.54724
1842	1.0511	14.25	-0.55478
1843	1.0511	14.25	-0.56318
1850	1.0584	142.50	-1.20103
1879	1.0481	27.55	-0.65952
1885	1.0777	6.17	-0.76396
1898	0.9753	23.08	-0.39771
1918	1.1061	351.50	-0.67965
1981	1.0061	41.80	-0.79168
1990	1.0963	43.13	-0.19078
1997	1.0066	343.90	-1.01088
2012	1.0251	19.00	-1.04113
2029	1.0189	35.71	-0.93577
2046	1.0424	150.10	-0.96660
2056	1.0140	23.75	-1.00903
2066	1.0344	52.25	-1.07838

2067	1.0344	52.25	-1.08679
2071	0.9863	1.90	-1.03938
2087	0.9244	1.62	-0.94636
2094	1.0258	107.06	-1.10922
2095	1.0258	107.06	-1.11763
2096	1.0258	107.06	-1.12604
2097	1.0258	107.06	-1.13445
2101	1.0076	25.65	-1.14510
2102	1.0076	25.65	-1.15350
2103	1.0076	25.65	-1.16191
2104	1.0076	25.65	-1.17032
2105	1.0076	25.65	-1.17873
2106	1.0076	25.65	-1.18713
2110	0.9851	9.50	-1.03997
2174	1.0230	38.00	-1.10561
2176	1.0235	85.40	-1.11719
2183	1.0233	59.94	-1.21334
2184	1.0233	59.94	-1.22174
2216	0.9954	7.12	-1.23115
2219	0.9870	2.85	-1.16582
2239	1.0400	570.00	-1.38091
2266	1.0243	6.65	-1.14084
2276	1.0105	14.25	-1.19426
2279	1.0098	0.66	-1.19924
2290	1.0094	0.38	-1.26231
2294	1.0040	38.00	-1.23416
2340	1.0044	11.69	-1.20850
2349	1.0200	26.60	-1.26337
2357	0.9958	4.18	-0.78588
2363	1.0216	2.85	-1.07540
2373	0.9943	1.90	-1.30257
2375	0.9783	0.57	-1.26208
2405	1.0163	3.80	-1.26862
2421	1.0091	9.50	-1.22875
2484	1.0174	5.60	-1.38443
2539	1.0209	6.65	-1.16700
2545	0.9581	9.50	-0.96988
2551	0.9990	13.30	-1.46050
2556	0.9855	1.71	-1.37001
2560	1.0202	5.60	-1.24234
2569	1.0474	1428.80	-1.39937
2573	1.0340	211.85	-1.38370
2578	1.0098	34.20	-1.48274
2586	1.0130	1.33	-1.34335
2594	1.0157	0.76	-1.47534
2600	0.9941	9.50	-1.36360
2623	0.9740	2.38	-1.35918

2625	1.0016	8.55	-1.41237
2629	0.9774	9.50	-1.32123
2641	0.9970	1.90	-1.35305
2673	1.0226	1060.20	-1.50088
2674	1.0079	1077.30	-1.49807
2679	0.9875	9.50	-1.42130
2691	0.9682	0.76	-1.06757
2695	1.0667	421.80	-1.48659
2696	1.0046	0.95	-1.51345
2702	1.0164	28.50	-1.46222
2704	1.0144	23.75	-1.40156
2705	1.0378	31.35	-1.41613
2706	1.0561	76.00	-1.42496
2707	1.0655	150.10	-1.43429
2710	1.0477	195.60	-1.54916
2712	1.0763	623.20	-1.61703
2713	1.0436	300.20	-1.62511
2714	1.0138	1216.00	-1.61128
2715	1.0656	1239.75	-1.62663
2717	1.0111	752.40	-1.62117
2768	1.0852	150.10	-1.55956
2859	0.9957	15.19	-1.59940
2947	1.0299	9.03	-1.62679
2948	0.9915	19.00	-1.68265
2993	1.0121	541.50	-1.68334
5776	1.0247	47.50	-1.50990

Tabela 5.26: Gerações ativas do sistema II no limite.

BARRA TENSÃO MULTIPLICADOR

	(pu)	(pu)
1660	0.8500	-6.67863
1888	0.8500	-64.09688
1894	0.8500	-75.63599

Tabela 5.27: Tensões do sistema II no limite.

Dentre os primeiros geradores, lidos na sequência em que se encontram no banco de dados, foram retirados cinco geradores e dos últimos geradores foram retirados outros cinco. Nas figuras 5.11 e 5.12 estes dez geradores estão organizados para os sistemas I e II, respectivamente, antes e depois da otimização. Verifica-se que os primeiros geradores por serem mais baratos, conforme (5.3), geram relativamente mais potência ativa que a solução inicial. De

modo contrário, os últimos cinco geradores por serem mais caros geram relativamente menos potência ativa.

