

ANDRÉ FERNANDO SCHIOCHET

**FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO MULTI-OBJETIVO:
ABORDAGEM UTILIZANDO UMA
ESTRATÉGIA DE PARAMETRIZAÇÃO**

**FLORIANÓPOLIS
2006**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO MULTI-OBJETIVO:
ABORDAGEM UTILIZANDO UMA
ESTRATÉGIA DE PARAMETRIZAÇÃO

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ANDRÉ FERNANDO SCHIOCHET

Florianópolis, junho de 2006.

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO MULTI-OBJETIVO: ABORDAGEM UTILIZANDO UMA ESTRATÉGIA DE PARAMETRIZAÇÃO

André Fernando Schiochet

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Orientador

Nelson Sadowski, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Roberto de Souza Salgado, Ph.D. (EEL/UFSC)
Presidente

André Della Rocca Medeiros, Dr. Eng. (ONS)

Erlon Cristian Finardi, Dr. Eng. (EEL/UFSC)

Hans Helmut Zürn, Ph.D. (EEL/UFSC)

*Aos meus pais,
Aristides Schiochet e Vera Aparecida Busmeyer Schiochet;
Irmão, Irmã e Cunhada,
Júnior, Lis Morena e Alexandra;
Sobrinha
Ana Laura
e noiva
Melissa Fiorini
pelo carinho e apoio.*

"A água nunca discute com seus obstáculos, mas sempre encontra um meio de contorná-los."

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre me iluminou e mostrou o caminho a trilhar.

Agradeço ao meu orientador Prof. Roberto Salgado, pela sua orientação acadêmica, confiança e amizade.

A minha família, por me proporcionarem as condições de chegar aqui, sempre me apoiando e acreditando na minha capacidade de concluir este trabalho.

À minha noiva Melissa Fiorini, que me acompanhou e sempre me apoiou nos meus sonhos, participando intensamente de todos eles.

Aos meus amigos Vlad, Pedro, Dudu, Guaira, Sú, Maria Helena, Fabiano, entre outros, que sempre me incentivaram e ajudaram nos momentos difíceis deste percurso.

Aos professores vinculados ao Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) e Laboratório de Planejamento de Sistemas Elétricos (LABPLAN), com os quais tive a oportunidade de adquirir valiosos conhecimentos como aluno do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFSC.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade e infra-estrutura de realizar este trabalho.

Aos colegas da Companhia Estadual de Energia Elétrica do RS (CEEE-RS) e da pós-graduação pelo apoio e auxílio para finalizar esta dissertação.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o início, meio e fim dessa dissertação.

MUITO OBRIGADO a todos!!!

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO MULTI-OBJETIVO: ABORDAGEM UTILIZANDO UMA ESTRATÉGIA DE PARAMETRIZAÇÃO

André Fernando Schiochet

Junho/2006.

Orientador: Roberto de Souza Salgado

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Fluxo de Potência Ótimo, Multi-Objetivo, Pontos Interiores, Método de Parametrização, Método dos Pesos, Método da Restrição.

Número de Páginas: 121

Este trabalho de pesquisa apresenta uma abordagem multi-objetivo para a solução do problema de otimização como contribuição para o Fluxo de Potência Ótimo. Esta abordagem utiliza o método de pontos interiores para resolver o problema de otimização não-linear em conjunto com as metodologias multi-objetivo: método da restrição, método dos pesos e método de parametrização.

Uma revisão dos fundamentos do FPO e dos principais índices de desempenho aplicados ao planejamento e operação dos sistemas de potência é apresentada. Os métodos multi-objetivo utilizados são detalhados, bem como suas principais características.

A essência do algoritmo multi-objetivo formulado é a transformação de um índice de desempenho como função principal e a transformação dos índices restantes em restrições de desigualdade, os quais têm seus respectivos limites parametrizados e ponderados por pesos.

Para formulação do problema de otimização foram utilizadas as funções objetivo desvio quadrático de tensão de um valor pré-estabelecido, desvio de potência ativa de um valor pré-especificado e desvio de potência reativa de um valor pré-especificado. Podem ser escolhidos vários objetivos para o problema de otimização, dependendo dos valores especificados de potência ativa e reativa selecionados.

Os resultados obtidos demonstraram o bom desempenho do algoritmo na solução do problema de fluxo de potência ótimo para o sistema-teste IEEE-57 barras. A análise do efeito dos fatores de ponderação e a variação dos valores especificados de potência demonstraram a eficiência da abordagem multi-objetivo, se tornando muito interessante para o processo de decisão e para construção do conjunto de Pareto.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**MULTI-OBJECTIVE OPTIMAL POWER FLOW:
AN APPROACH BASED ON
PARAMETERISATION STRATEGY**

André Fernando Schiochet

June/2006

Advisor: Roberto de Souza Salgado

Area of Concentration: Power Systems

Key words: Optimal Power Flow, Multiobjective optimization, Interior Point optimization method, Parameterisation, Weights methods, Constraint methods.

Number of Pages: 121

This work presents an approach based on multi-objective optimization for the Optimal Power Flow solution. The proposed methodology uses the nonlinear Interior Point Method to solve the optimization problem, together with multi-objective optimization strategies, the weighting factors and the ϵ -constraint methods, and a parameterisation strategy.

A review on the basic aspects of the Optimal Power Flow problem, including a description of the main performance indexes used in the planning and operation of the power systems is presented. The multi-objective optimization techniques used in the present work are presented as well as the main features of these techniques are described.

The main characteristic of the proposed approach is the use of weighting factors attributed to the objective functions, the conversion of the objective functions into inequality constraints and the use of parameterized limits to model these constraints.

Three performance indexes are simultaneously optimized: the deviation of a pre-specified voltage level and the deviation of pre-specified active and reactive power generation distribution.

Numerical results obtained with the IEEE-57 buses test system were used to assess the potential of the proposed approach in the power system steady state analysis.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto Geral	1
1.2	Fluxo de Potência Ótimo	3
1.3	Fluxo de Potência Ótimo Multi-objetivo	4
1.4	Trabalho Proposto	5
1.5	Organização da Dissertação	6
2	Fundamentos do Fluxo de Potência Ótimo	7
2.1	Introdução	7
2.2	Conceitos Preliminares	7
2.3	Índices de desempenho	12
2.3.1	Despacho de Potência Ativa	12
2.3.2	Despacho de Potência Reativa	17
2.4	Conclusão	20
3	Fluxo de Potência Ótimo Multi-objetivo	22
3.1	Introdução	22
3.2	Aspectos Preliminares	22
3.3	Revisão Bibliográfica	23
3.3.1	O Método dos Pesos	24
3.3.2	O Método das Restrições	26
3.3.3	Modelo Parametrizado do Fluxo de Potência Ótimo	29

3.4	Validação do conjunto de Pareto	31
3.5	Conclusão	32
4	Formulação do Problema Multi-objetivo	34
4.1	Introdução	34
4.2	Conceitos Gerais	34
4.3	Índices de Desempenho	35
4.4	Aspectos Computacionais e Particularidades	39
4.4.1	Função Quadrática de Potência	40
4.4.2	Fatores de Ponderação	41
4.4.3	Convergência	42
4.5	Conclusão	43
5	Resultados Numéricos	45
5.1	Otimização Mono-objetivo	45
5.1.1	Controle de Tensão	46
5.1.2	Mínimo Custo de Geração	48
5.2	Otimização Multi-objetivo	50
5.2.1	Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Custo de Geração de Potência Ativa	51
5.2.2	Mínimo Desvio de Tensão, Mínimo Custo de Geração e Máxima Reserva de Potência Reativa	57
5.2.3	Mínimo desvio de Tensão, Mínima Perda de Potência Ativa e Máxima Reserva de Potência Reativa	61
5.3	Multiplicadores Duais relacionados aos índices de desempenho	65
5.4	Influência de ρ^{min}	66
5.5	Convergência do Processo Iterativo	68
5.6	Conclusão	70
6	Conclusões e Considerações Finais	71
6.1	Conclusões	71
6.2	Recomendações para Futuros Trabalhos	72

A	Método de Pontos Interiores	73
B	Solução do Problema de Otimização Multi-objetivo	78
C	Dados e Resultados do sistema IEEE-57 barras	84
C.1	Controle de Tensão - Flupot	84
C.2	Mínimo Custo do sistema - Flupot	88
C.3	Programa multi-objetivo desenvolvido	91
C.3.1	Mínimo Desvio de Tensão de 1 pu	91
C.3.2	Mínimo Custo do Sistema - PMO	93
C.3.3	Máxima Reserva de Potência Reativa - PMO	95
D	Exemplo aplicado a um sistema de quatro barras	98
D.1	Mínimo Desvio de Tensão, Mínimo Custo de Geração de Potência Ativa e Máxima Reserva Especificada de Potência Reativa	100

Lista de Figuras

5.1	Módulos da Tensão por barra (Comparação do Controle de Tensão entre Flupot e PMO).	47
5.2	Ângulos da Tensão por barra (Comparação do Controle de Tensão entre Flupot e PMO).	47
5.3	Módulos da Tensão por barra (Comparação do Mínimo Custo entre Flupot e PMO).	49
5.4	Ângulos da Tensão por barra (Comparação do Mínimo Custo entre Flupot e PMO).	49
5.5	Desvio Quadrático de Tensão utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.	52
5.6	Desvio de Potência Ativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.	52
5.7	Desvio de Potência Reativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.	53
5.8	Desvio de Potência Reativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.	53
5.9	Desvio Quadrático de Tensão utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.	59
5.10	Comparação do Perfil de tensão entre soluções multi-objetivo e mono-objetivo.	59
5.11	Desvio de Potência Ativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.	60
5.12	Desvio de Potência Reativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.	60
5.13	Comparação de Perdas de Potência Ativa.	63
5.14	Comparação de Perdas de Potência Reativa.	63
5.15	Processo Iterativo do Parâmetro ρ_P para uma solução convergente.	69
5.16	Processo Iterativo do Parâmetro ρ_P para uma solução não-convergente.	69
D.1	Sistema de 4 barras	98

Lista de Tabelas

5.1	Comparação das potências geradas (P_{g_i} e Q_{g_i}) do Controle de Tensão entre Flupot e PMO.	46
5.2	Comparação (Controle de Tensão) entre Flupot e PMO dos Desvios de Tensão, Desvios de Potência e Geração Total.	48
5.3	Comparação das Potências Ativas e Reativas Geradas por Barra (Mínimo Custo). . .	50
5.4	Comparação dos Desvios, Custo de Geração e Geração Total (Mínimo Custo).	50
5.5	Geração de Potência Ativa pela variação dos fatores de ponderação.	54
5.6	Geração de Potência Reativa pela variação dos fatores de ponderação.	54
5.7	Comparação da geração de potência ativa de soluções multi-objetivo.	61
5.8	Comparação da geração de potência reativa de soluções multi-objetivo.	61
5.9	Comparação dos Desvios de tensão, potência ativa e potência reativa.	64
5.10	Geração de potência ativa - Mínimo desvio de tensão, Mínima perda e Máxima reserva de potência reativa.	64
5.11	Geração de potência reativa - Mínimo desvio de tensão, Mínima perda e Máxima reserva de potência reativa.	64
5.12	Multiplicadores de Duais - Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Custo do Sistema. .	65
5.13	Multiplicadores Duais - Mínimo Desvio de Tensão e Máxima Reserva de Potência Reativa.	66
5.14	Influência do parâmetro ρ_P^{min} na solução de mínimo custo do sistema.	67
D.1	Dados de Linha e Dados de Carregamento	98
D.2	Dados dos Geradores	99
D.3	Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Desvio de Potência Ativa - variação do Peso w_P	104

D.4	Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Desvio de Potência Reativa - variação do Peso w_Q	105
D.5	Mínimo Desvio de Tensão, Mínimo Desvio de Potência Ativa e Mínimo Desvio de Potência Reativa - variação dos Pesos w_P e w_Q	106

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto Geral

As mudanças que ocorreram no Setor Elétrico Brasileiro na última década tiveram como pilares da reforma a introdução da competição e imposição de que os preços refletissem os custos reais. Para isto, ocorreu a desverticalização do setor elétrico, isto é, houve a separação das atividades de geração, transmissão e distribuição, e surgiu o segmento de comercialização de energia (Silva, 2001). O processo de reestruturação foi iniciado com a promulgação da lei de Concessões, em 1995, a qual teve como principais mudanças:

- A criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pela regulamentação tarifária e estabelecimento das condições gerais de contratação do acesso e do uso dos sistemas de transmissão e de distribuição;
- A definição de que as empresas transmissoras não poderiam desempenhar qualquer atividade de compra e venda de energia, e que estas trabalhariam com base no conceito de receita permitida;
- A definição pela ANEEL dos equipamentos e instalações pertencentes à Rede Básica e às Demais Instalações da Transmissão - DIT's;
- Estabelecimento de instrumentos contratuais para a compra e venda de energia e uso do sistema de transmissão;
- Definição do livre acesso à Rede Básica.

A introdução de um ambiente competitivo desencadeou um processo de ajustes regulatórios e a criação de novos participantes, em razão da necessidade de estruturação de regras comerciais para regular o relacionamento entre os agentes. Para atuar como um ambiente em que os agentes que se relacionam no mercado competitivo possam contabilizar e liquidar seus contratos, foi estruturado e implantado o Mercado Atacadista de Energia - MAE. Em decorrência das características do Sistema Elétrico Brasileiro, predominantemente hidrelétrico e com capacidade de regularização plurianual, o

novo modelo institucional manteve o despacho centralizado, visando a otimização do sistema, sob responsabilidade de um novo órgão, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Para que haja um funcionamento adequado de um mercado de energia elétrica é necessário observar alguns requisitos:

- Eficiência econômica da indústria como um todo;
- Auto-sustentação da indústria de modo a garantir a expansão do sistema;
- Operação do sistema com elevado grau de confiabilidade em consonância com requisitos de qualidade impostos pela sociedade;
- A prestação dos serviços não pode ser discriminatória e a universalização dos serviços deve ser perseguida.

Além destes requisitos, e da participação dos agentes de geração, transmissão, distribuição e comercialização, é necessário a criação de agentes cujas funções são compostas pela operação do sistema, operação do mercado, planejamento da expansão e regulação do mercado. No Brasil estes agentes são, respectivamente:

ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico;
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;
EPE	Empresa de Planejamento Energético;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.

O objetivo do ONS é garantir a confiabilidade e eficiência da operação em tempo real do Sistema Interligado Nacional (SIN), operando o sistema de forma otimizada e padronizada. Tem também como meta assegurar a transparência das ações operacionais e o tratamento equânime dos agentes, com a manutenção da segurança, continuidade e qualidade no suprimento de energia elétrica (sítio do ONS).

Atualmente, um dos grandes problemas no setor elétrico está sendo a falta de investimentos para expansão da geração e da rede de transmissão e distribuição. Isto pode ocasionar sérios problemas, pois a reserva energética do país diminui à medida que a demanda cresce, assim levando o sistema a operar sob condições cada vez mais críticas. Algumas dessas condições críticas são:

- O decréscimo da margem de segurança do sistema influenciando na confiabilidade. Isto ocorre devido ao aumento da demanda de carga ser maior que o aumento da geração;
- O sistema necessita uma boa capacidade de *reserva girante*, a qual é normalmente calculada com base numa estimativa de confiabilidade do sistema. Esta reserva é necessária para a eventualidade de situações emergenciais;
- a utilização dos equipamentos sob condições limite, diminuindo a vida útil destes e não podendo suportar situações emergenciais.

Inserido dentro deste contexto estão as empresas do setor de energia elétrica, as quais têm a necessidade de operar e planejar o sistema em sua área de concessão. Os equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), como transformadores e linhas de transmissão, geralmente são operados de acordo com as suas capacidades nominais e emergenciais, e portanto ferramentas computacionais mais poderosas que calculem o fluxo de potência e auxiliem na tomada de decisão são cada vez mais necessárias.

1.2 Fluxo de Potência Ótimo

O **Fluxo de Potência Ótimo (FPO)** é uma ferramenta computacional utilizada para a análise e síntese da operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). O FPO tem como objetivo determinar a *melhor* distribuição de potência pelas unidades geradoras em funcionamento, o *melhor* perfil de tensão ou mesmo a *melhor* distribuição de potência reativa, todos com base na otimização de um ou vários índices de desempenho e atendendo simultaneamente a um conjunto de restrições.

A otimização da operação de um sistema físico pode ser interpretada como a determinação da melhor solução de um problema analiticamente bem definido, o qual é suposto ser uma representação satisfatória do comportamento real do sistema. Esta área inclui os estudos do critério de otimalidade para os problemas, a determinação de métodos de solução, o estudo da estrutura desses métodos e a implementação computacional em problemas testes e reais (Castrunovo, 2001).

Nas empresas de energia elétrica, os programas de FPO são geralmente utilizados no planejamento (projeto de um sistema de transmissão, análise de carregamento, avaliação do perfil da tensão, etc) e na operação (auxílio ao operador para a tomada de decisão em tempo real) dos sistemas.

O FPO consiste em resolver um conjunto de equações algébricas, não lineares e complexas, que resultam da aplicação das leis de Kirchhoff a um sistema com potências demandadas conhecidas. Diferentemente de um problema clássico de Fluxo de Potência, que necessita da especificação de algumas variáveis tais como: magnitudes de tensão e potência ativa gerada nas barras de geração (barras PV), o FPO trata estas variáveis como passíveis de ajustes. Para tanto, ele geralmente é apresentado como um problema de otimização, onde se procura maximizar ou minimizar um índice de desempenho, atendendo simultaneamente a um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade. Uma referência clássica para este problema é o trabalho de CARPENTIER (1962), onde formalmente foi apresentado um problema para minimizar custo de produção de energia, considerando as equações de balanço de potência ativa e reativa como restrições de igualdade e as limitações físicas dos equipamentos como restrições de desigualdade. Esta formulação serve como um ponto de partida para os estudos posteriores.

O índice de desempenho representa uma função objetivo modelada analiticamente, a qual reflete os aspectos econômicos, de qualidade de serviço e de segurança do SEP. As restrições de igualdade incluem os balanços de potência ativa e reativa do sistema. As restrições de desigualdade tratam dos limites nas variáveis de decisão, dos limites operacionais das máquinas e equipamentos, das restrições de segurança, etc. Geralmente, deseja-se determinar as soluções das equações da rede elétrica em

regime permanente. A formulação analítica deste problema implica em um modelo de otimização não-linear, multi-variável e de acentuada complexidade.

1.3 Fluxo de Potência Ótimo Multi-objetivo

Os aplicativos comerciais consideram em geral a otimização de um índice de desempenho por vez. Entretanto, muitos são os objetivos que influenciam no planejamento da operação dos sistemas de potência, tais como os aspectos de segurança, custo de geração, reserva de potência reativa, poluição ambiental, perda de potência nas linhas de transmissão, etc. A operação ótima do sistema de potência é alcançada quando vários objetivos são considerados simultaneamente. As técnicas convencionais de otimização do FPO solucionam o problema de otimização sob um único aspecto (e.g., custo de geração ou mínimo desvio da tensão nominal dos equipamentos) e muitas vezes esta solução pode não ser aceitável para os equipamentos. Assim, o planejamento da operação considerando diversos índices de desempenho simultaneamente deve ser tratado segundo as técnicas de otimização Multi-Objetivo (MO). Estas técnicas encontram um número de soluções viáveis, as quais todas são candidatas para a solução ótima.

A otimização Multi-Objetivo (MO) representa uma generalização dos métodos convencionais mono-objetivo e incorpora grandes vantagens às técnicas de otimização, dentre as quais pode-se citar:

- alcançar a solução ótima considerando vários objetivos simultaneamente (custo de geração, máxima reserva de reativo, mínima perda de potência ativa nas linhas de transmissão, etc);
- facilitar a tomada de decisão, pois indica as conseqüências da decisão com relação a todas as funções objetivo consideradas;
- promover regras mais apropriadas e mais transparentes para os participantes do sistema no planejamento e no processo de tomada de decisão;
- a percepção do analista ao problema será mais realista se muitos objetivos forem considerados.

Um problema de otimização MO consiste em determinar um vetor de variáveis de decisão, que satisfaça um conjunto de restrições e otimize uma função vetorial, cujos elementos representam os índices de desempenho a serem otimizados. Em um problema de otimização convencional, considerando apenas um índice de desempenho, busca-se uma solução viável que otimize um certo objetivo e resolva as restrições de igualdade e desigualdade e esta solução geralmente é única. Em problemas de otimização MO, a solução que minimiza um índice provavelmente não otimiza outros índices. Portanto, é adotado uma outra noção de otimalidade, conhecida como *otimalidade de Pareto*. Este conceito, utilizado para ilustrar o compromisso entre a otimização dos diferentes objetivos, é descrito a seguir.

Uma solução viável para um problema de otimização é uma solução de Pareto se não existir nenhuma outra solução que irá produzir uma melhoria em um objetivo sem causar uma degradação em pelo menos um dos demais objetivos.

Deve-se ter cuidado na escolha dos índices de desempenho, pois muitas vezes estas são conflitantes em natureza e outras vezes pode não fazer sentido utilizar determinados índices em conjunto (e.g. *máximo carregamento com mínimo corte de carga*).

1.4 Trabalho Proposto

Há mais de quatro décadas são desenvolvidas pesquisas sobre algoritmos para a solução do FPO e diversos aspectos requerem ainda estudos adicionais. Dentre esses, encontra-se a consideração simultânea de vários índices de desempenho, a inclusão de restrições de segurança, e mesmo o desenvolvimento de algoritmos de solução mais robustos e mais confiáveis. Isto motivou este trabalho o qual é descrito a seguir.

Um problema de otimização envolve variáveis, restrições e um ou mais critérios a serem otimizados. A natureza destes elementos caracteriza o tipo do problema de otimização. Como a formulação do problema de otimização envolve funções não-lineares, isto implica na aplicação de algoritmos de solução pertencentes à classe de otimização não-linear. A pesquisa proposta tem por finalidade o desenvolvimento de uma metodologia de solução deste problema considerando diferentes objetivos a serem otimizados simultaneamente. A metodologia desenvolvida é baseada em uma versão do Método de Pontos Interiores.

O objetivo desta dissertação foi desenvolver um trabalho tratando do FPO considerando multi-objetivos. Importantes contribuições foram alcançadas em termos de soluções do FPO. Dentre elas, pode-se citar a formulação do problema, estudos de algoritmos de solução, aplicação de técnicas de solução numérica ao problema e avaliação dos resultados. Foram considerados três índices de desempenho, relacionados ao despacho de potência ativa e reativa:

- 1) Desvios quadráticos de magnitude da tensão de um perfil pré-estabelecido;
- 2) Desvios absolutos de geração de potência ativa de uma distribuição pré-especificada;
- 3) Desvios absolutos de geração de potência reativa de uma distribuição pré-especificada;

A solução do problema resultante será obtida através do algoritmo de Pontos Interiores, versão primal-dual em conjunto com a aplicação do método dos pesos, do método das restrições e estratégia de parametrização. Com o mesmo algoritmo pode-se encontrar diversas soluções para o mesmo problema de otimização, considerando apenas um índice de desempenho, dois ou três índices de desempenho, como também soluções intermediárias entre estes índices.

Os estudos das metodologias de solução do problema de FPO MO foram acompanhados do desenvolvimento de um programa computacional no ambiente MATLAB. O sistema IEEE-57 barras foi utilizado para simulação e diversos testes foram realizados, tais como a comparação da ponderação dos índices de desempenho, utilização de diferentes valores especificados para os índices, monitoração dos valores parametrizados, comparação das soluções, etc.

1.5 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos e três apêndices.

No Capítulo 2 os componentes básicos da formulação do FPO são apresentados e conceitos básicos, tais como as variáveis de otimização e as restrições de igualdade e desigualdade, são definidos. Uma revisão bibliográfica das diversas técnicas de solução do FPO é realizada. Ainda neste capítulo são analisados diversos índices de desempenho utilizados no FPO.

O Capítulo 3 apresenta os fundamentos do FPO multi-objetivo, as características do *Conjunto de Pareto* e uma revisão bibliográfica dos métodos MO aplicados na solução do problema de otimização.

A abordagem MO e sua aplicação no problema de FPO, bem como algumas particularidades e alguns detalhes de implementações são assunto do Capítulo 4.

Os principais resultados das simulações realizadas através da variação dos fatores de ponderação e dos índices de desempenho compõem o Capítulo 5.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações para futuros trabalhos. A metodologia de pontos interiores, a solução do problema MO proposto e os dados do sistema IEEE-57 barras são apresentados nos apêndices.

Capítulo 2

Fundamentos do Fluxo de Potência Ótimo

2.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se os fundamentos do FPO e suas principais características. As variáveis de otimização, as restrições de igualdade e desigualdade e alguns dos procedimentos mais utilizados na solução dos problemas de otimização são descritos. Alguns índices de desempenho que podem ser utilizados no FPO, representados matematicamente pelas funções objetivo e a análise das principais variáveis das funções objetivo também são vistos no capítulo.

2.2 Conceitos Preliminares

Os principais aspectos relacionados ao problema de FPO são: a definição das variáveis, a formulação das restrições e dos índices de desempenho e as técnicas numéricas para solução do problema. As variáveis do problema normalmente consideradas referem-se a quantidades de barras ou elementos de ramos tais como:

- V : a magnitude da tensão de barra;
- δ : o ângulo de fase da tensão de barra;
- P_g e P_d : as potências ativa gerada e demandada;
- Q_g e Q_d : as potências reativa gerada e demandada;
- a : o “tap” de transformadores em fase com ajuste automático de carga;
- φ : a fase de transformadores defasadores com controle automático de fase;
- t : intercâmbio entre áreas;
- Q_{sh} : a injeção de potência reativa proveniente de indutores ou capacitores em derivação.

Algumas destas variáveis podem ser monitoradas diretamente para se obter a otimalidade desejada, outras indiretamente, ou seja, seu valor é dependente das variáveis monitoradas diretamente. Há

ainda aquelas que são consideradas constantes. Portanto, é usual classificá-las em variáveis de controle ou independentes, variáveis de estado ou dependentes e variáveis de perturbação ou parâmetros fixos.

A classificação destas variáveis é feita de acordo com o problema de otimização. O processo de otimização pode ser executado tomando-se como variáveis de otimização qualquer conjunto de variáveis dentre as previamente citadas como, por exemplo, os ângulos de fase, as componentes real e imaginária da tensão complexa, etc. As variáveis de controle devem ser expressas em relação aos dispositivos de controle físicos do sistema elétrico, tais como geração de potência ativa, geração de potência reativa, magnitude das tensões geradas, etc.

Dispositivos de saída discreta (banco de capacitores, reatores, e mesmo os taps de transformadores com comutação sob carga) são difíceis de serem modelados. No que diz respeito aos taps, um procedimento geralmente adotado é considerar os mesmos como variáveis contínuas durante o processo e, se na solução ótima o valor do tap esteja entre dois valores fisicamente viáveis, ajustá-lo para o valor mais próximo.

Qualquer problema de sistema de potência em regime permanente no qual busca-se a minimização ou maximização de um especificado índice, através do ajuste das quantidades controláveis apropriadas satisfazendo as equações de balanço de potência ativa e reativa em cada barra, pode ser visto como um problema de FPO. Em termos matemáticos este problema não-linear, estático, multivariável, com restrições de igualdade e desigualdade pode ser expresso como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \\ & \text{sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde, \mathbf{u} é o vetor das quantidades controláveis, \mathbf{x} é o vetor das variáveis dependentes; $f(\cdot)$ é a função objetivo; $\mathbf{g}(\cdot)$ é o vetor das funções não-lineares que representam as restrições de igualdade; $\mathbf{h}(\cdot)$ é o vetor das funções não-lineares que representam as restrições de desigualdade.

As *Restrições de Igualdade*, também chamadas de *Restrições de Carga* de um problema de FPO, correspondem as equações não-lineares da rede elétrica e representam a relação entre as variáveis dependentes e as variáveis independentes. Analiticamente, essas restrições representam os balanços de potência ativa e reativa e podem ser expressas de duas formas:

- em termos do valores totais de potência ativa gerada, consumida e de perdas:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_{g_i} - \sum_{i=1}^n P_{d_i} - P_l &= 0 \\ \sum_{i=1}^n Q_{g_i} - \sum_{i=1}^n Q_{d_i} - Q_l &= 0 \end{aligned}$$

onde, P_{g_i} e Q_{g_i} são as potências ativa e reativa geradas na barra i , P_{d_i} e Q_{d_i} são as potências ativa e reativa demandadas na barra i , P_l e Q_l são as perdas de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, e cada somatório envolve as n barras do sistema elétrico.

- em termos do balanço de potência relativo a cada barra individualmente; ou seja,

$$(P_{g_i} - P_{d_i}) - P_i(V, \delta, a) = 0$$

$$(Q_{g_i} - Q_{d_i}) - Q_i(V, \delta, a) = 0$$

onde, P_{g_i} e Q_{g_i} são as potências ativa e reativa geradas na barra i , P_{d_i} e Q_{d_i} são as potências ativas e reativas demandadas na barra i e $P_i(V, \delta, a)$ e $Q_i(V, \delta, a)$ são as injeções de potência ativa e reativa na barra i .

A alternativa de usar uma dessas duas formas diz respeito apenas a formulação matemática do algoritmo. O balanço de potência ativa total é geralmente utilizado nos problemas de despacho econômico clássico, requerendo a solução das equações da rede como uma etapa complementar.

As *Restrições de Desigualdade* são incluídas no problema para representar os limites físicos dos componentes ou aspectos de segurança relacionados à operação do sistema. As restrições deste tipo podem ser divididas em três grupos:

- *Restrições nas Variáveis de Controle*, as quais tem como objetivo refletir as limitações físicas dos equipamentos utilizados no despacho de potência. Limites nas gerações de potência ativa/reativa, na magnitude das tensões geradas, nos taps dos transformadores com comutação sob carga, são as restrições mais comuns deste tipo;
- *Restrições Funcionais*, as quais refletem os limites impostos às variáveis dependentes. Limites na magnitude da tensão das barras (se as equações da rede elétrica são resolvidas como complemento do problema de otimização), limites na geração de potência reativa e nos fluxos de potência ativa e/ou reativa pertencem a este tipo de restrição. Note que essas grandezas podem ser expressas como uma função da magnitude e do ângulo da tensão nas barras do sistema de potência;
- *Restrições de Segurança*, as quais representam as restrições operacionais e de carga relacionados a um conjunto de contingências determinadas pela função *Análise de Segurança em Tempo Real*. Limites nos fluxos de potência das linhas de transmissão para saídas eventuais de determinados componentes do sistema elétrico podem ser incluídos neste tipo de restrição;

As principais dificuldades relacionadas à manipulação das restrições de desigualdade são:

- O grande número de restrições envolvidas, principalmente se o aspecto de segurança é considerado;
- a impossibilidade de se identificar no início do processo de otimização que restrições serão ativas (isto é, estarão no limite, como igualdades) na solução final;
- as imprecisões na atualização das variáveis dependentes, principalmente se modelos são utilizados no processo de otimização;

Em sua forma original, todas as restrições pertinentes ao problema de FPO são não lineares. Entretanto, da mesma forma que na solução do Fluxo de Potência convencional, a linearização sucessiva das equações envolvidas pode ser aplicada, assim como o desacoplamento entre as malhas *potência ativa - ângulo da tensão* e *potência reativa - módulo da tensão* pode ser vantajosamente explorado. Mesmos modelos lineares, baseados no fluxo de potência C.C., podem ser utilizados para representar as restrições de igualdade. A solução do FPO é tanto mais degradada quanto mais aproximações forem feitas no modelo matemático que representa o problema físico. Entretanto, dependendo das características particulares do sistema de potência, é possível manter um nível razoável de precisão a despeito dessas simplificações. Desde que a metodologia de FPO é normalmente utilizada para a parte de alta tensão do sistema, as aproximações envolvendo o desacoplamento, se convenientemente feitas, não degradarão a precisão dos resultados.

O problema de otimização pode ser solucionado por diversas metodologias:

- **Programação Linear**

Esta técnica de solução de problemas de otimização se caracteriza pela sua rapidez e confiabilidade. A bibliografia sobre este método é extensa, destacando-se (Dantzig, 1963; Luenberger, 1965; Mamandur and Chenowete, 1981; Fletcher, 1987; Ristanovic, 1996). Nesta abordagem, tanto a função objetivo quanto as restrições são linearizadas em um ponto de operação. A linearização das funções pode ser resultante da linearização sucessiva de funções não-lineares em cada iteração. A inicialização do processo de solução, com esta abordagem, é feita através de um fluxo de potência convencional. Assim, partindo de uma solução viável formula-se o problema de Programação Linear (PL), linearizando a função objetivo e as restrições. Em cada iteração ocorrem ajustes nas variáveis de controle enquanto as variáveis dependentes são obtidas através de um fluxo de carga até que a solução ótima seja encontrada. Os métodos mais comuns de solução em PL são:

- * *Simplex*
- * *Dual Simplex*
- * *Dual Simplex revisado*

- **Programação Não-linear**

Diversas metodologias desenvolvidas na solução do problema de FPO utilizam funções não-lineares, as quais representam mais fielmente o sistema elétrico de potência. Isto inclui as equações de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, restrições de desigualdade que representam as limitações de equipamentos (potência gerada pelas máquinas de usinas, tap de transformadores), limitações de tensão e as funções objetivo a serem otimizadas. Em termos computacionais este tipo de abordagem é potencialmente mais onerosa. Alguns métodos de Programação Não-Linear (PNL) são listados a seguir:

- * *Métodos Baseados no Gradiente*

Estes foram os primeiros métodos de solução propostos para o FPO (Dommel and Tinney, 1968). Eles foram aplicados tanto para o modelo desacoplado, quanto para o modelo

completo. A principal vantagem é a simplicidade do modelo, que pode ser visto como uma extensão do fluxo de potência convencional.

* *Método de Newton*

Este método também é conhecido por método do gradiente modificado, o qual consiste basicamente em aproximar a Função Lagrangeana por uma função quadrática, tratando as restrições de desigualdade através de funções de penalidade. Esta metodologia foi muito utilizada na década de oitenta (Sun et al., 1984; Burchett et al., 1984; Maria and Findlay, 1987), embora estivesse associada à dificuldade de manipulação das restrições de desigualdade e o tratamento de não-convexidades.

* *Programação Quadrática Sequencial*

Esta classe de algoritmos é intermediária entre as metodologias de PL e as de estrita PNL. A solução do problema de FPO é semelhante ao de Programação Linear Sequencial, utilizando-se linearizações sucessivas nas restrições e representando a função objetivo por uma função quadrática. Alguns trabalhos na área são de (Fletcher, 1987; Burchett et al., 1984; Momoh, 1996).

* *Método de Pontos Interiores*

Este método (Karmarkar, 1984) tem permanecido em evidência desde a década de 90 e mostrou-se competitivo aos algoritmos Simplex para solução do problema de PL. A aplicação do método de Pontos Interiores formulado como um problema de PNL foi apresentado em Granville (1994), utilizando o algoritmo de barreira primal-dual ao problema de despacho ótimo de potência reativa.

Esta classe de algoritmos propõe a modificação das condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) durante o processo iterativo e o método baseia-se nos seguintes tópicos fundamentais:

- Formulação da Função Lagrangeana para a manipulação das restrições de igualdade;
- Transformação de todas as restrições de desigualdade em restrições de igualdade, através das variáveis de folga;
- Relaxação no processo iterativo da equação de complementaridade estrita, por um parâmetro barreira logarítmica $\mu \geq 0$;
- Utilização do Método de Newton para a solução de um conjunto de equações não lineares.

Diversos trabalhos baseados nos métodos de Pontos Interiores foram desenvolvidos na última década, entre os quais podemos citar (Granville et al., 1994; Barboza, 1997, 2001; Castrunovo, 1997, 2001). A base teórica da versão do Método de Pontos Interiores aplicado no presente trabalho é apresentada no Apêndice A.

* *Fluxo de Potência Ótimo Paramétrico*

Esta abordagem tem sido aplicada na solução do FPO para prevenir a divergência no processo iterativo e para estudos de máximo carregamento. Pode-se parametrizar a função objetivo, as restrições de igualdade, as restrições de desigualdade, etc. No presente trabalho, este tipo de formulação foi utilizado para parametrizar os limites superiores de

índices de desempenho transformados em restrições de desigualdade. Mais detalhes sobre o assunto são vistos em (Carpentier, 1973; Galiana and outros, 1983; Wu et al., 1993, 1994; Almeida, 1994; Irissari et al., 1997) e na Seção 3.3.3.

* *Fluxo de Potência Ótimo Multi-objetivo*

Este método utiliza duas ou mais funções objetivos no problema de otimização de FPO, sendo apresentado com boas perspectivas na referência (Wadhwa and Jain, 1990). Neste documento, é proposta uma formulação do FPO multi-objetivo considerando de forma simultânea as funções objetivo mínimo desvio quadrático do módulo de uma tensão pré-especificada, mínimo desvio de uma potência ativa pré-especificada e mínimo desvio de uma potência reativa pré-especificada. Esta abordagem é apresentada no Capítulo 3.

2.3 Índices de desempenho

O índice de desempenho representa quantitativamente o que se deseja otimizar, sendo sua forma analítica modelada por uma função. O uso apropriado desta é talvez, o mais importante e mais difícil aspecto de qualquer aplicação do FPO.

Os índices de desempenho devem ser escolhidos de acordo com o objetivo que se deseja alcançar no planejamento e/ou operação do sistema de potência. Dois pontos fundamentais devem ser considerados:

- A escolha de um índice que representa realisticamente as práticas e objetivos operacionais do sistema de energia elétrica;
- A definição da representação analítica do índice selecionado, de forma a facilitar a aplicação da técnica de otimização;

Muitas funções objetivo têm sido propostas, e podem ser classificadas pela natureza das variáveis de controle e pelos resultados a serem obtidos. Estas funções podem ser divididas em três classes de problemas:

- Despacho ótimo de potência ativa;
- Despacho ótimo de potência reativa;
- Despacho ótimo simultâneo de potência ativa e reativa.

2.3.1 Despacho de Potência Ativa

Alguns objetivos comumente utilizados para a determinação da distribuição ótima de potência ativa são mostrados a seguir:

2.3.1.1 Custo de Geração de Potência Ativa

Este objetivo reflete o aspecto econômico do sistema elétrico e na prática representa o índice a ser otimizado no despacho econômico de usinas térmicas, onde cada unidade termoeletrica geradora é representada por uma curva de custo de geração em função da potência ativa gerada. Esta curva de custo é na verdade, uma aproximação (linear, quadrática, etc.) da curva real de custo da unidade geradora.

Este índice de desempenho pode ser utilizado em usinas hidrelétricas, caso se consiga construir uma aproximação da curva de custo real em um determinado período, pois esta depende do planejamento hídrico do reservatório ¹.

A sua forma analítica consiste no somatório dos custos de geração de potência ativa das diversas unidades do sistema (Carpentier, 1962; Happ, 1977), sendo expressa como:

$$f(P_{gi}) = \sum_{i \in G_p} C_i(P_{gi}) \quad (2.2)$$

onde, $\{G_p\}$ é o conjunto de unidades geradoras de potência ativa, $C_i(\cdot)$ e P_{gi} são, respectivamente, as curvas de custo e a geração de potência ativa da i -ésima unidade geradora. Em geral, as curvas de custo $C_i(\cdot)$ são representadas por polinômios de segundo grau da forma:

$$C_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (2.3)$$

onde a_i , b_i e c_i são os coeficientes da função quadrática correspondente a i -ésima unidade geradora, com unidades $\frac{\$}{MW}$ e $\frac{\$}{MW^2}$, respectivamente. Alternativamente, uma função linear (ou linear segmentada) pode ser utilizada para representar a curva de custo de geração dependendo do nível de precisão requerida e da técnica numérica utilizada,

$$C_i(P_{gi}) = b_i P_{gi} \quad (2.4)$$

onde b_i é a inclinação da reta que representa a curva de custo.