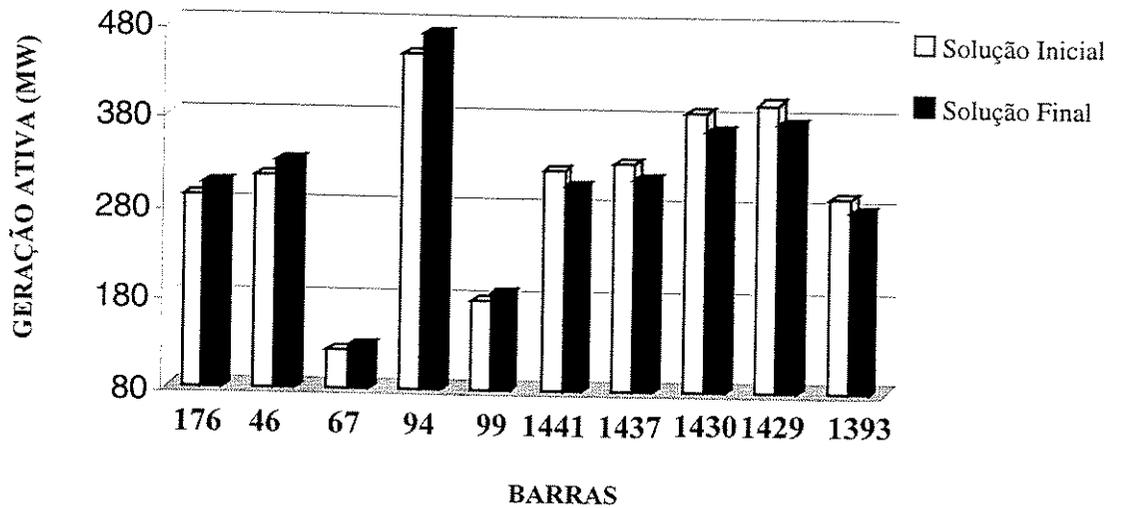


Figura 5.11: Despacho de geração ativa no sistema I

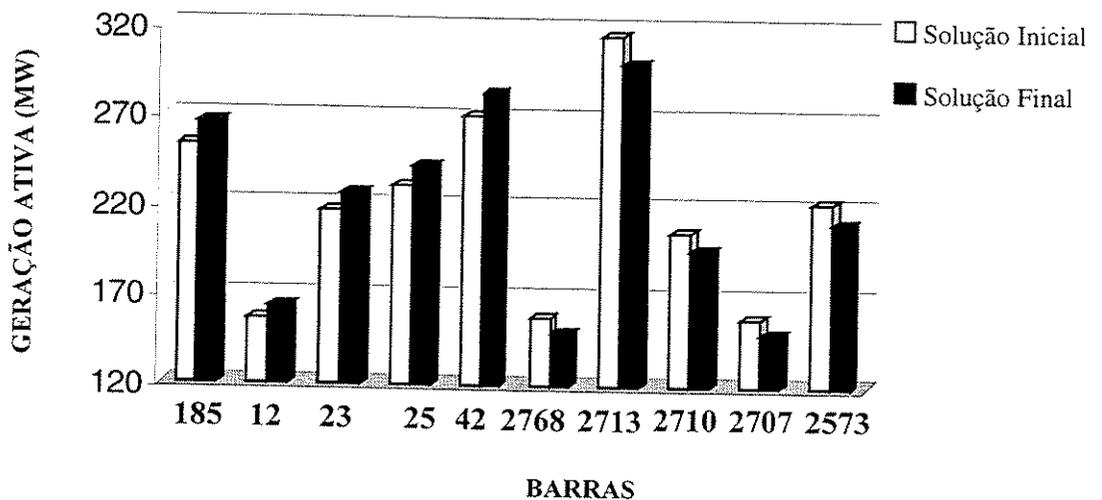


Figura 5.12: Despacho de geração ativa no sistema II

Capítulo VI

Conclusão

Este trabalho aplica uma abordagem paramétrica ao FPO para resolver sistemas de grande porte. A abordagem paramétrica se baseia no Método da Continuação, onde os conceitos básicos e as condições para a existência do caminho formado pelas soluções de um sistema de equações não lineares são apresentados.

O FPO é formulado de modo parametrizado mantendo a idéia original do Método da Continuação utilizado na solução de equações não lineares, que é dispor de uma solução trivial para o início da resolução do problema proposto. Por meio de pesos, a função objetivo do modelo paramétrico envolve problemas de minimização de perdas, minimização de custo de geração e minimização de desvio de tensão.

Para se obter a solução correspondente a um mínimo local do FPO são aplicadas as condições de otimalidade de KKT de primeira ordem, onde as

restrições de desigualdade são particionadas em dois conjuntos: ativo e folgado. Nesta forma procura-se descobrir dentre as restrições de desigualdade aquelas que violam seus limites e por conseguinte formam juntamente com as restrições de igualdade do problema um sistema que resolvido pelo método de Newton-Raphson fornece o mínimo local do FPO.

Para encontrar as restrições de desigualdade que pertencem ao conjunto ativo do FPO, a otimização paramétrica inicialmente relaxa o FPO através da incorporação de um parâmetro na função objetivo e nas restrições de igualdade e desigualdade. A evolução deste parâmetro determina paulatinamente o conjunto ativo associado ao FPO.

Os testes se concentram sobre dois sistemas elétricos reais de geração e transmissão que representam o sistema Sul/Sudeste. São apresentados os resultados referentes a perfil de tensão, número de iterações, tempo computacional e conjunto ativo.

São apresentadas quatro estratégias empregadas para se obter o conjunto ativo e variar o parâmetro de continuação. Cada uma delas teve seu momento de aplicação associada ao ambiente em que foi desenvolvido o programa computacional e a dimensão do sistema elétrico em teste. Para sistemas de grande porte é desenvolvida uma estratégia de variação do parâmetro e obtenção do conjunto ativo mais ousada. Ao invés de se remover uma violação por vez, se decidiu remover simultaneamente várias violações, de tal maneira a se determinar de modo mais rápido o conjunto ativo que corresponde a solução final do FPOP. Problemas de divergência decorrentes dessa maneira de obter o conjunto ativo ou mesmo do aumento do parâmetro são contornados através do recuo do parâmetro e de uma redução do conjunto ativo.

São analisadas duas formas de tratar a matriz Hessiana. Na primeira forma, chamada de matriz atualizada, esta é recalculada a cada nova iteração e na segunda forma, chamada de matriz constante, esta só é recalculada após o conjunto ativo e/ou parâmetro terem alguma modificação ou ainda, quando houver divergência no método de Newton-Raphson.

Monitorando as soluções associadas a todos os parâmetros obtidos, percebe-se que a partir de $c=0,9999$, e dentro de uma tolerância atribuída a função objetivo, já se consegue atingir a solução ótima não necessitando variar o parâmetro até $c=1$. Este aspecto associado ao modo de formar o conjunto ativo e tratamento da matriz Hessiana contribui para redução do tempo computacional.

A robustez da metodologia é constatada através da facilidade na determinação do termo quadrático W e na obtenção do parâmetro de folga ε . Como nos sistemas de pequeno porte, em sistemas de grande porte a solução final se mostra invariável para diferentes pontos de partida do problema.

Como sugestão para a continuidade deste trabalho são indicados o estudo:

- de novas formas de atualização do conjunto ativo, melhoramentos de técnicas de solução e evolução do parâmetro de continuação com o propósito de se obter um solução ainda mais rápida para o FPO.
- tendo-se reduzido o tempo de solução do FPO pode-se aplicá-lo no despacho on-line. Neste problema é conhecido o estado da rede elétrica num tempo t e para se obter o estado da mesma rede elétrica num tempo $t+\Delta t$ é aplicada a parametrização onde o parâmetro de continuação pode evoluir de forma mais rápida haja visto que em determinadas horas do dia haverá poucas alterações no estado da rede elétrica implicando em poucas mudanças do conjunto ativo.
- da aplicação na programação da geração mais especificadamente no pré-despacho;

- da inclusão de limites de transmissão para levar em conta as sobrecargas em linhas de transmissão;
- do planejamento de reativos, da análise de segurança e da estabilidade de tensão;
- de uma interface amigável no programa, de tal forma que seu uso seja acessível a outros usuários.