Este índice pode ser utilizado tanto no despacho de potência ativa preventivo como no corretivo. O despacho preventivo é feito no planejamento da operação a curto prazo, enquanto que o despacho corretivo é feito para otimizar o custo do desvio de uma potência ativa pré-especificada

$$C_i(P_{gi}) = a_i + b_i(P_{gi} - P_{gi}^{esp}) + c_i(P_{gi} - P_{gi}^{esp})^2 \quad (2.5)$$

onde os desvios $(P_{gi} - P_{gi}^{esp})$ teriam coeficientes de custo semelhantes aos da potência ativa gerada.

¹No tocante à sistemas hidrotérmicos é necessário prover informação com relação ao valor da água. Em geral isto é representado por um conjunto de restrições lineares que relacionam o custo futuro esperado com função do volume armazenado nos reservatórios. Detalhes de como este custo é obtido podem ser vistos em (Silva and Finardi, 2003)

2.3.1.2 Desvios Quadráticos Ponderados de uma Distribuição de Potência Ativa Pré-especificada

Este índice de desempenho normalmente é utilizado no despacho corretivo, implicando que variações de grande magnitude a partir de uma solução pré-estabelecida (considerando a mais econômica e/ou segura) são penalizadas. Ela é utilizada quando não se desejam grandes variações de um determinado ponto de operação.

Estas variações podem ser ponderadas nas unidades geradoras de acordo com a meta a alcançar. É uma função importante no caso brasileiro, cujo sistema têm predominância hidrelétrica, pois o despacho de potência ativa nas usinas pode ter sido calculado previamente seguindo outros critérios de otimização na operação dos reservatórios.

A forma analítica desta função é dada por:

$$f(\Delta P_{gi}) = \sum_{i \in G_P} \alpha_i (\Delta P_{gi})^2 \quad (2.6)$$

onde $\Delta P_{gi} = P_{gi} - P_{gi}^{esp}$ é o desvio do valor pré-especificado na unidade geradora i , α_i é a penalidade aplicada ao desvio de potência e $\{G_P\}$ é o conjunto de unidades geradoras de potência ativa.

Fazendo a expansão da Equação (2.6)

$$f(\Delta P_{gi}) = \sum_{i \in G_P} \alpha_i ((P_{gi}^{esp})^2 - 2P_{gi}^{esp} \cdot P_{gi} + P_{gi}^2) \quad (2.7)$$

Comparando a Equação (2.7) com a (2.3) pode-se fazer a seguinte analogia:

$$\begin{aligned} a_i &\rightarrow \alpha_i (P_{gi}^{esp})^2 \\ b_i &\rightarrow -2\alpha_i P_{gi}^{esp} \\ c_i &\rightarrow \alpha_i \end{aligned}$$

O uso destes coeficientes fictícios permite que o algoritmo desenvolvido para a solução do problema de mínimo custo de geração seja aplicado na otimização de um índice de desempenho de mínimos desvios, sem que seja necessário modificar a forma de busca da solução ótima.

Outra forma de modelar esta função objetivo é através do somatório do módulo dos desvios ponderados de uma distribuição de potência ativa pré-especificada, a qual será utilizada no presente trabalho.

$$f(\Delta P_{gi}) = \sum_{i \in G_P} \alpha_i |\Delta P_{gi}| \quad (2.8)$$

Embora esta função aparente ser simples, sua aplicação requer um grande cuidado na seleção dos fatores de ponderação e na potência especificada da qual pretende-se o mínimo desvio, pois a variação destes fatores modifica a condição final alcançada.

- **Seleção dos Fatores de Ponderação**

Durante um processo iterativo de otimização é observado que os maiores incrementos de potência tendem a ser atribuídos às unidades geradoras correspondentes aos menores fatores de ponderação. Os fatores de ponderação α_i podem ser estipulados para penalizar aumentos na geração de potência ativa das unidades P_{g_i} com maior rigor do que em outras unidades.

Algumas alternativas são propostas:

- * *Fatores de Ponderação Unitários*

$$\alpha_i = 1$$

Com este tipo de ponderação os desvios são penalizados de forma semelhante em todas as unidades geradoras, independente da localização, capacidade ou custo de potência ativa gerada.

- * *Fatores de Ponderação selecionados pela Capacidade Nominal das Unidades Geradoras*

$$\alpha_i = \frac{1}{|P_{g_i}^M - P_{g_i}^m|}$$

onde $P_{g_i}^M$ e $P_{g_i}^m$ são os limites máximo e mínimo da unidade geradora i , respectivamente. Os maiores desvios tenderão a ser atribuídos às unidades geradoras com maior capacidade.

- * *Fatores de Ponderação selecionadas pela Curva de Custo das Unidades Geradoras*

$$\alpha_i = c_i$$

Os desvios serão penalizados de acordo com o coeficiente do termo quadrático da curva de custo de geração. Maiores desvios tenderão a ser atribuídos às unidades geradoras com menor coeficiente quadrático c_i . Caso a curva de custo seja representada por uma função linear, o fator de ponderação ainda pode ser considerado o coeficiente linear da curva de custo ($\alpha_i = b_i$).

- **Seleção da Potência Ativa Pré-especificada**

A seleção deste índice indica o nível de potência ativa gerada do qual o analista pretende obter o menor desvio quadrático. Este nível pode refletir tanto um aspecto econômico como um aspecto relacionado à segurança do sistema. Algumas alternativas são mostradas a seguir.

- * *Minimização dos desvios da solução de mínimo custo*

A potência ativa pré-especificada é escolhida sendo uma solução pré-determinada por uma minimização do custo de geração.

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min\ custo}$$

Neste caso, o aspecto econômico é predominantemente refletido. Combinado com os fatores de ponderação pode-se obter vários resultados, alguns dos quais são os seguintes:

- Minimização do desvio da solução de mínimo custo distribuindo os desvios sem discriminação entre os geradores

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min\ custo} \text{ e } \alpha_i = 1$$

- Minimização do desvio da solução de mínimo custo distribuindo os desvios pela capacidade nominal de potência ativa de cada gerador

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min\ custo} \text{ e } \alpha_i = \frac{1}{|P_{g_i}^M - P_{g_i}^m|}$$

- Minimização do desvio da solução de mínimo custo distribuindo os desvios pelo coeficiente quadrático da curva de custo de cada gerador

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min\ custo} \text{ e } \alpha_i = c_i$$

* *Maximização da Reserva de Potência Ativa*

A potência ativa pré-especificada é escolhida sendo o limite mínimo dos geradores

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min}$$

Esta alternativa pode ser vista como a aplicação de um critério relacionado à segurança do sistema elétrico, pois isto permite suportar eventuais aumentos de carga ou contingências de geração e transmissão com maior segurança.

Neste caso, é possível observar uma tendência a que as perdas de potência ativa sejam reduzidas, devido a uma menor circulação de fluxo pelas linhas de transmissão.

Considerando os fatores de ponderação podemos obter os seguintes resultados:

- Maximização da reserva de potência ativa distribuindo os desvios sem discriminação entre os geradores

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min} \text{ e } \alpha_i = 1$$

- Maximização da reserva de potência ativa distribuindo os desvios pela capacidade nominal de potência ativa de cada gerador

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min} \text{ e } \alpha_i = \frac{1}{|P_{g_i}^M - P_{g_i}^m|}$$

- Maximização da reserva de potência ativa distribuindo os desvios pelo coeficiente quadrático da curva de custo de cada gerador

$$P_{g_i}^{esp} = P_{g_i}^{min} \text{ e } \alpha_i = c_i$$

2.3.1.3 Corte de Carga

Esta função visa diminuir o corte de carga em situações de emergência e/ou estabelecer limites no carregamento do sistema. Este é considerado o último recurso de controle quando o problema de FPO é constatado não ter solução viável por excesso de carregamento. Como o corte de carga é uma ação de chaveamento discreta, torna-se difícil modelá-lo com precisão.

Esta função pode ser expressa através de uma função linear do parâmetro de incremento de carga e o corte de carga é feito de tal forma a preservar o fator de potência da carga.

Fatores de ponderação podem ser utilizados para penalizar mais (ou menos) intensamente o corte de determinadas cargas. As curvas de custos também podem ser utilizadas levando em consideração a natureza das cargas (sinal contrário ao da potência gerada).

2.3.1.4 Ação de Controle

Esta função objetivo é utilizada em condições de emergência e procura estabelecer o mínimo número de controles que devem ser alterados de forma a corrigir as violações operativas nas restrições de desigualdades (sobrecargas em circuitos, tensões nos barramentos).

Em um sistema de controle real, o operador pode desejar remover as violações redistribuindo o menor número de unidades ou modificar o menor número de variáveis de controle. Como auxílio pode-se utilizar a sensibilidade dos controles em relação às restrições violadas. Existem diversas formulações analíticas para modelar esta função objetivo.

2.3.2 Despacho de Potência Reativa

Os índices mais comuns utilizados no problema de otimização do despacho de potência reativa são apresentados a seguir.

2.3.2.1 Perda de Potência Ativa nas linhas de transmissão

Este objetivo visa diminuir o valor das perdas no sistema e, determinar a geração de potência reativa (ou nível de tensão gerada) e os taps dos transformadores com comutação sob carga de forma a resultar em uma operação mais econômica. É importante enfatizar, que o efeito da minimização deste índice no custo de geração de potência ativa é considerado de segunda ordem. Podemos expressar este objetivo utilizando a equação de balanço de potência ativa total do sistema

$$\sum_{i=1}^n (P_{g_i} - P_{d_i}) - P_l = 0$$

onde P_{g_i} é a potência ativa gerada na barra i , P_{d_i} é a potência ativa demandada na barra i e P_l é a perda de potência ativa total nas linhas de transmissão, onde o somatório envolve as n barras do sistema

elétrico.

Desde que o balanço de potência ativa relativa a cada barra individualmente é dado por

$$P_{g_i} - P_{d_i} - P_i(V, \delta, a) = 0$$

onde $P_i(V, \delta, a)$ são as injeções de potência ativa na barra i , então

$$P_l = \sum_{i=1}^n P_i(V, \delta, a)$$

A perda de potência ativa nas linhas de transmissão pode ainda ser expressa como

$$P_l = \sum_{i=1}^n P_{i,j}(V, \delta, a)$$

onde $P_{i,j}(V, \delta, a)$ é o fluxo de potência ativa na linha de transmissão que conecta as barras i e j , expressa em função da magnitude, do ângulo das tensões nodais e dos taps dos transformadores em comutação.

Alternativamente fórmulas de perdas em função das injeções de potência podem ser derivadas das expressão

$$P_l + jQ_l = \mathbf{I}_{barra}^* \mathbf{Z}_{barra} \mathbf{I}_{barra}$$

onde, P_l é a perda total de potência ativa total na transmissão; Q_l é a perda de potência reativa total na transmissão, \mathbf{I}_{barra} é o vetor das injeções de correntes nas barras e \mathbf{Z}_{barra} é a matriz impedância de barra.

2.3.2.2 Desvio Quadrático Ponderado das Magnitudes das Tensões de um Nível Pré-Especificado

Esta função objetivo minimiza o desvio quadrático de um perfil de tensões pré-especificado, sendo geralmente utilizada como um critério corretivo. Foi utilizada como o principal índice de desempenho no processo de otimização multi-objetivo. Sua expressão analítica é

$$f(V_i) = \sum_{i=1}^n \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2 \quad (2.9)$$

onde, V_i é a magnitude da tensão da i -ésima barra; V_i^{esp} é o valor pré-selecionado da magnitude da tensão na i -ésima barra; γ_i é um fator de ponderação para penalizar cada barra; e n é o número total de barras do sistema.

Em geral, as tensões nominais são selecionadas como os valores pré-especificados. Isto pode ser justificado pelos seguintes fatos:

- * os componentes do sistema trabalham melhor na sua tensão nominal;
- * as cargas tendem a ser alimentadas à tensão nominal;

- * com as tensões das barras em seus valores nominais, há uma folga de tensão nas barras para suportar situações emergenciais;
- * *melhor* distribuição do fluxo de potência reativa através do sistema de transmissão.

2.3.2.3 Desvios Quadráticos Ponderados de uma Distribuição de Potência Reativa Pré-especificada

Este índice é semelhante ao mencionado na otimização do despacho de potência ativa. Dependendo da escolha dos fatores de ponderação e do valor especificado da distribuição de potência reativa, pode-se utilizar esta função para várias finalidades. A sua forma analítica é

$$f(\Delta Q_{g_i}) = \sum_{i \in G_Q} \beta_i (Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp})^2 \quad (2.10)$$

onde $\Delta Q_{g_i} = Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp}$ é o desvio do valor pré-especificado na unidade geradora i , β_i é a penalidade aplicada ao desvio de potência reativa e $\{G_Q\}$ é o conjunto de unidades geradoras de potência reativa.

Alternativamente a função objetivo pode ser modelada em uma forma linearizada como

$$f(\Delta Q_{g_i}) = \sum_{i \in G_Q} \beta_i |\Delta Q_{g_i}| \quad (2.11)$$

Este objetivo é adequado para fins de despachos corretivo, da mesma forma que a equação (2.6). Ele estabelece que decréscimos ou acréscimos a partir de uma distribuição especificada devem ser penalizados.

Para maximizar as margens de potência reativa, deve-se selecionar a potência reativa especificada como

$$Q_{g_i}^{esp} = \frac{Q_{g_i}^{max} + Q_{g_i}^{min}}{2}$$

obtendo uma geração de potência reativa (*VAR*) tendendo a ser equidistante dos limites.

Para minimizar o desvio de potência reativa da solução de mínima perda de potência ativa pode ser utilizado

$$Q_{g_i}^{esp} = Q_{g_i}^{minperda}$$

e utilizar os fatores de ponderação para penalizar a distribuição entre as unidades geradoras. Esta função objetivo também foi utilizada da formulação do FPO multi-objetivo.

2.3.2.4 Carregamento de Potência Ativa e Reativa

Este objetivo é utilizado no planejamento para expansão do sistema ou para estudos de estabilidade de tensão. Ele fornece uma medida da demanda crítica que pode ser suprida satisfazendo os limites operacionais.

A carga de cada barra é parametrizada por um fator ρ e a determinação do carregamento máximo consiste em maximizar o parâmetro da carga mantendo o fator de potência em cada barra constante, satisfazendo os limites operacionais e as equações de balanço de potência de cada barra. Sua forma analítica é

$$\begin{aligned} P_{d_i} &= (P_{d_i}^0 + \rho \Delta P_{d_i}) \\ Q_{d_i} &= (Q_{d_i}^0 + \rho \Delta Q_{d_i}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

onde, $P_{d_i}^0$ e $Q_{d_i}^0$ são as demandas de potências ativa e reativa na barra i , respectivamente, especificadas para um caso base; ΔP_{d_i} e ΔQ_{d_i} são os incrementos de carga de potência ativa e reativa e ρ é denominado parâmetro de carga.

Outros objetivos têm sido propostos na literatura. Os seguintes podem ser citados:

- *Custo de Geração de Potência Reativa*, é semelhante à função objetivo de Custo de geração de potência ativa e pode ser expresso como uma função quadrática ou linear.
- *Minimização das Perdas de Potência Reativa nas Linhas de Transmissão*, cujo objetivo é reduzir o efeito de linhas de transmissão altamente carregadas;
- *Adição Mínima de Potência Reativa para a Convergência da Solução do Fluxo de Potência*, a qual deve ser utilizada quando a convergência não é alcançada pelos métodos convencionais de fluxo de potência.
- *Mínimo desvio de Intercâmbio entre Áreas*, a qual é utilizada para minimizar os desvios quadráticos dos intercâmbios líquidos das áreas em relação aos intercâmbios programados.

2.4 Conclusão

A solução das equações da rede elétrica em regime permanente pode ser obtida via problema de otimização, considerando um determinado índice de desempenho como objetivo principal e solucionando simultaneamente as restrições de igualdade e desigualdade do sistema. As restrições de igualdade representam os balanços de potência ativa e reativa do sistema e as restrições de desigualdade são consideradas os limites físicos dos componentes da rede elétrica.

O problema de otimização pode ser solucionado por metodologias de PL, as quais se caracterizam pela sua rapidez e confiabilidade, e por metodologias de PNL que representam mais fielmente o sistema elétrico de potência devido a suas equações serem funções não-lineares, conforme mostra a revisão da literatura com ênfase nas principais técnicas de solução do problema de FPO.

Do estudo dos principais índices de desempenho utilizados na formulação do FPO, com suas respectivas funções objetivo, verifica-se que os mesmos podem ser utilizados tanto para o planejamento como para operação do sistema de potência.

Com o sistema operando cada vez mais em situações críticas deve-se utilizar ferramentas confiáveis e robustas que auxiliem o analista no processo de decisão tanto na operação em tempo real, como também no planejamento dos sistemas de potência. Isto implica em utilizar metodologias eficazes no tratamento simultâneo dos índices de desempenho, de maneira a tornar mais eficiente o uso dos equipamentos do sistema elétrico, melhorando sua vida útil e confiabilidade.

Capítulo 3

Fluxo de Potência Ótimo Multi-objetivo

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta os aspectos da otimização Multi-Objetivo (MO) utilizados no presente trabalho. Primeiramente os conceitos gerais das soluções ótimas encontradas são referenciados. A seguir, é feita uma revisão bibliográfica de algumas metodologias MO, descrevendo-se suas principais características e referências na área de sistemas de potência. Estes métodos foram utilizados para formular o problema de otimização proposto neste trabalho.

3.2 Aspectos Preliminares

Uma das principais características das metodologias MO consiste em encontrar pontos de operação intermediários entre os pontos de operação ótimos considerando apenas um aspecto, como aqueles determinados pelos métodos de otimização mono-objetivo. Devido à natureza conflitante dos objetivos, uma única solução possível otimizando todos os índices não é possível. Duas diferentes soluções eficientes são caracterizadas pelo fato de que cada uma delas é melhor em um objetivo mas pior no outro. Por isto as metodologias de otimização MO geram várias soluções, que dependem dos compromissos entre os índices de desempenho. Estas soluções compõem um conjunto muito grande (às vezes infinito) de soluções ótimas, o qual é conhecido como *Conjunto de Pareto* ou *Conjunto de Soluções Não-inferiores*. Cada ponto pertencente ao conjunto de Pareto tem uma importante característica:

Melhorar um objetivo resulta em piorar pelo menos um dos outros objetivos. Isto implica que a melhoria de um determinado índice só pode ser obtida com o sacrifício de um ou mais índices.

O principal objetivo da programação MO é a busca de soluções eficientes e/ou soluções de Pareto com o auxílio de Programas Multi-Objetivo (PMO) e, se possível, possibilitar a escolha de uma solução

final de sua preferência. É, portanto, de interesse do analista obter uma completa (ou parcial) descrição do conjunto de Pareto, referido também como *conjunto solução*. Infelizmente, para a maioria dos PMOs não é fácil obter uma descrição exata do conjunto de Pareto, que normalmente inclui um número grande ou infinito de pontos. Mesmo que teoricamente seja possível determinar exatamente este pontos, pode-se dizer que esta tarefa é um desafio muito grande e requer um custo computacional muito alto, sendo geralmente abandonada quando a otimização é realizada com sistemas reais.

3.3 Revisão Bibliográfica

As metodologias MO podem ser divididas basicamente em duas classes:

- a) os métodos que permitem ao analista definir alguns parâmetros e então determinam o *melhor ponto* de operação (*solução de compromisso*), o qual é interior ao conjunto de Pareto;
- b) os métodos que primeiro determinam muitos pontos do conjunto de Pareto, e então fazem a escolha da solução de compromisso dentre os pontos determinados.

O uso dos métodos do tipo (a) ou do tipo (b) depende das características do problema considerado.

Os métodos da classe (a) encontram a solução de compromisso automaticamente, desde que o ponto de vista do analista é considerado apenas uma vez para a escolha do objetivo principal e dos parâmetros necessários (Berizzi et al., 2001a). Neste caso não é necessária a determinação do conjunto de Pareto. Alguns conceitos relacionados a este método são utilizados no presente trabalho.

Os métodos da classe (b) são mais adequados quando é necessário conhecer as conseqüências da decisão tanto quanto possível. A desvantagem destas técnicas é a necessidade de se calcular muitos pontos do conjunto de Pareto e a grande complexidade da estrutura de decisão. Contudo, uma vez determinado o conjunto de Pareto, isto proporciona ao analista uma sensibilidade maior entre as funções objetivo e pode dar uma idéia da robustez da solução selecionada.

Matematicamente, um problema de otimização MO pode ser formulado conforme mostrado a seguir.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \\
 & \text{sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \\
 & \quad \mathbf{h}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\
 & \quad \mathbf{x} \in X
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^t$ é o vetor das variáveis de otimização, o qual é definido no espaço \mathfrak{R}^n e X é a região das soluções viáveis; $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_j(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})]^t$ é o vetor dos índices de desempenho, definidos no espaço das funções objetivo; isto é, $\mathbf{f}: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^k$ e \mathbf{u} é o vetor das variáveis dependentes. As funções vetoriais $\mathbf{g}: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$ correspondem às restrições de igualdade, enquanto que $\mathbf{h}: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^l$ representam as restrições de desigualdade. O vetor das funções objetivo mapeia o

vetor das variáveis de decisão (definidas no espaço das variáveis de decisão) no espaço das funções objetivo. Desta forma, deve-se fazer uma distinção entre o espaço de dimensão n das variáveis de decisão e o espaço de dimensão k das funções objetivo.

Com relação ao problema de otimização MO formulado em (3.1), é aplicado o conceito de otimalidade, conhecido como *otimalidade de Pareto*. Segundo este conceito, uma solução viável para um problema MO é uma solução de Pareto se não existir nenhuma outra solução que melhore um determinado objetivo e não cause degradação em pelo menos um dos outros objetivos. A definição a seguir formaliza este conceito.

Definição 1 *Seja \mathbf{X} o conjunto das soluções viáveis do Problema (3.1); isto é,*

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^n \mid \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\}$$

Um ponto \mathbf{x}^ é uma solução de Pareto, ou solução de compromisso, de um problema de otimização multi-objetivo, se $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ e não existe nenhum outro ponto $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ tal que*

$$\begin{aligned} f_i(\mathbf{x}) &\leq f_i(\mathbf{x}^*) \quad \text{para } i = 1 \dots k \\ &e \\ f_j(\mathbf{x}) &< f_j(\mathbf{x}^*) \quad \text{para pelo menos um } j \in \mathbf{I} \end{aligned}$$

onde \mathbf{I} é o conjunto dos índices relativos às funções objetivo.

O conjunto de Pareto pode não ser convexo se \mathbf{X} não for convexo no espaço da função objetivo. Tipicamente existe uma curva ou superfície de pontos de Pareto que relaciona as funções objetivo. Assim, para um problema de otimização MO, a solução de Pareto geralmente não é única.

Diversos métodos para a solução de um problema de otimização MO são encontrados na literatura: o método dos pesos, o método das restrições, o método de otimização com hierarquia, o método do critério global e a programação de metas são exemplos de técnicas de geração de soluções de Pareto. A seguir são apresentados os métodos relacionados ao presente trabalho.

3.3.1 O Método dos Pesos

O método dos pesos consiste essencialmente na otimização de uma função resultante da soma ponderada de todas as funções objetivo. O problema de otimização MO é transformado em um problema de otimização com apenas uma função objetivo dada por

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(\mathbf{x}) \quad (3.2)$$

onde $w_i \geq 0$ são os coeficientes de ponderação que representam a importância relativa de cada índice. Nesta metodologia empregam-se diferentes coeficientes de peso para cada uma das funções para

construir o conjunto de soluções de Pareto. Usualmente, considera-se que

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1$$

O problema (3.1) pode ser representado como

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^k w_i f_i(\mathbf{x}) \\ \text{sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &\leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x} &\in X \end{aligned} \tag{3.3}$$

Observe-se que as funções objetivo são geralmente expressas em diferentes unidades e os pesos são utilizados para compará-las e atribuir a relativa importância de cada função objetivo.

A interpretação geométrica do método dos pesos, é que no espaço dimensional \mathcal{R}^k das funções objetivo os pesos definem um hiperplano, e a solução de cada problema de otimização é representado pela intersecção do plano tangente definido por \mathbf{w} e a superfície de Pareto (Berizzi et al., 2001a). Por esta razão, somente é possível gerar o conjunto inteiro de Pareto por este método se as funções objetivo e as restrições forem convexas. Um caminho simples de encontrar o conjunto de Pareto pelo método dos pesos é variar sistematicamente \mathbf{w} e resolver cada problema de otimização resultante.

Outro comportamento deste método é a necessidade de um bom conhecimento do sistema para traçar o conjunto de Pareto de uma forma inteligente. De fato, não é fácil determinar os pesos *a priori* para obter uma boa distribuição dos pontos no conjunto de Pareto. Em alguns casos é difícil ter uma boa idéia da forma do conjunto de Pareto. Isto acontece porque alguns pontos podem ser muito próximos um dos outros, enquanto que outros podem ser bem distantes, evitando um bom conhecimento de parte deste conjunto.

A sensibilidade entre as diferentes funções objetivo é dada por:

$$\left| \frac{\partial f_i}{\partial f_j} \right| = \frac{w_j}{w_i}$$

Esta relação é importante porque representa as conseqüências da melhoria de uma função objetivo j em relação a um objetivo i , o qual é dado pela inclinação da superfície de Pareto no ponto de operação considerado.

Em Berizzi et al. (2001a) é feita uma revisão dos principais aspectos do método dos pesos e do método das restrições- ϵ , mostrando a aplicação de duas funções objetivo com o método dos pesos, o custo e a perda de potência ativa nas linhas de transmissão. O objetivo é construir o conjunto de Pareto variando sistematicamente os pesos e resolver cada problema de otimização. O referido artigo também apresenta as condições de suficiência para se obter o conjunto de Pareto, tanto pelo método dos pesos como pelo método das restrições. A desvantagem do método dos pesos é o grande

esforço computacional e a necessidade das funções objetivo e das restrições serem convexas, para se construir o conjunto de Pareto inteiro, apesar de que em alguns casos somente alguns pontos são realmente necessários para se ter uma idéia aproximada do conjunto de Pareto.

No artigo Nangia et al. (1998) o método dos pesos é utilizado para otimizar dois objetivos (custo de geração e perdas na transmissão). Tenta-se explorar a relação entre as faixas de variação dos índices de desempenho, para encontrar os pesos ótimos. Minimiza-se cada função separadamente para obter as soluções mono-objetivo, e os pesos são especificados um como unitário e o outro como um peso ótimo, estimado pela expressão:

$$w_{otimo} = \frac{F_C \text{ em } F_{L_{min}} - F_{C_{min}}}{F_L \text{ em } F_{C_{min}} - F_{L_{min}}}$$

onde $F_C \text{ em } F_{L_{min}}$ é o valor da função custo no ponto de mínima perda, $F_{C_{min}}$ é o valor de mínimo custo quando otimizado individualmente, $F_L \text{ em } F_{C_{min}}$ é o valor da função perdas na transmissão no ponto de mínimo custo e $F_{L_{min}}$ é o valor mínimo da função perda otimizada individualmente. A fórmula restringe o problema a apenas duas funções objetivo e é dependente do sistema utilizado. Segundo o artigo, foram testados os sistemas de 5, 14 e 30 barras do IEEE, sendo que no sistema de 30 barras a fórmula para w_{otimo} precisou de uma pequena modificação.

Em Chen (1998), é apresentado um problema MO de planejamento de potência reativa. A abordagem é baseada na norma ponderada e recosimento simulado para solucionar o problema MO de minimizar a norma ponderada do desvio de um ponto ideal ou *ponto-utopia* $\mathbf{y}^t = [y_1 \dots y_j]$ considerando três funções objetivo: a função custo de geração, o desvio da magnitude da tensão e a margem de segurança do sistema, o qual é expresso analiticamente por

$$\min_{x \in \chi} \sum_{j=1}^n w_j |f_j(\mathbf{z}) - y_j|^p$$

onde χ é a região de viabilidade, $1 \leq p \leq \infty$ são pesos não-negativos satisfazendo $w_j \geq 0$ para todos $j = 1, 2, \dots, n$ e $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, e o ponto $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ é chamado de ponto utopia ou ponto ideal, cujo valor é pré-especificado pelo analista.

Utiliza-se o critério da barra mais *fraca* em termos de reativo, para determinar as barras candidatas a instalação de novas fontes de potência reativa. Este método utiliza os pesos iguais e requer a especificação dos desvios desejados para cada função objetivo. Este método ainda depende da estratégia utilizada pelo analista para determinar o ponto ideal (\mathbf{y}) e pode-se obter uma solução não-inferior, próxima a solução preferida pelo analista. A sua principal desvantagem é utilizar os pesos igualmente distribuídos, não avaliando a ordem de grandeza das funções objetivo, podendo haver uma distribuição melhor dos pesos e mais próxima à solução ideal.

3.3.2 O Método das Restrições

O método das restrições é considerado o método mais intuitivo para a geração de soluções de Pareto (Cohon, 1978). Algumas variações desta metodologia, como o *método da restrição- ϵ* e o

método de igualdade própria, são encontrados na literatura. Neste trabalho, utilizou-se o método da restrição- ϵ , o qual será apresentado a seguir.

O método da restrição- ϵ permite transformar o problema MO em um problema convencional de otimização mono-objetivo, escolhendo-se uma função objetivo como principal e transformando as demais funções objetivo em restrições de desigualdade.

Considerando o problema MO definido em (3.1) e escolhendo a função objetivo principal representada por f_m , o problema MO torna-se $P_m(\epsilon)$:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f_m(\mathbf{x}) \\ & \text{sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & f_i(\mathbf{x}) \leq \epsilon_i, \quad \text{para } i = 1 \dots k \quad i \neq m \end{aligned} \tag{3.4}$$

onde, $f_i(\mathbf{x})$ representam as funções objetivo transformadas em restrições de desigualdade; $\epsilon = [\epsilon_1 \dots \epsilon_{j-1}, \epsilon_{j+1} \dots \epsilon_k]^T$ é o vetor dos valores pré-especificados, relacionado a cada restrição adicional.

O problema pode ter m variações alternando a função principal com as funções objetivo transformadas em restrições de desigualdade. Este problema pode ser resolvido pelas técnicas utilizadas na solução do FPO mono-objetivo vistos em (2.2).

As condições para que um ponto de operação \mathbf{x}^* do problema (3.4) seja do conjunto de Pareto são (Berizzi et al., 2001a):

- Condição Suficiente (C_1): \mathbf{x}^* é a única solução de $P_m(\epsilon^*)$ para pelo menos um m ;
- Condição Necessária (C_2): \mathbf{x}^* resolve $P_m(\epsilon^*)$ para todo $m = 1 \dots k$;
- Condição Necessária (C_3): a solução ótima de $P_m(\epsilon^0)$ é estritamente maior que $f_m(\mathbf{x}^*)$ para todo $\epsilon^0 \leq \epsilon^*$.

O conjunto de Pareto pode ser calculado resolvendo-se $P_m(\epsilon)$ para diferentes valores de ϵ , e verificando se pelo menos uma das condições (C_1) a (C_3) mencionadas acima é satisfeita. No entanto, todas as condições citadas acima são de grande complexidade. Por exemplo, (C_1) gera a solução candidata ao conjunto de Pareto resolvendo apenas um problema de otimização $P_m(\epsilon)$, mas a existência de uma única solução pode ser difícil de se verificar. Por outro lado, (C_2) não é muito adequada com muitas funções objetivo, porque necessita, para cada candidato ϵ , calcular $P_m(\epsilon)$ para todo m . Adicionalmente, (C_3) geralmente é difícil de verificar numericamente.

Particularmente, se as funções objetivo e as restrições forem convexas e a função objetivo principal for estritamente convexa, nenhum teste é necessário. Caso a função objetivo principal não seja estritamente convexa, mas o problema seja diferenciável, deve-se calcular as condições de suficiência de segunda ordem.

Um procedimento comum para a escolha dos parâmetros ϵ_i^0 para $i = 1 \dots k$ com $i \neq m$, consiste em resolver $k - 1$ problemas de otimização considerando cada uma das funções objetivo separadamente. De posse dos valores iniciais atribuídos aos parâmetros ϵ_i^0 , estes podem ser ajustados durante um processo de tomada de decisão por

$$f_i(\mathbf{x}) \leq \epsilon_i^0 + \Delta f_i$$

onde Δf_i são os acréscimos associados às respectivas funções objetivo.

Outro ponto importante refere-se aos métodos de solução do problema de otimização que utilizam multiplicadores de Lagrange associado à cada restrição (Berizzi et al., 2001a). Este multiplicador é a variação da função objetivo principal em relação às restrições, que neste caso são as demais funções objetivo consideradas. Então, se λ_{mi}^* é o multiplicador associado à i -ésima função quando a m -ésima função é a função objetivo principal, obtém-se:

$$\lambda_{mi}^* = -\frac{\partial f_m(\mathbf{x}^*)}{\partial \epsilon_i}$$

Os multiplicadores de Lagrange indicam a relação de sensibilidade entre as funções objetivo ativas, sendo muito importantes para análises adicionais, apesar de representarem valores instantâneos. Esta propriedade é muito útil para o analista escolher um ponto de operação final dentro do conjunto de Pareto. Diminuindo ϵ_i ; isto é, reduzindo o limite máximo da i -ésima restrição, há um aumento na sensibilidade entre a função objetivo principal e a i -ésima função. Isto se deve ao fato de que quanto menor o limite, menor deverá ser a variação na função transformada em restrição para obter uma mesma variação na função objetivo principal.

Quando o problema é convexo, o sinal dos multiplicadores de Lagrange também pode ser útil para verificar se o ponto considerado é interno ao conjunto de Pareto: a solução \mathbf{x}^* pertence ao conjunto de Pareto, se todos os multiplicadores de Lagrange associados às restrições funcionais são estritamente negativos.

Em Berizzi et al. (2001b) utiliza-se o método das restrições para encontrar o conjunto de Pareto variando sistematicamente o valor de ϵ_i e então utiliza-se uma análise de compromisso para encontrar a melhor solução. Com esta técnica é possível estabelecer compromissos entre as funções objetivo no conjunto de Pareto. Considerando dois pontos de operação factíveis \mathbf{x}^0 e \mathbf{x}^* , sendo os valores correspondentes das funções:

$$P(\mathbf{x}^0) = [f_1(\mathbf{x}^0), f_2(\mathbf{x}^0) \dots f_k(\mathbf{x}^0)]$$

$$P(\mathbf{x}^*) = [f_1(\mathbf{x}^*), f_2(\mathbf{x}^*) \dots f_k(\mathbf{x}^*)]$$

O intercâmbio entre f_m e f_i é expresso como:

$$T_{mi} = \frac{f_m(x^0) - f_m(x^*)}{f_i(x^0) - f_i(x^*)}$$

No artigo mencionado, foram realizados testes com o sistema CIGRE-16 barras, com duas e três

funções objetivo: custo de geração e perdas de potência ativa; segurança relacionada ao colapso de tensão, custo da reserva de potência ativa e intercâmbio entre áreas. Esta técnica tem como única desvantagem o esforço computacional para encontrar as soluções de Pareto.

Em Nangia et al. (1997) utilizou-se a função custo dos geradores e a função perdas de potência ativa para otimizar a geração de potência reativa. Os argumentos para esta proposição foram que, considerando o desacoplamento entre potência ativa e reativa, as perdas ativas de transmissão são dependentes do perfil do módulo de tensão as quais são dependentes das potências reativas. Então, a otimização do despacho de potência reativa pode ser considerada como a minimização das perdas de potência ativa. Este aspecto é discutível, pois no sistema elétrico não se consegue um desacoplamento total entre as partes ativa e reativa do sistema e as perdas também estão relacionadas a geração de potência ativa do sistema.

3.3.3 Modelo Parametrizado do Fluxo de Potência Ótimo

A utilização do FPO muitas vezes é restringida pela falta de confiabilidade no processo de convergência dos aplicativos computacionais de FPO não-linear. A não convergência do FPO, geralmente, é uma consequência da inexistência de uma solução que satisfaça simultaneamente as restrições de igualdade e desigualdade, ou da impossibilidade de se alcançar o valor ótimo do índice de desempenho (Moyano, 2005).

A divergência do processo iterativo se deve ao fato de que algumas matrizes relacionadas às condições de otimalidade tornam-se singulares durante o processo iterativo. A singularidade pode acontecer quando o suprimento da demanda sob condições operacionais é inviável, ou seja, a solução do problema pode estar além do ponto de bifurcação sela-nó das equações que representam a rede elétrica ou de condições por demais restritivas na região definida pelos limites operativos. A dificuldade de se atingir o ponto ótimo também está relacionada a forma analítica da função objetivo e a distância do ponto de partida.

Esta formulação do FPO é baseada na parametrização da carga e/ou dos limites operativos para evitar a divergência do processo iterativo. A função objetivo é representada pela soma ponderada do parâmetro da carga e/ou dos limites com a função objetivo do problema original. A análise do parâmetro da demanda e/ou limites fornece uma indicação das potenciais causas da divergência do processo iterativo e das possíveis medidas que podem ser adotadas para evitar a divergência. Se o suprimento da carga estiver dentro dos limites operacionais do sistema for viável, o método proposto determina a solução do problema original. Este tipo de formulação é adequada para evitar a divergência do processo iterativo, podendo ser aplicada em uma variedade de casos práticos.

3.3.3.1 A Parametrização dos Limites

A parametrização dos limites operativos é representada analiticamente pelo seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^l w_i \rho_i + f(\mathbf{x}) \\
 & \text{sujeito a} \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}, \rho) \leq \mathbf{0} \\
 & \quad \quad \quad \rho \geq \mathbf{0} \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{x} \in X
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

onde $\rho = [\rho_1, \dots, \rho_i, \dots, \rho_l]^t$ é o vetor dos parâmetros dos limites e l é o número de restrições de desigualdade sujeita à relaxação dos limites, w_i é o peso de cada parâmetro relacionado a cada limite operativo e as outras variáveis são as mesmas já citadas no problema (3.1).

As restrições de desigualdade parametrizadas (3.6) são as mesmas do problema (3.1), acrescidas do vetor de valores pré-determinados dos incrementos $\Delta \mathbf{h}^e = [\Delta h_1^e, \dots, \Delta h_i^e, \dots, \Delta h_l^e]^t$, parametrizadas pelo vetor ρ .

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \rho) = \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \rho \Delta \mathbf{h}^e \tag{3.6}$$

Caso a solução do problema, expressa em (3.5), pertença à região definida pelas restrições de igualdade e desigualdade originais, então o vetor ρ será nulo ($\rho_i = 0$). Um valor positivo de ρ implica que os limites devem ser relaxados para que se obtenha a convergência do processo iterativo. Neste caso, a solução determinada é um ponto pertencente à fronteira definida pelos limites operativos relaxados.

A formulação do problema desta forma aumentará o número de restrições de desigualdade e de variáveis, influenciando as condições de otimalidade de primeira ordem e de segunda ordem.