Apêndice A

Teoremas da Função Implícita e do Caminho

Os teoremas da Função Implícita e do Caminho [Garcia e Zangwill, 1981] tratam das condições para se expressar as variáveis de otimização como função do parâmetro de continuação. Inicialmente são fornecidas as notações usadas nestes teoremas. Dada uma função Homotopia $H: \mathcal{R}^{n+1} \rightarrow \mathcal{R}^n$, define-se

$$H^{-1} = \{(x, c) / H(x, c) = 0\} \quad (\text{A.1})$$

como o conjunto de todos os pontos que satisfazem a função Homotopia. A matriz Jacobiana da função Homotopia pode ser dividida em duas partes:

$$\nabla H(x, c) = (\nabla_x H \mid \nabla_c H) \quad (\text{A.2})$$

Teorema da Função Implícita

Seja $H: \mathcal{R}^{n+1} \rightarrow \mathcal{R}^n$ diferenciável e contínua em um ponto $(x_1, c_1) \in H^{-1}$ e $\nabla_x H(x_1, c_1)$ inversível. Então, na vizinhança de (x_1, c_1) todos os pontos que satisfazem $H(x, c) = 0$ estão sobre um caminho diferenciável e contínuo que passa através de (x_1, c_1) (figura A.1).

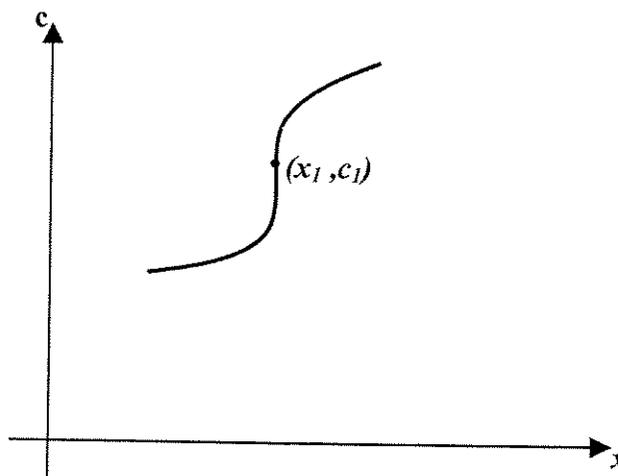


Figura A.1: Todos os pontos vizinhos a (x_1, c_1) que satisfazem a função Homotopia.

Teorema do Caminho

Seja $H: \mathcal{R}^{n+1} \rightarrow \mathcal{R}^n$ diferenciável e contínua. Supondo que para todo $(x, c) \in H^{-1}$ a Jacobiana $\nabla H(x, c)$ é de rank completo, então H^{-1} consiste de caminhos diferenciáveis e contínuos.

Apêndice B

Formulação do Fluxo de Potência Ótimo Paramétrico

A solução do FPOP fornece como resultado o estado do sistema o qual compreende:

a) as variáveis de controle ou variáveis independentes :

- magnitude de tensão nas barras de geração e barras com compensação de reativos $\rightarrow v$;
- geração ativa $\rightarrow p_g$;
- geração reativa $\rightarrow q_g$;
- tap de transformador $\rightarrow a$;
- admitância shunt $\rightarrow b$;

b) as variáveis de estado ou variáveis dependentes

- ângulos em todas as barras, com exceção da barra de referência $\rightarrow \theta$;
- magnitudes de tensão nas barras de carga $\rightarrow v$;

A variável de otimização x é representada por $x=[\theta \ v \ b \ a]^T$ e a função objetivo do problema parametrizado é dada por:

$$F(\theta, v, b, a, c) = f(\theta, v, a) - (1-c) \cdot f_o^T \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ v \\ b \\ a \end{bmatrix} + (1-c) \cdot \frac{1}{2} \cdot W \cdot \|\theta - \theta^o\|^2 + \quad (B.1)$$

$$(1-c) \cdot \frac{1}{2} \cdot W \cdot \|v - v^o\|^2 + (1-c) \cdot \frac{1}{2} \cdot W \cdot \|b - b^o\|^2 + (1-c) \cdot \frac{1}{2} \cdot W \cdot \|a - a^o\|^2$$

Por meio de pesos atribuídos a função objetivo, pode-se resolver o FPO com uma função objetivo específica ou uma combinação delas. O peso w_1 está associado a minimização da função custo de geração, o peso w_2 está associado a minimização da função perdas nas linhas de transmissão e o peso w_3 está associado a minimização do desvio de tensão de um dado perfil pré-estabelecido. Desta forma, a função objetivo do problema original é dada por:

$$f(\theta, v, a) = w_1 \cdot \min \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} ct_i(p_{g_i}) \right\} + w_2 \cdot \min \{ p_{g_{slack}} \} + w_3 \cdot \min \left\{ \sum_{i=1}^{NB} (v_i - 1)^2 \right\} \quad (B.2)$$

onde :

NAG → número de barras de geração ativa;

NB → número de barras do sistema elétrico;

$p_{g_{slack}}$ → potência ativa gerada na barra de referência;

A família de problemas parametrizados associados ao problema original é apresentada como:

$$\begin{aligned} \min F(\theta, v, b, a, c) \\ (\theta, v, b, a) \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

sujeito a

$$p_d + p(v, \theta, a) - (1-c)[p_d + p(v^o, \theta^o, a^o)] = 0 \quad (\omega) \quad (\text{B.4})$$

$$q_d + q(v, \theta, a) - bv^2 - (1-c)[q_d + q(v^o, \theta^o, a^o) - b^o v^o{}^2] = 0 \quad (\beta) \quad (\text{B.5})$$

$$p_d + p(v, \theta, a) - p_g^{\min} - (1-c)\Delta h p_g \geq 0 \quad (\omega^{\min}) \quad (\text{B.6})$$

$$p_d + p(v, \theta, a) - p_g^{\max} - (1-c)\Delta h p_g \leq 0 \quad (\omega^{\max}) \quad (\text{B.7})$$

$$q_d + q(v, \theta, a) - bv^2 - q_g^{\min} - (1-c)\Delta h q_g \geq 0 \quad (\rho^{\min}) \quad (\text{B.8})$$

$$q_d + q(v, \theta, a) - bv^2 - q_g^{\max} - (1-c)\Delta h q_g \leq 0 \quad (\rho^{\max}) \quad (\text{B.9})$$

$$v - v^{\min} - (1-c)\Delta x_v \geq 0 \quad (\lambda^{\min}) \quad (\text{B.10})$$

$$v - v^{\max} - (1-c)\Delta x_v \leq 0 \quad (\lambda^{\max}) \quad (\text{B.11})$$

$$b - b^{\min} - (1-c)\Delta x_b \geq 0 \quad (\mu^{\min}) \quad (\text{B.12})$$

$$b - b^{\max} - (1-c)\Delta x_b \leq 0 \quad (\mu^{\max}) \quad (\text{B.13})$$

$$a - a^{\min} - (1-c)\Delta x_a \geq 0 \quad (\phi^{\min}) \quad (\text{B.14})$$

$$a - a^{\max} - (1-c)\Delta x_a \leq 0 \quad (\phi^{\max}) \quad (\text{B.15})$$

onde:

- p_d e q_d
 - potência ativa e reativa da carga
- $p(v, \theta, a)$, $q(v, \theta, a)$
 - potência ativa e reativa calculada

- as equações (B.4)-(B.5) são escritas para barras de carga
- as equações (B.6)-(B.7) são escritas para barras de geração ativa
 - limites de geração potência ativa (p_g^{max} , p_g^{min})
- as equações (B.8)-(B.9) são escritas para barras de geração reativa
 - limites de geração potência reativa (q_g^{max} , q_g^{min})
- as equações (B.10)-(B.11) são escritas para todas as barras
 - limites de magnitude de tensão (v^{max} , v^{min})
- as equações (B.12)-(B.13) são escritas para barras de controle de reativos
 - limites de compensação shunt (b^{max} , b^{min})
- as equações (B.14)-(B.15) são escritas para transformadores com tap variável
 - limites dos taps (a^{max} , a^{min})

Apêndice C

Função Lagrangeana do FPOP e suas Derivadas

C.1 FUNÇÃO LAGRANGEANA

A função Lagrangeana do problema parametrizado é dada por:

$$\begin{aligned} L = & F(\theta, v, b, a, c) + \sum_{i \in nc} \alpha_i \{pd_i + p_i(v, \theta, a) - (1-c) + [pd_i + p_i(v_0, \theta_0, a_0)]\} + \\ & + \sum_{i \in nc} \beta_i \{qd_i + q_i(v, \theta, a) - b_i v_i^2 - (1-c)[qd_i + q_i(v_0, \theta_0, a_0) - b_{i0} v_{i0}^2]\} + \\ & + \sum_{i \in ipg \min} \omega_i^{\min} \{pd_i + p_i(v, \theta, a) - pg_i^{\min} - (1-c)\Delta h_{pg_i}\} \\ & + \sum_{i \in ipg \max} \omega_i^{\max} \{pd_i + p_i(v, \theta, a) - pg_i^{\max} - (1-c)\Delta h_{pg_i}\} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{i \in i q g \max} \rho_i^{\max} \left\{ q d_i + q_i(v, \theta, a) - b_i v_i^2 - q g_i^{\max} - (1-c) \Delta h_{q g_i} \right\} + \\
 & + \sum_{i \in i q g \min} \rho_i^{\min} \left\{ q d_i + q_i(v, \theta, a) - b_i v_i^2 - q g_i^{\min} - (1-c) \Delta h_{q g_i} \right\} + \\
 & + \sum_{i \in s v \min} \lambda_i^{\min} \left\{ v_i - v_i^{\min} - (1-c) \Delta x_{v_i} \right\} + \\
 & + \sum_{i \in s v \max} \lambda_i^{\max} \left\{ v_i - v_i^{\max} - (1-c) \Delta x_{v_i} \right\} + \\
 & + \sum_{i \in s a \min} \phi_i^{\min} \left\{ a_i - a_i^{\min} - (1-c) \Delta x_{a_i} \right\} + \\
 & + \sum_{i \in s a \max} \phi_i^{\max} \left\{ a_i - a_i^{\max} - (1-c) \Delta x_{a_i} \right\} + \\
 & + \sum_{i \in s b \min} \mu_i^{\min} \left\{ b_i - b_i^{\min} - (1-c) \Delta x_{b_i} \right\} + \\
 & + \sum_{i \in s b \max} \mu_i^{\max} \left\{ b_i - b_i^{\max} - (1-c) \Delta x_{b_i} \right\}
 \end{aligned}$$

O conjunto das barras de carga é dado por nc e os conjuntos dos índices das restrições ativas são dados por:

- Geração ativa - $ipgmin, ipgmax$
- Geração reativa - $iqgmin, iqgmax$
- Magnitude de tensão - $svmin, svmax$

- Compensação shunt - sbmin, sbmax
- Tap - samin, samax

C.2 DERIVADA PRIMEIRA DA FUNÇÃO LAGRANGEANA

As derivadas das injeções de potência ativa e potência reativa são obtidas através das expressões originadas da aplicação da lei de Kirchoff em barras quaisquer, como:

$$p_l = v_l \sum_{k=1}^{nb} |Y_{kl}| v_k \cos(\theta_l - \theta_k - \phi_{kl})$$

$$q_l = v_l \sum_{k=1}^{nb} |Y_{kl}| v_k \sin(\theta_l - \theta_k - \phi_{kl})$$

C.2.1 DERIVADA EM RELAÇÃO AO ÂNGULO

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_k} = & \frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} - (1-c) f_{\theta_k}^0 + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} + \\ & + \sum_{i \in ipgmax} \omega_i^{\max} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} + \sum_{i \in ipgmin} \omega_i^{\min} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} + \sum_{i \in iqgmax} \rho_i^{\max} \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} + \\ & + \sum_{i \in iqgmin} \rho_i^{\min} \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} = & w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} [p_{d_i} + p_i(v, \theta, a)] + aa_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} \right\} + \\ & + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} \end{aligned}$$

$$f_{\theta_k}^0 = w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial \theta_k} [pd_i + p_i(v^0, \theta^0, a^0)] + aa_i \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial \theta_k} \right\} +$$

$$+ w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial \theta_k} + \sum_{i \in nc} \alpha_i^0 \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial \theta_k} + \sum_{i \in nc} \beta_i^0 \frac{\partial q_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial \theta_k}$$

C.2.2 DERIVADA EM RELAÇÃO A MAGNITUDE DE TENSÃO

$$\frac{\partial L}{\partial v_k} = \frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial v_k} - (1-c)f_{v_k}^0 + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} -$$

$$- 2\beta_k b_k v_k + \sum_{i \in ipg \max} \omega_i^{\max} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} + \sum_{i \in ipg \min} \omega_i^{\min} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} +$$

$$+ \sum_{i \in iqg \max} \rho_i^{\max} \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} + \sum_{i \in iqg \min} \rho_i^{\min} \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} - 2\rho^{\max} b_k v_k -$$

$$- 2\rho^{\min} b_k v_k$$

$$\frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial v_k} = w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} [pd_i + p_i(v, \theta, a)] + aa_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} \right\} +$$

$$+ w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} + 2w_3(v_k - 1) + W(1-c)(v_k - v_k^0)$$

$$f_{v_k}^0 = w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial v_k} [pd_i + p_i(v^0, \theta^0, a^0)] + aa_i \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial v_k} \right\} +$$

$$+ w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial v_k} + 2w_3(v_k^0 - 1) + \sum_{i \in nc} \alpha_i^0 \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial v_k} +$$

$$+ \sum_{i \in nc} \beta_i^0 \frac{\partial q_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial v_k}$$