Com o objetivo de obter um melhor condicionamento do problema de otimização, a parametrização dos limites requer a inclusão de uma restrição de não negatividade no problema expresso em (3.5) para cada tipo de limite sujeito à relaxação. Cada tipo de restrição está associado a um parâmetro ρ_i e cada restrição sujeita à relaxação está associada a um fator Δh_i^e .

Deve ser observado que a especificação da não negatividade do parâmetro ρ implica que os limites não se tornarão mais restritos do que os limites do problema original; e a ausência de um limite superior ao ρ implica que as restrições selecionadas serão relaxadas o quanto for preciso. Caso esta relaxação não seja suficiente, isto indica que o ponto crítico (de bifurcação sela-nó) das equações de fluxo de potência convencional foi ultrapassado. Neste caso, o corte de carga se torna necessário como uma alternativa (ou uma medida corretiva adicional) à relaxação dos limites.

3.3.3.2 A Parametrização da Demanda

O problema de FPO com carga parametrizada modela o ajuste ponderado da demanda para a restauração da solubilidade das equações da rede elétrica em regime permanente sob condições operativas e minimiza simultaneamente um vetor de funções objetivo. O problema pode ser expresso como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } w\rho + f(\mathbf{x}) \\
 & \text{sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{x}, \rho) = \mathbf{0} \\
 & \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\
 & \quad \rho \geq 0 \\
 & \quad \mathbf{x} \in X
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

onde, w pondera a função mínimo corte de carga, representada por ρ , em relação às outras funções objetivo. As outras variáveis têm o mesmo significado que nos problemas (3.1) e (3.5).

As restrições $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \rho)$ representam as equações parametrizadas de balanço de potência de cada barra e são expressas por

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \rho) = \begin{cases} P_j(\mathbf{x}) - P_{g_j}(\mathbf{x}) + (P_{d0_j} - \rho\Delta P_{d_j}) \\ Q_j(\mathbf{x}) - Q_{g_j}(\mathbf{x}) + (Q_{d0_j} - \rho\Delta Q_{d_j}) \end{cases} \tag{3.8}$$

onde, P_j e Q_j são as potências ativas e reativas injetadas na barra j ; P_{g_j} e Q_{g_j} são as potências ativas e reativas geradas na barra j ; P_{d0_j} e Q_{d0_j} são as demandas base de potência ativa e reativa, respectivamente, da barra j ; e ΔP_{d_j} e ΔQ_{d_j} são as direções do ajuste de carga na barra j . Este valores são supostamente conhecidos e estão relacionados qualitativa e quantitativamente à disponibilidade de cada barra para o corte de carga. Usualmente as direções de ajuste da carga mantêm o mesmo fator de potência da barra j .

O *parâmetro de carga* ρ é limitado, de forma que quando a solução se encontra dentro da região definida pelas equações de balanço de potência e pelos limites operativos, o valor do parâmetro ρ é nulo. Neste caso, a solução coincide com a do problema (3.1).

Tanto o problema (3.5) quanto o problema (3.7) podem ser solucionados pelos métodos de otimização MO apresentados em (3.3.1 e 3.3.2).

3.4 Validação do conjunto de Pareto

Apesar de não ser um critério freqüentemente adotado na prática para verificar se a solução encontrada pelo método dos pesos ou pelo *método da restrição- ϵ* é uma solução do conjunto de Pareto, pode-se verificar as condições C_1 a C_3 , vistas na seção (3.3.2), o que é muitas vezes difícil. Neste

caso, o chamado *teste- δ* , mostrado a seguir (Berizzi et al., 2001a), pode ser adotado:

$$\begin{aligned} \delta = \text{Maximize} \quad & \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ \text{sujeito a} \quad & \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & f_i(\mathbf{x}) + \alpha_i = f_i(\mathbf{x}^*), \quad \text{para } i = 1 \dots k \\ & \alpha_i \geq 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Esta solução pode assegurar que \mathbf{x}^* pertence ao conjunto de Pareto, ou caso contrário, um novo ponto pode ser fornecido, o qual é interior ao conjunto de Pareto; se x^0 é o ponto ótimo do problema (3.9) e δ^0 o valor correspondente de δ , x^* pertence ao conjunto de Pareto se $\delta^0 = 0$.

Este teste é muito importante porque, se $\delta^0 \neq 0$ isto indica que \mathbf{x}^* não pertence ao conjunto de Pareto, e \mathbf{x}^0 está dentro do conjunto de Pareto. Portanto, este teste se torna necessário para as mais diferentes funções objetivo, porque ele sempre permite a definição completa do conjunto de Pareto.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais métodos multi-objetivo, os quais serão utilizados na formulação do problema proposto. A formulação do problema MO para o FPO pode ser feita por diversas metodologias e, em todas, o analista deve fornecer parâmetros de acordo com a melhoria que se deseja alcançar. O conjunto de Pareto é difícil de ser encontrado em sua totalidade, pois geralmente é um número muito grande ou infinito de pontos de operação. Então usualmente se encontra um ponto ou apenas alguns pontos de operação, dependendo do método MO utilizado.

A solução para o problema MO, dado um vetor de funções objetivo, representa o interesse do analista melhorar (ou piorar) um índice de desempenho, degradando (ou melhorando) os outros índices. O conjunto de Pareto tem uma importante característica: melhorar um índice de desempenho resulta em piorar pelo menos um dos outros índices do problema.

O método das restrições permite (mesmo quando o conjunto de Pareto não é convexo) a determinação do conjunto inteiro de Pareto, dado que valores substanciais de ϵ estão disponíveis. Estes últimos valores são mais fáceis de serem determinados que os fatores de ponderação do método dos pesos, pois estão mais relacionados com o sistema físico de energia e suas particularidades operacionais. O analista pode defini-los baseado no conhecimento do sistema (e.g. dados históricos) e nos objetivos a serem alcançados.

A estratégia de parametrização pode ser utilizada para se tratar os limites operacionais do sistema. Esta metodologia fornece uma indicação das potenciais causas da divergência e das possíveis medidas que podem ser tomadas para se obter uma solução operacional. Os limites de tensão, demanda de potência, geração de potência ativa ou reativa, etc, podem ser parametrizados.

Muitas metodologias foram propostas para validar o conjunto de Pareto, mas todas são de grande dificuldade matemática ou de grande custo computacional para se testar em sistemas de potência

reais. No próximo capítulo, é mostrada a formulação do trabalho proposto, o qual encontra soluções do conjunto de Pareto devido a todas as funções objetivo utilizadas serem convexas.

Capítulo 4

Formulação do Problema Multi-objetivo

4.1 Introdução

Neste capítulo é formulado o problema proposto através das metodologias vistas no capítulo anterior. O objetivo é minimizar o desvio de tensão de um ponto de operação simultaneamente com o desvio de potência ativa e/ou reativa, utilizando simultaneamente o método dos pesos, o método das restrições e a estratégia de parametrização. Os aspectos mais relevantes deste problema de otimização MO, e algumas particularidades encontradas são descritas nas seções seguintes.

4.2 Conceitos Gerais

A aplicação de otimização MO no FPO consiste na determinação do estado do sistema elétrico que otimize vários índices de desempenho simultaneamente e atenda a um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade. Conforme visto em (2.3), há uma série de índices que podem ser otimizados, dentre os quais podemos citar o mínimo desvio quadrático de um nível de tensão pré-especificado, o mínimo custo do sistema e as mínimas perdas de potência ativa nas linhas de transmissão.

Conforme mencionado anteriormente, as restrições de igualdade são representadas pelas equações de balanço de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema; as restrições de desigualdade são representadas pelas restrições operacionais e/ou de segurança, como os níveis seguros de tensão para a operação do sistema, a capacidade de geração de potência e os limites de taps dos transformadores.

Em problemas reais como a operação de sistemas elétricos de potência é comum deparar-se com situações nas quais necessita-se fazer uma tomada de decisão com objetivos às vezes conflitantes sob certos aspectos. Além disso, os resultados da otimização de um determinado índice podem produzir um impacto muito grande no sistema em relação à um ponto de operação otimizado por outro índice. Por exemplo, caso o sistema esteja operando em um ponto que representa o mínimo custo de geração de potência ativa do sistema, e aplicarmos um FPO que deseja maximizar a reserva de potência reativa do sistema, certamente causará um impacto grande no sistema modificando o perfil de tensão,

as potências geradas em cada máquina, etc, podendo causar oscilações ou até mesmo levar o sistema à instabilidade. Desta maneira, o alcance de um determinado objetivo com um mínimo desvio da condição de operação anterior, é certamente um procedimento bastante recomendável sob o ponto de vista prático.

4.3 Índices de Desempenho

No desenvolvimento utilizou-se os seguintes índices de desempenho representados pelas funções objetivo:

- a) Somatório dos desvios quadráticos de magnitude da tensão de um perfil pré-estabelecido

A forma analítica desta função é dada como

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2 \quad (4.1)$$

onde n é o número de barras, V^{esp} é o valor de tensão pré-especificado, e γ é uma constante utilizada para ponderar os respectivos desvios de tensão.

Esta função objetivo reflete o perfil de tensão do sistema, o qual é extremamente dependente do valor especificado da tensão. Pela necessidade operacional e de segurança, é desejável que o sistema opere próximo dos valores nominais de tensão e de tap dos equipamentos. Em alguns casos, o sistema poderá suportar melhor as contingências que possam vir a acontecer nestas condições além de melhorar a distribuição de fluxo de potência reativa no sistema. No presente trabalho os valores nominais dos equipamentos (I_{pu}) serão utilizados para V^{esp} .

Pode-se ter outros valores especificados, como o de qualquer ponto factível que se deseje ter um menor desvio de tensão. Este pode ser o perfil de tensão do mínimo custo do sistema, ou do ponto de mínima geração de potência reativa.

- b) Somatório dos desvios absolutos de geração de potência ativa de uma distribuição pré-especificada

A representação analítica desta função é

$$f_2(x) = \sum_{i \in \{G_p\}} \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| \quad (4.2)$$

onde $\{G_p\}$ é o conjunto de unidades geradoras de potência ativa, $P_{g_i}^{esp}$ é o valor da potência ativa pré-especificada na unidade geradora i e α_i é a penalidade aplicada ao desvio de potência de cada unidade geradora.

Esta função pode ter vários valores especificados e ponderações como visto em 2.3.1.2

- c) Somatório dos desvios absolutos de geração de potência reativa de uma distribuição pré-especificada

A forma analítica desta função objetivo é expressa por

$$f_3(x) = \sum_{j \in \{G_Q\}} \beta_j |Q_{g_j} - Q_{g_j}^{esp}| \quad (4.3)$$

onde $\{G_Q\}$ é o conjunto de unidades geradoras de potência reativa, $Q_{g_j}^{esp}$ é o valor da potência reativa pré-especificada na unidade geradora j e β_j é a penalidade aplicada ao desvio de potência de cada unidade geradora.

O problema de FPO com as funções objetivo citadas acima será formulado pelo método de pontos interiores não linear - versão primal-dual, apresentado no anexo A.

A magnitude das tensões, o ângulo das tensões e os taps dos transformadores serão utilizados como variáveis de controle. Através destas variáveis de otimização será proposto o problema para minimizar o desvio de tensão (4.1), o desvio de potência ativa (4.2) e o desvio de potência reativa (4.3) simultaneamente. A formulação analítica do FPO MO apresentado nesta dissertação é representada por

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{i=1}^n \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2, \quad \sum_{i \in G_P} \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| e \quad \sum_{j \in G_Q} \beta_j |Q_{g_j} - Q_{g_j}^{esp}| \\ \text{sujeito a} \quad & P_{g_i} - P_{d_i} - P_i(V, \delta, a) = 0 \\ & Q_{g_i} - Q_{d_i} - Q_i(V, \delta, a) = 0 \\ & V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \\ & a_i^{min} \leq a_i \leq a_i^{max} \\ & P_{g_i}^{min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} \\ & Q_{g_i}^{min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{max} \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde as equações de balanço de potência ativa são definidas para as barras de carga e para as barras com compensadores síncronos, enquanto as equações de balanço de potência reativa são definidas apenas para as barras de carga.

O Problema (4.4) é semelhante ao (3.1). Para solucionar este problema de otimização MO foi aplicado o “método da restrição- ϵ ” visto em (3.3.2). A função objetivo desvio de tensão é escolhida como função principal, enquanto as funções objetivo desvio de potência ativa e desvio de potência reativa são transformadas em restrições de desigualdade ou também conhecidas como *restrições funcionais*. As funções objetivo são sujeitas a um limite superior ϵ_P e ϵ_Q determinado pelo analista . A

formulação do problema de otimização MO é dada por

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^n \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2 \\
& \text{sujeito a} \quad P_{gi} - P_{di} - P_i(V, \delta, a) = 0 \\
& \quad \quad \quad Q_{gi} - Q_{di} - Q_i(V, \delta, a) = 0 \\
& \quad \quad \quad V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\
& \quad \quad \quad a_i^{\min} \leq a_i \leq a_i^{\max} \\
& \quad \quad \quad P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \\
& \quad \quad \quad Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \\
& \text{e as funções objetivo transformadas em restrições} \\
& \quad \quad \quad \sum_{i \in G_P} \alpha_i |P_{gi} - P_{gi}^{esp}| \leq \epsilon_P \\
& \quad \quad \quad \sum_{j \in G_Q} \beta_j |Q_{gj} - Q_{gj}^{esp}| \leq \epsilon_Q
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Os limites ϵ_P e ϵ_Q indicam a severidade da restrição. Caso estes limites tenham um valor muito pequeno, pode ser que o problema de otimização não consiga satisfazer a função principal e ao mesmo tempo alcançar uma solução para as funções objetivo transformadas em restrição, devido à região de factibilidade do sistema.

Esta formulação do problema MO tem a dificuldade de conhecer os valores ϵ_P e ϵ_Q *a priori*. Uma solução seria variar estes valores e encontrar o conjunto de Pareto, e então escolher o melhor ponto dependendo do ponto de vista do analista. Esta solução demanda um esforço computacional muito grande.

Uma solução alternativa é utilizar o FPO MO via modelo parametrizado. O método da parametrização (3.3.3) foi utilizado para parametrizar os limites das funções objetivo transformadas em restrições de desigualdade através de uma variável ρ .

$$\epsilon_P \implies \rho_P \Delta \epsilon_P$$

$$\epsilon_Q \implies \rho_Q \Delta \epsilon_Q$$

O método dos Pesos (3.3.1) tornou-se necessário para ponderar a função principal e os parâmetros ρ (ρ_P e ρ_Q) relacionados às funções objetivo desvio de potência ativa e desvio de potência reativa. A função principal (4.1) tem peso constante unitário e os fatores de ponderação w_P e w_Q ponderam os limites parametrizados ρ_P e ρ_Q . Quanto maior o fator de ponderação especificado menor será o valor da variável ρ .

A formulação ilustrativa é mostrada abaixo:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && \text{Função objetivo eleita como principal} + w_{F_{02}} \rho_{F_{02}} + w_{F_{03}} \rho_{F_{03}} \\
 & \text{sujeito a} && \text{Função objetivo 2 transformada em restrição} \leq \rho_{F_{02}} * \text{limite pré-especificado 2} \\
 & && \text{Função objetivo 3 transformada em restrição} \leq \rho_{F_{03}} * \text{limite pré-especificado 3} \\
 & && \vdots \\
 & && \text{outras restrições do problema}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

A função objetivo mínimo desvio quadrático ponderado de um perfil de tensão pré-especificado foi eleita como função principal e as demais funções objetivo foram transformadas em restrições. O problema é formulado como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && \sum_{i=1}^n \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2 + w_P \rho_P + w_Q \rho_Q \\
 & \text{sujeito a} && P_{g_i} - P_{d_i} - P_i(V, \delta, a) = 0 \\
 & && Q_{g_i} - Q_{d_i} - Q_i(V, \delta, a) = 0 \\
 & && V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \\
 & && a_i^{min} \leq a_i \leq a_i^{max} \\
 & && P_{g_i}^{min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} \\
 & && Q_{g_i}^{min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{max} \\
 & && \sum_{i \in G_P} \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| \leq \rho_P \Delta \epsilon_P \\
 & && \sum_{i \in G_Q} \beta_i |Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp}| \leq \rho_Q \Delta \epsilon_Q
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Os pesos w_P e w_Q ponderam os parâmetros ρ_P e ρ_Q respectivamente, os quais são os limites das restrições funcionais. Caso w_P e w_Q sejam nulos, o problema se torna um problema mono-objetivo da função principal e ρ_P e ρ_Q terão valores elevados, tais que satisfaçam os desvios de potência das restrições funcionais em relação ao ponto de operação de mínimo desvio quadrático de V^{esp} . Elevando os fatores de ponderação w_P e/ou w_Q , o valor dos parâmetros ρ_P e/ou ρ_Q tenderão a diminuir para restringirem o limite máximo das restrições funcionais, ou seja, para alcançar um menor desvio de P_g^{esp} e/ou Q_g^{esp} .

Neste problema ainda torna-se necessário acrescentar limites mínimo e máximo para ρ_P e ρ_Q .

$$\rho_P^{min} \leq \rho_P \leq \rho_P^{max}$$

$$\rho_Q^{min} \leq \rho_Q \leq \rho_Q^{max}$$

O problema proposto completo torna-se

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } \sum_{i=1}^n \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2 + w_P \rho_P + w_Q \rho_Q \\
& \text{sujeito a } P_{g_i} - P_{d_i} - P_i(V, \delta, a) = 0 \\
& \quad Q_{g_i} - Q_{d_i} - Q_i(V, \delta, a) = 0 \\
& \quad V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\
& \quad a_i^{\min} \leq a_i \leq a_i^{\max} \\
& \quad P_{g_i}^{\min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{\max} \\
& \quad Q_{g_i}^{\min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{\max} \\
& \quad \rho_P^{\min} \leq \rho_P \leq \rho_P^{\max} \\
& \quad \rho_Q^{\min} \leq \rho_Q \leq \rho_Q^{\max} \\
& \quad \sum_{i \in G_P} \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| \leq \rho_P \Delta \epsilon_P \\
& \quad \sum_{i \in G_Q} \beta_i |Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp}| \leq \rho_Q \Delta \epsilon_Q
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Há uma região de factibilidade do sistema onde pode-se satisfazer a função objetivo principal e as funções objetivo transformadas em restrições, a qual está relacionada aos valores mínimos dos parâmetros ρ e aos valores especificados de tensão e potência.

Dependendo dos objetivos a serem otimizados, os valores especificados de V^{esp} , P_g^{esp} e Q_g^{esp} podem ser pontos de operação diferentes ou o mesmo ponto de operação. Por exemplo, se $V^{esp} = 1 pu$ e P_g^{esp} e Q_g^{esp} forem a solução de mínimo custo do sistema, e caso $w_P = 0$ e $w_Q = 0$, então o algoritmo encontrará uma solução que tenha o menor desvio do perfil de tensão nominal do sistema ($V_{nom} = 1 pu$) e nestas condições, conforme aumentamos os valores de w_P e w_Q , pontos intermediários entre a solução de mínimo custo e a solução do desvio de tensão serão encontrados, até alcançar a solução de mínimo custo com valores elevados para w_P e w_Q .

A solução deste problema de otimização é apresentada no apêndice B.

4.4 Aspectos Computacionais e Particularidades

Os algoritmos para as simulações são implementados em computadores digitais, nos quais as operações individuais de soma, subtração, multiplicação e divisão são realizadas com precisão aritmética finita, gerando erros ao longo de suas execuções. Como é impossível monitorar cada operação, é necessário que sejam feitas avaliações a priori sobre os efeitos dos erros nos resultados dos algoritmos. Desta forma, é importante que se tenha um conhecimento razoável da aritmética de precisão finita utilizada pelos computadores, delimitando se possível, os erros gerados.

A solução de um sistema de potência interconectado tendo diferentes níveis de tensão requer a transformação de todas as impedâncias para uma mesma base de tensão. Esta transformação é

conhecida como *Sistema por unidade (pu)* e várias quantidades físicas tais como potência, tensão, corrente e impedância são expressas como uma fração decimal ou múltiplos de quantidades base. Esta transformação é utilizada para não se ter variáveis com grandezas muito diferentes, pois isto pode ocasionar problemas numéricos.

4.4.1 Função Quadrática de Potência

Em uma primeira formulação do problema proposto, os índices de desempenho desvio de potência ativa (4.2) e desvio de potência reativa (4.3) foram considerados sendo funções quadráticas como mostrado abaixo.

$$\sum_{i \in G_P} \alpha_i (P_{gi} - P_{gi}^{esp})^2 \leq \rho_P \Delta \epsilon_P \quad (4.9)$$

$$\sum_{j \in G_Q} \beta_j (Q_{gj} - Q_{gj}^{esp})^2 \leq \rho_Q \Delta \epsilon_Q \quad (4.10)$$

Considera-se no decorrer desta seção que $\Delta \epsilon_P$ e $\Delta \epsilon_Q$ são unitários.

$$\begin{aligned} P_{gi} &= P_{di} + V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{gi} &= Q_{di} + V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Como pode ser visto em (4.11), as variáveis P_{gi} e Q_{gi} são dependentes das variáveis de controle V, a e δ . Sendo assim, a formulação dos desvios de potência por uma função quadrática insere muitos erros nas primeiras e segundas derivadas do Lagrangeano.

Além disto, devido aos valores de potência serem representados em *pu*, o somatório dos desvios quadráticos de potência ativa e reativa acabam tendo ordens pequenas, implicando em um valor muito baixo para os limites superiores das funções objetivo transformadas em restrições ρ_P e ρ_Q . Caso se deseje um desvio de potência menor ou igual a 1 MW e considerando a base de potência como 100 MVA, deve-se ter ρ_P^{min} e/ou ρ_Q^{min} na ordem de 10^{-4} ; A ordem de grandeza de ρ_P e ρ_Q influencia na solução do sistema por ela ser muito menor que a ordem de grandeza das outras variáveis.

Nesta formulação o processo iterativo não alcançava a convergência em muitos casos, ocorrendo com maior frequência os fenômenos descritos na Seção Convergência (4.4.3). O número de condicionamento da matriz de derivadas de segunda ordem se aproximava de zero e havia uma maior dificuldade para encontrar valores apropriados para ρ_P^{min} e ou ρ_Q^{min} .

As equações quadráticas de desvio de potência (4.9 e 4.10) foram modificadas para as funções de somatório do módulo dos desvios de potência ativa e reativa (4.2 e 4.3). O desvio em módulo possui o parâmetro ρ_P e ρ_Q com grandezas mais próximas do desvio de tensão, evitando problemas numéricos.

4.4.2 Fatores de Ponderação

Os fatores de ponderação w_P e w_Q representam o intercâmbio entre os índices de desempenho e também são chamados de pesos w_P e w_Q . Os pesos w_P e w_Q indicam a importância do desvio de potência ativa e desvio de potência reativa respectivamente, em relação ao desvio de tensão o qual tem fator de ponderação unitário e foi eleito como função principal pelo método da restrição ϵ .

Os pesos ponderam os parâmetros ρ_P e ρ_Q , através dos quais pode-se relaxar ou restringir os limites superiores dos desvios de potência ativa e reativa, indicando maior importância para um determinado índice de desempenho e/ou para outro. Os desvios de potência e os fatores de ponderação dependem das potências especificadas e da dimensão do sistema utilizado, pois normalmente os sistemas maiores possuem maior capacidade de geração e conseqüentemente um maior desvio de potência.

Para fatores de ponderação nulos o problema torna-se minimizar o desvio de tensão de um valor pré-especificado, enquanto ρ_P e ρ_Q são relaxados tais que satisfaçam as restrições de desvio de potência ativa e desvio de potência reativa no ponto de operação de mínimo desvio de tensão. Conforme os fatores de ponderação w_P e w_Q aumentam, ρ_P e ρ_Q tendem a diminuir para restringir os limites dos desvios de potência ativa e reativa.

A partir de um certo valor de peso, o problema deixa de ter sensibilidade entre os fatores de ponderação w e os parâmetros ρ . A solução encontrada permanece constante com o aumento dos fatores de ponderação devido ao parâmetro ρ_P ou o parâmetro ρ_Q atingirem seu limite mínimo e conseqüentemente atingir o mínimo desvio de potência. Neste caso a solução de mínimo desvio de potência ativa e/ou reativa encontrada permanecerá constante mesmo com o aumento dos fatores de ponderação. Para fatores de ponderação w_P e/ou w_Q com ordem de grandeza elevados ($> 10^3$) o processo iterativo não obtém a convergência.

4.4.2.1 Limite Mínimo do Parâmetro $\rho - \rho^{\min}$

Este é um dos dados de entrada mais importantes do problema de otimização formulado e dependem da sensibilidade do analista ao sistema de potência utilizado. Através do aumento dos fatores de ponderação w_P e/ou w_Q os parâmetros ρ_P e/ou ρ_Q diminuem até atingirem seus valores mínimos e, ρ_P^{\min} e ρ_Q^{\min} tornam-se os limites máximo dos índices de desempenho transformados em restrição de desigualdade. As funções objetivo transformadas em restrição tornam-se

$$\sum_{i \in G_P} \alpha_i |P_{gi} - P_{gi}^{esp}| \leq \rho_P^{\min} \quad (4.12)$$

$$\sum_{i \in G_Q} \beta_i |Q_{gi} - Q_{gi}^{esp}| \leq \rho_Q^{\min} \quad (4.13)$$

Caso os valores de ρ_P^{\min} e ρ_Q^{\min} sejam elevados, sendo maior que o valor dos desvios de potência ativa e reativa encontrados para $w_P = 0$ e $w_Q = 0$, a solução encontrada será o mínimo desvio de

tensão. Isto se deve ao fato do maior desvio encontrado para este problema ser quando os fatores de ponderação são nulos, isto é, se o valor do parâmetro ρ^{min} for maior que este desvio máximo de potência as equações (4.12) e (4.13) serão sempre satisfeitas. Por outro lado, o menor desvio de potência encontrado é quando P_{g_i} é exatamente o seu valor especificado ($P_{g_i}^{esp}$), ou quando o problema encontra seu menor desvio em relação às potências especificadas (e.g. $P_{g_i}^{esp} = 0$).

O valor de ρ^{min} é muito importante por ser o limite dos desvios de potência quando os fatores de ponderação são elevados. Sendo assim, se ρ^{min} for intermediário entre os problemas com solução do mínimo desvio de tensão e mínimo desvio de potência, a solução do problema MO não será encontrada sendo o menor desvio de potência possível, pois as equações (4.12) e (4.13) serão satisfeitas antes do problema atingir o valor de mínimo desvio de potência. Portanto é necessário obter valores adequados para ρ^{min} para que este possa ter a maior faixa de valores possível, ou seja, para os desvios de potência variarem do maior desvio encontrado representado no ponto de mínimo desvio de tensão até o menor desvio de potência possível, o qual será especificado como ρ^{min} .

A solução adotada através da heurística para encontrar os valores de ρ^{min} é mostrada pelo algoritmo abaixo:

1. Adotar um dos fatores de ponderação nulo e o outro fator sendo 1;
2. adotar $\rho = \rho_{\text{mínimo desvio de tensão}}$;
3. decrescer ρ^{min} enquanto $\rho = \rho_{min}$;
4. caso $\rho > \rho_{min}$, adotar um fator de ponderação w maior tal que ocorra $\rho \cong \rho_{min}$;
5. decrescer ρ_{min} enquanto o problema obtiver convergência, e o menor ρ_{min} encontrado é setado como sendo o valor limite de ρ^{min} , testando se elevar w não decrescerá ρ_{min} .

Deve-se adotar este procedimento para encontrar ρ_P^{min} e ρ_Q^{min} .

Com um valor inferior do limite encontrado para o parâmetro ρ_P^{min} e ρ_Q^{min} o processo iterativo não obtém convergência. A não convergência não significa divergência, mas que o gradiente permanece oscilando em uma determinada faixa de valores não conseguindo satisfazer as restrições de desigualdade dos índices de desempenho. O desvio de potência ativa e/ou reativa do problema não convergido tem valores próximo ao limite do parâmetro ρ^{min} . Pode-se adotar valores um pouco superiores aos desvios para iniciar o procedimento ilustrado acima para encontrar ρ^{min} .

4.4.3 Convergência

Através de heurística observou-se que os fatores de ponderação w_P e w_Q e os limites mínimo de ρ têm grande influência no processo iterativo de convergência do problema de otimização. Encontrar a faixa de valores onde se encontra a sensibilidade ao sistema utilizado é uma das maiores dificuldades para começar a se obter soluções significativas.

Os parâmetros ρ_P^{min} e ρ_Q^{min} tem limites inferiores. Caso os parâmetros ρ_P^{min} e/ou ρ_Q^{min} sejam menores que seus respectivos limites, as restrições de desigualdade desvio de potência ativa e/ou reativa não são satisfeitas devido ao fato do desvio de potência ativa e/ou reativa ser maior que o parâmetro ρ . Nesta situação a norma do gradiente permanece oscilando em uma faixa de valores próximo a sua tolerância e as variáveis de controle variam muito pouco tentando satisfazer as restrições de desigualdade, às vezes satisfazendo em um número elevado de iterações e quando não converge alcança o número máximo de iterações.

Pode-se tentar ajustar o fator μ para melhorar o processo de convergência, pois os pontos do conjunto de Pareto podem estar muito próximos e devido ao tamanho do passo o processo iterativo não converge.

A solução do processo não convergido é útil, pois ele dá um indicativo da ordem do desvio de potência na última iteração e pode ser utilizado para encontrar o limite de ρ_{min} . Este limite tem uma pequena variação quando são considerados 2 ou 3 índices de desempenho simultaneamente, pois o problema modifica seus objetivos de otimização.

4.5 Conclusão

O trabalho proposto foi formulado unindo três metodologias MO para solução do FPO. O método dos pesos, o método das restrições e o método de parametrização formularam o problema (4.8) que foi solucionado pelo método de pontos interiores versão primal-dual. No capítulo foi descrito o objetivo de cada metodologia e os resultados esperados a respeito do problema, através da variação dos fatores de ponderação dos índices de desempenho.

O problema foi solucionado pela redução do número de variáveis do sistema, onde foram consideradas as variáveis de parametrização, de otimização e as variáveis de Lagrange. Por este método obteve-se um melhor desempenho computacional e um melhor condicionamento da matriz de segunda derivada do método de Newton.

Existem alguns parâmetros que modificam o problema proposto como: os valores especificados de potência ativa P_g^{esp} e potência reativa Q_g^{esp} , pelo qual pode-se modificar o ponto de operação e o objetivo do problema; os fatores de ponderação w_P e w_Q que representam a sensibilidade entre os índice de desempenho; os parâmetros ρ_P^{min} e ρ_Q^{min} os quais têm grande influência no problema e com valores adequados pode-se obter significativas soluções.

Os limites de ρ_P^{min} e ρ_Q^{min} devem ser encontrados através do procedimento de diminuir seu valor e elevar os fatores de ponderação associados ao limite. Os desvios de potência do processo não convergido têm uma boa aproximação dos limites. Estes podem ser vistos como as variáveis mais sensíveis ao problema.

Caso os valores de potência ativa e reativa sejam o mesmo ponto de operação observam-se que para valores elevados dos fatores de ponderação e ao estreitar um dos parâmetros ρ^{min} , por exemplo ρ_P^{min} , o desvio de potência reativa diminui e se aproxima dos valores especificados.

No próximo capítulo observa-se os resultados computacionais e para valores adequados dos parâmetros citados obtêm-se muitos pontos de operação para o problema de otimização multi-objetivo.

Capítulo 5

Resultados Numéricos

A metodologia proposta foi implementada no ambiente computacional MatLab, versão 6.0, em um microcomputador Celeron-D 2800Mhz, com 512MB de memória RAM. O sistema IEEE-57 barras foi selecionado para os testes.

Os testes¹ foram realizados visando os seguintes objetivos:

- validação dos resultados obtidos através do Programa Computacional Multi-objetivo (PMO) implementado pela metodologia proposta, por comparação com aqueles determinados com o programa computacional Flupot (Flupot, 2005);
- avaliação das soluções multi-objetivo, obtidas com a variação das ponderações atribuídas aos índices de desempenho considerados;
- estudo dos desvios de potência ativa e reativa ao longo das iterações;
- análise da dependência das soluções multi-objetivo com os valores de potência pré-especificados.

5.1 Otimização Mono-objetivo

Neste teste será realizada a validação do programa computacional multi-objetivo (PMO). Para tanto, o seguinte procedimento foi adotado:

- a solução do problema de fluxo de potência ótimo foi obtida através do programa Flupot;
- os valores de tensão e/ou potência ativa e reativa correspondentes à solução determinada no item anterior foram utilizados como variáveis especificadas no programa multi-objetivo;
- os fatores de ponderação do programa multi-objetivo foram selecionados de forma que o problema de otimização multi-objetivo resolvido fosse semelhante àquele resolvido via Flupot;

¹No programa os valores de potência e os parâmetros ρ_P e ρ_Q estão em pu com potência base de 100 MVA

- os resultados dos casos base simulados pelo programa comercial Flupot estão apresentados no anexo C.
- as variáveis de controle selecionadas no programa Flupot são: P_g , Q_g , V e $taps$.

5.1.1 Controle de Tensão

Se o controle de tensão é selecionado como índice de desempenho, o programa Flupot determina um ajuste nos controles de potência reativa, de forma a manter as tensões dentro dos limites especificados. Caso isto não seja possível, os limites de tensão num conjunto de barras escolhidas automaticamente pelo programa, são relaxados. As barras em que não é permitida a relaxação dos limites de tensão devem ser especificadas.

Com relação ao programa computacional baseado na metodologia proposta, os resultados do controle de tensão foram obtidos nas seguintes condições:

- a minimização dos desvios quadráticos da magnitude da tensão pré-especificada foi mantida como objetivo único do processo de otimização;
- os valores dos fatores de ponderação w_P e w_Q foram especificados em zero, de forma a excluir as restrições de desvio de potência do problema de otimização;
- os valores de magnitude da tensão pré-especificados, de potência ativa pré-especificados e de potência reativa pré-especificados foram obtidos através da solução determinada pelo programa comercial Flupot utilizando o índice de desempenho controle de tensão;

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam a comparação das soluções obtidas com o programa Flupot otimizando o controle de tensão e com o PMO implementado. As soluções encontradas para o perfil do módulo das tensões das barras e para o perfil dos ângulos das barras são praticamente as mesmas com o Flupot e o PMO, tendo pequenos desvios de seus respectivos valores especificados. Os dados completos do sistema IEEE-57 barras e alguns resultados obtidos pelo programa Flupot e pelo PMO desenvolvido podem ser encontrados no Apêndice C. Um exemplo de um sistema de 4 barras com suas soluções é apresentado no Apêndice D.

Através da tabela 5.1 pode ser visto que a geração de potência ativa do PMO teve um desvio por barra, da solução obtida pelo Flupot, mais significativo do que a geração de potência reativa, embora ambos o desvios totais tenham sido pequenos.

	Programa	1	2	3	6	8	9	12	Total
Potência Ativa Gerada	Flupot	265,3	0	261,9	0	353	0	390,7	1270,9
	PMO	274,6	0	273,5	0	348,4	0	375,6	1272,1
Potência Reativa Gerada	Flupot	54,7	7,2	16	2,5	93,8	1	103,4	278,6
	PMO	53	6,66	16,2	2,7	95,7	0,87	108,26	283,39

Tabela 5.1: Comparação das potências geradas (P_{g_i} e Q_{g_i}) do Controle de Tensão entre Flupot e PMO.

O desvio da geração total do PMO de potência ativa e reativa é de 0,09% e 1,3%, respectivamente, em relação a geração total de potência ativa e reativa obtida pela solução do Flupot.

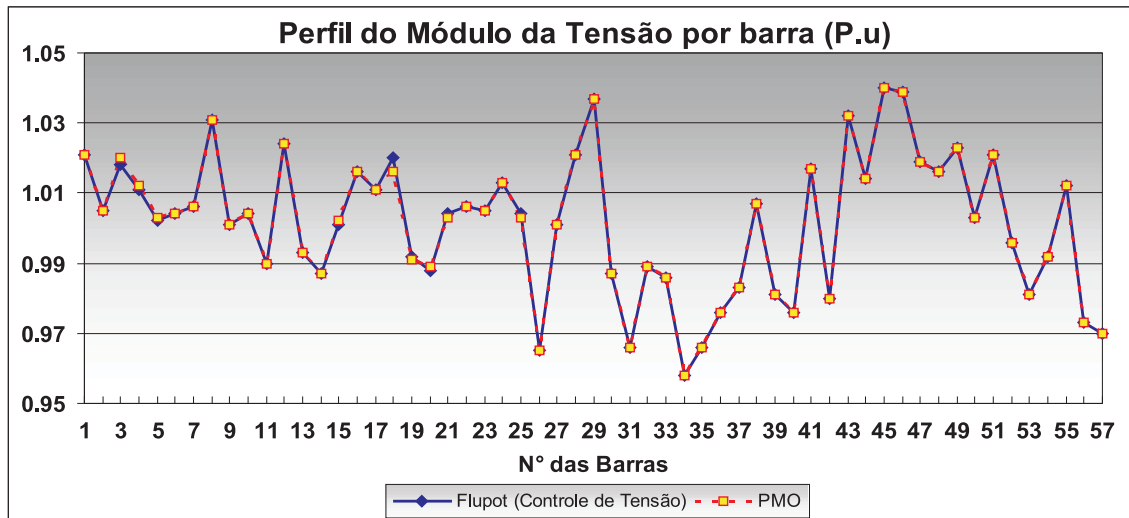


Figura 5.1: Módulos da Tensão por barra (Comparação do Controle de Tensão entre Flupot e PMO).

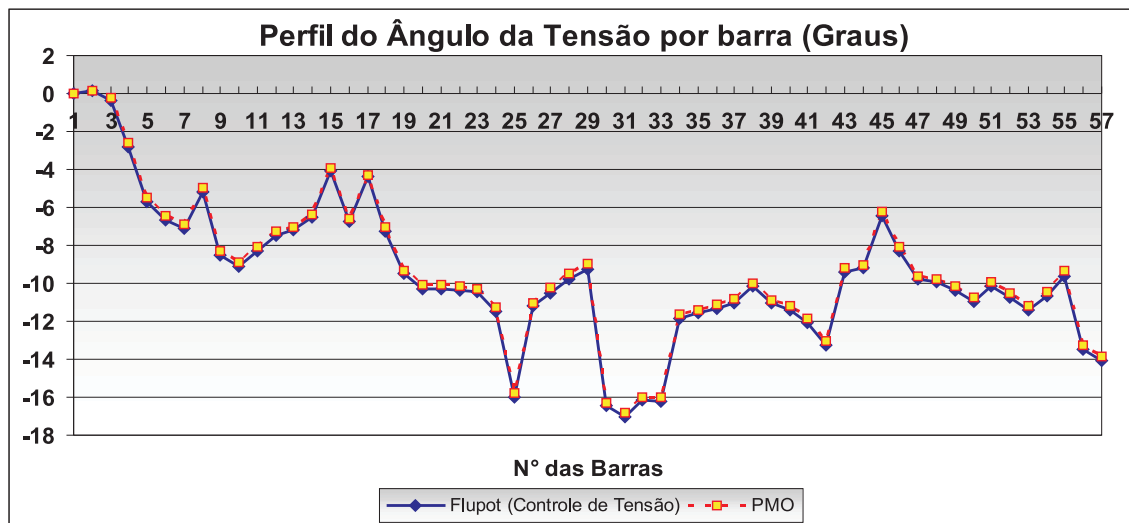


Figura 5.2: Ângulos da Tensão por barra (Comparação do Controle de Tensão entre Flupot e PMO).