C.2.3 DERIVADA EM RELAÇÃO A ADMITÂNCIA SHUNT

$$\frac{\partial L}{\partial b_k} = \frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial b_k} - (1-c)f_{b_k}^0 - \beta_k v_k^2 - \rho_k^{\max} v_k^2 - \rho_k^{\min} v_k^2$$

$$\frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial b_k} = w_4(1-c)(b_k - b_k^0)$$

$$f_{b_k}^0 = -\beta_k^0 v_k^0{}^2$$

C.2.4 DERIVADA EM RELAÇÃO AO TAP

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial a_k} = & \frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial a_k} - (1-c)f_{a_k}^0 + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} + \\ & + \sum_{i \in ipg \max} \omega_i^{\max} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} + \sum_{i \in ipg \min} \omega_i^{\min} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} + \sum_{i \in iqg \max} \rho_i^{\max} \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} + \\ & + \sum_{i \in iqg \min} \rho_i^{\min} \frac{\partial q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(v, \theta, a)}{\partial a_k} = & w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} [p_{d_i} + p_i(v, \theta, a)] + aa_i \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} \right\} + \\ & + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} + w_4(1-c)(a_k - a_k^0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{a_k}^0 = & w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial a_k} [p_{d_i} + p_i(v^0, \theta^0, a^0)] + aa_i \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial a_k} \right\} + \\
 & + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial a_k} + \sum_{i \in nc} \alpha_i^0 \frac{\partial p_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial a_k} + \sum_{i \in nc} \beta_i^0 \frac{\partial q_i(v^0, \theta^0, a^0)}{\partial a_k}
 \end{aligned}$$

C.3 DERIVADA SEGUNDA DA FUNÇÃO LAGRANGEANA

C.3.1 DERIVADA ÂNGULO x ÂNGULO

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial \theta_l} = & \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} + \\
 & + \sum_{i \in ipgmax} \omega_i^{\max} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in ipgmin} \omega_i^{\min} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in iqgmax} \rho_i^{\max} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} + \\
 & + \sum_{i \in iqgmin} \rho_i^{\min} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} = & w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \left[\frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} [p_{d_i} + p_i(v, \theta, a)] + \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_l} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k} \right] + \right. \\
 & \left. + aa_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l} \right\} + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_k \partial \theta_l}
 \end{aligned}$$

C.3.2 DERIVADA MAGNITUDE DE TENSÃO x ÂNGULO

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 L}{\partial v_k \partial \theta_l} &= \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} + \\ &+ \sum_{i \in ipgmax} \omega_i^{\max} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in ipgmin} \omega_i^{\min} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in iqgmax} \rho_i^{\max} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} + \\ &+ \sum_{i \in iqgmin} \rho_i^{\min} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} &= w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \left[\frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} [p_{d_i} + p_i(v, \theta, a)] + \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_l} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} \right] + \right. \\ &\left. + aa_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} \right\} + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial \theta_l} \end{aligned}$$

C.3.3 DERIVADA MAGNITUDE DE TENSÃO x MAGNITUDE DE TENSÃO

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 L}{\partial v_k \partial v_l} &= \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} + \\ &+ \sum_{i \in ipgmax} \omega_i^{\max} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} + \sum_{i \in ipgmin} \omega_i^{\min} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} + \sum_{i \in iqgmax} \rho_i^{\max} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} + \\ &+ \sum_{i \in iqgmin} \rho_i^{\min} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} = w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \left[\frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} [pd_i + p_i(v, \theta, a)] + \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_l} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k} \right] + \right. \\ \left. + aa_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l} \right\} + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_l}$$

Para o caso em que o índice l for igual ao índice k aparecerá o termo $2w_3 + W(1-c)$ que será adicionado a :

$$\frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial v_k \partial v_k}$$

C.3.4 DERIVADA TAP x ÂNGULO

$$\frac{\partial^2 L}{\partial a_k \partial \theta_l} = \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} + \\ + \sum_{i \in ipgmax} \alpha_i^{max} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in ipgmin} \alpha_i^{min} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} + \sum_{i \in iqgmax} \rho_i^{max} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} + \\ + \sum_{i \in iqgmin} \rho_i^{min} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l}$$

$$\frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} = w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \left[\frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} [pd_i + p_i(v, \theta, a)] + \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial \theta_l} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} \right] + \right. \\ \left. + aa_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l} \right\} + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial \theta_l}$$

C.3.5 DERIVADA TAP x TAP

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 L}{\partial a_k \partial a_l} &= \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} + \\ &+ \sum_{i \in ipgmax} \omega_i^{\max} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} + \sum_{i \in ipgmin} \omega_i^{\min} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} + \sum_{i \in iqgmax} \rho_i^{\max} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} + \\ &+ \sum_{i \in iqgmin} \rho_i^{\min} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} &= w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \left\{ \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} [pd_i + p_i(v, \theta, a)] + \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_l} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} \right\} + \right. \\ &\left. + aa_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} \right\} + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_l} \end{aligned}$$

Para o caso em que o índice l for igual ao índice k aparecerá o termo $W(1-c)$ que será adicionado a :

$$\frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial a_k}$$

C.3.6 DERIVADA TAP x MAGNITUDE DE TENSÃO

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 L}{\partial a_k \partial v_l} &= \frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} + \sum_{i \in nc} \alpha_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} + \sum_{i \in nc} \beta_i \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} + \\ &+ \sum_{i \in ipgmax} \omega_i^{\max} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} + \sum_{i \in ipgmin} \omega_i^{\min} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} + \sum_{i \in iqgmax} \rho_i^{\max} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} + \\ &+ \sum_{i \in iqgmin} \rho_i^{\min} \frac{\partial^2 q_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 f(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} = w_1 \left\{ \sum_{i=1}^{NAG} 2bb_i \left\{ \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} [pd_i + p_i(v, \theta, a)] + \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial v_l} \frac{\partial p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k} \right\} + aa_i \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l} \right\} + w_2 \sum_{i=1}^{NAG} \frac{\partial^2 p_i(v, \theta, a)}{\partial a_k \partial v_l}$$

C.3.7 DERIVADA MAGNITUDE DE TENSÃO x ADMITÂNCIA SHUNT

$$\frac{\partial^2 L}{\partial v_k \partial b_l} = -2\beta_l v_l - 2\rho_l^{\max} v_l - 2\rho_l^{\min} v_l$$

C.3.8 DERIVADA ADMITÂNCIA SHUNT x ADMITÂNCIA SHUNT

$$\frac{\partial^2 L}{\partial b_k \partial b_l} = 0$$

Para o caso em que o índice l for igual ao índice k a derivada acima será igual ao termo $W(l-c)$.