Na tabela 5.2 observa-se que o somatório dos desvios quadráticos do módulo das tensões foi praticamente insignificante. Os somatórios dos desvios de potência ativa e reativa são de 3,2% e 3,4%, respectivamente, da geração total de potência ativa e reativa obtida pelo Flupot, mostrando que as soluções entre os dois programas diferem muito pouco.

	FLUPOT	Programa Computacional Multi-objetivo
Desvio Quadrático de Tensão de 1 pu	0,022376	0,022448
Desvio de Potência Ativa (MW)	0	40,57
Desvio de Potência Reativa (Mvar)	0	9,55
Geração Total de Potência Ativa (MW)	1270,9	1272,1
Geração Total de Potência Reativa (Mvar)	278,6	283,39

Tabela 5.2: Comparação (Controle de Tensão) entre Flupot e PMO dos Desvios de Tensão, Desvios de Potência e Geração Total.

Utilizando apenas o mínimo desvio de tensão foi possível obter uma solução em que a geração total de potência ativa e reativa foram praticamente as mesmas obtidas pelo Flupot e o perfil de tensão foi igual.

5.1.2 Mínimo Custo de Geração

Se o mínimo custo de geração for selecionado como índice de desempenho, o programa Flupot calcula novos valores para os controles de tal forma a minimizar o custo total de geração de potência ativa, levando em consideração as restrições especificadas pelo usuário. O custo de geração é considerado como uma função linear passando pela origem.

Em relação ao programa computacional desenvolvido, as seguintes considerações foram feitas:

- os índices de desempenho (4.3) desvio de tensão, desvio de potência ativa e desvio de potência reativa foram minimizados simultaneamente;
- os valores dos fatores de ponderação w_P e w_Q foram ambos especificados em 100, de forma a incluir as restrições de desvio de potência no problema de otimização;
- os valores de magnitude da tensão pré-especificados foram selecionados como $1,0 pu$;
- as potências ativas e reativas pré-especificadas foram obtidas através da solução determinada pelo programa comercial Flupot utilizando o índice de desempenho mínimo custo de geração.

Através das figuras 5.3 e 5.4 observa-se que a solução do programa Flupot foi semelhante à solução encontrada pelo PMO desenvolvido, com pequenos desvios no módulo de tensão das barras devido ao fato de utilizar o índice de desempenho desvio de tensão simultaneamente no processo de otimização. A solução encontrada em relação à potência ativa gerada e aos ângulos foi igual à solução do Flupot e a potência reativa teve um pequeno desvio devido ao acoplamento $Q - V$, como pode ser analisado pela figura 5.3 e tabela 5.4.

A tabela 5.4 mostra que o custo de geração de potência do PMO foi igual ao custo obtido pelo Flupot. O desvio de tensão de $1 pu$ foi menor do que a solução do Flupot com uma geração de potência reativa semelhante, melhorando o perfil de tensão do sistema.

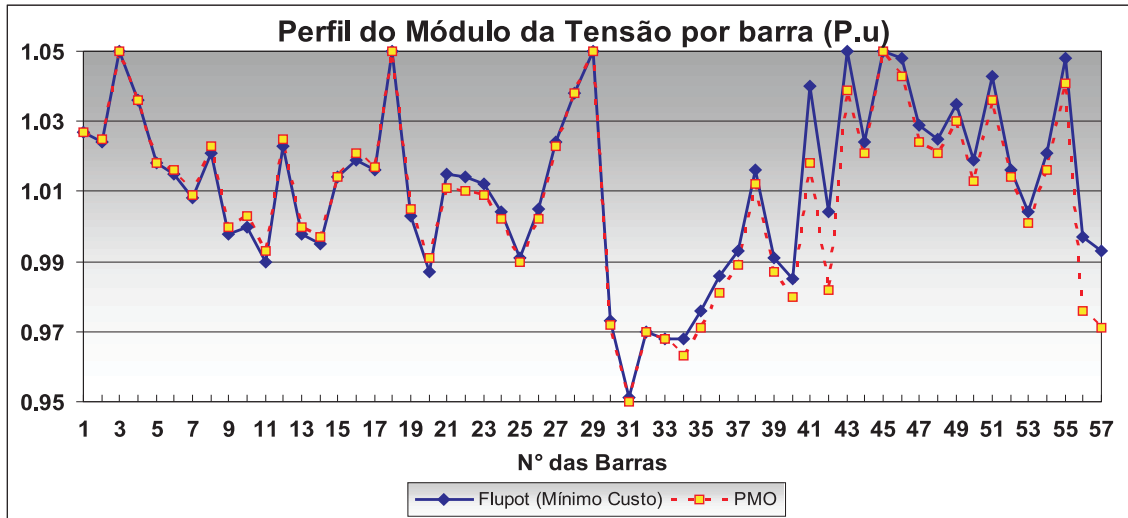


Figura 5.3: Módulos da Tensão por barra (Comparação do Mínimo Custo entre Flupot e PMO).

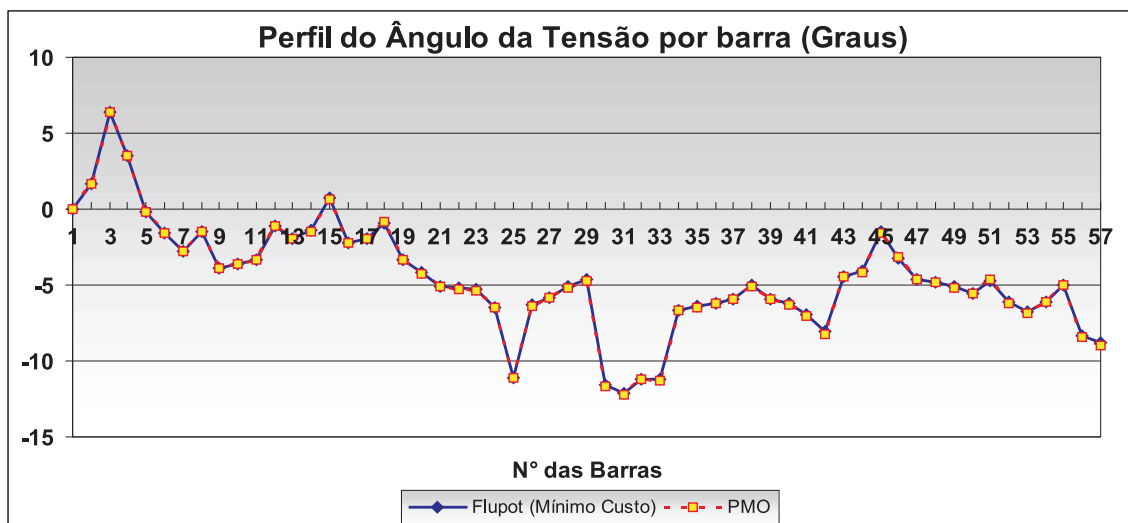


Figura 5.4: Ângulos da Tensão por barra (Comparação do Mínimo Custo entre Flupot e PMO).

	Programa	1	2	3	6	8	9	12
Potência Ativa Gerada	Flupot	0	0	500	0	276,8	0	500
	PMO	0	0	500	0	276,801	0	500
Potência Reativa Gerada	Flupot	59,7	49,9	28	14,8	61	8,9	65
	PMO	58,92	50	25,42	14,38	63,2	9	66,04

Tabela 5.3: Comparação das Potências Ativas e Reativas Geradas por Barra (Mínimo Custo).

	FLUPOT	Programa Computacional Multi-objetivo
Custo de Geração de Potência Ativa(\$)	$144,014 * 10^5$	$144,014 * 10^5$
Desvio Quadrático de Tensão de 1 pu (pu V)	0,040448	0,037952
Desvio de Potência Ativa (MW)	0	0,001
Desvio de Potência Reativa (Mvar)	0	7,23
Geração Total de Potência Ativa (MW)	1276,8	1276,8
Geração Total de Potência Reativa (Mvar)	287,3	287,0

Tabela 5.4: Comparação dos Desvios, Custo de Geração e Geração Total (Mínimo Custo).

Os valores de desvio de potência do Flupot são nulos devido à sua solução ter sido utilizada como valores especificados no PMO. Com estes testes mostra-se que o programa computacional multi-objetivo pode alcançar as soluções mono-objetivo, além de encontrar soluções intermediárias entre as soluções mono-objetivo. Estes pontos intermediários são pontos contidos no conjunto de Pareto.

5.2 Otimização Multi-objetivo

Os testes descritos a seguir visam obter soluções multi-objetivo intermediárias entre as soluções ótimas obtidas por programas de otimização mono-objetivo convencionais, assim construindo uma parte do conjunto de soluções de Pareto.

Através da variação dos fatores de ponderação w_P e w_Q é traçado o conjunto de Pareto e diferentes objetivos podem ser alcançados dependendo dos valores especificados de potência ativa e reativa. Os seguintes critérios são adotados:

- Os valores especificados de tensão são de $1,0pu$, sendo o caso base o problema de mínimo desvio de tensão;
- os valores especificados de potência ativa e reativa são obtidos de soluções ótimas do programa Flupot (Caso Base Custo de Geração);
- os limites mínimos para os parâmetros ρ_P e ρ_Q são ajustados de forma a obter os respectivos desvios de potência desejados, dependendo do objetivo a ser alcançado e valores especificados de potência;
- as constantes γ , α , β , $\Delta\epsilon_P$, $\Delta\epsilon_Q$ são unitárias;

Os testes apresentam os resultados do problema de otimização multi-objetivo de acordo com a formulação mostrada em (4.8). Prevê-se que com o aumento dos fatores de ponderação w_P e w_Q estará ocorrendo uma maior ponderação para os índices de desempenho transformados em restrições de desigualdade, e conseqüentemente, um estreitamento dos limites dos desvios de potência ativa e de potência reativa. Aumentando-se os fatores de ponderação, a solução em termos de potência ativa gerada se aproxima das potências especificadas, pois os parâmetros ρ_P e ρ_Q dos índices de desempenho tenderão a diminuir. Através dos fatores de ponderação, pode-se formular problemas de otimização considerando um, dois ou três índices de desempenho.

5.2.1 Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Custo de Geração de Potência Ativa

A formulação destes objetivos pelo problema de otimização multi-objetivo (4.8) pode ser feita através dos valores especificados:

- $V^{esp} = 1,0 pu$;
- P_g^{esp} é a potência ativa obtida através da solução de mínimo custo de geração;
- Q_g^{esp} é a potência reativa obtida através da solução de mínimo custo de geração.

Para realização e análise dos resultados dos testes, considerou-se:

- variação dos fatores de ponderação de forma a se construir uma parte do conjunto de Pareto;
- comparação de soluções ótimas de três problemas de otimização considerando dois e três índices de desempenho:
 - Fator de ponderação w_P ativo e w_Q zero, de forma a minimizar o desvio de tensão e desvio de potência ativa simultaneamente;
 - Fator de ponderação w_P zero e w_Q ativo, de forma a minimizar o desvio de tensão e desvio de potência reativa simultaneamente;
 - Fatores de ponderação w_P e w_Q ativos, de forma a minimizar o desvio de tensão, desvio de potência ativa e desvio de potência reativa simultaneamente;
- Gráficos analisando os desvios de tensão, desvios de potência ativa e desvios de potência reativa;
- Tabelas ilustrando as soluções de potências ativa e reativas geradas de acordo com os fatores de ponderação.

Através das figuras 5.5 a 5.7 observa-se que o crescimento dos fatores de ponderação w_P e/ou w_Q , provoca um intercâmbio entre os índices *somatório do desvio de tensão* e *somatórios dos desvios de potência ativa e reativa*. A Figura 5.5 ilustra o intercâmbio no desvio de tensão comparando os três problemas de otimização citados, enquanto as figuras 5.6 e 5.7 apresentam a comparação dos desvios

de potência ativa e reativa, respectivamente, com os parâmetros ρ_P e ρ_Q relacionados a cada problema de otimização.

A Figura 5.8 apresenta o perfil de tensão das soluções mono-objetivo mínimo desvio de tensão e mínimo custo de geração, comparando com o perfil de tensão dos três problemas multi-objetivo considerados utilizando o fator de ponderação em que houve o menor desvio de potência ativa e reativa de cada um, neste caso w_P e w_Q são unitários. O perfil de tensão das soluções multi-objetivo é intermediário entre as soluções mono-objetivo.

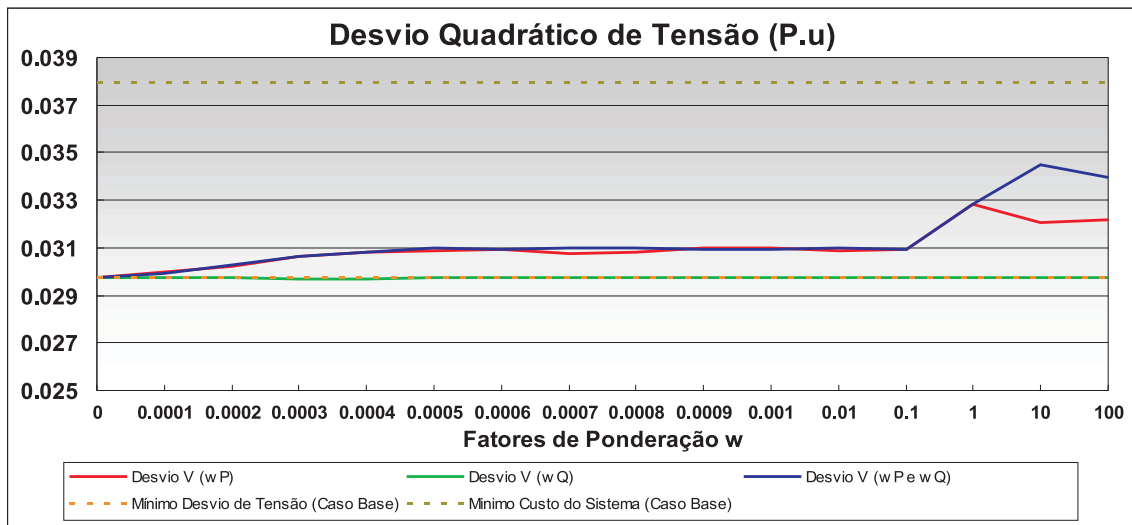


Figura 5.5: Desvio Quadrático de Tensão utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.

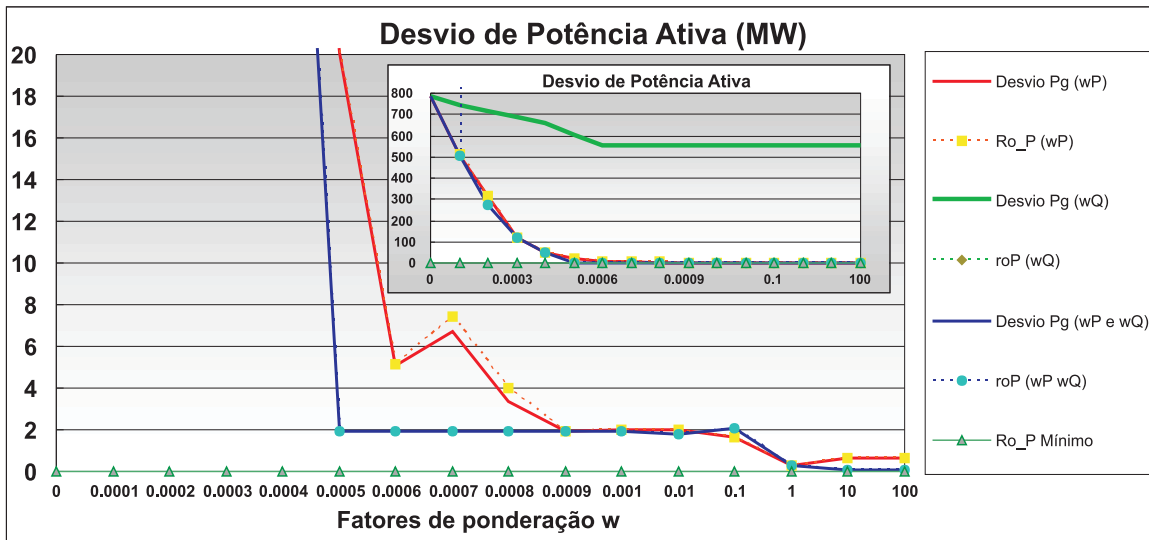


Figura 5.6: Desvio de Potência Ativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.

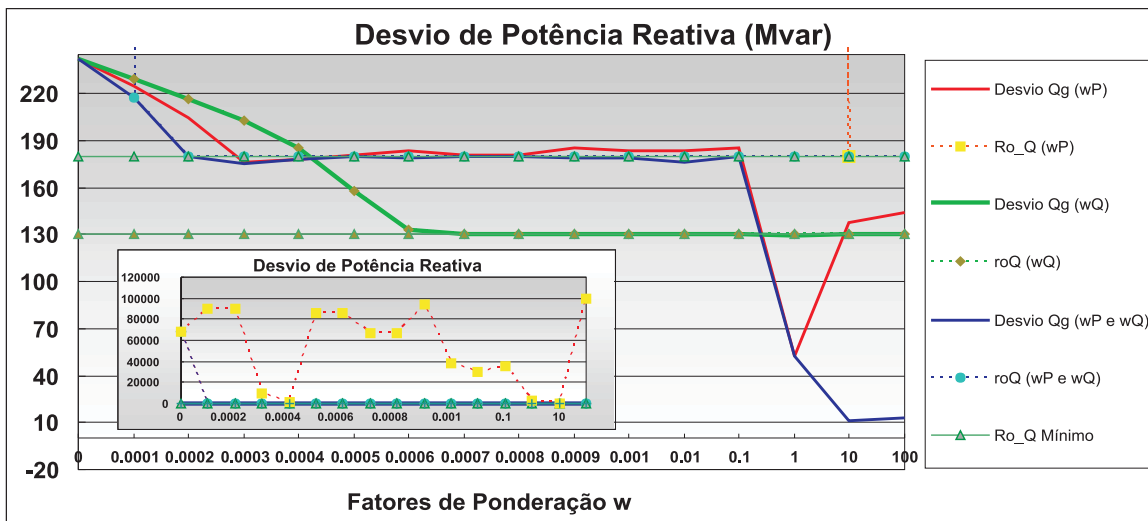


Figura 5.7: Desvio de Potência Reativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.

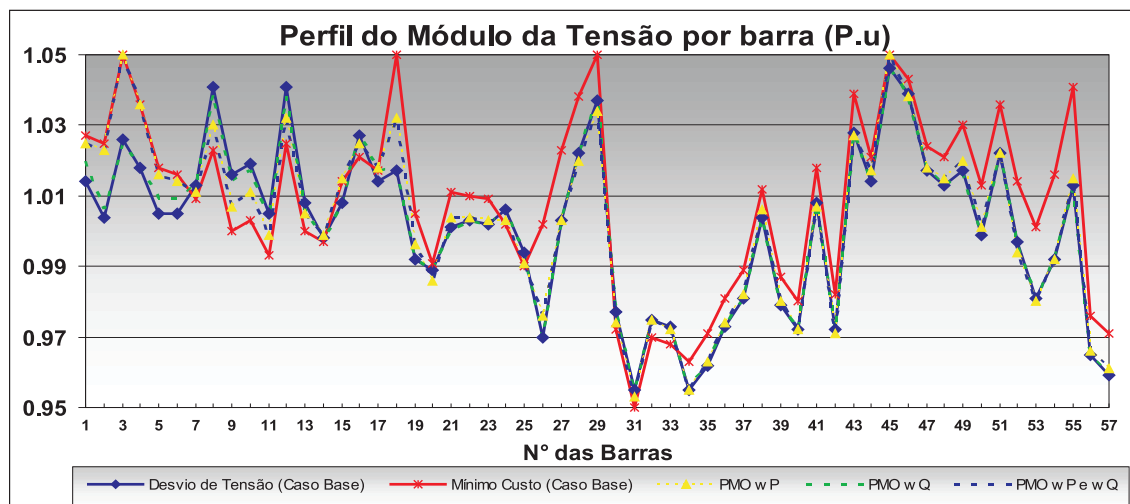


Figura 5.8: Desvio de Potência Reativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.

As tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os valores de potências ativas e reativas geradas para cada fator de ponderação. As soluções de cada um dos três problemas multi-objetivo de otimização são identificadas pela coluna 3, através dos fatores de ponderação ativos².

² w_P indica que apenas os desvios de tensão e de potência ativa gerada são minimizados no problema de otimização; w_Q indica que apenas os desvios de tensão e de potência reativa gerada são minimizados; e w_P e w_Q indica que os três índices de desempenho são minimizados.

	$P_{g_i}^{esp}$	Fat. de Pond.	0	0.0001	0.0002	0.0003	0.0005	0.1	10	100
Pg1	0	wP	268.03	153.67	76.61	4.2	0.2	0.01	0.01	0.01
		wQ	268.03	246.15	229.55	213.33	191.67	191.56	145.16	145.05
		wP e wQ	268.03	147.29	50.02	1.92	0	0.01	0	0
Pg3	500	wP	172.65	242.31	336.55	437.55	490.57	500	499.89	499.91
		wQ	172.65	171.76	170.96	171.42	178.44	178.38	218.65	218.68
		wP e wQ	172.65	241.34	360.99	439.67	500	500	500	500
Pg8	276.8	wP	397.91	371.9	355.27	331.92	287.16	278.16	277.35	277.34
		wQ	397.91	398.55	399.4	400.74	402.32	402.83	401.82	401.61
		wP e wQ	397.91	376.99	358.29	332.19	278.73	280.43	276.85	276.84
Pg12	500	wP	428.84	497.84	499.9	499.98	499.91	500	500	500
		wQ	428.84	450	465.9	479.8	492.42	492.07	499.2	499.49
		wP e wQ	428.84	499.97	500	499.99	500	498.21	500	500
Total	1276.8	wP	1267.43	1265.732	1268.336	1273.646	1277.839	1278.477	1277.259	1277.265
		wQ	1267.43	1266.457	1265.803	1265.287	1264.841	1264.849	1264.831	1264.832
		wP e wQ	1267.43	1265.595	1269.29	1273.775	1278.729	1278.669	1276.854	1276.835
Custo	144.01E+3	wP	175.59E+3	163.03E+3	154.76E+3	146.88E+3	144.66E+3	144.29E+3	144.10E+3	144.09E+3
		wQ	175.59E+3	173.44E+3	171.84E+3	170.30E+3	168.23E+3	168.24E+3	163.59E+3	163.57E+3
		wP e wQ	175.59E+3	162.64E+3	152.35E+3	146.68E+3	144.31E+3	144.38E+3	144.03E+3	144.03E+3

Tabela 5.5: Geração de Potência Ativa pela variação dos fatores de ponderação.

	$Q_{g_i}^{esp}$	Fat. de Pond.	0	0.0001	0.0002	0.0003	0.0005	0.1	10	100
Qg1	59.7	wP	-1.8	18.75	39.65	59.69	62.33	62.73	23.75	22.24
		wQ	-1.98	3.07	10.33	17.79	35.86	44.53	44.53	44.6
		wP e wQ	-1.8	25.13	50.37	59.66	60.11	59.63	58.47	58.06
Qg2	49.9	wP	16.27	6.9	1.19	3.47	4.03	3.8	50	50
		wQ	16.44	15.78	12.49	9.26	6.62	8.32	8.3	8.24
		wP e wQ	16.27	3.45	2.7	4.27	6.14	6.66	49.99	50
Qg3	28	wP	59.58	59.08	48.19	33.14	25.13	24.27	40.18	43.18
		wQ	59.63	59.96	59.87	59.25	46.79	35.37	35.35	35.35
		wP e wQ	59.58	59.61	39.35	32.7	24.77	24.68	24.82	24.79
Qg6	14.8	wP	-21.15	-28.5	-30.43	-30.56	-24.7	-24.67	-17.25	-18.83
		wQ	-21.22	-21.56	-20.12	-18.52	-13.06	-9.54	-9.52	-9.5
		wP e wQ	-21.15	-28.15	-28.8	-30.59	-24.52	-24.67	13.77	13.28
Qg8	61	wP	89.32	96.54	100.54	107.11	114.95	117.84	97.19	97.7
		wQ	89.36	88.91	87.08	85.13	80.86	79.05	79.01	79.04
		wP e wQ	89.32	94.99	99.59	107.1	117.3	116.92	64.33	65.27
Qg9	8.9	wP	8.74	8.99	8.98	9	8.98	9.2	9	9
		wQ	8.76	8.99	8.99	8.98	8.99	8.99	8.99	8.99
		wP e wQ	8.74	9	9	9	9	9.02	9	9.07
Pg12	65	wP	115.8	95.7	96.08	98.04	101.33	101	86.52	85.98
		wQ	115.75	107.59	101.41	96.14	89.14	88.38	88.44	88.38
		wP e wQ	115.8	92.98	94.85	98.16	101.88	102.31	66.9	67
Total	287.3	wP	266.76	257.457	264.199	279.89	292.054	294.18	289.384	289.268
		wQ	266.733	262.738	260.055	258.028	255.193	255.096	255.111	255.101
		wP e wQ	266.76	257.003	267.063	280.298	294.685	294.549	287.285	287.481

Tabela 5.6: Geração de Potência Reativa pela variação dos fatores de ponderação.

• Minimização do Desvio de Tensão e Desvio de Potência Ativa

Considerando o fator w_Q nulo, o parâmetro ρ_Q não terá influência na função a ser minimizada, pois $w_Q \cdot \rho_Q = 0$. Com $\Delta\epsilon_Q$ unitário, o parâmetro ρ_Q se torna o limite máximo da função objetivo

$$\sum_{i \in G_Q} \beta_i |Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp}| \leq \rho_Q$$

e ρ_Q poderá ser relaxado quanto necessário, desde que satisfaça a restrição de desigualdade.

O peso w_P é variado e conforme este valor aumenta o parâmetro ρ_P tende a diminuir para que o limite superior da função

$$\sum_{i \in G_P} \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| \leq \rho_P$$

se torne cada vez menor e o valor de P_{g_i} cada vez mais próximo de $P_{g_i}^{esp}$.

O objetivo somatório do desvio quadrático de tensão, a qual foi eleito como função principal pelo método das restrições, mostra que o aumento de w_P causa um aumento no desvio quadrático de

tensão. Este intercâmbio entre os índices de desempenho depende da relação entre V^{esp} e P_g^{esp} , da distância entre estes pontos, da forma das duas funções objetivo envolvidas, dos pontos especificados serem soluções viáveis, entre outros fatores.

A variação de w_P depende da ordem dos valores das funções objetivo, pois a função somatório dos desvios quadráticos de tensão tem um valor muito inferior ao da função somatório do módulo dos desvios de potências geradas. Isto se deve ao fato de ser um somatório de desvios elevados ao quadrado cujos valores estão em pu.

O problema de otimização considerando apenas o *desvio de tensão* e o *desvio de potência ativa* alcançou valores de potência ativa próximos da solução ótima de mínimo custo de geração com o aumento do fator de ponderação w_P , pois $P_g \rightarrow P_g^{esp}$. O *desvio de potência reativa* tendeu à solução de mínimo custo. O desvio de potência reativa diminuiu porque Q_g^{esp} é o mesmo ponto de operação de P_g^{esp} . Aumentando w_P , $P_g \cong P_g^{esp}$, então $Q_g \rightarrow Q_g^{esp}$. O *desvio de tensão* aumentou fazendo os intercâmbios entre os índices de desempenho desvios de potência, representando as soluções contidas no *conjunto de Pareto*.

Observa-se que o aumento do fator de ponderação entre 0,0006 e 0,1 praticamente não alterou a solução do problema, apenas tendo variações significativas nos desvios a partir de $w_P = 1$. O menor desvio da solução de mínimo custo ocorreu com fator de ponderação $w_P = 1$, obtendo desvios de potência ativa e reativa de 2MW e 50Mvar, respectivamente. Esta solução teve potências ativas geradas iguais à solução do Flupot com um perfil de tensão com menor desvio de tensão de 1pu, como pode ser visto na figura 5.8. Para valores $w_P > 1$ há um aumento nos desvios de potência ativa e reativa e uma diminuição do desvio de tensão.

O parâmetro ρ_P acompanhou o desvio de potência ativa, decrescendo com o aumento do fator de ponderação w_P e alcançou seu valor mínimo ($\rho_P^{min} = 0.01MW$), enquanto o parâmetro ρ_Q teve valores altos (30.000) pelo fato de w_Q ser nulo e não apareceu na Figura 5.6 devido à escala. Apesar do parâmetro ρ_Q ter sido elevado, o desvio de potência reativa teve uma tendência a acompanhar a solução do desvio de potência ativa.

• Minimização do Desvio de Tensão e Desvio de Potência Reativa

Considerando apenas os índices de desempenho *desvio de tensão* e *desvio de potência reativa* observa-se pela figura (5.6) que o *desvio de potência ativa* alcançou seu mínimo em $w_Q = 0,0007$, embora este tenha sido muito grande (700MW), bem como o valor do parâmetro ρ_P , devido ao fato do índice de desempenho desvio de potência ativa ter sido excluído do problema de otimização.

O desvio de potência reativa decresceu com o parâmetro ρ_Q , o qual atingiu $\rho_Q^{min} = 130Mvar$ em $w_Q = 0,0007$ e o desvio de potência reativa deixou de ter sensibilidade ao aumento do fator de ponderação w_Q . Neste caso, o parâmetro ρ_Q^{min} é menor que no problema de otimização considerando o *desvio de tensão* e *desvio de potência ativa*, pois aumentando-se w_Q o parâmetro ρ_Q resultou em decrescer o limite máximo do desvio de potência reativa. Caso fosse utilizado este mesmo valor de

ρ^{min} para o problema anterior não se conseguiria convergência no processo iterativo de otimização, devido ao objetivo desvio de potência reativa não conseguir satisfazer a restrição de desigualdade.

O desvio de tensão foi praticamente o mesmo obtido para o mínimo desvio de tensão, tendo apenas pequenas variações no perfil do módulo de tensão, embora com uma configuração de geração de potência reativa diferente, como pode ser visto na tabela 5.5 e pela figura 5.8.

Este problema multi-objetivo obteve diferentes soluções do problema anterior, embora não tenha alcançado a solução de mínimo custo para as potências reativas geradas. Sabe-se que $Q_g^{esp} = Q_g^{min\ custo}$ é um ponto factível, mas para encontrar $Q_g^{min\ custo}$ foi utilizada a otimização de potência ativa (mínima geração de potência ativa). Isto implica em que Q_g^{esp} não é um ponto onde tenha ocorrido uma otimização de potência reativa, assim o processo iterativo de solução não conseguiu alcançar o ponto de operação de Q_g^{esp} . Percebe-se que a determinação de soluções viáveis depende dos pontos especificados. A forte dependência do mínimo custo de geração de potência ativa à variável de controle potência ativa gerada influenciou neste resultado.

• Minimização do Desvio de Tensão, Desvio de Potência Ativa e Desvio de Potência Reativa

Neste teste considerou-se os três índices de desempenho envolvidos no problema de otimização multi-objetivo. Foram minimizados o desvio de tensão, o desvio de potência ativa e o desvio de potência reativa simultaneamente. O crescimento dos fatores de ponderação w_P e w_Q foi uniforme, embora pudesse ainda haver outras combinações para encontrar outra parte do conjunto de Pareto (e.g. $w_P + w_Q = 1$). Com o aumento dos fatores de ponderação e maior importância para os índices de desempenho transformados em restrição, a solução praticamente foi a mesma da solução de mínimo custo, com o menor desvio de potência ativa e reativa em $w_P = w_Q = 10$.

O desvio de potência ativa foi semelhante ao problema de otimização considerando o desvio de tensão e desvio de potência ativa até $w_P = w_Q = 1$. A partir de $w_P = w_Q = 10$ minimizou-se os três índices simultaneamente e se alcançou exatamente o valor de potência ativa especificada previamente, resultando em um desvio de potência ativa de $0,05MW$. O parâmetro ρ_P acompanhou o desvio de potência ativa para todas as soluções obtidas, devido a este parâmetro ser a variável minimizada. Em $w_P = w_Q = 10$ o parâmetro ρ_P atingiu ρ_P^{min} .

O desvio de potência reativa acompanhou a forte influência da otimização da potência ativa gerada e obteve um desvio muito pequeno ($10,8Mvar$) das potências reativas geradas em cada barra. O parâmetro ρ_Q acompanhou o desvio de potência reativa até $w_P = w_Q = 1$, onde o parâmetro ρ_Q atingiu seu limite mínimo ($\rho_Q^{min} = 180Mvar$). A partir de $w_P = w_Q = 1$ o desvio de potência reativa decresceu até atingir seu menor desvio. Este problema mostrou a forte influência dos fatores de ponderação e a dificuldade em se encontrar os pesos ótimos.

Neste teste o desvio de tensão obteve o valor mais expressivo em relação aos dois testes considerados anteriormente. Há uma maior sensibilidade entre os índices de desempenho quando ambos fatores de ponderação são considerados ativos. Nota-se que em $w_P = w_Q = 100$ houve um pequeno decréscimo do desvio de tensão devido a um pequeno incremento no desvio de potência reativa,

mostrando que para melhorar um objetivo se deve sacrificar pelo menos um dos outros objetivos e que nem sempre o aumento do fator de ponderação trará benefício ao índice.

Esta solução corresponde a uma distribuição de potência ativa e reativa de mínimo custo, conseguindo-se melhorar o perfil de tensão com um pequeno incremento no desvio de potência reativa, embora mantendo a geração total de potência reativa a mesma da solução de mínimo custo.

Devemos tomar cuidado com o valor de ρ_{min} , pois se selecionarmos um valor muito pequeno para ρ_P^{min} e ou ρ_Q^{min} e os valores de w_P e ou w_Q forem tais que ρ_P e ou ρ_Q estiverem atingindo seus respectivos limites, pode ser que uma das funções objetivo transformadas em restrição não consiga chegar a um ponto de operação em que o somatório dos módulos dos desvios de potência ativa e/ou reativa seja menor que seu respectivo limite, ocasionando a não convergência. A não convergência não significa divergência, mas sim que o programa fica oscilando de um ponto para outro nas iterações e não consegue satisfazer todas as restrições ao mesmo tempo. Por exemplo, diminuir o tamanho do passo tem sido visto ser uma alternativa satisfatória, ou o aumento do valor de ρ_P^{min} e/ou ρ_Q^{min} .

5.2.2 Mínimo Desvio de Tensão, Mínimo Custo de Geração e Máxima Reserva de Potência Reativa

Nestes testes, o problema multi-objetivo considerando simultaneamente os índices desvio quadrático de tensão, custo de geração de potência ativa e reserva de potência reativa adotou:

- $V^{esp} = 1,0 pu$;
- P_g^{esp} é a potência ativa obtida através da solução de mínimo custo de geração;
- Q_g^{esp} é a potência reativa média obtida por $Q_{g_i} = \frac{Q_{g_i}^{max} + Q_{g_i}^{min}}{2}$.

Através desta formulação do problema multi-objetivo visou-se minimizar dois e/ou três objetivos simultaneamente realizando um intercâmbio entre os índices de desempenho. Para realização dos testes serão considerados os problemas de otimização descritos abaixo:

- (a) **Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Custo de Geração**, com os fatores de ponderação w_P ativo e w_Q zero, de forma a minimizar o desvio de tensão e desvio de potência ativa simultaneamente;
- (b) **Mínimo Desvio de Tensão e Máxima Reserva Especificada de Potência Reativa**, com os fatores de ponderação w_P zero e w_Q ativo, de forma a minimizar o desvio de tensão e desvio de potência reativa simultaneamente;
- (c) **Mínimo Desvio de Tensão, Mínimo Custo de Geração e Máxima Reserva Especificada de Potência Reativa**, com os fatores de ponderação w_P e w_Q ativos, de forma a minimizar o desvio de tensão, desvio de potência ativa e desvio de potência reativa simultaneamente;

A figura 5.9 apresenta os desvios quadráticos de tensão, correspondentes às soluções multi-objetivo através da variação dos fatores de ponderação w_P e/ou w_Q . Os desvios quadráticos obtidos das soluções mono-objetivo mínimo desvio de tensão e mínimo custo de geração de potência ativa também são apresentados para comparação.

A figura 5.10 apresenta o perfil de tensão do sistema IEEE-57 barras, onde foram selecionadas as soluções dos PMOs cujos fatores de ponderação causaram o maior desvio de tensão de cada problema de otimização ((a), (b) e (c)), e comparadas às soluções mono-objetivo.

As figuras 5.11 e 5.12 apresentam os desvios de potência ativa e reativa para cada fator de ponderação testado pelo PMO. As variações (oscilações) que o desvio de potência ativa apresenta são devido à convergência do processo iterativo. Foi necessário adotar um critério mantendo os parâmetros ρ_P^{min} e ρ_Q^{min} constantes para a variação dos fatores de ponderação. Observando-se os desvios de potência ativa e reativa e os desvios de tensão para cada fator de ponderação, nota-se que a melhoria de um objetivo somente pôde ser obtida através da degradação de um ou mais objetivos.

O desvio quadrático de tensão aumentou nos três problemas de otimização através do incremento nos fatores de ponderação, mantendo-se praticamente constante de 0,0006 a 0,1. Para fatores de ponderação maiores que 0,1 é visto que ocorre um grande intercâmbio entre o desvio de tensão e os desvios de potência ativa e reativa, obtendo-se valores significativos com os fatores de ponderação 10 e 100. Observa-se que a solução do problema (c) com fator de ponderação $w_P = w_Q = 100$ é igual à solução de mínimo custo, tendo o mesmo desvio de tensão e desvio de potência ativa.

Pela figura 5.10 nota-se que o problema multi-objetivo (c), o qual considera os três índices de desempenho, tem o mesmo perfil de tensão da solução mono-objetivo mínimo custo de potência ativa. O problema de otimização (b) obteve o maior desvio de tensão do teste em $w_Q = 100$, devido ao índice de desempenho máxima reserva de reativo ter sido mais ponderado que o desvio de tensão. O perfil de tensão desta solução atingiu os limites máximos de tensão em algumas barras. O problema (a) teve seu maior desvio de tensão em $w_P = 10$.

Utilizaram-se dois valores para o limite mínimo de ρ_Q^{min} , $260Mvar$ no problema (a) e (c), e $225Mvar$ no problema (b). Este parâmetro foi modificado para poder se obter melhores resultados para o problema de máxima reserva de reativo.

As tabelas 5.7 e 5.8 apresentam a geração de potência ativa e potência reativa das soluções mais significativas obtidas pelos testes. Comparando-se as soluções obtidas, observa-se que diferentes soluções de distribuição de potência ativa e reativa podem ser obtidas, dependendo do objetivo que o analista deseja alcançar. Com fatores de ponderação elevados pode-se favorecer mais os índices de desempenho transformados em restrição. Observe a diferente distribuição de potência ativa e reativa comparando as soluções dos problemas de otimização multi-objetivo (a) e (b) para fatores de ponderação iguais a 100. No problema (b) a geração de potência ativa aumentou $10MW$ e a geração de potência reativa decresceu $50Mvar$, enquanto o custo do sistema elevou em relação ao problema (a).

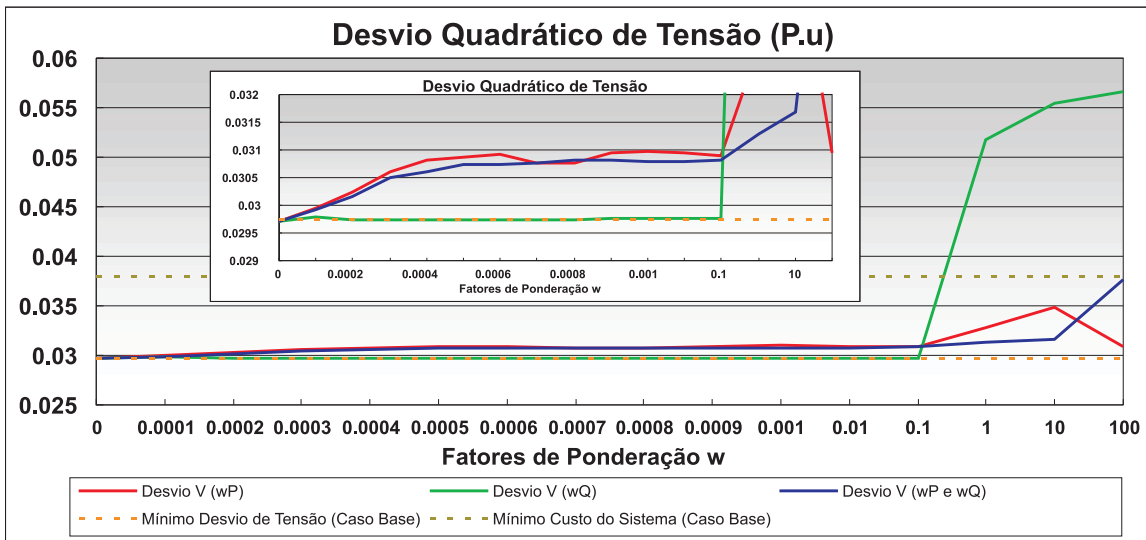


Figura 5.9: Desvio Quadrático de Tensão utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.

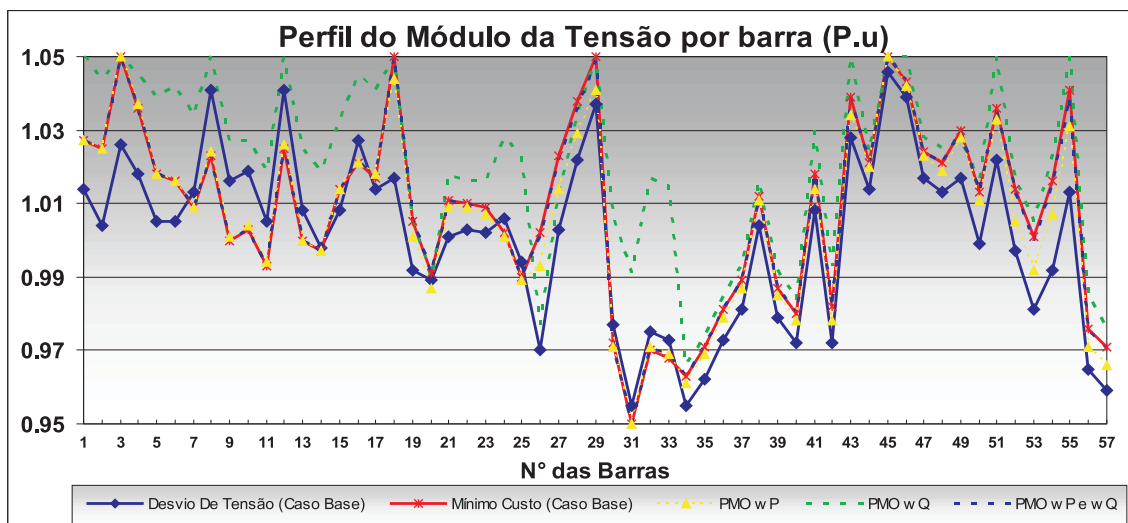


Figura 5.10: Comparação do Perfil de tensão entre soluções multi-objetivo e mono-objetivo.

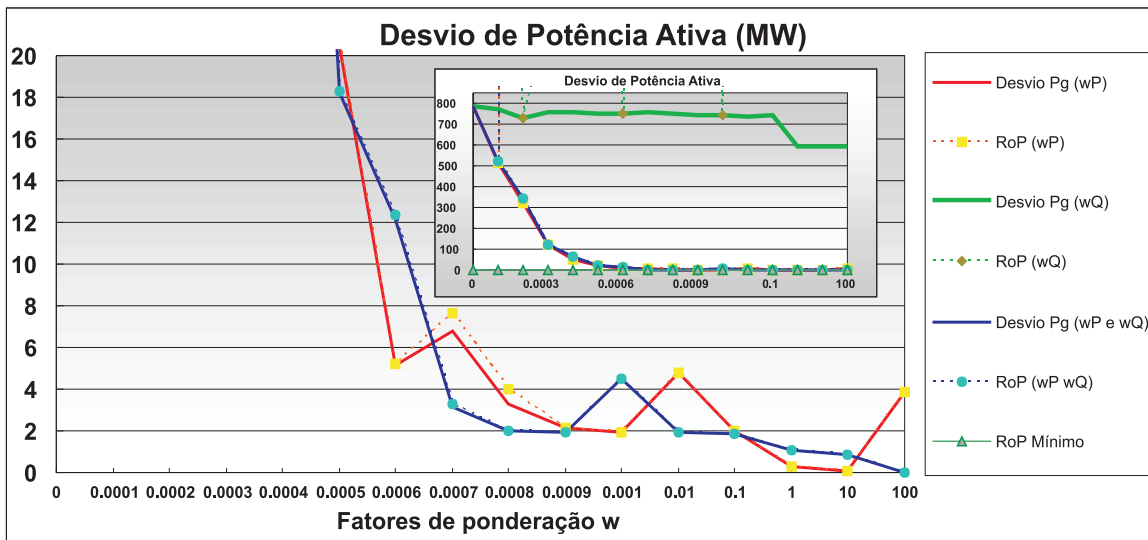


Figura 5.11: Desvio de Potência Ativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.

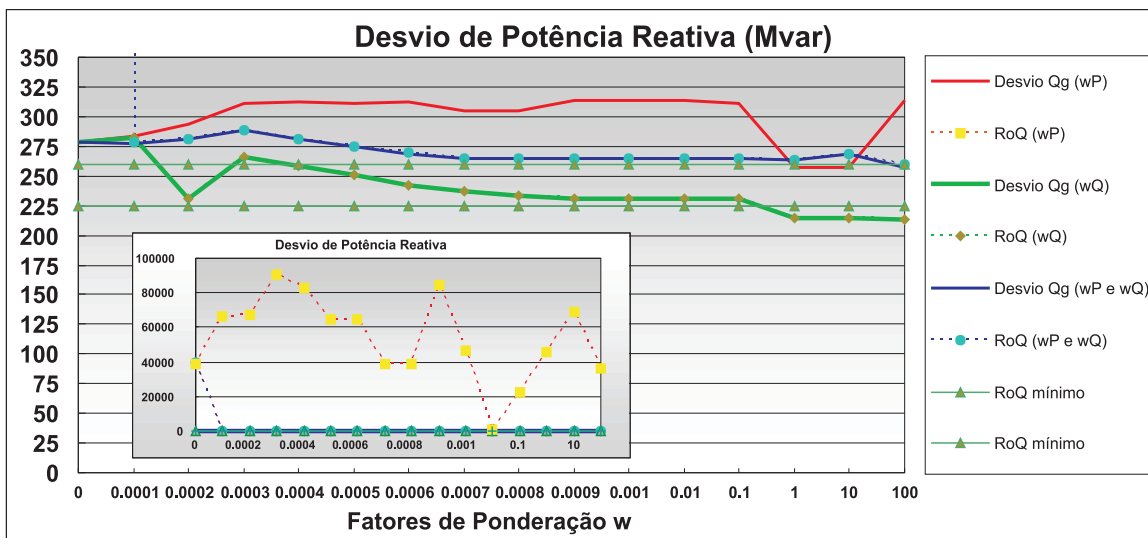


Figura 5.12: Desvio de Potência Reativa utilizando 2 e 3 índices de desempenho simultaneamente.

Nota-se que para fatores de ponderação altos o problema de otimização beneficiou mais o desvio de potência ativa do que o desvio de potência reativa, pelo fato de ter obtido a solução de mínimo custo do sistema para os fatores de ponderação $w_P = w_Q = 100$.

	$P_{g_i}^{especificado}$	Fatores de Ponderação	0	0.0002	0.0005	0.1	10	100
Pg1	0	wP	268.12	77.25	0.24	0.56	0	0
		wQ	268.11	251.93	256.25	253.48	168.66	168.55
		wP e wQ	268.12	89.75	0.14	0.23	0.09	0
Pg3	500	wP	174.35	336.31	490.41	499.99	500	498.92
		wQ	174.3	143.44	156.92	146.06	195.66	195.65
		wP e wQ	174.33	324.16	491.5	499.99	499.91	500
Pg8	276.78	wP	397.27	354.87	287.28	278.21	276.85	279.6
		wQ	397.29	385.09	391.34	387.94	399.4	399.57
		wP e wQ	397.28	353.96	286.33	278.42	277.48	276.81
Pg12	500	wP	427.73	499.89	499.9	500	500	500
		wQ	427.76	485.49	461.92	478.62	500	500
		wP e wQ	427.75	500	499.96	500	500	500
Total	1276.78	wP	1267.472	1268.325	1277.824	1278.767	1276.854	1278.531
		wQ	1267.472	1265.951	1266.438	1266.085	1263.723	1263.773
		wP e wQ	1267.472	1267.872	1277.937	1278.632	1277.47	1276.81
Custo	144.01E+3	wP	175.56E+3	154.80E+3	144.67E+3	144.34E+3	144.03E+3	144.33E+3
		wQ	175.56E+3	173.47E+3	174.15E+3	173.75E+3	165.71E+3	165.71E+3
		wP e wQ	175.56E+3	155.96E+3	144.62E+3	144.31E+3	144.13E+3	144.02E+3

Tabela 5.7: Comparação da geração de potência ativa de soluções multi-objetivo.

	$Q_{g_i}^{especificada}$	Fatores de Ponderação	0	0.0002	0.0005	0.1	10	100	$Q_g^{Mincusto}$
Qg1	0	wP	0.12	39.28	62.28	62.71	58.48	62.93	59.7
		wQ	0.07	-0.17	-0.98	1.06	29.49	29.36	
		wP e wQ	0.09	36.44	62.04	55.4	23.68	58.89	
Qg2	0	wP	14.54	1.63	4.08	4.26	50	3.56	49.9
		wQ	14.58	12.26	14.24	10.5	50	50	
		wP e wQ	14.56	1.93	8.51	16.67	50.27	50	
Qg3	0	wP	59.03	47.61	25.09	23.25	24.85	24.9	28
		wQ	59.04	60.15	60	60.07	21.37	21	
		wP e wQ	59.03	46.18	11.19	7.28	27.5	25.34	
Qg6	0	wP	-20.49	-29.91	-24.65	-22.87	13.79	-24.81	14.8
		wQ	-20.51	2.24	-8.16	2.9	19.3	20.3	
		wP e wQ	-20.5	-24.31	-6.22	-0.43	-4.13	14.34	
Qg8	30	wP	89.03	100.26	114.87	116.57	64.29	117.28	61
		wQ	89.04	68.21	77.23	67.14	50.27	49.97	
		wP e wQ	89.04	95.54	99.63	96.62	89.01	63.32	
Qg9	0	wP	8.57	8.96	8.98	8.77	9	9.07	8.9
		wQ	8.57	9.11	9	9	9	9	
		wP e wQ	8.57	8.97	9	8.93	9	9	
Qg12	0	wP	116.14	96.32	101.36	102.11	66.87	101.28	65
		wQ	116.13	108.31	111.16	110.37	64.49	64.26	
		wP e wQ	116.14	97.96	107.84	109.46	94.57	66.13	
Total	0	wP	266.925	264.152	292.01	294.798	287.272	294.212	287.3
		wQ	266.921	260.094	262.489	261.042	243.912	243.887	
		wP e wQ	266.923	262.724	292.004	293.935	289.903	287.027	

Tabela 5.8: Comparação da geração de potência reativa de soluções multi-objetivo.

5.2.3 Mínimo desvio de Tensão, Mínima Perda de Potência Ativa e Máxima Reserva de Potência Reativa

Para realização dos testes considerando simultaneamente os objetivos mínimo desvio quadrático de tensão, mínima perda de potência ativa e máxima reserva de potência reativa adotou-se:

- $V^{esp} = 1,0pu$;
- $P_{g_i}^{esp}$ é igual a zero;
- $Q_{g_i}^{esp}$ é a potência reativa média obtida por $Q_{g_i} = \frac{Q_{g_i}^{max} + Q_{g_i}^{min}}{2}$.

Especificando-se a potência ativa gerada como zero resulta em minimizar a geração de potência ativa desconsiderando o custo dos geradores, e conseqüentemente minimizar as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão e transformadores. Especificando a potência reativa gerada como o valor médio espera-se obter a maximização das margens de potência reativa.

A tabela 5.9 apresenta os resultados dos desvios de tensão, desvios de potência ativa e desvios de potência reativa considerando três problemas de otimização multi-objetivo e comparando-os com a solução obtida pela otimização mono-objetivo de mínima perda obtido pelo programa Flupot e com a solução de máxima reserva de potência reativa obtida pelo item anterior 5.2.2.b. Foram considerados os fatores de ponderação w_P e w_Q mais significativos para demonstrarem os resultados obtidos, enquanto outros valores são intermediários ou muito próximos dos resultados mostrados. Os três problemas multi-objetivo considerados são:

- (a) **Mínimo Desvio de Tensão e Mínima Perda de Potência Ativa**, com os fatores de ponderação w_P ativo e w_Q zero, de forma a minimizar o desvio de tensão e desvio de potência ativa simultaneamente;
- (b) **Mínimo Desvio de Tensão e Máxima Reserva de Potência Reativa**, com os fatores de ponderação w_P zero e w_Q ativo, de forma a minimizar o desvio de tensão e desvio de potência reativa simultaneamente;
- (c) **Mínimo Desvio de Tensão, Mínima perda de Potência Ativa e Máxima Reserva de Potência**, com os fatores de ponderação w_P e w_Q ativos, de forma a minimizar o desvio de tensão, desvio de potência ativa e desvio de potência reativa simultaneamente;

As figuras 5.13 e 5.14 apresentam as perdas de potência ativa e perdas de potência reativa para os fatores de ponderação selecionados e para os três problemas de otimização utilizados, bem como os resultados obtidos pelo programa de mínima perda do Flupot e os resultados de perdas obtidos no item anterior 5.2.2.b considerando o mínimo desvio de tensão e máxima reserva de potência reativa para $w_Q = 100$.

As tabelas 5.10 e 5.11 mostram a geração de potência ativa e reativa. Nota-se que a geração total de potência ativa da solução do Flupot e da máxima reserva de reativo são iguais, enquanto a geração total de potência reativa difere de $9Mvar$. As soluções destes dois objetivos são muito próximas, embora a distribuição de potência entre os geradores seja diferente.

O problema (a) obteve a mesma perda de potência ativa da solução do flupot para $w_P = 1$, resultando em uma solução ótima melhor do que a solução do Flupot em $w_P = 100$ devido ao intercâmbio entre o desvio de tensão e o desvio de potência ativa. O desvio de tensão aumentou 92% para variar apenas 11% das perdas de potência ativa, em relação ao range (distância entre valor mínimo e valor máximo) destes objetivos.

O problema (b) alcançou a mesma solução da máxima reserva de potência reativa do problema 5.2.2.b para $w_Q = 100$. A perda de potência ativa do problema de otimização máxima reserva de reativo é a mesma do problema de otimização mínima perda.

O problema (c) beneficiou mais a função objetivo desvio de potência ativa até $w_P = w_Q = 1$, onde também alcançou a solução do Flupot de mínima perda. A partir de $w_P = w_Q = 1$ o problema multi-objetivo favoreceu mais a função objetivo desvio de potência reativa obtendo uma solução mais

próxima da solução de máxima reserva de potência reativa, obtendo as mesmas perdas de potência reativa.

Observa-se que diferentes distribuições de potência ativa e reativa entre os geradores podem ser obtidas com praticamente a mesma geração total de potência, dependendo do objetivo que o analista deseja alcançar. O problema (c) favoreceu mais o desvio de potência reativa para valores elevados dos fatores de ponderação devido aos valores de potência ativa e reativa especificados serem provenientes de índices de desempenho relacionados ao despacho de potência reativa.

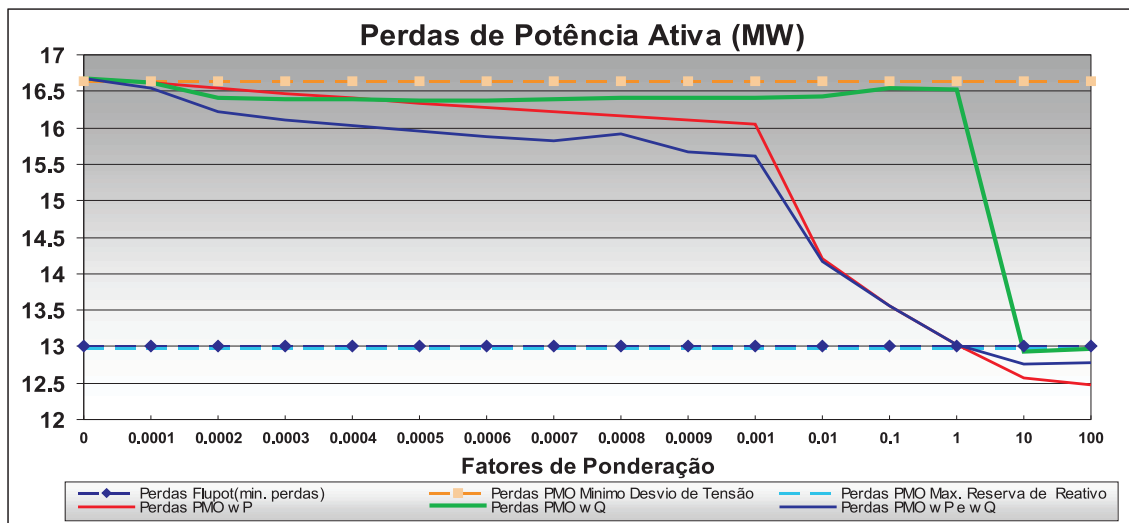


Figura 5.13: Comparação de Perdas de Potência Ativa.

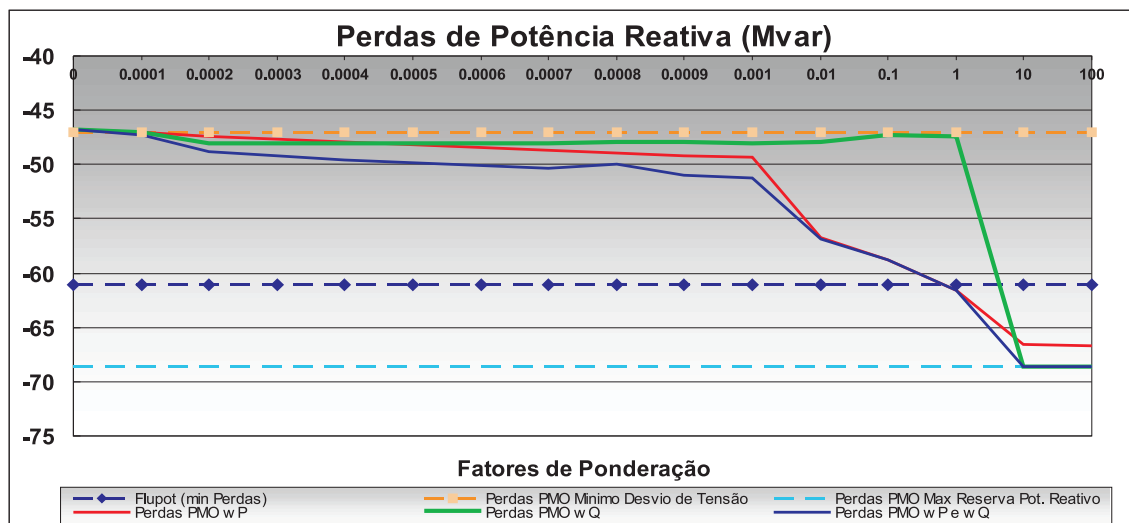


Figura 5.14: Comparação de Perdas de Potência Reativa.

	Fat. de Pond.	0	0.001	1	10	100	Flupot	Max. Res. Pot. reativo
Desvio de Tensão	wP	0.029691	0.029687	0.031853	0.048729	0.05817	0.030189	0.056628
	wQ	0.029689	0.029808	0.029673	0.055438	0.056628		
	wP e wQ	0.029689	0.029806	0.031898	0.055246	0.055319		
Desvio de Potência Ativa	wP	1267.4828	1266.852	1263.8338	1263.3646	1263.2807	1263.7	1263.773
	wQ	1267.4838	1267.2023	1267.3157	1263.7233	1263.7725		
	wP e wQ	1267.4838	1266.4047	1263.8316	1263.5671	1263.5817		
Desvio de Potência Reativa	wP	277.5392	275.8705	234.0685	216.6315	216.0881	222.03	213.8868
	wQ	277.4734	284.4093	274.6674	213.912	213.8868		
	wP e wQ	277.4734	280.1768	233.8133	214.0023	213.9743		

Tabela 5.9: Comparação dos Desvios de tensão, potência ativa e potência reativa.

	F_{gi}^{exp}	Fat. de Pond.	0	0.001	1	10	100	Flupot	Max. Res. Pot. reativo
Pg1	0	wP	268.02	252.28	172.08	173.35	173.09	175.1	168.55
		wQ	268.02	261.61	266.41	168.66	168.55		
		wP e wQ	268.02	240.99	172.06	170.08	170.03		
Pg3	0	wP	174.96	176.94	168.18	169.22	169.62	169.7	195.65
		wQ	175.05	173.63	173.67	195.66	195.65		
		wP e wQ	175.05	176.16	168.18	189.58	189.56		
Pg8	0	wP	397.04	398.33	423.83	420.81	420.57	422.4	399.57
		wQ	397.01	398.04	396.46	399.4	399.57		
		wP e wQ	397.01	397.82	423.81	403.91	403.99		
Pg12	0	wP	427.46	439.31	499.75	499.98	500	496.5	500
		wQ	427.41	433.92	430.78	500	500		
		wP e wQ	427.41	451.43	499.78	500	500		
Total	0	wP	1267.483	1266.852	1263.834	1263.365	1263.281	1263.7	1263.773
		wQ	1267.484	1267.202	1267.316	1263.723	1263.773		
		wP e wQ	1267.484	1266.405	1263.832	1263.567	1263.582		

Tabela 5.10: Geração de potência ativa - Mínimo desvio de tensão, Mínima perda e Máxima reserva de potência reativa.

	Q_{gi}^{exp}	Fat. de Pond.	0	0.001	1	10	100	Flupot	Max Res. Pot. Reativo
Qg1	0	wP	0.68	2.08	29.14	35.82	32.81	45.9	29.36
		wQ	0.76	-1.53	0.82	29.49	29.36		
		wP e wQ	0.76	-0.18	28.96	29.17	29.1		
Qg2	0	wP	14.06	14.69	46.75	49.84	50	40.3	50
		wQ	13.99	16.93	13.83	50	50		
		wP e wQ	13.99	18.11	46.97	49.99	50		
Qg3	0	wP	58.8	58.53	36.35	34.39	34.49	32.1	21
		wQ	58.77	59.98	58.91	21.37	21		
		wP e wQ	58.77	59.99	36.3	24.03	23.77		
Qg6	0	wP	-20.29	-20.75	-5.99	4.33	7.23	3.2	20.3
		wQ	-20.25	-22.79	-19.14	19.29	20.3		
		wP e wQ	-20.25	-23.68	-5.88	16.44	17.14		
Qg8	30	wP	88.96	88.75	75.16	58.51	54.33	70.5	49.97
		wQ	88.95	90.53	87.85	50.27	49.97		
		wP e wQ	88.95	90.86	75.06	50.24	49.92		
Qg9	0	wP	8.5	8.53	8.63	8.97	9	4.4	9
		wQ	8.49	8.99	8.54	9	9		
		wP e wQ	8.49	9	8.68	9	9		
Qg12	0	wP	116.24	112.55	62.04	54.77	58.23	55.9	64.26
		wQ	116.25	113.65	115.58	64.49	64.26		
		wP e wQ	116.25	108.37	61.97	65.13	65.04		
Total	30	wP	266.96	264.367	252.082	246.632	246.088	252.3	243.887
		wQ	266.966	265.754	266.386	243.912	243.887		
		wP e wQ	266.966	262.466	252.06	244.002	243.974		

Tabela 5.11: Geração de potência reativa - Mínimo desvio de tensão, Mínima perda e Máxima reserva de potência reativa.

5.3 Multiplicadores Duais relacionados aos índices de desempenho

Os multiplicadores duais π_l e π_u aparecem associados às restrições de desigualdade, as quais são representadas através dos limites mínimos e máximos de tensão, limites mínimos e máximos dos geradores, limites mínimos e máximos dos taps dos transformadores e limites máximos dos índices de desempenho transformados em restrições de desigualdade. Eles representam a sensibilidade da função objetivo em relação aos limites ativos. Se os limites de geração não são violados, os multiplicadores valem zero.

Os multiplicadores duais π_{DP} e π_{DQ} , relacionados aos índices de desempenho $\sum \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}|$ e $\sum \beta_j |Q_{g_j} - Q_{g_j}^{esp}|$ representam a sensibilidade entre o índice de desempenho principal i e o índice de desempenho j transformado em restrição de desigualdade.

A tabela 5.12 apresenta os resultados das soluções mínimo desvio de tensão, mínimo custo de geração de potência ativa e uma solução de Pareto intermediária entre as duas soluções mono-objetivo, todas resultantes do problema 5.2.1. A análise das soluções está relacionada aos multiplicadores duais π_{DP} , π_{DQ} , π_{rop} e π_{roq} .

Para solução de mínimo desvio de tensão do problema 5.2.1, os desvio de potência e os parâmetros ρ estão relaxados, sem nenhuma violação destes limites e com seus respectivos multiplicadores duais nulos. A solução de Pareto intermediária tem os multiplicadores π_{DP} e π_{roq} não nulos, representando a violação de seus limites e a sensibilidade ao aumento dos fatores de ponderação.

Na solução de mínimo custo do sistema, os multiplicadores π_{DP} , π_{rop} e π_{roq} são não nulos, mostrando que a sensibilidade das variáveis no limite aumentam com o crescimento do fatores de ponderação. Para ocorrer um decréscimo nos índices de desempenho desvio de potência deve ser feito um intercâmbio maior com o índice desvio de tensão.

	Mínimo Desvio de Tensão $w_P = w_Q = 0$	Solução de Pareto $w_P = w_Q = 0.0005$	Mínimo Custo do Sistema $w_P = w_Q = 10$
Desvio de Potência Ativa ($puMW$)	7.876533	0.019542	0.00054
Desvio de Potência Reativa ($puMvar$)	2.419476	1.8	0.108439
ρ_P ($puMW$)	2397.38604	0.01955	0.00054
ρ_Q ($puMvar$)	1682.41558	1.80001	1.8
ρ_P^{min} ($puMW$)	0.0001	0.0001	0.0001
ρ_Q^{min} ($puMvar$)	1.8	1.8	1.8
π_{DP}	0	-0.0005	-9.9755
π_{DQ}	0	0	0
π_{rop}	0	0	0.0245
π_{roq}	0	0.0005	10

Tabela 5.12: Multiplicadores de Duais - Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Custo do Sistema.

A tabela 5.13 apresenta os resultados das soluções mínimo desvio de tensão, máxima reserva de potência reativa e uma solução de Pareto intermediária entre as duas soluções mono-objetivo do problema 5.2.2.

	Mínimo Desvio de Tensão $w_P = w_Q = 0$	Solução de Pareto $w_P = 0$ e $w_Q = 0.001$	Máxima Reserva de Reativo w_P e $w_Q = 100$
Desvio de Potência Ativa ($puMW$)	7.865	7.6927	5.956
Desvio de Potência Reativa ($puMvar$)	2.7791	2.7902	2.1388
ρ_P ($puMW$)	2395.77	2534.84	2951.71
ρ_Q ($puMvar$)	1391.09	2.75001	2.13887
ρ_P^{min} ($puMW$)	0.0001	0.0001	0.0001
ρ_Q^{min} ($puMvar$)	3	2.75	2
π_{DP}	0	0	0
π_{DQ}	0	-0.0001	-99.9999
π_{roP}	0	0	0
π_{roQ}	0	0.0009	0.0001

Tabela 5.13: Multiplicadores Duais - Mínimo Desvio de Tensão e Máxima Reserva de Potência Reativa.

O resultado desta análise para a solução de mínimo desvio de tensão foi a mesma da tabela 5.12. Para a solução de Pareto intermediária entre as soluções mono-objetivo, o parâmetro ρ_Q teve seu limite violado e seu respectivo multiplicador dual não nulo. Para este valor do peso w_Q o desvio de potência reativa consegue decrescer muito pouco para um valor menor de ρ_Q^{min} , pois o limite do desvio de potência reativa foi violado, sendo seu multiplicador π_{DQ} não nulo.

O decréscimo do desvio de potência reativa apenas pode ser obtido através do aumento do peso w_Q e do decréscimo de ρ^{min} , como pode ser visto na solução de máxima reserva de potência reativa. Nesta solução nota-se o valor elevado do multiplicador π_{DP} mostrando a grande sensibilidade entre o índice máxima reserva de potência reativa e o índice desvio de tensão. As figuras 5.9 a 5.12 mostram estas soluções ilustrando o grande intercâmbio entre estes índices devido a sensibilidade entre eles.

Através destes testes notou-se que:

$$|\pi_{roP}| + |\pi_{DP}| = w_P \quad (5.1)$$

$$|\pi_{roQ}| + |\pi_{DQ}| = w_Q \quad (5.2)$$

A soma dos valores absolutos dos multiplicadores duais relacionados aos desvios de potência e aos parâmetros ρ resultam no peso w . Os fatores de ponderação w dependem da sensibilidade dos respectivos desvios de potência e da sensibilidade aos parâmetros ρ . Conclui-se que os multiplicadores duais dos índices de desempenho são extremamente dependentes dos fatores de ponderação e dos limites mínimos do parâmetro ρ_P .

5.4 Influência de ρ^{min}

Neste teste, foi utilizado o problema multi-objetivo da seção 5.2.2, mínimo desvio de tensão e mínimo custo do sistema, para mostrar a influência da variação do parâmetro ρ^{min} . Os fatores de ponderação são mantidos constantes em $w_P = 10$ e $w_Q = 0$. O parâmetro ρ_P^{min} é variado entre uma faixa de valores superiores ao desvio de potência ativa da solução de mínimo desvio de tensão ($\rho_P = 15$) e a solução de mínimo custo do sistema ($\rho_P = 0.0001$).

Ao se utilizar o fator de ponderação alto de w_P , atribui-se uma maior importância para o desvio de potência ativa e para o parâmetro ρ_P , tentando manter este último no limite ρ^{min} , mostrando a influência do limite mínimo do parâmetro ρ . A tabela 5.14 apresenta os resultados obtidos por este teste.

ρ_P^{min}	ρ_P	Desvio de Potência ativa	Desvio da Potência reativa	Desvio de Tensão	π_{DP}^H	π_{top}^H
15	15	7.914	2.899	0.02979	0	10
10	10	7.758	2.829	0.02978	0	10
7.75	7.75	7.541	2.796	0.02971	-0.000003	9.999997
5	5	4.990	2.861	0.02998	-0.000112	9.999888
1	1	0.990	3.065	0.03063	-0.000343	9.9997
0.1	0.1	0.099	3.134	0.03093	-0.000466	9.999534
0.001	0.001	0.001	2.575	0.03369	-5.762289	4.237711
0.0001	0.00052	0.00052	2.573	0.03489	-9.999990	0.000010
0.00001	0.00052	0.00052	2.573	0.03483	-9.999343	0.000657

Tabela 5.14: Influência do parâmetro ρ_P^{min} na solução de mínimo custo do sistema.

Para valores elevados de ρ_P^{min} , maiores que o desvio de potência ativa (7,865puMW) da solução mono-objetivo mínimo desvio de tensão, a solução do problema está próxima da solução de mínimo desvio de tensão.

Conforme ρ_P^{min} decresce ocorre o estreitamento do limite de desvio de potência ativa ocasionado pelo decréscimo do parâmetro ρ_P , e os desvios de potência ativa diminuem, com os multiplicadores duais π_{rop} e π_{DP} se tornando não nulos.

Para $\rho_P^{min} \geq 0.1$, nota-se que o multiplicador dual π_{ρ_P} é muito maior do que o valor do multiplicador dual π_{DP} representando que o parâmetro ρ_P tem uma maior sensibilidade à variação de seu valor. O valor baixo de sensibilidade do desvio de potência ativa representa que este ainda tem possibilidade de decrescer.

Para $\rho_P^{min} \leq 0.001$ ocorre um intercâmbio entre a sensibilidade ao parâmetro ρ_P e a sensibilidade ao desvio de potência ativa, tendo uma maior ponderação para este último. Isto mostra que o decréscimo do parâmetro ρ^{min} causa um aumento na relação de sensibilidade entre o desvio de potência e o desvio de tensão; conseqüentemente para satisfazer a equação 5.1, um decréscimo na sensibilidade ao parâmetro ρ .

Para valores elevados do multiplicador π_{DP} conclui-se que o desvio de potência ativa está próximo da solução ótima mono-objetivo e de seu limite mínimo, representando a violação dos limites do desvio de potência ativa. Em $\rho_P^{min} = 0.0001$ o desvio de potência ativa atingiu seu menor desvio dos valores de potência ativa especificados, sendo representado pelo alto valor do multiplicador π_{DP} .

Alguns problemas multi-objetivo não conseguem satisfazer as restrições de desigualdade quando ρ^{min} é menor que o limite do desvio de potência, se tornando instável ou oscilatório.

5.5 Convergência do Processo Iterativo

Nesta seção será mostrado o acompanhamento dos parâmetros ρ_P e ρ_Q durante o processo iterativo de convergência do problema multi-objetivo 5.2.1, mínimo desvio de tensão e mínimo custo do sistema com fatores de ponderação $w_P = w_Q = 10$.

Observa-se pela figura 5.15 que o desvio de potência ativa decresceu ao longo das iterações acompanhado por ρ_P , o qual atingiu $\rho_P^{min} = 0.001$ na iteração 17. O desvio de potência reativa também decresceu, satisfazendo as restrições de desigualdade dos índices de desempenho e ρ_Q atingiu seu limite mínimo $\rho_Q^{min} = 1.8$ na iteração 7.

O processo iterativo é extremamente dependente de ρ^{min} , tendo um limite relacionado a esta variável para se obter a convergência. Este limite depende dos valores de potência ativa e reativa especificados. Caso este valor seja menor e bem próximo do limite, o parâmetro ρ_P não consegue satisfazer as funções objetivo transformadas em restrições de desigualdade e fica oscilando em um ponto de operação, com o desvio de potência ativa ou reativa, dependendo do problema, maior que o parâmetro ρ ; e a norma do gradiente oscilando muito próximo da convergência (e.g. 0.01; tolerância=0.001). Conforme diminui ρ^{min} a norma do gradiente aumenta e fica oscilando em um valor mais elevado, e.g. 100, mas não diverge. A figura 5.16 mostra um processo não convergente utilizando $\rho_Q^{min} = 1.5$. A partir da iteração 120 o processo se torna oscilatório puro com o desvio de potência ativa e desvio de potência reativa maior que o parâmetro ρ , assim não satisfazendo as restrições de desigualdade $\sum \beta_i |Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp}| \leq \rho_Q$ e $\sum \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| \leq \rho_P$.

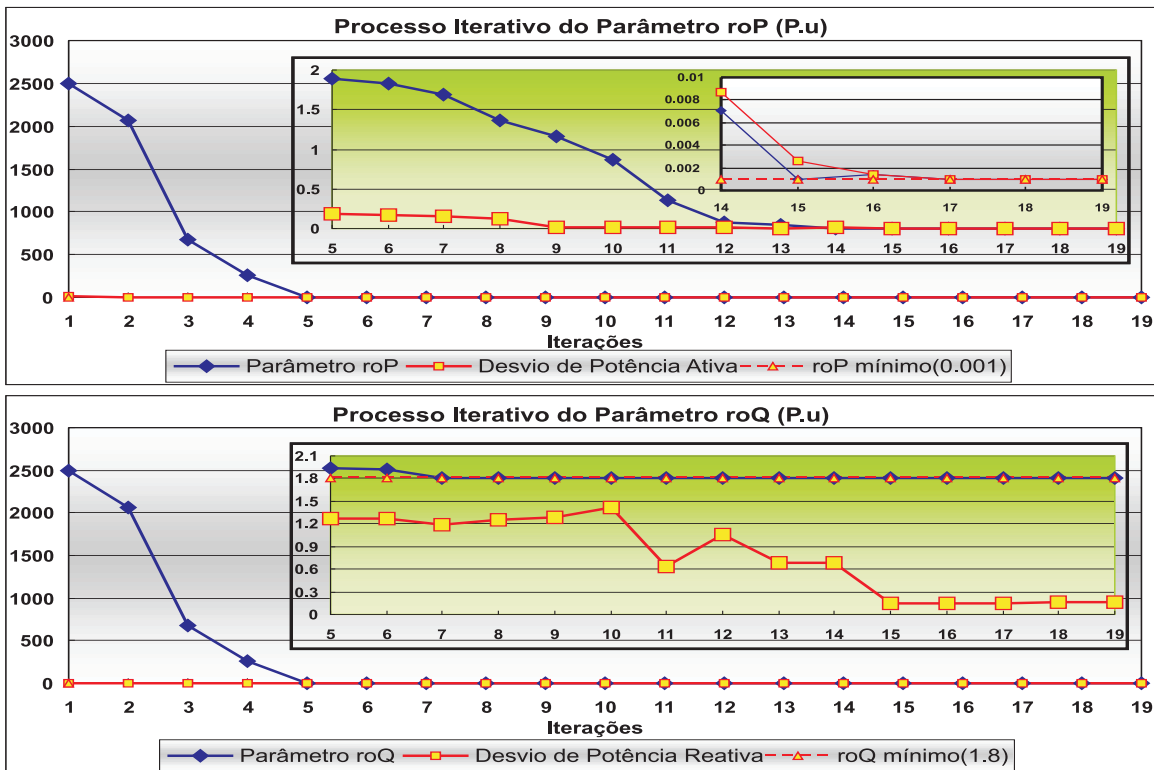


Figura 5.15: Processo Iterativo do Parâmetro ρ_P para uma solução convergente.