Apêndice D

Modelo para Implementação Computacional

D.1 Introdução

Quando se aplica o FPO em sistemas de grande porte verifica-se que o sistema (3.33) é muito esparso. Esta característica é inerente a topologia da rede elétrica. Neste caso para que haja um melhor aproveitamento da metodologia, principalmente em relação a tempo computacional, torna-se necessário o emprego de técnicas de esparsidade.

Para se resolver o sistema (3.32) é feita a decomposição LDU da matriz Jacobiana deste, tal que:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial x \cdot \partial \gamma_I} & \frac{\partial^2 L}{\partial x \cdot \partial \lambda} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_I \cdot \partial x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \cdot \partial x} & 0 & 0 \end{bmatrix} = L \cdot D \cdot U$$

e as correções são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta \gamma_I \\ \delta \lambda \end{bmatrix} = U^{-1} \cdot D^{-1} \cdot L^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{\partial L}{\partial x} \\ -\frac{\partial L}{\partial \gamma_I} \\ -\frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix}$$

O armazenamento de elementos não nulos e os fatores LDU estão indexados à topologia da rede através de variáveis de ramo (taps de transformadores - a) e de variáveis nodais (ângulos de tensão - θ ; magnitude de tensão - v ; compensação shunt - b ; multiplicadores de Lagrange - λ, γ). Uma estrutura geral de como é armazenada a matriz de coeficientes em (3.33) é dada na figura D.1.

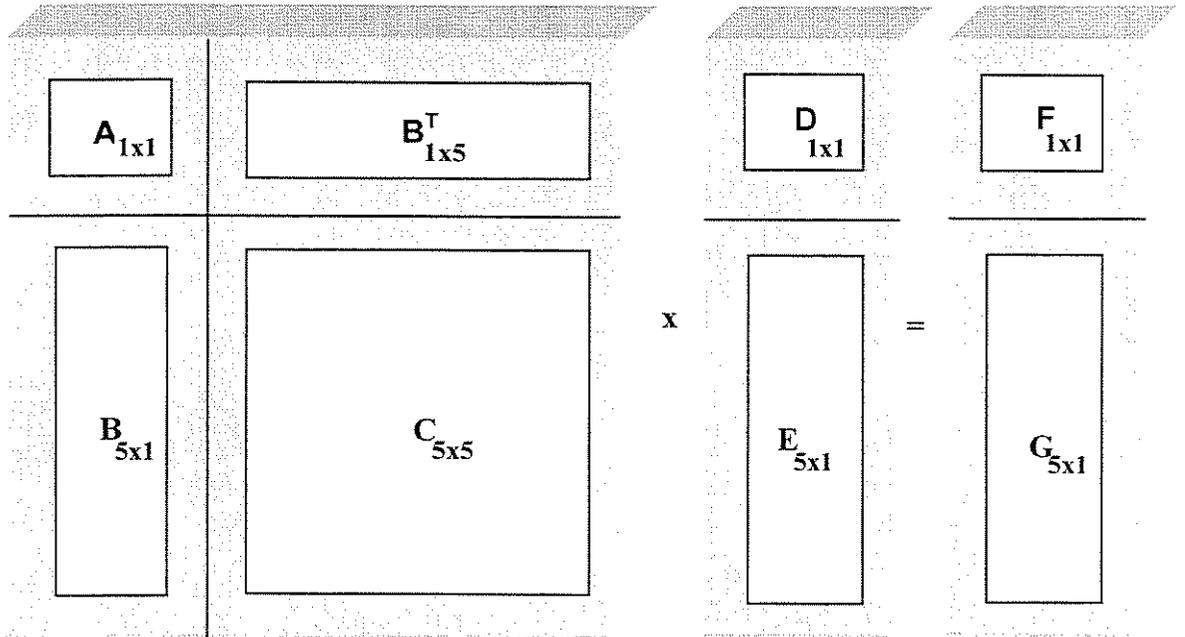
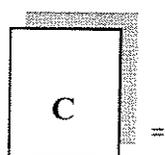


Figura D.1: Estrutura de armazenagem da matriz Hessiana

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{A} = \frac{\partial^2 L}{\partial a^2} \quad \mathbf{D} = \Delta a \quad \mathbf{F} = -\frac{\partial L}{\partial a} \\
 \mathbf{B} = \begin{array}{c} \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \partial a} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V \partial a} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial a} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_i \partial a} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial b \partial a} \end{array} \quad \mathbf{G} = \begin{array}{c} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial V} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial L}{\partial \gamma_i} \\ \frac{\partial L}{\partial b} \end{array} \quad \mathbf{E} = \begin{array}{c} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ \Delta \gamma_i \\ \Delta b \end{array}
 \end{array}$$



$$\begin{array}{ccccc}
 \frac{\partial^2 L}{\partial \theta^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \cdot \partial V} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \cdot \partial \lambda} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \cdot \partial \gamma_i} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \cdot \partial b} \\
 \frac{\partial^2 L}{\partial V \cdot \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial V^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V \cdot \partial \lambda} & \frac{\partial^2 L}{\partial V \cdot \partial \gamma_i} & \frac{\partial^2 L}{\partial V \cdot \partial b} \\
 \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \cdot \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \cdot \partial V} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_i \cdot \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial \gamma_i \cdot \partial V} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial^2 L}{\partial b \cdot \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial b \cdot \partial V} & 0 & 0 & \frac{\partial^2 L}{\partial b^2}
 \end{array}$$

D.2 O Programa

O programa computacional para resolver o FPO foi escrito na linguagem FORTRAN 77. Abaixo está o programa com as principais subrotinas.

C.....SUBROTINAS DE INICIALIZAÇÃO

CALL DADOSGER

CALL VERIFICA

CALL ESTRAT

C....PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

DO WHILE ($c_k \geq 0.9999$ e $|f(x(c_{k-1})) - f(x(c_k))| \leq 10^{-2}$)

CALL LOOP

CALL VERIFICA

CALL ESTRAT

END DO

STOP

END

D.3 Comentários sobre as Subrotinas

CALL DADOSGER

Esta subrotina lê os dados de barra e de linha do sistema em estudo. Fixa as constantes W e ε . Cria os elementos da matriz admitância.

CALL VERIFICA

Nesta subrotina é verificado se o ponto calculado pelo sistema (3.33) apresenta violações. Ela está presente em dois pontos do programa. Quando localizada dentro do conjunto de subrotinas de inicialização ela verifica se o ponto inicial é factível ou não. Se este não for factível então, as restrições violadas são relaxadas.

CALL ESTRAT

Esta subrotina é responsável pelo incremento do parâmetro e da alteração dos conjuntos ativo e folgado apontados pela subrotina anterior.

CALL LOOP

Aqui se faz o armazenamento compacto e a solução do sistema (3.33). É feito um monitoramento permanente para verificar se o sistema extrapola o número de iterações máximas ou se o maior valor do gradiente (3.32) está aumentando a cada iteração. Estas são situações de divergência onde conforme o problema se reduz o parâmetro de continuação ou se reduz o conjunto ativo.

BIBLIOGRAFIA

Almeida, K.C., *A General Parametric Optimal Power Flow*, Tese de Doutorado, McGill University, Montreal, Canadá, Novembro, 1994.

Almeida, K.C.; Galiana, F.D., Soares, S., *A General Parametric Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, Fevereiro, 1996, pp 540-547

Almeida, K.C.; Galiana, F.D., Soares, S., *A Nonlinear Parametric Approach for Optimal Load Tracking*, Proceedings. of the 11th Power Systems Computation Conference, Avignon, França, Agosto, 1993, pp 1257-1264.

Almeida, K.C., Galiana, F.D., *Critical Cases in the Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, Agosto, 1997, pp 1509-1518.

Almeida, K.C., Salgado, R., *Optimal Power Flow Solutions Under Variable Load Conditions*, artigo aceito para publicação no IEEE Transactions on Power Systems, PE009PRS(04-2000).

Ajjarapu, V., Christy, C., *The Continuation Power Flow: A Tool for Steady-State Voltage Stability Analysis*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 07, No. 1, Fevereiro, 1992, pp 416-423.

- Baldick, R., Kim, B.H., Chase, C., Luo, Y.,** *A Fast Distributed Implementation of Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 114, No. 03, Agosto, 1999, pp 858-864.
- Burchett, R.C., Happ, H.H., Vierath, D.R.,** *Quadratically Convergent Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on PAS, Vol. 103, No. 11, Novembro, 1984, pp 3267-3275.
- Burchett, R.C., Happ, H.H., Merrit, W.C., Saylor, C.H.,** *Security Dispatching*, Proceedings of CIGRÉ 32nd Session, 1988.
- Carpentier, J. L.,** *Contribution à l'étude du Dispatching Economique*, Bulletin de la Société Française des Electriciens, Ser. 8, Vol. 3, 1962.
- Carpentier, J. L.,** *Towards a Secure and Optimal Automatic Operation of Power Systems*, Proceedings of the Power Systems Computer Application Conference, Montreal, Canadá, Maio, 1987, pp 2-37.
- Clements, K. A., Davis, P.W., Frey, K.D.,** *An Interior Point Algorithm for Weighted Least Absolute Value Power System State Estimation*, IEEE/PES 1991 Winter Meeting.
- da Costa, G.R.M., Santos, Jr., A.,** *A Quasi-Newton Version in the Augmented Lagrangian Approach to Solve the Optimal Power Flow*, Proceedings of the IFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems, Munique, Alemanha, Março, 1992, pp 37-40.
- Davison, G.R.,** *Dividing Load between Units*, Electrical World, Dezembro, 1922.

Dillon, T.S.; *Rescheduling, Constrained Participation Factors and Parameter Sensitivity*, IEEE Transactions on PAS, Vol 100, pp 2628-2634, 1981.

Dommel, H.W., Tinney, W.F., *Optimal Power Flow Solutions*, IEEE Transactions on PAS, Vol. 87, pp 1866-1876, 1968.

Eletrobrás, *Plano Decenal de Expansão 1999/2008*, GCPS, Ministério de Minas e Energia.

El-Bakry, A., Tapia, R., Tsuchiya, T., Zhang, Y., *On the Formulation and Theory of the Newton Interior-Point Method for Nonlinear Programming*, Journal of Optimization Theory and Applications, 89, 1996, pp 507-541.

Fahmideh-Vojdani, A., Galiana, F.D., *The Continuation Method and Its Application to System Planning and Operation*; Proceedings of CIGRE, paper 102-04, Florence, Itália, 1983.

Fang, S., Puthenpura, S., *Linear Optimization and Extensions: Theory and Algorithms*, Prentice Hall, 1993.

Flatabo, N., Ognedal, R., Carlsen, T., *Voltage Stability Condition in Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 05, No. 4, Novembro, 1990, pp 1286-1293.

Galiana, F.D., Fahmideh-Vojdani, Hunneault, M., A., Juman, M., *Optimal Power System Dispatch Through the Continuation Method: Variation of Functional Inequality Limits*, Proceedings of International.

Symposium on Circuits and Systems, Newport Beach, USA, Maio, 1983, pp. 1192-1197.

Garcia, C.B., Zangwill, W.I., *Pathways to Solutions, Fixed Points and Equilibria*, Prentice Hall, 1981.

Ge, S. Y., Chung, T.S., *Optimal Active power Flow Incorporating Power Flow Control Needs in Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, Maio, 1999, pp 738-744.

Granville, S., *Optimal Reactive Dispatch Through Interior Points Methods*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, Fevereiro, 1994, pp 136-146.

Granville, S., Mello, J.C.O., Melo, A.C.G., *Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, 1996, pp 1096-1103

Happ, H.H., *Optimal Power Dispatching – A Comprehensive Survey*, IEEE Transactions PAS, Vol. 96, pp 841-854, 1977.

Hong, Y.Y., *Enhanced Newton Optimal power Flow Approach: Experiences in Taiwan Power System*, IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 3, Maio, 1992, pp 205-210.

Hunneault, M., Fahmideh-Vojdani, A., Juman, M., Calderon, R., Galiana, F.D., *The Continuation Method in Power System Optimization: Applications to Economy-Security Functions*, IEEE Transactions on PAS, Vol. 104, 1985, pp 114-123.

Hunneault, M., Galiana, F.D., *An Investigation of the Solution to the Optimal Power Flow Problem Incorporating Continuation Methods*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, 1990, pp103-110.