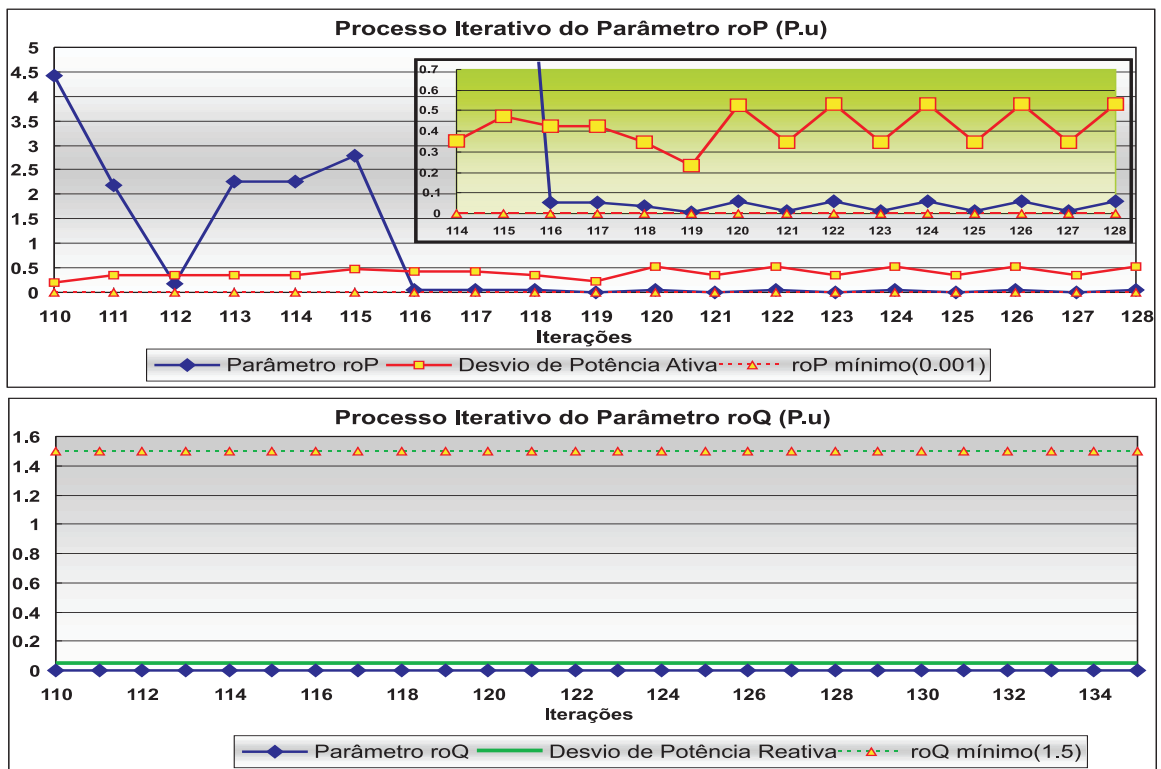


Figura 5.16: Processo Iterativo do Parâmetro ρ_P para uma solução não-convergente.

5.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos referente ao algoritmo implementado utilizando a abordagem multi-objetivo. A utilização do método da restrição, do método dos pesos e do método de parametrização em conjunto com o método de pontos interiores para solução do problema de FPO obtiveram bons resultados.

O crescimento dos pesos atribui uma maior importância para as funções objetivo transformadas em restrições de desigualdade. A utilização destas funções objetivo representadas pelos *desvios de potência ativa e reativa de um valor pré-especificado* tornaram-se muito interessantes, pois diferentes índices de desempenho podem ser otimizados através da potência ativa especificada e da potência reativa especificada.

Através da variação dos pesos foi encontrada uma parte do conjunto de Pareto, onde observou-se que a solução com os fatores de ponderação ativos depende extremamente do limite mínimo adotado para o parâmetro ρ^{min} da função objetivo transformado em restrição. Selecionando-se adequadamente este limite e as potências ativas e reativas especificadas, encontrou-se as soluções mono-objetivo mínimo desvio de tensão, mínimo custo do sistema, máxima reserva de potência reativa e mínima perda de potência ativa para o sistema IEEE-57 barras, além de soluções ótimas *não-inferiores* contidas no conjunto de Pareto e intermediárias entre as soluções mono-objetivo.

O multiplicador dual relacionado aos índices de desempenho transformados em restrições indica o intercâmbio entre o índice de desempenho escolhido como principal e o índice transformado em restrição. Este multiplicador pode ser não-nulo mesmo com o parâmetro ρ não atingindo seu limite mínimo ρ^{min} .

Capítulo 6

Conclusões e Considerações Finais

Esta dissertação apresentou as principais propriedades teóricas da otimização multi-objetivo e mostra como metodologias relevantes podem ser de interesse prático na otimização e no controle do sistema de potência. As principais técnicas Multi-objetivo (MO) para determinar o conjunto de Pareto de soluções não-inferiores são descritas e as características matemáticas de cada método são ilustradas.

A formulação proposta considera a possibilidade de utilizar a otimização MO para operação do sistema de potência em um ambiente regulado por um mercado de energia, sendo capaz de tomar decisões relativas a segurança e confiabilidade, mantendo o sistema com margens aceitáveis e garantindo um comportamento transparente e não discriminatório ao operador do sistema.

A metodologia proposta é baseada na parametrização dos limites das restrições de desigualdade e no intercâmbio entre os índices de desempenho; um procedimento MO que permite a interação entre o processo de decisão e o analista. Desta forma leva-se em conta o procedimento de análise para selecionar as soluções calculadas do conjunto de Pareto, observando os objetivos e os valores de intercâmbio.

6.1 Conclusões

A abordagem utilizada possibilitou a otimização simultânea das funções objetivo mínimo desvio quadrático de tensão, mínimo desvio de potência ativa e mínimo desvio de potência reativa. As principais conclusões desta abordagem são:

- * É possível especificar o desvio de potência desejada de uma solução e alcançá-la através da seleção dos fatores de ponderação, obtendo-se uma solução do problema multi-objetivo em uma única etapa. Através da variação dos fatores de ponderação o conjunto solução de Pareto é gerado e após pode-se escolher a solução desejada, denominada solução de compromisso.

- * A metodologia proposta com a abordagem multi-objetivo foi implementada com sucesso na otimização simultânea das funções objetivo desvio de tensão, desvio de potência ativa e desvio de potência reativa. O mínimo desvio das soluções mínimo custo do sistema, mínima perda de potência ativa, máxima reserva de potência reativa e mínimo desvio quadrático de tensão foram alcançados através da variação dos valores especificados, mostrando a flexibilidade da formulação proposta.
- * Há uma grande dificuldade em encontrar o limite mínimo da variável parametrizada, influenciando na convergência do processo iterativo, só podendo ser obtida *a priori* através de uma análise de sensibilidade do sistema.
- * Demonstrou-se que a solução de um problema multi-objetivo é uma solução de Pareto e, desta forma, será uma solução de compromisso entre as funções objetivo consideradas. Portanto, do ponto de vista prático, a solução de um FPO multi-objetivo é uma solução de compromisso entre os índices de desempenho considerados.

6.2 Recomendações para Futuros Trabalhos

Os resultados desta pesquisa podem ser aprimorados ou servir como ponto de partida para outros trabalhos futuros. Os principais aspectos são descritos a seguir.

A utilização de outro índice de desempenho como objetivo principal do método das restrições, fazendo uma análise para comparações com a metodologia utilizada.

Aprofundamento do estudo da região de factibilidade do problema multi-objetivo relacionado ao limite parametrizado ρ das restrições de desigualdade e do fator de passo μ utilizado no método de pontos interiores.

Aprofundamento da análise dos multiplicadores de Lagrange relacionados aos índices de desempenho transformados em restrições e dos multiplicadores relacionados ao parâmetro ρ .

Extensão do desenvolvimento da abordagem multi-objetivo utilizando outras funções objetivo, como o máximo carregamento ou o intercâmbio entre subsistemas de energia.

Estudo de uma estratégia de ordenação para preservar a esparsidade da matriz W , melhorando a convergência do processo iterativo.

Estudo de outros métodos de solução do problema de otimização de FPO em conjunto com as metodologias multi-objetivo e sua aplicação real perante o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

Apêndice A

Método de Pontos Interiores

Os Métodos de pontos Interiores tem sido largamente utilizados na solução de problemas de programação linear e não linear de grande porte. Este apêndice descreve a base teórica dos algoritmos não-lineares de pontos interiores versão primal-dual.

Matematicamente o problema de fluxo de potência ótimo poder ser formulado como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(\mathbf{x}) \\ & \text{sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{h}^{\min} \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}^{\max} \end{aligned} \tag{A.1}$$

onde, $f(\mathbf{x})$ é a função objetivo expressa em termos do vetor n -dimensional \mathbf{x} , relacionado as variáveis de otimização; $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ é um vetor m -dimensional, cujas componentes são as equações $g_i(\mathbf{x})$ que representam as restrições de igualdade; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ é um vetor l -dimensional, das equações $h_i(\mathbf{x})$ que representam as restrições de desigualdade; e \mathbf{h}^{\min} e \mathbf{h}^{\max} são os limites mínimo e máximo, respectivamente, das restrições de desigualdade.

A metodologia de solução do problema expresso pela equação (A.1) via Método de pontos Interiores pode ser sumarizada nos passos descritos a seguir.

- Transformação das restrições de desigualdade em restrições de igualdade através do uso de variáveis de folga; isto fornece

$$\begin{aligned} \mathbf{h}(\mathbf{x}) - s_l - \mathbf{h}^{\min} &= 0 \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) + s_u - \mathbf{h}^{\max} &= 0 \\ s_l, s_u &> 0 \end{aligned} \tag{A.2}$$

onde, s_l e s_u são vetores cujas componentes (s_{l_i} e s_{u_i}) são variáveis de folga correspondentes às restrições de desigualdade;

- adição da função barreira logaritmica à função objetivo; isto é,

$$f(\mathbf{x}) - \mu \left[\sum_i \ln s_{l_i} + \sum_i \ln s_{u_i} \right] \quad (\text{A.3})$$

- aplicação das condições de otimalidade no problema resultante, o qual é expresso como,

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & f(\mathbf{x}) - \mu \left[\sum_i \ln s_{l_i} + \sum_i \ln s_{u_i} \right] \\ \text{sujeito a } & \mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) - s_l - \mathbf{h}^{\min} = 0 \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) + s_u - \mathbf{h}^{\max} = 0 \\ & s_l, s_u > 0 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

- As condições de otimalidade de primeira ordem (Karush-Kuhn-Tucker) para este problema são:

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) - \sum_{i=1}^l \pi_i^* \nabla_{\mathbf{x}} h_i(\mathbf{x}^*) &= 0 \\ h_i(\mathbf{x}^*) &\geq 0, \quad i = 1, \dots, l \\ \pi_i^* h_i(\mathbf{x}^*) &= 0, \quad i = 1, \dots, l \\ \pi_i^* &\geq 0, \quad i = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

onde π_i é o multiplicador *dual* correspondente à i -ésima restrição de desigualdade, e o sobre-escrito * denota a solução ótima. Estas condições indicam que a solução ótima:

- o vetor gradiente da função objetivo é expresso como uma combinação linear dos vetores gradiente das restrições;
- as restrições de desigualdade são todas satisfeitas;
- se uma restrição de desigualdade está no limite (isto é, $h_i(\mathbf{x}) = 0$) então a correspondente variável dual π_i é não nula, e vice-versa (denominada *condição de complementaridade*);
- não é possível excluir nenhuma desigualdade do conjunto de restrições ativas para uma eventual redução no valor da função objetivo.

A função Lagrangeana do problema A.4 é

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{x}, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u) &= f(\mathbf{x}) - \mu \left[\sum_i \ln s_{l_i} + \sum_i \ln s_{u_i} \right] - \lambda^t \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ &\quad - \pi_{h_l}^t [\mathbf{h}(\mathbf{x}) - s_l - \mathbf{h}^{\min}] - \pi_{h_u}^t [\mathbf{h}(\mathbf{x}) + s_u - \mathbf{h}^{\max}] \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

A aplicação das condições de Karush-Kuhn-Tucker à equação A.6 fornece

$$\begin{aligned}
\nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{L}(\mathbf{x}, s_l, s_u, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) &= 0 = \nabla_{\mathbf{x}}f(\mathbf{x}) - \nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x})^t\lambda - \nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{h}(\mathbf{x})^t(\boldsymbol{\pi}_l + \boldsymbol{\pi}_u) \\
\nabla_{s_l}\mathcal{L}(x, s_l, s_u, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) &= 0 = \boldsymbol{\mu}\mathbf{e} - \mathbf{S}_l\boldsymbol{\pi}_l \\
\nabla_{s_u}\mathcal{L}(x, s_l, s_u, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) &= 0 = \boldsymbol{\mu}\mathbf{e} + \mathbf{S}_u\boldsymbol{\pi}_u \\
\nabla_{\lambda}\mathcal{L}(x, s_l, s_u, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) &= 0 = -\mathbf{g}(\mathbf{x}) \\
\nabla_{\boldsymbol{\pi}_l}\mathcal{L}(x, s_l, s_u, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) &= 0 = -[\mathbf{h}(\mathbf{x}) - s_l - \mathbf{h}^{min}] \\
\nabla_{\boldsymbol{\pi}_u}\mathcal{L}(x, s_l, s_u, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) &= 0 = -[\mathbf{h}(\mathbf{x}) + s_u - \mathbf{h}^{Max}]
\end{aligned} \tag{A.7}$$

onde, $\nabla_{\mathbf{x}}f(\mathbf{x})$ e $\nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{h}(\mathbf{x})$ são os vetores gradientes de $f(\mathbf{x})$ e $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, respectivamente; $\nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x})$ é a matriz jacobiana de $\mathbf{g}(\mathbf{x})$; \mathbf{e} é um vetor unitário; e \mathbf{S}_l e \mathbf{S}_u são matrizes diagonais formadas pelos elementos dos vetores s_l e s_u , respectivamente.

As condições expressas pela equação (A.7) são acrescidas das restrições de não negatividade, correspondentes às variáveis de folga, e de sinal, relativas aos multiplicadores duais; isto é,

$$s_l \geq 0, \quad s_u \geq 0, \quad \boldsymbol{\pi}_l \geq 0, \quad \boldsymbol{\pi}_u \leq 0 \tag{A.8}$$

O ponto estacionário do problema representado pela equação (A.4) é obtido resolvendo-se a equação (A.7). Utilizando o método de Newton-Raphson, o seguinte sistema de equações não-lineares deve ser resolvido a cada iteração:

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}(\mathbf{x}, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u)\Delta\mathbf{x} - \mathbf{J}(\mathbf{x})^t\Delta\lambda - \nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{h}(\mathbf{x})^t(\Delta\boldsymbol{\pi}_l + \Delta\boldsymbol{\pi}_u) &= -t \\
-\Pi_l\Delta\mathbf{S}_l - \mathbf{S}_l\Delta\boldsymbol{\pi}_l &= -(\boldsymbol{\mu}\mathbf{e} - \mathbf{S}_l\boldsymbol{\pi}_l) \\
\Pi_u\Delta\mathbf{S}_u + \mathbf{S}_u\Delta\boldsymbol{\pi}_u &= -(\boldsymbol{\mu}\mathbf{e} + \mathbf{S}_u\boldsymbol{\pi}_u) \\
-\mathbf{J}(\mathbf{x})^t\Delta\mathbf{x} + \Delta\mathbf{S}_l &= \mathbf{h}(\mathbf{x}) - s_l - \mathbf{h}^{min} \\
-\mathbf{J}(\mathbf{x})^t\Delta\mathbf{x} - \Delta\mathbf{S}_u &= \mathbf{h}(\mathbf{x}) + s_u - \mathbf{h}^{Max}
\end{aligned} \tag{A.9}$$

onde,

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) = \nabla_{\mathbf{x}}^2f(\mathbf{x}) - \sum_i \lambda_i \nabla_{\mathbf{x}}^2\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) - \sum_j (\boldsymbol{\pi}_l + \boldsymbol{\pi}_u) \nabla_{\mathbf{x}}^2\mathbf{h}_j(\mathbf{x})$$

é a matriz de segundas derivadas da função Lagrangeana em relação às variáveis de otimização; $\nabla_{\mathbf{x}}^2f(\mathbf{x})$, $\nabla_{\mathbf{x}}^2\mathbf{g}_i(\mathbf{x})$ e $\nabla_{\mathbf{x}}^2\mathbf{h}_j(\mathbf{x})$ são as matrizes de segundas derivadas de $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{g}_i(\mathbf{x})$ e $\mathbf{h}_j(\mathbf{x})$, respectivamente;

$$t = \nabla_{\mathbf{x}}\mathcal{L}(\mathbf{x}, s_l, s_u, \lambda, \boldsymbol{\pi}_l, \boldsymbol{\pi}_u) = \nabla_{\mathbf{x}}^2f(\mathbf{x}) - \mathbf{J}(\mathbf{x})^t\lambda - \nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{h}(\mathbf{x})^t(\boldsymbol{\pi}_l + \boldsymbol{\pi}_u)$$

e Π_l e Π_u são matrizes diagonais formadas pelos elementos dos vetores $\boldsymbol{\pi}_l$ e $\boldsymbol{\pi}_u$, respectivamente.

A equação (A.9) pode ser re-escrita na forma matricial, resultando em

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u) \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta s_l \\ \Delta s_u \\ \Delta \lambda \\ \Delta \pi_l \\ \Delta \pi_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t \\ -(\mu \mathbf{e} - \mathbf{S}_l \pi_l) \\ -(\mu \mathbf{e} + \mathbf{S}_u \pi_u) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) - s_l - \mathbf{h}^{\min} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) + s_u - \mathbf{h}^{\max} \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

com a matriz $\mathbf{W}(\mathbf{x}, s_l, s_u, \lambda, \pi_l, \pi_u)$ dada por

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{x}, \lambda, \pi_l, \pi_u) & 0 & 0 & -\mathbf{J}(\mathbf{x})^t & -\nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x})^t & -\nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x})^t \\ 0 & -\Pi_l & 0 & 0 & -\mathbf{S}_l & 0 \\ 0 & 0 & \Pi_u & 0 & 0 & \mathbf{S}_u \\ -\mathbf{J}(\mathbf{x})^t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) & \mathbf{U} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) & 0 & -\mathbf{U} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

onde \mathbf{U} é a matriz identidade. Note que esta matriz, originalmente não-simétrica, pode-se tornar simétrica multiplicando a segunda linha por $-\mathbf{S}_l^{-1}$ e a terceira linha por $-\mathbf{S}_u^{-1}$.

A solução da equação (A.9) fornece os incrementos nas variáveis primais e duais do problema de otimização. A não violação das restrições de não negatividade das variáveis de folga e de sinais dos multiplicadores duais é assegurada, calculando-se o comprimento do passo nos espaços primal e dual como,

$$\gamma_p = \min \left[\min_{\Delta s_{l_i} < 0} \frac{s_{l_i}}{|\Delta s_{l_i}|} \quad \min_{\Delta s_{u_i} < 0} \frac{s_{u_i}}{|\Delta s_{u_i}|} \quad 1 \right] \quad (\text{A.12})$$

$$\gamma_d = \min \left[\min_{\Delta \pi_{l_i} < 0} \frac{\pi_{l_i}}{|\Delta \pi_{l_i}|} \quad \min_{\Delta \pi_{u_i} < 0} \frac{-\pi_{u_i}}{|\Delta \pi_{u_i}|} \quad 1 \right] \quad (\text{A.13})$$

A atualização das variáveis primais e duais é dada por:

$$\begin{array}{ll} \text{Variáveis Primais} & \text{Variáveis Duais} \\ x^{k+1} = x^k + \sigma \gamma_p \Delta x^k & \lambda^{k+1} = \lambda^k + \sigma \gamma_d \Delta \lambda^k \\ s_l^{k+1} = s_l^k + \sigma \gamma_p \Delta s_l^k & \pi_l^{k+1} = \pi_l^k + \sigma \gamma_d \Delta \pi_l^k \\ s_u^{k+1} = s_u^k + \sigma \gamma_p \Delta s_u^k & \pi_u^{k+1} = \pi_u^k + \sigma \gamma_d \Delta \pi_u^k \end{array} \quad (\text{A.14})$$

onde σ é uma constante cuja finalidade é garantir que as variáveis s e π não se anulem. A literatura Granville (1994) recomenda $\sigma = 0,9995$, o qual na prática mostra-se satisfatório.

Portanto, a finalidade dos fatores de passo $\sigma \gamma_p$ e $\sigma \gamma_d$ é garantir a não negatividade das variáveis de folga e assegurar uma redução suficiente na função de mérito representada pela função Lagrangeana.

O valor do parâmetro barreira é computado ao final de cada iteração utilizando-se

$$\mu = \frac{s^l \pi^l - s^u \pi^u}{2l\beta} \quad (\text{A.15})$$

onde l é o número de restrições de desigualdade.

O algoritmo para a resolução de um problema de otimização via método de Pontos Interiores versão Primal-Dual é sumarizado nos passos descritos a seguir:

1. Inicialização das variáveis primais e duais;
2. Cálculo do vetor gradiente da função Lagrangeana aumentada, equação A.7;
3. teste de convergência: comparação da norma euclidiana do vetor gradiente e do valor do parâmetro barreira μ com as respectivas tolerâncias. Se os critérios de convergência forem satisfeitos, o processo iterativo é encerrado (a solução ótima foi encontrada); caso contrário, prosseguir ao próximo passo;
4. Cálculo e fatoração da matriz \mathbf{W} , da equação (A.11);
5. solução do sistema linear, equação (A.10);
6. determinação dos comprimentos de passos nos espaços primal e dual, equação (A.12 e A.13);
7. Atualização das variáveis de otimização, equação (A.14);
8. Cálculo do novo valor do parâmetro barreira μ , equação (A.15). retorno ao passo 2.

Apêndice B

Solução do Problema de Otimização Multi-objetivo

O Problema de otimização não-linear e multi-objetivo (4.8) foi resolvido utilizando o método de pontos interiores versão primal-dual apresentado no apêndice A. Nesta abordagem, as restrições de desigualdade são transformadas em restrições de igualdade pela introdução de variáveis de folga. Desta forma, transforma-se o problema original em um problema equivalente, o qual contém apenas restrições de igualdade.

A condição de não-negatividade das variáveis de folga é tratada pela incorporação destas variáveis à função objetivo do problema e às desigualdades do tipo maior ou igual, onde as restrições foram previamente transformadas em desigualdades do tipo menor ou igual. Para que os vetores das variáveis de folga permaneçam no plano positivo, isto é $s \in \mathfrak{R}_+$, faz-se uso de uma função barreira logarítmica adicionada à função objetivo. Assim obtêm-se a uma função objetivo modificada que assume a seguinte forma:

$$f_o = \sum_{i=1}^{nb} \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2 + w_P \rho_P + w_Q \rho_Q - \mu \sum (\ln s_{h_u} - \ln s_{h_l}) - \mu \sum (\ln s_{\rho_u} - \ln s_{\rho_l}) - \mu \sum (\ln s_{f_u})$$

onde $s > 0$ e μ é o parâmetro de penalização da função barreira logarítmica, o qual é um número positivo que tende iterativamente a zero quando a solução se aproxima do ótimo.

As restrições de igualdade ($g(x) = 0$) e as restrições de desigualdade transformadas em igualdade ($h_*(x) = 0$) pela adição das variáveis de folga são mostradas abaixo.

$$g(x) = \begin{bmatrix} P_i(a, V, \delta) - P_{gi} + P_{di} \\ Q_i(a, V, \delta) - Q_{gi} + Q_{di} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
h_l &= \begin{bmatrix} a - s_{a_l} - a^{\min} \\ V - s_{V_l} - V^{\min} \\ P_g - s_{P_{g_l}} - P_g^{\min} \\ Q_g - s_{Q_{g_l}} - Q_g^{\min} \end{bmatrix} & h_u &= \begin{bmatrix} a + s_{a_u} - a^{\max} \\ V + s_{V_u} - V^{\max} \\ P_g + s_{P_{g_u}} - P_g^{\max} \\ Q_g + s_{Q_{g_u}} - Q_g^{\max} \end{bmatrix} \\
h_\rho^l &= \begin{bmatrix} \rho_P - s_{\rho_{P_l}} - \rho_P^{\min} \\ \rho_Q - s_{\rho_{Q_l}} - \rho_Q^{\min} \end{bmatrix} & h_\rho^u &= \begin{bmatrix} \rho_P + s_{\rho_{P_u}} - \rho_P^{\max} \\ \rho_Q + s_{\rho_{Q_u}} - \rho_Q^{\max} \end{bmatrix} \\
h_{f_u} &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n_{ger}} \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| + s_{f_{P_u}} - \rho_P \epsilon_P \\ \sum_{i=1}^{n_{ger}} \beta_i |Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp}| + s_{f_{Q_u}} - \rho_Q \epsilon_Q \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

A função lagrangeana associada ao problema dual é construída incorporando-se as restrições de igualdade à função objetivo através de Multiplicadores de Lagrange e variáveis duais, $\lambda \in \mathfrak{R}^m$ e $\pi \in \mathfrak{R}^l \times \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^n$, respectivamente, resultando na seguinte função escalar:

$$\begin{aligned}
L &= f_o - \lambda^t g(x) - \pi_{h_u}^t h_u(x) - \pi_{h_l}^t h_l(x) - \pi_{\rho_u}^t h_{\rho_u}(x) - \pi_{\rho_l}^t h_{\rho_l}(\rho) - \pi_{f_u}^t h_{f_u}(x) - \\
&\quad \mu (\sum (\ln s_{h_u} - \ln s_{h_l}) + \sum (\ln s_{\rho_u} - \ln s_{\rho_l}) + \sum (\ln s_{f_u}))
\end{aligned}$$

esta função desempenha um importante papel para a solução do problema, pois a partir dela é possível estabelecer um caminho para a obtenção de uma solução, a qual é determinada pela aplicação das condições de otimalidade de primeira ordem para o problema dadas por:

$$\nabla L(x, s, \lambda, \rho, \pi) = 0$$

As condições de otimalidade de primeira ordem também podem ser escritas como:

$$\begin{aligned}
\nabla_x L &= \nabla_x f_o - \nabla_x g^t(x) \lambda - \nabla_x h_u^t(x) \pi_{h_u} - \nabla_x h_l^t(x) \pi_{h_l} - \nabla_x h_{f_u}^t(x, \rho) \pi_{f_u} - \nabla_x h_{\rho_u}^t(x) \pi_{\rho_u} - \nabla_x h_{\rho_l}^t(x) \pi_{\rho_l} &= t & \text{(B.1)} \\
\nabla_{s_{h_u}} L &= \mu e - \bar{S}_{h_u} \bar{\Pi}_{h_u} &= v_{h_u} & \text{(B.2)} \\
\nabla_{s_{h_l}} L &= \mu e - \bar{S}_{h_l} \bar{\Pi}_{h_l} &= v_{h_l} & \text{(B.3)} \\
\nabla_{s_{f_u}} L &= \mu e - \bar{S}_{f_u} \bar{\Pi}_{f_u} &= v_{f_u} & \text{(B.4)} \\
\nabla_{s_{\rho_u}} L &= \mu e - \bar{S}_{\rho_u} \bar{\Pi}_{\rho_u} &= v_{\rho_u} & \text{(B.5)} \\
\nabla_{s_{\rho_l}} L &= \mu e - \bar{S}_{\rho_l} \bar{\Pi}_{\rho_l} &= v_{\rho_l} & \text{(B.6)} \\
\nabla_\lambda L &= -g(x) & & \text{(B.7)} \\
\nabla_\rho L &= \nabla_\rho f_o - \nabla_\rho h_{f_u}^t(x) \pi_{f_u} - \nabla_\rho h_{\rho_u}^t(x) \pi_{\rho_u} - \nabla_\rho h_{\rho_l}^t(x) \pi_{\rho_l} &= R_\rho & \text{(B.8)} \\
\nabla_{\pi_{h_u}} L &= -h_u &= y_{h_u} & \text{(B.9)} \\
\nabla_{\pi_{h_l}} L &= -h_l &= y_{h_l} & \text{(B.10)} \\
\nabla_{\pi_{f_u}} L &= -h_{f_u} &= y_{f_u} & \text{(B.11)} \\
\nabla_{\pi_{\rho_u}} L &= -h_{\rho_u} &= y_{\rho_u} & \text{(B.12)} \\
\nabla_{\pi_{\rho_l}} L &= -h_{\rho_l} &= y_{\rho_l} & \text{(B.13)}
\end{aligned}$$

onde e é um vetor unitário de ordem adequada a dimensão da variável, e as matrizes S e Π são

matrizes diagonais como mostradas a seguir.

$$\begin{aligned} \bar{S}_{h_u} &= \begin{bmatrix} s_{a_u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{V_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{P_{g_u}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{Q_{g_u}} \end{bmatrix} & \bar{\Pi}_{h_u} &= \begin{bmatrix} \pi_{a_u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi_{V_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{P_{g_u}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{Q_{g_u}} \end{bmatrix} \\ \bar{S}_{h_l} &= \begin{bmatrix} s_{a_l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{V_l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{P_{g_l}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{Q_{g_l}} \end{bmatrix} & \bar{\Pi}_{h_l} &= \begin{bmatrix} \pi_{a_l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi_{V_l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{P_{g_l}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{Q_{g_l}} \end{bmatrix} \\ \bar{S}_{f_u} &= \begin{bmatrix} s_{f_{P_u}} & 0 \\ 0 & s_{f_{Q_u}} \end{bmatrix} & \bar{\Pi}_{f_u} &= \begin{bmatrix} \pi_{f_{P_u}} & 0 \\ 0 & \pi_{f_{Q_u}} \end{bmatrix} \\ \bar{S}_{\rho_u} &= \begin{bmatrix} s_{\rho_{P_u}} & 0 \\ 0 & s_{\rho_{Q_u}} \end{bmatrix} & \bar{\Pi}_{\rho_u} &= \begin{bmatrix} \pi_{\rho_{P_u}} & 0 \\ 0 & \pi_{\rho_{Q_u}} \end{bmatrix} \\ \bar{S}_{\rho_l} &= \begin{bmatrix} s_{\rho_{Q_l}} & 0 \\ 0 & s_{\rho_{Q_l}} \end{bmatrix} & \bar{\Pi}_{\rho_l} &= \begin{bmatrix} \pi_{\rho_{Q_l}} & 0 \\ 0 & \pi_{\rho_{Q_l}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

As equações não-lineares (B.1 a B.13), resultantes da aplicação das condições de otimalidade de primeira ordem, são resolvidas pelo método de Newton. No método de Newton, a cada iteração são determinados os incrementos das variáveis x , s , λ , ρ e π , na direção de busca, isto é Δx , Δs , $\Delta \lambda$, $\Delta \rho$ e $\Delta \pi$ são encontrados em cada iteração resolvendo-se o sistema de equações:

$$\nabla^2 L(x, s, \lambda, \rho, \pi) \Delta y = -\nabla L(x, s, \lambda, \rho, \pi)$$

o qual, para o problema formulado pode ser expressa como

$$w = \begin{bmatrix} H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -J & 0 & -\nabla_x h'_u & -\nabla_x h'_l & -\nabla_x h'_{f_u} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\Pi}_{h_u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{h_u} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\bar{\Pi}_{h_l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{S}_{h_l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{\Pi}_{f_u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{f_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\Pi}_{\rho_u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{\rho_u} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{\Pi}_{\rho_l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{S}_{\rho_l} \\ -J & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\epsilon} & -U_{\rho_u} & -U_{\rho_l} \\ -\nabla_x h_u & -U_{h_u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h_l & 0 & U_{h_l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h_{f_u} & 0 & 0 & -U_{f_u} & 0 & 0 & 0 & \bar{\epsilon} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -U_{\rho_u} & 0 & 0 & -U_{\rho_u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_{\rho_l} & 0 & -U_{\rho_l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta s_{h_u} \\ \Delta s_{h_l} \\ \Delta s_{f_u} \\ \Delta s_{\rho_u} \\ \Delta s_{\rho_l} \\ \Delta \lambda \\ \Delta \rho \\ \Delta \pi_{h_u} \\ \Delta \pi_{h_l} \\ \Delta \pi_{f_u} \\ \Delta \pi_{\rho_u} \\ \Delta \pi_{\rho_l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t \\ -v_{h_u} \\ -v_{h_l} \\ -v_{f_u} \\ -v_{\rho_u} \\ -v_{\rho_l} \\ g \\ -R_p \\ -y_{h_u} \\ -y_{h_l} \\ -y_{f_u} \\ -y_{\rho_u} \\ -y_{\rho_l} \end{bmatrix} \quad (B.14)$$

A matriz H representa segunda derivada do Lagrangeano ou também conhecida como Hessiana do Lagrangeano; e a matriz J representa o Jacobiano do Lagrangeano, o qual representa a primeira derivada das restrições de igualdade. A matriz U é uma matriz identidade e possui dimensões compatíveis com as respectivas variáveis.

$$H = \nabla_{xx}^2 L = \nabla_{xx}^2 f_o - \sum_{i=1}^m \nabla_{xx}^2 g_i(x) \lambda_i - \sum_{j=1}^{n_h} \nabla_{xx}^2 h_j(x) \pi_j - \sum_{k=1}^{n_{h_f}} \nabla_{xx}^2 h_{f_k}(x, \rho) \pi_{f_k} \quad (B.15)$$

onde as matrizes $\nabla_{xx}^2 f_o$, $\nabla_{xx}^2 g(x)$, $\nabla_{xx}^2 h(x)$ e $\nabla_{xx}^2 h_f(x, \rho)$ representam as segundas derivadas em relação

ao vetor x de f, g, h e h_f respectivamente. Este sistema poder ser reduzido através de manipulações algébricas descritas a seguir. Da solução do sistema linear (B.14) obtêm-se as equações:

$$H\Delta x - J^t \Delta \lambda - \nabla_x h_u^t \Delta \pi_{h_u} - \nabla_x h_l^t \Delta \pi_{h_l} - \nabla_x h_{f_u}^t \Delta \pi_{f_u} = -t \quad (\text{B.16})$$

$$\bar{\Pi}_{h_u} \Delta s_{h_u} - \bar{S}_{h_u} \Delta \pi_{h_u} = -v_{h_u} \quad (\text{B.17})$$

$$\bar{\Pi}_{h_l} \Delta s_{h_l} - \bar{S}_{h_l} \Delta \pi_{h_l} = -v_{h_l} \quad (\text{B.18})$$

$$\bar{\Pi}_{f_u} \Delta s_{h_u} - \bar{S}_{f_u} \Delta \pi_{f_u} = -v_{f_u} \quad (\text{B.19})$$

$$\bar{\Pi}_{\rho_u} \Delta s_{\rho_u} - \bar{S}_{\rho_u} \Delta \pi_{\rho_u} = -v_{\rho_u} \quad (\text{B.20})$$

$$\bar{\Pi}_{\rho_l} \Delta s_{\rho_l} - \bar{S}_{\rho_l} \Delta \pi_{\rho_l} = -v_{\rho_l} \quad (\text{B.21})$$

$$-J \Delta \lambda = g \quad (\text{B.22})$$

$$\bar{\epsilon} \Delta \pi_{f_u} - U_{\rho_u} \Delta \pi_{\rho_u} - U_{\rho_l} \Delta \pi_{\rho_l} = -R_{\rho} \quad (\text{B.23})$$

$$-\nabla_x h_u \Delta x - U_{h_u} \Delta s_{h_u} = -y_{h_u} \quad (\text{B.24})$$

$$-\nabla_x h_l \Delta x + U_{h_l} \Delta s_{h_l} = -y_{h_l} \quad (\text{B.25})$$

$$-\nabla_x h_{f_u} \Delta x - U_{f_u} \Delta s_{f_u} + \bar{\epsilon} \Delta \rho = -y_{f_u} \quad (\text{B.26})$$

$$-U_{\rho_u} \Delta s_{\rho_u} - U_{\rho_u} \Delta \rho = -y_{\rho_u} \quad (\text{B.27})$$

$$-U_{\rho_l} \Delta s_{\rho_l} + U_{\rho_l} \Delta \rho = -y_{\rho_l} \quad (\text{B.28})$$

Isolando Δs das equações (B.24 a B.28) obtém-se:

$$\Delta s_{h_u} = y_{h_u} - \nabla_x h_u \Delta x \quad (\text{B.29})$$

$$\Delta s_{h_l} = -y_{h_l} + \nabla_x h_l \Delta x \quad (\text{B.30})$$

$$\Delta s_{f_u} = y_{f_u} - \nabla_x h_{f_u} \Delta x + \bar{\epsilon} \Delta \rho \quad (\text{B.31})$$

$$\Delta s_{\rho_u} = y_{\rho_u} - \Delta \rho \quad (\text{B.32})$$

$$\Delta s_{\rho_l} = -y_{\rho_l} + \Delta \rho \quad (\text{B.33})$$

Substituindo as equações (B.29 - B.33) nas equações (B.17 - B.21).

$$\Delta \pi_{h_u} = -\bar{S}_{h_u}^{-1} (v_{h_u} + \bar{\Pi}_{h_u} y_{h_u}) + \bar{S}_{h_u}^{-1} \bar{\Pi}_{h_u} \nabla_x h_u \Delta x \quad (\text{B.34})$$

$$\Delta \pi_{h_l} = \bar{S}_{h_l}^{-1} (v_{h_l} + \bar{\Pi}_{h_l} y_{h_l}) - \bar{S}_{h_l}^{-1} \bar{\Pi}_{h_l} \nabla_x h_l \Delta x \quad (\text{B.35})$$

$$\Delta \pi_{f_u} = -\bar{S}_{f_u}^{-1} (v_{f_u} + \bar{\Pi}_{f_u} y_{f_u}) + \bar{S}_{f_u}^{-1} \bar{\Pi}_{f_u} \nabla_x h_{f_u} \Delta x - \bar{S}_{f_u}^{-1} \bar{\Pi}_{f_u} + \bar{\epsilon} \Delta \rho \quad (\text{B.36})$$

$$\Delta \pi_{\rho_u} = -\bar{S}_{\rho_u}^{-1} (v_{\rho_u} + \bar{\Pi}_{\rho_u} y_{\rho_u}) + \bar{S}_{\rho_u}^{-1} \bar{\Pi}_{\rho_u} \Delta \rho \quad (\text{B.37})$$

$$\Delta \pi_{\rho_l} = -\bar{S}_{\rho_l}^{-1} (v_{\rho_l} + \bar{\Pi}_{\rho_l} y_{\rho_l}) - \bar{S}_{\rho_l}^{-1} \bar{\Pi}_{\rho_l} \Delta \rho \quad (\text{B.38})$$

Considerando que $\nabla_x h_u = \nabla_x h_l = \nabla_x h$ e substituindo as equações (B.22, B.34 a B.36) na equação (B.16); e substituindo as equações (B.37 e B.38) na equação (B.23) obtemos:

$$\widehat{H} = [H + \nabla_x h^t (-\bar{S}_{h_u}^{-1} \bar{\Pi}_{h_u} + \bar{S}_{h_l}^{-1} \bar{\Pi}_{h_l}) \nabla_x h + \nabla_x h_{f_u}^t (-\bar{S}_{f_u}^{-1} \bar{\Pi}_{f_u}) \nabla_x h_{f_u}] \Delta x \quad (\text{B.39})$$

$$\widehat{R} = \nabla_x h_{f_u} \bar{S}_{f_u}^{-1} \bar{\Pi}_{f_u} \bar{\epsilon} \Delta \rho \quad (\text{B.40})$$

$$\widehat{t} = -t + \nabla_x h^t [-\bar{S}_{h_u}^{-1} (v_{h_u} + \bar{\Pi}_{h_u} y_{h_u}) + \bar{S}_{h_l}^{-1} (v_{h_l} + \bar{\Pi}_{h_l} y_{h_l})] + \nabla_x h_{f_u}^t [-\bar{S}_{f_u}^{-1} (v_{f_u} + \bar{\Pi}_{f_u} y_{f_u})] \quad (\text{B.41})$$

Substituindo as equações (B.36 a B.38) na equação (B.23) encontra-se

$$\hat{D} = (-\bar{S}_{\rho_u}^{-1}\bar{\Pi}_{\rho_u} + \bar{S}_{\rho_l}^{-1}\bar{\Pi}_{\rho_l} - \bar{\epsilon}^t \bar{S}_{f_u}^{-1}\bar{\Pi}_{f_u}\bar{\epsilon}) \quad (\text{B.42})$$

$$\hat{R}_\rho = -R_\rho + \bar{\epsilon}^t [\bar{S}_{f_u}^{-1}(v_{f_u} + \bar{\Pi}_{f_u}y_{f_u})] - U_{\rho_u} [\bar{S}_{\rho_u}^{-1}(v_{\rho_u} + \bar{\Pi}_{\rho_u}y_{\rho_u})] + U_{\rho_l} [\bar{S}_{\rho_l}^{-1}(v_{\rho_l} + \bar{\Pi}_{\rho_l}y_{\rho_l})] \quad (\text{B.43})$$

Assim, com as manipulações propostas para o sistema linear (B.14), este assume a seguinte forma reduzida:

$$\begin{bmatrix} \hat{H} & -J^t & \hat{R}^t \\ -J & 0 & 0 \\ \hat{R} & 0 & \hat{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \\ \Delta \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{t} \\ g \\ \hat{R}_\rho \end{bmatrix}$$

Portanto, ao invés de lidar com o sistema maior, descrito em (B.23), resolve-se o sistema reduzido para $\Delta x, \Delta \lambda$ e $\Delta \rho$, e à partir destes incrementos calcula-se Δs e $\Delta \pi$ pelas equações (B.29 a B.38). Estes incrementos nas variáveis são utilizados na atualização das variáveis primais e duais.