Huneault, M., Galiana, F.D., *A Survey of the Optimal Power Flow Literature*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, Maio, 1991, pp. 762-770.

Iba, K., Sasaki, H., Egawa, M., Watanabe, T., *Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 06, No. 2, Maio, 1991, pp 548-593.

Irissari, G.D., Wang, X., Tong, J., Mokhtari, S., *Maximum Loadability of Power Systems Using Interior Point Non-Linear Optimization Method*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, 1997, pp 162-172.

Karmarkar, N., *A new polynomial-time algorithm for linear programming*, Combinatorica, 4 (1984), pp 373-395.

Kirchen, D. S., Van Meeteren, H.P., *MW / Voltage Control in a Linear Programming Based Optimal Power Flow* , IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, Maio, 1988, pp 481-489.

Lima, F.G.M., *Estudos de Fluxo de Potência Ótimo Via Otimização Paramétrica*, Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas-SP, Outubro, 1993.

Lima, F.G.M., Santos Jr., A., Soares, S., *Fluxo de Potência Ótimo Via Programação Paramétrica*, XXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campinas-SP, Novembro, 1993, pp 247-251.

Lima, F.G.M., Santos Jr., A., Soares, S., *Fluxo de Potência Ótimo Via Método da Continuação*, 10º Congresso Brasileiro de Automática, Rio de Janeiro-RJ, Setembro, 1994, pp 01-06.

Lima, F.G.M., Soares, S., Santos Jr., A., Almeida, K.C. and Galiana, F.D., *Optimal Power Flow Based on a General Nonlinear Parametric Approach*, Proceedings. of the 13th Power Systems Computation Conference, Trondheim, Noruega, Junho, 1999, Vol. 1, pp 495-502.

Martinez, J.L., Gomez, A., Quintana, V.H., *Reactive- Power Optimization by Interior Point Methods: Implementation Issues*, Proceedings of 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, Alemanha, Agosto, 1996, pp. 844-850.

Medina, J., Quintana, V.H., Conejo, A.J., *A New clipping-off Interior Point Algorithm to Solve the Medium-Term Hydro-Thermal Coordination Problem*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, Maio, 1997, pp 285-288.

Miranda, V., Saraiva, J.T., *Fuzzy Modelling of Power System Optimal Load Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, Maio, 1992, pp 843-849.

Monticelli, A., Liu, W.H.E, *Adaptative Movement Penalty Method for the Newton Optimal Power Flow*, IEEE Transactionions on Power Systems, Vol.7, No. 1, Fevereiro, 1992, pp 334-342.

Momoh, A.J., El-Hawary, M.E., Adapa, R., *A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993, Part I: Nonlinear and Quadratic Programming Approaches*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, Fevereiro, 1999, pp 96-104.

Momoh, A.J., El-Hawary, M.E., Adapa, R., *A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993, Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, Fevereiro, 1999, pp 105-111.

Nepomuceno, L., *Modelos de Otimização Equivalentes para Minimização de Perdas através do FPO Newton*. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP, Outubro, 1997.

Ponrajah, R. A., Galiana, F.D., *The Minimum Cost Optimal Power Flow Problem Solved Via Restart Homotopy Continuation Method*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 1, Fevereiro, 1989, pp 139-148.

Quintana, V. H., Torres, G. L., Palomo, J. M., *Interior- Point Methods and Their Applications to Power Systems: A Classification of Publications and Software Codes*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, Fevereiro, 2000, pp 170-176.

Santos Jr., A., Deckmann, S., Soares, S., *A Dual Augmented Lagrangian Approach for Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 3, Agosto, 1988, pp 1020-1025.

Sasson, A., *Nonlinear Programming Solutions for Load-Flow, Minimum loss, and Economic Dispatching Problems*, IEEE Transactions on PAS, Vol. 88, No. 4, Abril, 1969, pp 399-408.

Sasson, A., Vilorio, F., Aboytes, F., *Optimal Load Flow Solution Using the Hessian Matrix*, Proc. of the Power Industry Computer Application Conference, Maio, 1971, pp 203-209.

Steinberg, M.J., Smith, T.H., *The Theory of Incremental Rates*, Pt. 1, Electrical Engineering, Abril, 1934.

Stott, B., Hobson, E., *Power System Security Control Calculations Using Linear Programming*, Parts I and II, IEEE Transactions on PAS, Vol. 97, No. 5, 1978, pp 1713-1731.

Stott, B., Marinho, J.L., *Linear Programming for Power System Network Security Applications*, IEEE Transactions on PAS, Vol. 98, No. 3, 1979, pp 837-848.

Sun, D.I, Ashley, B., Brewer, B., Hughes, A., Tinney, W.F., *Optimal Power Flow by Newton Approach*, IEEE Transactions on PAS, Vol. 103, No. 10, Outubro, 1984, pp 2864-2880.

Tinney, W.F., Bright, J.M., Demaree, K.D., Hughes, B.A., *Some Deficiencies in Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Systems , Vol. 03, No. 2, Maio, 1988, pp 676-683.

Tiranuchit, A., Ewerbring, L. M., Duryea, R. A., Thomas R. J., Luk, F. T., *Towards a Computationally Feasible On-Line Voltage Stability Index*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 03, No. 2, Maio, 1988, pp 669-675.

Torres, G.L., *Nonlinear Optimal Power Flow by Interior and Non-Interior Point Methods*, Tese de Doutorado, University of Waterloo, Ontario, Canadá, Novembro, 1998.

Torres, G.L., Quintana, V.H., *An Interior Point Method for Nonlinear Optimal power Flow Using Voltage Rectangular Coordinates* , IEEE Transactions on Power Systems, Vol.13, 1998, pp 1211-1218.

Torres, G.L., Quintana, V.H., *Optimal Power Flow by a Nonlinear Complementary Method*, Proc. PICA'99, Santa Clara, USA, Maio, 1999, pp 211-216.

Vargas, L.S., Quintana, V.H., Vannelli, A., *A Tutorial Description of a Interior Point Method and its Application to Security-Constrained Economic Dispatch*, IEEE/PES 1992 Summer Meeting.

Yamashita, H., Yabe, H, *Superlinear and Quadratic Converge of Some Primal-Dual Interior Point Methods for Constrained Optimization*, Mathematical Programming, 75, 1996, pp 377-397.

Wells, D.W., *Method for Economic Secure Loading of a Power System*, Proceedings of IEEE, Vol, 115, No. 8, 1968, pp 606-614.

Wu, Y., Debs, A.S., Marsten, R.E., *A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior point Algorithm for Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, 1994, pp 876-883.