<i>Variáveis Primais</i>	<i>Variáveis Duais</i>	
$a^{atual} = a + \kappa\alpha_P\Delta a$	$\lambda^{atual} = \lambda + \kappa\alpha_D\Delta \lambda$	
$V^{atual} = V + \kappa\alpha_P\Delta V$	$\pi^{atual} = \pi + \kappa\alpha_D\Delta \pi$	
$\delta^{atual} = \delta + \kappa\alpha_P\Delta \delta$		(B.44)
$\rho^{atual} = \rho + \kappa\alpha_P\Delta \rho$		
$s^{atual} = s + \kappa\alpha_P\Delta s$		

Com o objetivo de manter a busca da solução ótima no interior do conjunto viável, controla-se o tamanho do passo verificando-se as seguintes condições:

$$\alpha_P = \min\{\min_{\Delta s_j < 0} \frac{s_j}{|\Delta s_j|}, 1\} \quad (\text{B.45})$$

$$\alpha_D = \min\{\min_{\Delta \pi_l < 0} \frac{\pi_l}{|\Delta \pi_l|}, 1\} \quad (\text{B.46})$$

$$(\text{B.47})$$

onde κ é uma constante cuja função é evitar que a variável atinja a fronteira, normalmente com valor 0,99995.

O ajuste do parâmetro μ da função barreira é determinado através de uma "medida de complementaridade" expressa em função da grandeza $s^t \pi$. O método de penalidade de Fiacco e McCormick estabelece que o parâmetro barreira deve diminuir iteração a iteração, e em programação linear espera-se que a taxa de diminuição seja da ordem do sistema ((Castrunovo, 1997), Carvalho (1999)). Em programação não-linear, não se pode esperar uma diminuição tão acentuada pela não-linearidade das restrições. Introduce-se então no cálculo de μ , um parâmetro $\beta > 1$ definido pelo usuário, que representa a taxa esperada de decréscimo de μ . Os valores utilizados variam entre 10 e 20, segundo (Granville, 1994), e deve-se notar que valores muito elevados podem prejudicar a convergência da

solução.

$$\mu = \frac{s^l \pi^l - s^u \pi^u}{2n\beta} \quad (\text{B.48})$$

(B.49)

Neste trabalho utilizou-se β igual a 10, como recomendado na referência (Granville, 1994). O critério de parada é estabelecido quando todas as condições especificadas forem satisfeitas: o parâmetro da função barreira logarítmica atende uma tolerância especificada (nas simulações sendo consideradas 10^{-10}), as restrições de igualdade são satisfeitas em relação à uma tolerância, por exemplo 10^{-3} ; e a norma do gradiente do Lagrangeano, em relação às variáveis do problema, satisfaz a uma tolerância especificada (no presente caso, 10^{-3}). O algoritmo 4.8 foi implementado em ambiente Matlab, para avaliação dos sistema-teste IEEE-57 barras. Os principais resultados obtidos são mostrados no capítulo 5.

Apêndice C

Dados e Resultados do sistema IEEE-57 barras

Neste apêndice são apresentadas as soluções de mínimo desvio de tensão e mínimo custo do sistema obtidas através do programa comercial Flupot e alguns resultados obtidos através do programa multi-objetivo (PMO) desenvolvido.

C.1 Controle de Tensão - Flupot

PROGRAMA DE FLUXO DE POTENCIA OTIMO - FLUPOT - V5.1 - 12/2000
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA

Sumario da Funcao Objetivo e das Variaveis

Funcao Objetivo:

Minimo custo alocao de potencia reativa

Controle de ajuste de tensao

Variaveis:

Potencia ativa gerada

Potencia reativa gerada

Tap

Potencia reativa alocada

Tensao em barra PV

Tap do trafo do conversor

SUMARIO DO CASO

SHUNT	TOTAL =		22.4	MVAR		
CARGA	TOTAL =	1250.8	MW	336.0	MVAR	
GERACAO	TOTAL =	1270.8	MW	278.5	MVAR (278.5 , .0)	
INJECAO	EQUIV =	.0	MW	.0	MVAR	
INJ.	ALOCADA =	.0	MW	.0	MVAR (.0 , .0)	
SHUNT	ALOCADO =			.0	MVAR (.0N , .0N)	
POT.	REJEIT.	=	.0	MW	.0	MVAR

SHUNT CHAVEADO = .0 MVAR (.0N , .0N)
 PERDA TOTAL = 20.0 MW -35.0 MVAR
 C.SERIE ALOC. = .000 % .00 MVAR
 CARREG. TOTAL = .00 MW .00 MVAR
 PEDAGIO = .00 MW .00 MVAR
 COMP. ESTATICA = .0 MVAR
 SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA = .00000000
 SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA = .00000000

* CASO BASE *

RELATORIO DE BARRAS AC DO SIST. * AREA 1 *

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X

BARRA	TENSAO	GERACAO	INJ	EQV	FATOR	CARGA	LINK	DC	SHUNT
NUM.	TIPO	MOD/	MW/	MW/	GER %	MW/	MW/	MVAR/	MVAR/
NOME	ANG	MVAR	MVAR	EQV %	MVAR	MVAR	MVAR	EQUIV	
CE MVAR									
1	2	1.021	265.3	.0	.0	55.0	.0	.0	
Kanawha		.0	54.7	.0	.0	17.0	.0	.0	
2	1	1.005	.0	.0	.0	3.0	.0	.0	
Turner		.1	7.2	.0	.0	88.0	.0	.0	
3	1	1.018	261.9	.0	.0	41.0	.0	.0	
Logan		-.4	16.0	.0	.0	21.0	.0	.0	
4	0	1.011	.0	.0	.0	.0	.0	.0	
Sprigg		-2.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	
5	0	1.002	.0	.0	.0	13.0	.0	.0	
Bus 5		-5.5	.0	.0	.0	4.0	.0	.0	
6	1	1.004	.0	.0	.0	75.0	.0	.0	
Beaver Ck		-6.4	2.5	.0	.0	2.0	.0	.0	
7	0	1.006	.0	.0	.0	.0	.0	.0	
Bus 7		-6.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	
8	1	1.031	353.0	.0	.0	150.0	.0	.0	
Clinch Rv		-4.7	93.8	.0	.0	22.0	.0	.0	
9	1	1.001	.0	.0	.0	121.0	.0	.0	
Saltville		-8.0	1.0	.0	.0	26.0	.0	.0	
10	0	1.004	.0	.0	.0	5.0	.0	.0	
Bus 10		-8.6	.0	.0	.0	2.0	.0	.0	
11	0	.990	.0	.0	.0	.0	.0	.0	
Tazewell		-7.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0	
12	1	1.024	390.7	.0	.0	377.0	.0	.0	
Glen Lyn		-6.9	103.4	.0	.0	24.0	.0	.0	
13	0	.993	.0	.0	.0	18.0	.0	.0	
Bus 13		-6.8	.0	.0	.0	2.3	.0	.0	
14	0	.987	.0	.0	.0	10.5	.0	.0	
Bus 14		-6.2	.0	.0	.0	5.3	.0	.0	
15	0	1.001	.0	.0	.0	22.0	.0	.0	
Bus 15		-3.9	.0	.0	.0	5.0	.0	.0	
16	0	1.016	.0	.0	.0	43.0	.0	.0	
Bus 16		-6.3	.0	.0	.0	3.0	.0	.0	
17	0	1.011	.0	.0	.0	42.0	.0	.0	
Bus 17		-4.1	.0	.0	.0	8.0	.0	.0	
18	0	1.020	.0	.0	.0	27.2	.0	10.4	
Sprigg		-7.1	.0	.0	.0	9.8	.0	.0	
19	0	.992	.0	.0	.0	3.3	.0	.0	
Bus 19		-9.3	.0	.0	.0	.6	.0	.0	
20	0	.988	.0	.0	.0	2.3	.0	.0	
Bus 20		-10.0	.0	.0	.0	1.0	.0	.0	
21	0	1.004	.0	.0	.0	.0	.0	.0	

Bus 21		-10.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
22	0	1.006	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 22		-10.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
23	0	1.005	.0	.0	.0	6.3	.0	.0
Bus 23		-10.2	.0	.0	.0	2.1	.0	.0
24	0	1.013	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 24		-11.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0
25	0	1.004	.0	.0	.0	6.3	.0	5.9
Bus 25		-15.6	.0	.0	.0	3.2	.0	.0
26	0	.965	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 26		-10.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0
27	0	1.001	.0	.0	.0	9.3	.0	.0
Bus 27		-10.1	.0	.0	.0	.5	.0	.0
28	0	1.021	.0	.0	.0	4.6	.0	.0
Bus 28		-9.4	.0	.0	.0	2.3	.0	.0
29	0	1.037	.0	.0	.0	17.0	.0	.0
Bus 29		-8.8	.0	.0	.0	2.6	.0	.0
30	0	.987	.0	.0	.0	3.6	.0	.0
Bus 30		-16.1	.0	.0	.0	1.8	.0	.0
31	0	.966	.0	.0	.0	5.8	.0	.0
Bus 31		-16.7	.0	.0	.0	2.9	.0	.0
32	0	.989	.0	.0	.0	1.6	.0	.0
Bus 32		-15.9	.0	.0	.0	.8	.0	.0
33	0	.986	.0	.0	.0	3.8	.0	.0
Bus 33		-15.9	.0	.0	.0	1.9	.0	.0
34	0	.958	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 34		-11.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0
35	0	.966	.0	.0	.0	6.0	.0	.0
Bus 35		-11.3	.0	.0	.0	3.0	.0	.0
36	0	.976	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 36		-11.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
37	0	.983	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 37		-10.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0
38	0	1.007	.0	.0	.0	14.0	.0	.0
Bus 38		-9.9	.0	.0	.0	7.0	.0	.0
39	0	.981	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 39		-10.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0
40	0	.976	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 40		-11.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
41	0	1.017	.0	.0	.0	6.3	.0	.0
Tazewell		-11.7	.0	.0	.0	3.0	.0	.0
42	0	.980	.0	.0	.0	7.1	.0	.0
Bus 42		-12.9	.0	.0	.0	4.0	.0	.0
43	0	1.032	.0	.0	.0	2.0	.0	.0
Tazewell		-9.0	.0	.0	.0	1.0	.0	.0
44	0	1.014	.0	.0	.0	12.0	.0	.0
Bus 44		-8.9	.0	.0	.0	1.8	.0	.0
45	0	1.040	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 45		-6.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0
46	0	1.039	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 46		-8.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
47	0	1.019	.0	.0	.0	29.7	.0	.0
Bus 47		-9.5	.0	.0	.0	11.6	.0	.0
48	0	1.016	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 48		-9.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0
49	0	1.023	.0	.0	.0	18.0	.0	.0
Bus 49		-10.0	.0	.0	.0	8.5	.0	.0
50	0	1.003	.0	.0	.0	21.0	.0	.0
Bus 50		-10.5	.0	.0	.0	10.5	.0	.0
51	0	1.021	.0	.0	.0	18.0	.0	.0

Bus 51		-9.7	.0	.0	.0	5.3	.0	.0
52	0	.996	.0	.0	.0	4.9	.0	.0
Bus 52		-10.4	.0	.0	.0	2.2	.0	.0
53	0	.981	.0	.0	.0	20.0	.0	6.1
Bus 53		-11.0	.0	.0	.0	10.0	.0	.0
54	0	.992	.0	.0	.0	4.1	.0	.0
Bus 54		-10.3	.0	.0	.0	1.4	.0	.0
55	0	1.012	.0	.0	.0	6.8	.0	.0
Saltville		-9.1	.0	.0	.0	3.4	.0	.0
56	0	.973	.0	.0	.0	7.6	.0	.0
Bus 56		-13.1	.0	.0	.0	2.2	.0	.0
57	0	.970	.0	.0	.0	6.7	.0	.0
Bus 57		-13.7	.0	.0	.0	2.0	.0	.0

RELATORIO DE GERADOR * AREA 1 *

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  BARRA      TENSÃO          GERACAO          LIM.,/, PARTIC BARRA
  NUM.  TIPO  MOD      MIN      MW      MAX  MW  GER  CONT.
  NOME      ANG      MIN      MVARMAX  MVAR  EQUIV
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  1      2  1.021      .0  265.3  500.0      .0  1
  Kanawha      .0 -150.0  54.7  150.0      .0
  2      1  1.005      .0      .0      .0 =      .0  2
  Turner      .1 -50.0  7.2  50.0      .0
  3      1  1.018      .0  261.9  500.0      .0  3
  Logan      -.4 -60.0  16.0  60.0      .0
  6      1  1.004      .0      .0      .0 =      .0  6
  Beaver Ck      -6.4 -35.0  2.5  35.0      .0
  8      1  1.031      .0  353.0  500.0      .0  8
  Clinch Rv      -4.7 -140.0  93.8  200.0      .0
  9      1  1.001      .0      .0      .0 =      .0  9
  Saltville      -8.0 -9.0  1.0  9.0      .0
  12     1  1.024      .0  390.7  500.0      .0  12
  Glen Lyn      -6.9 -155.0  103.4  155.0      .0
  
```

RELATORIO DE TRANSFORMADOR

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  DA BARRA      P/ BARRA          TAP          BARRA      TENSÃO
  NUM.  NOME      NUM.  NOME      MIN  ATUAL  MAX  CONT  ESPEC  ATUAL  DEFAS
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  4 Sprigg      18 Sprigg      .900 .989 1.100  4 1.023 1.011
  4 Sprigg      18 Sprigg      .900 .989 1.100  4 1.023 1.011
  21 Bus 21     20 Bus 20     .900 1.004 1.100  21 1.002 1.004
  24 Bus 24     25 Bus 25           1.000
  24 Bus 24     25 Bus 25           1.000
  24 Bus 24     26 Bus 26     .900 1.053 1.100  24 1.006 1.013
  7 Bus 7      29 Bus 29     .900 .957 1.100  7 1.012 1.006
  34 Bus 34     32 Bus 32     .900 .931 1.100  34 .954 .958
  11 Tazewell   41 Tazewell   .900 .923 1.100  11 1.004 .990
  15 Bus 15     45 Bus 45     .900 .960 1.100  15 1.008 1.001
  14 Bus 14     46 Bus 46     .900 .939 1.100  14 .997 .987
  10 Bus 10     51 Bus 51     .900 .978 1.100  10 1.019 1.004
  13 Bus 13     49 Bus 49     .900 .919 1.100  13 1.007 .993
  11 Tazewell   43 Tazewell   .900 .952 1.100  11 1.004 .990
  40 Bus 40     56 Bus 56     .900 1.019 1.100  40 .971 .976
  39 Bus 39     57 Bus 57     .900 .971 1.100  39 .979 .981
  9 Saltville   55 Saltville   .900 .983 1.100  9 1.016 1.001
  
```

C.2 Mínimo Custo do sistema - Flupot

 PROGRAMA DE FLUXO DE POTENCIA OTIMO - FLUPOT - V5.1 - 12/2000
 CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA

Sumario da Funcao Objetivo e das Variaveis

Funcao Objetivo:

Minimo custo de geracao ativa

Variaveis:

Potencia ativa gerada

Potencia reativa gerada

Tap

Tensao em barra PV

Tap do trafo do conversor

SUMARIO DO CASO

SHUNT	TOTAL =		23.2	MVAR	
CARGA	TOTAL =	1250.8	MW	336.0	MVAR
GERACAO	TOTAL =	1276.8	MW	287.3	MVAR (287.3 , .0)
INJECAO	EQUIV =	.0	MW	.0	MVAR
INJ.	ALOCADA =	.0	MW	.0	MVAR (.0 , .0)
SHUNT	ALOCADO =			.0	MVAR (.0N , .0N)
POT.	REJEIT. =	.0	MW	.0	MVAR
SHUNT	CHAVEADO =			.0	MVAR (.0N , .0N)
PERDA	TOTAL =	26.0	MW	-25.5	MVAR
C.SERIE	ALOC. =	.000	%	.00	MVAR
CARREG.	TOTAL =	.00	MW	.00	MVAR
PEDAGIO	=	.00	MW	.00	MVAR
COMP.	ESTATICA =			.0	MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA				=	144014.90000000
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA				=	.00000000

RELATORIO DE BARRAS AC DO SIST. * AREA 1 *

BARRA	TENSAO	GERACAO	INJ	EQV	FATOR	CARGA	LINK	DC	SHUNT
NUM.	TIPO	MOD/	MW/	MW/	GER %	MW/	MW/	MVAR/	MVAR/
NOME	ANG	MVAR	MVAR	EQV %	MVAR	MVAR	MVAR	EQUIV	
CE MVAR									
1	2	1.027	.0	.0	.0	55.0	.0	.0	.0
Kanawha		.0	59.7	.0	.0	17.0	.0	.0	.0
2	1	1.024	.0	.0	.0	3.0	.0	.0	.0
Turner		1.7	49.9	.0	.0	88.0	.0	.0	.0
3	1	1.050	500.0	.0	.0	41.0	.0	.0	.0
Logan		6.4	28.0	.0	.0	21.0	.0	.0	.0
4	0	1.036	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Sprigg		3.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5	0	1.018	.0	.0	.0	13.0	.0	.0	.0
Bus 5		-.2	.0	.0	.0	4.0	.0	.0	.0
6	1	1.015	.0	.0	.0	75.0	.0	.0	.0
Beaver Ck		-1.6	14.8	.0	.0	2.0	.0	.0	.0
7	0	1.008	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 7		-2.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

8	1	1.021	276.8	.0	.0	150.0	.0	.0
Clinch Rv		-1.5	61.0	.0	.0	22.0	.0	.0
9	1	.998	.0	.0	.0	121.0	.0	.0
Saltville		-3.9	8.9	.0	.0	26.0	.0	.0
10	0	1.000	.0	.0	.0	5.0	.0	.0
Bus 10		-3.6	.0	.0	.0	2.0	.0	.0
11	0	.990	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Tazewell		-3.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0
12	1	1.023	500.0	.0	.0	377.0	.0	.0
Glen Lyn		-1.1	65.0	.0	.0	24.0	.0	.0
13	0	.998	.0	.0	.0	18.0	.0	.0
Bus 13		-1.9	.0	.0	.0	2.3	.0	.0
14	0	.995	.0	.0	.0	10.5	.0	.0
Bus 14		-1.4	.0	.0	.0	5.3	.0	.0
15	0	1.014	.0	.0	.0	22.0	.0	.0
Bus 15		.7	.0	.0	.0	5.0	.0	.0
16	0	1.019	.0	.0	.0	43.0	.0	.0
Bus 16		-2.2	.0	.0	.0	3.0	.0	.0
17	0	1.016	.0	.0	.0	42.0	.0	.0
Bus 17		-1.9	.0	.0	.0	8.0	.0	.0
18	0	1.050	.0	.0	.0	27.2	.0	11.0
Sprigg		-.9	.0	.0	.0	9.8	.0	.0
19	0	1.003	.0	.0	.0	3.3	.0	.0
Bus 19		-3.3	.0	.0	.0	.6	.0	.0
20	0	.987	.0	.0	.0	2.3	.0	.0
Bus 20		-4.2	.0	.0	.0	1.0	.0	.0
21	0	1.015	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 21		-5.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
22	0	1.014	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 22		-5.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0
23	0	1.012	.0	.0	.0	6.3	.0	.0
Bus 23		-5.3	.0	.0	.0	2.1	.0	.0
24	0	1.004	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 24		-6.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0
25	0	.991	.0	.0	.0	6.3	.0	5.8
Bus 25		-11.1	.0	.0	.0	3.2	.0	.0
26	0	1.005	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 26		-6.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0
27	0	1.024	.0	.0	.0	9.3	.0	.0
Bus 27		-5.8	.0	.0	.0	.5	.0	.0
28	0	1.038	.0	.0	.0	4.6	.0	.0
Bus 28		-5.1	.0	.0	.0	2.3	.0	.0
29	0	1.050	.0	.0	.0	17.0	.0	.0
Bus 29		-4.6	.0	.0	.0	2.6	.0	.0
30	0	.973	.0	.0	.0	3.6	.0	.0
Bus 30		-11.6	.0	.0	.0	1.8	.0	.0
31	0	.951	.0	.0	.0	5.8	.0	.0
Bus 31		-12.1	.0	.0	.0	2.9	.0	.0
32	0	.970	.0	.0	.0	1.6	.0	.0
Bus 32		-11.2	.0	.0	.0	.8	.0	.0
33	0	.968	.0	.0	.0	3.8	.0	.0
Bus 33		-11.2	.0	.0	.0	1.9	.0	.0
34	0	.968	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 34		-6.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0
35	0	.976	.0	.0	.0	6.0	.0	.0
Bus 35		-6.4	.0	.0	.0	3.0	.0	.0
36	0	.986	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 36		-6.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0
37	0	.993	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 37		-5.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0

38	0	1.016	.0	.0	.0	14.0	.0	.0
Bus 38		-5.0	.0	.0	.0	7.0	.0	.0
39	0	.991	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 39		-5.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0
40	0	.985	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 40		-6.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0
41	0	1.040	.0	.0	.0	6.3	.0	.0
Tazewell		-6.9	.0	.0	.0	3.0	.0	.0
42	0	1.004	.0	.0	.0	7.1	.0	.0
Bus 42		-8.1	.0	.0	.0	4.0	.0	.0
43	0	1.050	.0	.0	.0	2.0	.0	.0
Tazewell		-4.4	.0	.0	.0	1.0	.0	.0
44	0	1.024	.0	.0	.0	12.0	.0	.0
Bus 44		-4.1	.0	.0	.0	1.8	.0	.0
45	0	1.050	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 45		-1.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0
46	0	1.048	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 46		-3.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0
47	0	1.029	.0	.0	.0	29.7	.0	.0
Bus 47		-4.6	.0	.0	.0	11.6	.0	.0
48	0	1.025	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Bus 48		-4.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0
49	0	1.035	.0	.0	.0	18.0	.0	.0
Bus 49		-5.1	.0	.0	.0	8.5	.0	.0
50	0	1.019	.0	.0	.0	21.0	.0	.0
Bus 50		-5.6	.0	.0	.0	10.5	.0	.0
51	0	1.043	.0	.0	.0	18.0	.0	.0
Bus 51		-4.7	.0	.0	.0	5.3	.0	.0
52	0	1.016	.0	.0	.0	4.9	.0	.0
Bus 52		-6.1	.0	.0	.0	2.2	.0	.0
53	0	1.004	.0	.0	.0	20.0	.0	6.4
Bus 53		-6.8	.0	.0	.0	10.0	.0	.0
54	0	1.021	.0	.0	.0	4.1	.0	.0
Bus 54		-6.1	.0	.0	.0	1.4	.0	.0
55	0	1.048	.0	.0	.0	6.8	.0	.0
Saltville		-5.0	.0	.0	.0	3.4	.0	.0
56	0	.997	.0	.0	.0	7.6	.0	.0
Bus 56		-8.3	.0	.0	.0	2.2	.0	.0
57	0	.993	.0	.0	.0	6.7	.0	.0
Bus 57		-8.8	.0	.0	.0	2.0	.0	.0

RELATORIO DE GERADOR * AREA 1 *

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
BARRA	TENSAO	GERACAO			LIM., /, PARTIC			BARRA
NUM.	TIPO	MOD	MIN	MW	MAX	MW	GER	CONT.
	NOME	ANG	MIN	MVARMAX	MVAR	EQUIV		
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
1	2	1.027	.0	.0	500.0	.0		1
Kanawha		.0	-150.0	59.7	150.0		.0	
2	1	1.024	.0	.0	.0 =	.0		2
Turner		1.7	-50.0	49.9	50.0		.0	
3	1	1.050	.0	500.0	500.0	.0		3
Logan		6.4	-60.0	28.0	60.0		.0	
6	1	1.015	.0	.0	.0 =	.0		6
Beaver Ck		-1.6	-35.0	14.8	35.0		.0	
8	1	1.021	.0	276.8	500.0	.0		8
Clinch Rv		-1.5	-140.0	61.0	200.0		.0	
9	1	.998	.0	.0	.0 =	.0		9
Saltville		-3.9	-9.0	8.9	9.0		.0	

```

12      1 1.023      .0 500.0 500.0      .0 12
Glen Lyn      -1.1 -155.0 65.0 155.0      .0

```

RELATORIO DE TRANSFORMADOR

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
DA BARRA          P/ BARRA          TAP          BARRA          TENSAO
NUM.      NOME      NUM.      NOME      MIN  ATUAL  MAX  CONT ESPEC ATUAL DEFAS
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  4 Sprigg      18 Sprigg      .900 .983 1.100   4 1.023 1.036
  4 Sprigg      18 Sprigg      .900 .983 1.100   4 1.023 1.036
21 Bus 21      20 Bus 20      .900 1.027 1.100  21 1.002 1.015
24 Bus 24      25 Bus 25          1.000
24 Bus 24      25 Bus 25          1.000
24 Bus 24      26 Bus 26      .900 1.001 1.100  24 1.006 1.004
  7 Bus 7      29 Bus 29      .900 .951 1.100   7 1.012 1.008
34 Bus 34      32 Bus 32      .900 .961 1.100  34 .954 .968
11 Tazewell     41 Tazewell     .900 .901 1.100  11 1.004 .990
15 Bus 15      45 Bus 45      .900 .962 1.100  15 1.008 1.014
14 Bus 14      46 Bus 46      .900 .940 1.100  14 .997 .995
10 Bus 10      51 Bus 51      .900 .953 1.100  10 1.019 1.000
13 Bus 13      49 Bus 49      .900 .912 1.100  13 1.007 .998
11 Tazewell     43 Tazewell     .900 .938 1.100  11 1.004 .990
40 Bus 40      56 Bus 56      .900 .999 1.100  40 .971 .985
39 Bus 39      57 Bus 57      .900 .964 1.100  39 .979 .991
  9 Saltville   55 Saltville   .900 .945 1.100   9 1.016 .998

```

C.3 Programa multi-objetivo desenvolvido

Serão apresentados os resultados de algumas soluções de Pareto obtidas pelo PMO desenvolvido.

C.3.1 Mínimo Desvio de Tensão de 1 pu

A solução de mínimo desvio de tensão foi obtida pelo PMO com os fatores de ponderação nulos.

```

wp = 0.00000      wq = 0.00000
Resultados das barras
Limite da restrição funcional P = 1.00000  Limite da restrição funcional Q = 1.00000
Número de iterações = 12
barra  tensão      geração          carga          custo mult. de Lagrange
#  tipo V(pu) ang(0) Pg(MW) Qg(Mvar) Qsh(Mvar) Pd(MW) Qd(Mvar) (MW) ($/MW) ($/Mvar)
1  2  1.014  0.00  268.035 -1.800  0.000  55.000  17.000  536.069
2  1  1.004 -0.32  0.000  16.267  0.000  3.000  88.000  0.000
3  1  1.026 -2.08  172.646  59.583  0.000  41.000  21.000  172.646
4  3  1.018 -3.69  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
5  0  1.005 -5.37  0.000  0.000  0.000  13.000  4.000  0.000  0.001
6  1  1.005 -5.76  0.000 -21.152  0.000  75.000  2.000  0.000
7  3  1.013 -5.39  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  -0.000 -0.002
8  1  1.041 -2.87  397.907  89.323  0.000  150.000  22.000  596.860
9  1  1.016 -6.64  0.000  8.742  0.000  121.000  26.000  0.000
10 0  1.019 -7.35  0.000  0.000  0.000  5.000  2.000  0.001  0.000
11 3  1.005 -6.85  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  -0.004 -0.010
12 1  1.041 -5.62  428.842 115.797  0.000  377.000  24.000  450.284

```


13	0	1.008	-6.16	0.000	0.000	0.000	18.000	2.300	-0.003	-0.007	
14	0	0.998	-5.95	0.000	0.000	0.000	10.500	5.300	-0.003	-0.009	
15	0	1.008	-4.20	0.000	0.000	0.000	22.000	5.000	-0.002	-0.006	
16	0	1.027	-5.42	0.000	0.000	0.000	43.000	3.000	0.001	0.003	
17	0	1.014	-3.67	0.000	0.000	0.000	42.000	8.000	0.000	0.002	
18	0	1.017	-7.97	0.000	0.000	10.346	27.200	9.800	0.001	-0.002	
19	0	0.992	-9.69	0.000	0.000	0.000	3.300	0.600	-0.019	-0.033	
20	0	0.989	-10.07	0.000	0.000	0.000	2.300	1.000	-0.026	-0.045	
21	3	1.001	-9.65	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.024	-0.048	
22	3	1.003	-9.64	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.024	-0.048	
23	0	1.002	-9.72	0.000	0.000	0.000	6.300	2.100	-0.025	-0.049	
24	3	1.006	-10.41	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.043	-0.071	
25	0	0.994	-15.05	0.000	0.000	5.834	6.300	3.200	-0.066	-0.186	
26	3	0.970	-10.10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.042	-0.067	
27	0	1.003	-9.00	0.000	0.000	0.000	9.300	0.500	-0.015	-0.026	
28	0	1.022	-8.13	0.000	0.000	0.000	4.600	2.300	-0.005	-0.012	
29	0	1.037	-7.53	0.000	0.000	0.000	17.000	2.600	-0.001	-0.006	
30	0	0.977	-15.58	0.000	0.000	0.000	3.600	1.800	-0.094	-0.220	
31	0	0.955	-16.21	0.000	0.000	0.000	5.800	2.900	-0.141	-0.276	
32	0	0.975	-15.37	0.000	0.000	0.000	1.600	0.800	-0.130	-0.271	
33	0	0.973	-15.41	0.000	0.000	0.000	3.800	1.900	-0.134	-0.274	
34	3	0.955	-11.02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.101	-0.153	
35	0	0.962	-10.77	0.000	0.000	0.000	6.000	3.000	-0.087	-0.135	
36	3	0.973	-10.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.071	-0.117	
37	3	0.981	-10.27	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.058	-0.101	
38	0	1.004	-9.47	0.000	0.000	0.000	14.000	7.000	-0.021	-0.046	
39	3	0.979	-10.32	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.060	-0.103	
40	3	0.972	-10.57	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.073	-0.120	
41	0	1.008	-10.85	0.000	0.000	0.000	6.300	3.000	-0.011	-0.066	
42	0	0.972	-12.16	0.000	0.000	0.000	7.100	4.000	-0.046	-0.105	
43	0	1.028	-8.03	0.000	0.000	0.000	2.000	1.000	-0.005	-0.019	
44	0	1.014	-8.68	0.000	0.000	0.000	12.000	1.800	-0.015	-0.034	
45	3	1.046	-6.32	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.013	
46	3	1.039	-7.68	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.004	-0.016	
47	0	1.017	-9.10	0.000	0.000	0.000	29.700	11.600	-0.008	-0.027	
48	3	1.013	-9.23	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.012	-0.032	
49	0	1.017	-9.36	0.000	0.000	0.000	18.000	8.500	-0.007	-0.025	
50	0	0.999	-9.70	0.000	0.000	0.000	21.000	10.500	-0.005	-0.016	
51	0	1.022	-8.51	0.000	0.000	0.000	18.000	5.300	0.002	-0.001	
52	0	0.997	-9.03	0.000	0.000	0.000	4.900	2.200	-0.006	-0.012	
53	0	0.981	-9.67	0.000	0.000	6.069	20.000	10.000	-0.009	-0.014	
54	0	0.992	-8.89	0.000	0.000	0.000	4.100	1.400	-0.006	-0.011	
55	0	1.013	-7.76	0.000	0.000	0.000	6.800	3.400	-0.001	-0.004	
56	0	0.965	-12.51	0.000	0.000	0.000	7.600	2.200	-0.065	-0.121	
57	0	0.959	-13.06	0.000	0.000	0.000	6.700	2.000	-0.079	-0.139	
Total:				1267.430	266.760	22.249	1250.800	336.000	1755.860		

Resultados dos geradores

#	barra	tensão		geração(MW)				geração(MVAR)			
		tipo	V(pu)	ang(0)	Pgmin	Pg	Pgmax	Pgesp	Qgmin	Qg	Qgmax
1	2	1.014	0.00	0.00	268.03	500.00	0.00	-150.00	-1.80	150.00	59.70
2	1	1.004	-0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	-50.00	16.27	50.00	49.90
3	1	1.026	-2.08	0.00	172.65	500.00	500.00	-60.00	59.58	60.00	28.00
6	1	1.005	-5.76	0.00	0.00	0.00	0.00	-35.00	-21.15	35.00	14.80
8	1	1.041	-2.87	0.00	397.91	500.00	276.80	-140.00	89.32	200.00	61.00
9	1	1.016	-6.64	0.00	0.00	0.00	0.00	-9.00	8.74	9.00	8.90
12	1	1.041	-5.62	0.00	428.84	500.00	500.00	-155.00	115.80	155.00	65.00

Resultados dos trafos

da barra p/ barra tap side

tap	side	nontap	side	tap	Tensão		
min	atual	esp	máx	espec	atual		
4	18	0.900	0.998	1.000	1.100	1.000	1.018
4	18	0.900	0.997	1.000	1.100	1.000	1.018
21	20	0.900	1.002	1.000	1.100	1.000	1.001
24	26	0.900	1.040	1.000	1.100	1.000	1.006
7	29	0.900	0.965	1.000	1.100	1.000	1.013
34	32	0.900	0.941	1.000	1.100	1.000	0.955
11	41	0.900	0.959	1.000	1.100	1.000	1.005
15	45	0.900	0.957	1.000	1.100	1.000	1.008
14	46	0.900	0.949	1.000	1.100	1.000	0.998
10	51	0.900	0.991	1.000	1.100	1.000	1.019
13	49	0.900	0.949	1.000	1.100	1.000	1.008
11	43	0.900	0.968	1.000	1.100	1.000	1.005
40	56	0.900	1.001	1.000	1.100	1.000	0.972
39	57	0.900	0.990	1.000	1.100	1.000	0.979
9	55	0.900	0.997	1.000	1.100	1.000	1.016

Resultados dos Ros

ro_min	ro	ro_máx
0.00010	2397.38604	5000.00000
1.80000	1682.41558	5000.00000

Valor de alfa	= 1.000000000
Valor de gama	= 1.000000000
Delta Epsilon P	= 1.00000000000
Delta Epsilon Q	= 1.00000000000
Desvio quadrático da tensão	= 0.029730
Desvio da Potência ativa	= 7.876533
Desvio da Potência reativa	= 2.419476
Custo de geração de potência ativa	= 175586.0294
Perda de potência ativa nas LTs	= 16.6300
Perda de potência reativa nas LTs	= -46.9912

C.3.2 Mínimo Custo do Sistema - PMO

Os resultados apresentados estão com os fatores de Ponderação ativos, cujos valores são tais que ponderem mais as funções objetivo transformadas em restrições. Os valores especificados de potência ativa e reativa são obtidos de (C.2).

wp = 10.00000 wq = 10.00000

Resultados das barras

Limite da restrição funcional P = 1.00000 Limite da restrição funcional Q = 1.00000

Número de iterações = 17

barra	tensão	geração			carga		custo mult. de Lagrange				
#	tipo	V(pu)	ang(0)	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qsh(Mvar)	Pd(MW)	Qd(Mvar)	(MW)	(\$/MW)	(\$/Mvar)
1	2	1.027	0.00	0.002	58.472	0.000	55.000	17.000	0.003		
2	1	1.025	1.66	0.000	49.991	0.000	3.000	88.000	0.000		
3	1	1.050	6.41	500.000	24.824	0.000	41.000	21.000	500.000		
4	3	1.037	3.52	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-9.354	-0.027
5	0	1.018	-0.19	0.000	0.000	0.000	13.000	4.000		-9.823	-0.028
6	1	1.016	-1.60	0.000	13.775	0.000	75.000	2.000	0.000		
7	3	1.009	-2.81	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.070	-0.030
8	1	1.024	-1.53	276.852	64.330	0.000	150.000	22.000	415.279		
9	1	1.001	-3.90	0.000	8.995	0.000	121.000	26.000	0.000		

10	0	1.004	-3.59	0.000	0.000	0.000	5.000	2.000		-10.085	-0.066	
11	3	0.994	-3.30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.127	-0.132	
12	1	1.026	-1.15	500.000	66.898	0.000	377.000	24.000	525.000			
13	0	1.000	-1.93	0.000	0.000	0.000	18.000	2.300		-9.992	-0.118	
14	0	0.997	-1.45	0.000	0.000	0.000	10.500	5.300		-9.938	-0.144	
15	0	1.014	0.68	0.000	0.000	0.000	22.000	5.000		-9.682	-0.090	
16	0	1.021	-2.20	0.000	0.000	0.000	43.000	3.000		-9.942	0.002	
17	0	1.018	-1.95	0.000	0.000	0.000	42.000	8.000		-9.915	-0.013	
18	0	1.044	-0.90	0.000	0.000	10.894	27.200	9.800		-9.358	-0.037	
19	0	1.001	-3.39	0.000	0.000	0.000	3.300	0.600		-10.055	-0.224	
20	0	0.987	-4.33	0.000	0.000	0.000	2.300	1.000		-10.318	-0.287	
21	3	1.009	-5.12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.321	-0.314	
22	3	1.009	-5.26	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.351	-0.313	
23	0	1.008	-5.37	0.000	0.000	0.000	6.300	2.100		-10.383	-0.317	
24	3	1.002	-6.57	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.696	-0.332	
25	0	0.990	-11.15	0.000	0.000	5.782	6.300	3.200		-10.799	-0.572	
26	3	0.993	-6.39	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.693	-0.330	
27	0	1.014	-5.87	0.000	0.000	0.000	9.300	0.500		-10.445	-0.164	
28	0	1.029	-5.21	0.000	0.000	0.000	4.600	2.300		-10.241	-0.097	
29	0	1.041	-4.74	0.000	0.000	0.000	17.000	2.600		-10.073	-0.035	
30	0	0.972	-11.65	0.000	0.000	0.000	3.600	1.800		-11.073	-0.752	
31	0	0.951	-12.21	0.000	0.000	0.000	5.800	2.900		-11.443	-1.013	
32	0	0.973	-11.24	0.000	0.000	0.000	1.600	0.800		-11.125	-0.884	
33	0	0.971	-11.28	0.000	0.000	0.000	3.800	1.900		-11.165	-0.905	
34	3	0.961	-6.72	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-11.044	-0.734	
35	0	0.969	-6.47	0.000	0.000	0.000	6.000	3.000		-10.929	-0.657	
36	3	0.979	-6.20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.769	-0.564	
37	3	0.987	-5.94	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.643	-0.498	
38	0	1.011	-5.07	0.000	0.000	0.000	14.000	7.000		-10.298	-0.303	
39	3	0.985	-5.99	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.670	-0.511	
40	3	0.978	-6.28	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.790	-0.566	
41	0	1.014	-7.10	0.000	0.000	0.000	6.300	3.000		-10.130	-0.218	
42	0	0.978	-8.29	0.000	0.000	0.000	7.100	4.000		-10.620	-0.487	
43	0	1.034	-4.43	0.000	0.000	0.000	2.000	1.000		-10.127	-0.148	
44	0	1.020	-4.17	0.000	0.000	0.000	12.000	1.800		-10.133	-0.250	
45	3	1.050	-1.57	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-9.651	-0.099	
46	3	1.042	-3.18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-9.936	-0.154	
47	0	1.023	-4.65	0.000	0.000	0.000	29.700	11.600		-10.135	-0.230	
48	3	1.020	-4.83	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-10.188	-0.242	
49	0	1.028	-5.15	0.000	0.000	0.000	18.000	8.500		-10.145	-0.147	
50	0	1.011	-5.61	0.000	0.000	0.000	21.000	10.500		-10.336	-0.230	
51	0	1.033	-4.67	0.000	0.000	0.000	18.000	5.300		-10.075	-0.072	
52	0	1.005	-6.23	0.000	0.000	0.000	4.900	2.200		-10.622	-0.205	
53	0	0.992	-6.88	0.000	0.000	6.195	20.000	10.000		-10.849	-0.253	
54	0	1.007	-6.13	0.000	0.000	0.000	4.100	1.400		-10.560	-0.190	
55	0	1.031	-5.04	0.000	0.000	0.000	6.800	3.400		-10.160	-0.074	
56	0	0.971	-8.52	0.000	0.000	0.000	7.600	2.200		-10.775	-0.541	
57	0	0.966	-9.01	0.000	0.000	0.000	6.700	2.000		-10.883	-0.571	
Total:				1276.854	287.285	22.872	1250.800	336.000	1440.282			

Resultados dos geradores

#	barra	tensão		geração(MW)				geração(MVAR)			
		tipo	V(pu)	ang(0)	Pgmin	Pg	Pgmax	Pgesp	Qgmin	Qg	Qgmax
1	2	1.027	0.00	0.00	0.00	500.00	0.00	-150.00	58.47	150.00	59.70
2	1	1.025	1.66	0.00	0.00	0.00	0.00	-50.00	49.99	50.00	49.90
3	1	1.050	6.41	0.00	500.00	500.00	500.00	-60.00	24.82	60.00	28.00
6	1	1.016	-1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	-35.00	13.77	35.00	14.80
8	1	1.024	-1.53	0.00	276.85	500.00	276.80	-140.00	64.33	200.00	61.00
9	1	1.001	-3.90	0.00	0.00	0.00	0.00	-9.00	9.00	9.00	8.90
12	1	1.026	-1.15	0.00	500.00	500.00	500.00	-155.00	66.90	155.00	65.00

Resultados dos trafos

da barra p/ barra		nontap side		tap		tap side		Tensão
tap	side	min	atual	esp	máx	espec	atual	
4	18	0.900	0.991	1.000	1.100	1.100	1.000	1.037
4	18	0.900	0.988	1.000	1.100	1.100	1.000	1.037
21	20	0.900	1.018	1.000	1.100	1.100	1.000	1.009
24	26	0.900	1.011	1.000	1.100	1.100	1.000	1.002
7	29	0.900	0.959	1.000	1.100	1.100	1.000	1.009
34	32	0.900	0.950	1.000	1.100	1.100	1.000	0.961
11	41	0.900	0.943	1.000	1.100	1.100	1.000	0.994
15	45	0.900	0.961	1.000	1.100	1.100	1.000	1.014
14	46	0.900	0.947	1.000	1.100	1.100	1.000	0.997
10	51	0.900	0.966	1.000	1.100	1.100	1.000	1.004
13	49	0.900	0.923	1.000	1.100	1.100	1.000	1.000
11	43	0.900	0.951	1.000	1.100	1.100	1.000	0.994
40	56	0.900	1.009	1.000	1.100	1.100	1.000	0.978
39	57	0.900	0.987	1.000	1.100	1.100	1.000	0.985
9	55	0.900	0.964	1.000	1.100	1.100	1.000	1.001

Resultados dos Ros

ro_min	ro	ro_máx
0.00010	0.00054	5000.00000
1.80000	1.80000	5000.00000

Valor de alfa = 1.00000000
 Valor de gama = 1.00000000
 Delta Epsilon P = 1.0000000000
 Delta Epsilon Q = 1.0000000000
 Desvio quadrático da tensão = 0.034478
 Desvio da Potência ativa = 0.000540
 Desvio da Potência reativa = 0.108439
 Custo de geração de potência ativa = 144028.1670
 Perda de potência ativa nas LTs = 26.0539
 Perda de potência reativa nas LTs = -25.8437

C.3.3 Máxima Reserva de Potência Reativa - PMO

wp = 0.00000 wq = 100.00000

Resultados das barras

Límite da restrição funcional P = 1.00000 Límite da restrição funcional Q = 1.00000

Número de iterações = 17

#	barra	tensão		geração			carga		custo mult. de Lagrange	
		V(pu)	ang(0)	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qsh(Mvar)	Pd(MW)	Qd(Mvar)	(MW)	(\$/MW) (\$/Mvar)
1	2	1.050	0.00	168.551	29.358	0.000	55.000	17.000	337.101	
2	1	1.044	0.04	0.000	49.999	0.000	3.000	88.000	0.000	
3	1	1.050	-0.05	195.648	21.000	0.000	41.000	21.000	195.648	
4	3	1.045	-1.53	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-5.352 -100.430
5	0	1.039	-3.02	0.000	0.000	0.000	13.000	4.000		-10.865 -100.516
6	1	1.042	-3.34	0.000	20.303	0.000	75.000	2.000	0.000	
7	3	1.034	-2.65	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-9.772 -101.935
8	1	1.050	0.01	399.575	49.968	0.000	150.000	22.000	599.362	
9	1	1.027	-3.61	0.000	9.000	0.000	121.000	26.000	0.000	
10	0	1.027	-4.03	0.000	0.000	0.000	5.000	2.000		-15.158 -103.780
11	3	1.019	-3.91	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-15.500 -104.726
12	1	1.050	-1.91	500.000	64.258	0.000	377.000	24.000	525.000	

13	0	1.025	-3.30	0.000	0.000	0.000	18.000	2.300	-13.039	-103.732	
14	0	1.019	-3.42	0.000	0.000	0.000	10.500	5.300	-13.714	-104.612	
15	0	1.033	-2.19	0.000	0.000	0.000	22.000	5.000	-8.421	-102.699	
16	0	1.045	-2.68	0.000	0.000	0.000	43.000	3.000	-9.612	-100.468	
17	0	1.041	-2.17	0.000	0.000	0.000	42.000	8.000	-7.952	-101.191	
18	0	1.050	-5.63	0.000	0.000	11.025	27.200	9.800	-19.754	-101.248	
19	0	1.006	-6.94	0.000	0.000	0.000	3.300	0.600	-28.329	-106.263	
20	0	0.990	-7.11	0.000	0.000	0.000	2.300	1.000	-30.559	-108.828	
21	3	1.018	-7.02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-29.932	-110.916	
22	3	1.016	-6.96	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-29.842	-111.286	
23	0	1.016	-7.04	0.000	0.000	0.000	6.300	2.100	-30.359	-111.459	
24	3	1.028	-7.68	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-34.781	-112.982	
25	0	1.023	-11.98	0.000	0.000	6.173	6.300	3.200	-52.952	-125.093	
26	3	0.977	-7.34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-33.481	-112.271	
27	0	1.013	-6.18	0.000	0.000	0.000	9.300	0.500	-25.492	-107.554	
28	0	1.034	-5.30	0.000	0.000	0.000	4.600	2.300	-20.621	-105.638	
29	0	1.050	-4.71	0.000	0.000	0.000	17.000	2.600	-17.124	-104.110	
30	0	1.007	-12.49	0.000	0.000	0.000	3.600	1.800	-57.654	-127.548	
31	0	0.991	-13.12	0.000	0.000	0.000	5.800	2.900	-63.703	-130.635	
32	0	1.017	-12.40	0.000	0.000	0.000	1.600	0.800	-57.874	-127.569	
33	0	1.015	-12.43	0.000	0.000	0.000	3.800	1.900	-58.381	-127.822	
34	3	0.966	-8.24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-40.461	-117.926	
35	0	0.974	-8.01	0.000	0.000	0.000	6.000	3.000	-38.505	-116.643	
36	3	0.985	-7.76	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-36.124	-115.238	
37	3	0.993	-7.54	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-34.306	-114.181	
38	0	1.016	-6.78	0.000	0.000	0.000	14.000	7.000	-28.817	-111.041	
39	3	0.992	-7.59	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-34.642	-114.310	
40	3	0.984	-7.81	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-36.409	-115.364	
41	0	1.030	-7.85	0.000	0.000	0.000	6.300	3.000	-30.492	-112.814	
42	0	0.993	-9.13	0.000	0.000	0.000	7.100	4.000	-39.718	-117.122	
43	0	1.050	-5.07	0.000	0.000	0.000	2.000	1.000	-19.798	-106.571	
44	0	1.024	-6.12	0.000	0.000	0.000	12.000	1.800	-25.249	-108.961	
45	3	1.050	-4.04	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-14.699	-103.718	
46	3	1.050	-5.06	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-19.809	-107.253	
47	0	1.028	-6.40	0.000	0.000	0.000	29.700	11.600	-26.190	-109.973	
48	3	1.025	-6.51	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-26.944	-110.294	
49	0	1.027	-6.43	0.000	0.000	0.000	18.000	8.500	-26.046	-110.035	
50	0	1.017	-6.63	0.000	0.000	0.000	21.000	10.500	-27.670	-110.420	
51	0	1.050	-5.26	0.000	0.000	0.000	18.000	5.300	-19.459	-105.333	
52	0	1.017	-6.12	0.000	0.000	0.000	4.900	2.200	-26.339	-108.190	
53	0	1.005	-6.72	0.000	0.000	6.366	20.000	10.000	-30.269	-109.725	
54	0	1.023	-5.91	0.000	0.000	0.000	4.100	1.400	-25.019	-107.811	
55	0	1.050	-4.78	0.000	0.000	0.000	6.800	3.400	-18.081	-105.085	
56	0	0.985	-9.48	0.000	0.000	0.000	7.600	2.200	-42.305	-117.346	
57	0	0.976	-9.98	0.000	0.000	0.000	6.700	2.000	-45.198	-118.230	
Total:				1263.773	243.887	23.564	1250.800	336.000	1657.110		

Resultados dos geradores

#	barra	tensão		geração(MW)				geração(MVAR)			
		tipo	V(pu)	ang(0)	Pgmin	Pg	Pgmax	Pgesp	Qgmin	Qg	Qgmax
1	2	1.050	0.00	0.00	168.55	500.00	0.00	-150.00	29.36	150.00	0.00
2	1	1.044	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	-50.00	50.00	50.00	0.00
3	1	1.050	-0.05	0.00	195.65	500.00	500.00	-60.00	21.00	60.00	0.00
6	1	1.042	-3.34	0.00	0.00	0.00	0.00	-35.00	20.30	35.00	0.00
8	1	1.050	0.01	0.00	399.57	500.00	276.80	-140.00	49.97	200.00	30.00
9	1	1.027	-3.61	0.00	0.00	0.00	0.00	-9.00	9.00	9.00	0.00
12	1	1.050	-1.91	0.00	500.00	500.00	500.00	-155.00	64.26	155.00	0.00

Resultados dos trafos

da barra p/ barra tap side

tap side		nontap side			tap		Tensão
min	atual	esp	máx	espec	atual		
4	18	0.900	0.989	1.000	1.100	1.000	1.045
4	18	0.900	0.989	1.000	1.100	1.000	1.045
21	20	0.900	1.037	1.000	1.100	1.000	1.018
24	26	0.900	1.056	1.000	1.100	1.000	1.028
7	29	0.900	0.973	1.000	1.100	1.000	1.034
34	32	0.900	0.911	1.000	1.100	1.000	0.966
11	41	0.900	0.950	1.000	1.100	1.000	1.019
15	45	0.900	0.979	1.000	1.100	1.000	1.033
14	46	0.900	0.958	1.000	1.100	1.000	1.019
10	51	0.900	0.970	1.000	1.100	1.000	1.027
13	49	0.900	0.967	1.000	1.100	1.000	1.025
11	43	0.900	0.962	1.000	1.100	1.000	1.019
40	56	0.900	0.991	1.000	1.100	1.000	0.984
39	57	0.900	0.998	1.000	1.100	1.000	0.992
9	55	0.900	0.971	1.000	1.100	1.000	1.027

Resultados dos Ros

ro_min	ro	ro_máx
0.01000	2951.81740	5000.00000
1.30000	2.13887	5000.00000

Valor de alfa = 1.00000000
 Valor de gama = 1.00000000
 Delta Epsilon P = 1.0000000000
 Delta Epsilon Q = 1.0000000000
 Desvio quadrático da tensão = 0.056628
 Desvio da Potência ativa = 5.956777
 Desvio da Potência reativa = 2.138868
 Custo de geração de potência ativa = 165711.0344
 Perda de potência ativa nas LTs = 12.9725
 Perda de potência reativa nas LTs = -68.5495

Apêndice D

Exemplo aplicado a um sistema de quatro barras

Neste apêndice é apresentado um exemplo de aplicação do problema de otimização multi-objetivo descrito no Capítulo 4. Para ilustrar o exemplo é utilizado o sistema teste de 4 barras e 4 linhas mostrado abaixo. Os dados de linha e as cargas por barra aparecem na Tabela (D.1), enquanto que os limites de geração e o custo dos geradores aparecem na Tabela (D.2).

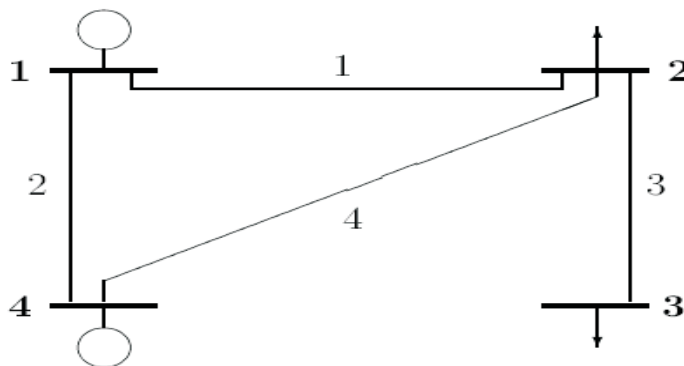


Figura D.1: Sistema de 4 barras

Dados de Linha				
Linha	De	P/.	x(pu)	Lim. (MW)
1	1	2	0,2	± 700
2	1	4	0,3	± 300
3	2	3	0,2	± 700
4	2	4	0,4	± 130

Dados de Barra		
Barras	Carga MW	Carga Mvar
1	0	0
2	150	65
3	100	43
4	0	0

Tabela D.1: Dados de Linha e Dados de Carregamento

Dados dos Geradores (P_{g_i} em MW e Q_{g_i} em Mvar)			
Gerador	Curva de Custo	Limites	
Barra 1 (G1)	$F_1(P_{g_1}) = 0,00241P_{g_1}^2 + 7,92P_{g_1}$	$10 \leq P_{g_1} \leq 700$	$-50 \leq Q_{g_1} \leq 50$
Barra 2 (G2)	$F_2(P_{g_2}) = 0,00075P_{g_2}^2 + 7,00P_{g_2}$	$10 \leq P_{g_2} \leq 700$	$-50 \leq Q_{g_2} \leq 65$

Tabela D.2: Dados dos Geradores

O problema de otimização multi-objetivo (4.8, D.1) é aplicado ao sistema de 4 barras. Este exemplo tem a finalidade de mostrar o grande número de soluções viáveis que pode ser encontrado entre os pontos ótimos e o efeito dos fatores de ponderação sobre o problema, além de mostrar de uma forma simples a solução e análise do problema de FPO MO.

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } \sum_{i=1}^n \gamma_i (V_i - V_i^{esp})^2 + w_P \rho_P + w_Q \rho_Q \\
& \text{sujeito a } P_{g_i} - P_{d_i} - P_i(V, \delta, a) = 0 \\
& \quad Q_{g_i} - Q_{d_i} - Q_i(V, \delta, a) = 0 \\
& \quad V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\
& \quad P_{g_i}^{\min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{\max} \\
& \quad Q_{g_i}^{\min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{\max} \\
& \quad \rho_P^{\min} \leq \rho_P \leq \rho_P^{\max} \\
& \quad \rho_Q^{\min} \leq \rho_Q \leq \rho_Q^{\max} \\
& \quad \sum_{i \in G_P} \alpha_i |P_{g_i} - P_{g_i}^{esp}| \leq \rho_P \Delta \epsilon_P \\
& \quad \sum_{i \in G_Q} \beta_i |Q_{g_i} - Q_{g_i}^{esp}| \leq \rho_Q \Delta \epsilon_Q
\end{aligned} \tag{D.1}$$

onde

$$P_i = V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

e

$$Q_i = V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

Os dados de entrada, além dos apresentados nas tabelas (D.1 e D.2), são:

- $V_i^{esp} = 1,0 pu$;
- $P_{g_i}^{esp}$ e $Q_{g_i}^{esp}$ são obtidos de soluções do programa Flupot;
- $V_i^{\min} = 0,95 pu$ e $V_i^{\max} = 1,05 pu$;
- $\rho_P^{\min} = 10^{-4} pu$ e $\rho_P^{\max} = 10^4 pu$;
- $\rho_Q^{\min} = 10^{-4} pu$ e $\rho_Q^{\max} = 10^4 pu$;

- As variáveis $\gamma, \alpha, \beta, \Delta\epsilon_P$ e $\Delta\epsilon_Q$ são unitárias.

D.1 Mínimo Desvio de Tensão, Mínimo Custo de Geração de Potência Ativa e Máxima Reserva Especificada de Potência Reativa

Como explicado anteriormente no Capítulo 5, é necessária uma solução ótima mono-objetivo para utilizar como valor especificado de potência ativa e/ou reativa e estabelecer um determinado objetivo que se deseje alcançar. Os índices de desempenho escolhidos foram o mínimo custo de geração de potência ativa e a máxima reserva de potência reativa. O índice de desempenho máxima reserva de potência reativa é obtido especificando Q_g^{esp} como $Q_g^{med} = \frac{Q_g^{max} + Q_g^{min}}{2}$. Foi realizada uma simulação no Flupot otimizando o custo do sistema, sendo representado como Caso Base. Outro Caso Base é o mínimo desvio de tensão de V^{esp} com os fatores de ponderação w_P e w_Q nulos, ou seja, os casos bases são soluções ótimas mono-objetivo. Abaixo estão representadas as soluções utilizadas como Caso Base.

- Mínimo Custo de Geração de Potência Ativa (Flupot)

```

-----
PROGRAMA DE FLUXO DE POTENCIA OTIMO - FLUPOT - V5.1 - 12/2000
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA
-----

Sumario da Funcao Objetivo e das Variaveis

Funcao Objetivo:
Minimo custo de geracao ativa

Variaveis:
Potencia ativa gerada
Potencia reativa gerada
Tensao em barra PV
Tap do trafo do conversor

SUMARIO DO CASO
CARGA TOTAL = 250.0 MW 108.0 MVAR
GERACAO TOTAL = 250.0 MW 109.7 MVAR ( 109.7 , .0 )
PERDA TOTAL = .0 MW 1.7 MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA = 1802.70185160
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA = .00000000

CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS AC DO SIST. * AREA 1 *

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
BARRA TENSAO GERACAO INJ EQV FATOR CARGA LINK DC SHUNT
NUM. TIPO MOD/ MW/ MW/ GER % MW/ MW/ MVAR/
NOME ANG MVAR MVAR EQV % MVAR MVAR EQUIV
CE MVAR
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
1 2 1.001 10.1 .0 .0 .0 .0 .0
barra 1 .0 47.4 .0 .0 .0 .0 .0

```

2	0	1.000	.0	.0	.0	150.0	.0	.0
barra 2			-.1	.0	.0	65.0	.0	.0
3	0	.999	.0	.0	.0	100.0	.0	.0
barra 3			-.2	.0	.0	43.0	.0	.0
4	1	1.002	239.9	.0	.0	.0	.0	.0
barra 4			.2	62.4	.0	.0	.0	.0

RELATORIO DE GERADOR * AREA 1 *

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  BARRA      TENSÃO      GERACAO      LIM.,/, PARTIC  BARRA
NUM.  TIPO  MOD      MIN      MW      MAX  MW  GER  CONT.
  NOME      ANG      MIN  MVARMAX  MVAR  EQUIV
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  1      2  1.001  10.0  10.1  700.0  .0  1
barra 1      .0 -50.0  47.4  50.0  .0
  4      1  1.002  10.0  239.9  700.0  .0  4
barra 4      .2 -50.0  62.4  65.0  .0

```

- Mínimo Desvio de Tensão de 1 pu (PMO)

$$- V_i^{esp} = 1 \text{ pu}$$

$$- P_{g_i}^{esp} = [10.1, 239.9];$$

$$- Q_{g_i}^{esp} = [47.4, 62.4].$$

CASO BASE

```

=====
|                               Resultados das barras                               |
=====
| Limite da restrição funcional P =  1.00000  Limite da restrição funcional Q =  1.00000 |
| Número de iterações =  10                                                           |
=====
  barra  tensão      geração      carga      custo mult. de Lagrange
#  tipo V(pu) ang(0)  Pg(MW)  Qg(Mvar) Qsh(Mvar) Pd(MW)  Qd(Mvar)  (MW)  ($/MW) ($/Mvar)
-----
  1  2  1.001  0.00  127.672  46.808  0.000  0.000  0.000  10.114
  2  0  0.999  -0.18  0.000  0.000  0.000  150.000  65.000  0.000  -0.001
  3  0  0.999  -0.29  0.000  0.000  0.000  100.000  43.000  0.000  -0.001
  4  1  1.001  0.04  122.328  62.464  0.000  0.000  0.000  8.564
-----
Total:                250.000  109.272  0.000  250.000  108.000  18.678
=====
|                               Resultados dos geradores                               |
=====
  barra  tensão      Geração(MW)      geração(MVAR)
#  tipo V(pu) ang(0)  Pgmin  Pg  Pgmax  Pgesp  Qgmin  Qg  Qgmax  Qgesp
-----
  1  2  1.001  0.00  10.00  127.67  700.00  10.10  -50.00  46.81  50.00  0.00
  4  1  1.001  0.04  10.00  122.33  700.00  239.90  -50.00  62.46  65.00  7.50
-----
|                               Resultados dos Ros                               |
| wp =  0.00000  wq =  0.00000  |
=====

```

ro_min	ro	ro_máx
0.00001	173.59432	5000.00000
0.00001	50.02991	5000.00000

Desvio quadrático da tensão = 0.000004 (puV)
 Desvio da Potência ativa = 2.351447 (puMW)
 Desvio da Potência reativa = 1.017721 (puMVAR)
 Custo de geração de potência ativa = 1867.7746 (\$)
 Perda de potência ativa nas LTs = -0.0000 (MW)
 Perda de potência reativa nas LTs = 1.2721 (MVAR)

Nota-se que as duas soluções consideradas como Casos Base são diferentes sob o ponto de vista de geração ativa e reativa, custo do sistema e perdas de potência reativa, embora o perfil de tensão das soluções seja praticamente igual. Na solução do PMO os parâmetros ρ_P e ρ_Q são muito maiores que os desvios de potência ativa e reativa devido aos pesos serem nulos.

Através do programa computacional multi-objetivo (PMO) pode-se obter soluções intermediárias entre estas soluções ótimas, conhecidas como soluções internas ao Conjunto de Pareto. Também pode-se encontrar a solução ótima de mínimo custo. Para obter estas soluções intermediárias, será realizada a variação dos pesos w_P e/ou w_Q , ponderando mais o desvio de potência ativa ou o desvio de potência reativa, ou ambos os desvios, todos em relação ao desvio de tensão.

Como é feita a especificação dos pesos?

É muito difícil saber os valores dos pesos “a priori” que terão sensibilidade ao problema, por isto é feita a variação dos pesos para saber em que região deve-se analisar o problema. Esta sensibilidade depende do sistema utilizado e das potências ativa e reativa especificadas.

Como o sistema alcança o valor de potência especificada?

Com o aumento do peso, este faz o parâmetro ρ tender a diminuir. Como o parâmetro ρ é o limite superior dos índices de desempenho transformados em restrições e este tende a diminuir, ocorre um estreitamento do desvio de potência, conseqüentemente levando a solução ótima a se aproximar dos valores especificados de potência. Outro ponto importante é se os valores especificados de tensão, potência ativa e potência reativa são soluções factíveis. Caso não sejam, como no exemplo mostrado para a máxima reserva de potência reativa, espera-se o menor desvio deste ponto.

A tabela (D.3) mostra os resultados do sistema de 4 barras ao variar o peso w_P , mantendo o peso w_Q nulo. Nesta situação, devido ao peso w_Q ser nulo, o parâmetro ρ_Q não é otimizado na função objetivo. Não pode-se esperar valor algum do parâmetro ρ_Q , apenas sabe-se que este pode ter qualquer valor (entre ρ_Q^{min} e ρ_Q^{max}) superior ao desvio de potência reativa, satisfazendo a restrição de desigualdade de desvio de potência reativa. Pode-se notar que a potência ativa P_{g_i} atingiu o seu respectivo valor especificado (Flupot: $P_{g_1}^{esp} = 10.1$ e $P_{g_1}^{esp} = 239.9$) em $w_P = 0.0001$. Para valores de w_P maiores que 0.001 o desvio de potência permanece praticamente constante. A região em que houve uma maior sensibilidade entre o peso w_P e o desvio de potência ativa foi em $0.00001 \leq w_P \leq 0.0001$. Se w_P variar nesta faixa de valores serão encontradas inúmeras soluções com distribuições de geração de potência ativa diferentes. Os valores de ρ^{min} são definidos como 0.01 MW (0.0001 pu), ou seja,

um valor aceitável para o desvio de potência especificada. Caso houvesse problema de convergência, o parâmetro ρ^{min} deveria ser aumentado.

A tabela (D.4) apresenta os resultados da variação do fator de ponderação w_Q mantendo w_P nulo. Através dessa variação ocorreu um decréscimo nas perdas de potência reativa e no desvio de potência reativa e um acréscimo no desvio de tensão.

A tabela (D.5) apresenta os resultados da variação simultânea dos pesos w_P e w_Q . O aumento dos pesos resultou no ponto de mínimo custo com um desvio de potência reativa um pouco inferior à solução encontrada com apenas w_P ativo. Para isto houve o intercâmbio entre o desvio de potência reativa e o desvio de tensão, isto é, um decréscimo no desvio de potência reativa só pôde ser obtido através do aumento de um outro índice (desvio de tensão ou desvio de potência ativa). Como o desvio de potência ativa ficou igual, ocorreu um aumento do desvio de tensão. Esta é a característica do Conjunto de Pareto.

Desvio de Tensão e Mínimo Custo do Sistema												
w_P ativo e w_Q nulo												
w_P	0	0.000001	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
w_Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1 (pu)	1.0007	1.0007	1.0007	1.0008	1.0007	1.0008	1.0008	1.0008	1.0008	1.0008	1.0008	1.0008
V_2 (pu)	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945	0.99945
V_3 (pu)	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859	0.99859
V_4 (pu)	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012
P_{g1} (MW)	127.67	126.97	121.33	10	10.161	10.069	10.066	10.055	10.073	10.106	10.101	10.092
P_{g2} (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{g3} (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{g4} (MW)	122.33	123.03	128.67	240	239.84	239.93	239.93	239.95	239.93	239.89	239.9	239.91
Q_{g1} (Mvar)	46.808	46.81	46.818	49.989	47.086	49.989	49.972	49.984	49.983	49.998	49.999	49.995
Q_{g2} (Mvar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_{g3} (Mvar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_{g4} (Mvar)	62.464	62.463	62.465	59.74	62.644	59.74	59.756	59.744	59.745	59.73	59.729	59.733
p_P (MW)	17359	3744.7	367.23	0.0012429	0.46073	0.0010023	0.0010006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
p_Q (Mvar)	5003	5067.6	5159.2	81256	6869.4	153260	34346	51510	46421	116910	34120	52986
Desvio de Tensão (pu)	4.3791E-06	4.3791E-06	4.379E-06	4.3128E-06	4.379E-06	4.3128E-06	4.3131E-06	4.3129E-06	4.3129E-06	4.3126E-06	4.3125E-06	4.3126E-06
Desvio de P_g (MW)	235.14	233.74	222.46	0.19979	0.12286	0.062447	0.068069	0.090732	0.054491	0.012061	0.0016686	0.015446
Desvio de Q_g (Mvar)	101.77	101.77	101.78	102.23	102.23	102.23	102.23	102.23	102.23	102.23	102.23	102.23
Custo do Sist.	1867.8	1867.1	1861.9	1759.5	1759.7	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6
Perdas P (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdas Q (Mvar)	1.2721	1.2732	1.2827	1.729	1.7308	1.7285	1.7286	1.7286	1.7285	1.7283	1.7283	1.7284

Tabela D.3: Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Desvio de Potência Ativa - variação do Peso w_P

Desvio de Tensão e Máxima Reserva de Potência Reativa												
w _P nulo e w _Q ativo												
w _P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w _Q	0	0.000001	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
V ₁ (pu)	1.0007	1.0007	1.0007	1.0007	1.0007	1.0008	1.0011	1.0038	1.0293	1.0496	1.0496	1.0496
V ₂ (pu)	0.99945	0.99944	0.99944	0.99945	0.99945	0.99948	0.99976	1.0025	1.028	1.0483	1.0483	1.0483
V ₃ (pu)	0.99859	0.99858	0.99858	0.99859	0.99859	0.99862	0.9989	1.0017	1.0272	1.0475	1.0475	1.0475
V ₄ (pu)	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0013	1.0015	1.0043	1.0297	1.05	1.05	1.05
P _{g1} (MW)	127.67	127.69	127.7	127.76	128.59	135.15	166.59	166.61	166.62	166.62	166.62	166.62
P _{g2} (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{g3} (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{g4} (MW)	122.33	122.31	122.3	122.24	121.41	114.85	83.412	83.386	83.381	83.38	83.38	83.38
Q _{g1} (Mvar)	46.808	46.778	46.778	46.81	46.814	46.814	49.479	49.985	49.999	50	50	50
Q _{g2} (Mvar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q _{g3} (Mvar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q _{g4} (Mvar)	62.464	62.495	62.494	62.461	62.457	62.447	59.759	59.246	59.171	59.126	59.126	59.126
ρ _P (MW)	17359	12752	12832	17793	18212	18377	47846	48697	73468	54388	81618	131780
ρ _Q (Mvar)	5003	3184.6	1422.5	101.82	102.61	101.86	101.74	101.73	101.67	101.63	101.63	101.63
Desvio de Tensão (pu)	4.3791E-06	4.3802E-06	4.3801E-06	4.3791E-06	4.3791E-06	4.383E-06	4.7033E-06	4.2152E-05	3.259E-03	9.5496E-03	9.5496E-03	9.5496E-03
Desvio de P _g (MW)	235.14	235.19	235.21	235.31	236.98	250.09	312.98	313.03	313.04	313.04	313.04	313.04
Desvio de Q _g (Mvar)	101.77	101.77	101.77	101.77	101.77	101.76	101.74	101.73	101.67	101.63	101.63	101.63
Custo do Sist.	1867.8	1867.8	1867.8	1867.9	1868.6	1874.6	1903.6	1903.6	1903.6	1903.6	1903.6	1903.6
Perdas P (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdas Q (Mvar)	1.2721	1.2721	1.2721	1.272	1.2707	1.2614	1.2384	1.2311	1.1707	1.1257	1.1257	1.1257

Tabela D.4: Mínimo Desvio de Tensão e Mínimo Desvio de Potência Reativa - variação do Peso w_Q

Desvio de Tensão, Mínimo Custo do Sistema e Máxima Reserva de Potência Reativa												
w _P ativo e w _Q ativo												
w _P	0	0.000001	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
w _Q	0	0.000001	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
V ₁ (pu)	1.0007	1.0007	1.0007	1.0008	1.0008	1.0008	1.0012	1.005	1.0393	1.0496	1.0496	1.0496
V ₂ (pu)	0.99945	0.99944	0.99938	0.99945	0.99946	0.9995	0.99989	1.0037	1.0381	1.0483	1.0483	1.0483
V ₃ (pu)	0.99859	0.99858	0.99852	0.99859	0.99859	0.99863	0.99902	1.0029	1.0373	1.0475	1.0475	1.0475
V ₄ (pu)	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0012	1.0013	1.0016	1.0055	1.0398	1.05	1.05	1.05
P _{g1} (MW)	127.67	127.46	127.27	10	10.105	10.108	10.108	10.1	10.101	10.1	10.1	10.1
P _{g2} (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{g3} (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{g4} (MW)	122.33	122.54	122.73	240	239.89	239.89	239.89	239.9	239.9	239.9	239.9	239.9
Q _{g1} (Mvar)	46.808	46.778	46.745	49.938	50	49.898	50	50	50	50	50	50
Q _{g2} (Mvar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q _{g3} (Mvar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q _{g4} (Mvar)	62.464	62.494	62.528	59.791	59.728	59.83	59.727	59.714	59.602	59.571	59.571	59.571
ρ _P (MW)	17359	8285.7	4706.4	0.0020008	0.0010001	0.0010684	0.0010001	0.0010003	0.001	0.001	0.001	0.001
ρ _Q (Mvar)	5003	3187.2	2130.2	102.23	102.23	102.23	102.23	102.21	102.1	102.07	102.07	102.07
Desvio de Tensão (pu)	4.3791E-06	4.3801E-06	4.3973E-06	4.3139E-06	4.3126E-06	4.3223E-06	5.0596E-06	7.7321E-05	5.9689E-03	9.5491E-03	9.5491E-03	9.5491E-03
Desvio de P _g (MW)	235.14	234.73	234.35	0.19977	0.010624	0.016236	0.015204	0.00096334	0.0010069	0.00099148	0.0009997	0.00099974
Desvio de Q _g (Mvar)	101.77	101.77	101.77	102.23	102.23	102.23	102.23	102.21	102.1	102.07	102.07	102.07
Custo do Sist.	1867.8	1867.6	1867.4	1759.5	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6	1759.6
Perdas P (MW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdas Q (Mvar)	1.2721	1.2725	1.2729	1.729	1.7283	1.7282	1.7268	1.7136	1.602	1.5709	1.5709	1.5709

Tabela D.5: Mínimo Desvio de Tensão, Mínimo Desvio de Potência Ativa e Mínimo Desvio de Potência Reativa - variação dos Pesos w_P e w_Q

Referências Bibliográficas

- Almeida, K. C. (1994). *A General Parametric Optimal Power Flow*. Ph.d. thesis, McGill University, Montreal, Canada.
- Barboza, L. V. (1997). *Análise de Máximo Carregamento de sistemas de Potência via Método de Pontos Interiores*. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Barboza, L. V. (2001). *Análise e Desenvolvimento de Metodologias Corretivas para a Restauração da Solução das Equações da Rede Elétrica*. Tese (doutorado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Berizzi, A., Bovo, C., Innorta, M., and Marannino, P. (2001a). Multiobjective optimization applied to modern power systems. In *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, volume 3, pages 1503–1508.
- Berizzi, A., Bovo, C., and Marannino, P. (2001b). The surrogate worth trade off analysis for power system operation in electricity markets. In *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, volume 2, pages 1034–1039.
- Burchett, R. C., Happ, H. H., and Vierath, D. R. (1984). Quadratically convergent optimal power flow. In *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volume 103, pages 3267–3275.
- Carpentier, J. (1962). Contribution a l'étude du dispatching économique. In *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, volume 3 of 8, pages 431–447.
- Carpentier, J. (1973). Differential injections method: A general method for secure and optimal power flow. In *Anais do PICA Conference*.
- Carvalho, R. J. O. (1999). *Fluxo de Potência Ótimo: Abordagem Multiobjetivo e Aplicação de Transformações Ortogonais*. Tese (doutorado em engenharia elétrica), UFSC - 1999.
- Castrunovo, E. D. (1997). *Solução de Fluxo de Potência Ótimo via Método de Pontos Interiores, com Aplicação de Computação de Alto Desempenho*. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Castrunovo, E. D. (2001). *Aplicação de Métodos de Pontos Interiores no Fluxo de Potência Ótimo Não Linear com Utilização de Processamento de Alto Desempenho*. Tese (doutorado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- Chen, Y. L. (1998). Weighted norm approach for multiobjective var. In *Proceedings of the IEE - part C*, volume 145, pages 369–374.
- Cohon, J. L. (1978). *Multiobjective programming and planning*. Academic Press.
- Dantzig, G. B. (1963). *Linear Programming and Extensions*. PhD thesis, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- Dommel, H. W. and Tinney, W. F. (1968). Optimal power flow solutions. In *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*.
- Fletcher, R. (1987). *Practical Methods of Optimization*. John Wiley e Sons, 2 edition.
- Flupot (2005). In *Manual do Usuário*. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).
- Galiana, F. D. and outros (1983). Optimal power flow dispatch through the continuation method: Variation of functional inequality limits. In *Proc. of IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems*, pages 1192–1197.
- Granville, S. (1994). Optimal reactive dispatch through interior point methods. In *IEEE Transactions on Power Systems*, volume 9, pages 136–146.
- Granville, S., Mello, J. C. O., and Mello, A. C. G. (1994). Application of interior point methods to power flow unsolvability. In *IEEE Transactions on Power Systems*, volume 11, pages 1093–1103.
- Happ, H. H. (1977). Optimal power dispatch. In *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volume 96, pages 820–830.
- Irissari, G. D., Wang, X., and Mokhtari, S. (1997). Maximum loadability of power system using interior point method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1):162–172.
- Karmarkar, N. (1984). A new polynomial algorithm for linear programming. In *Combinatoria 4*, pages 373–395.
- Luenberger, D. G. (1965). *Introduction to Linear and Non Linear Programming*. Addison-Wesley Publish Company, Inc.
- Mamandur, K. R. C. and Chenowete, R. O. (1981). Optimal control of reactive power flow for improvements in voltage profiles and for real power loss minimization. In *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volume 100, pages 3185–3194.
- Maria, G. A. and Findlay, J. A. (1987). A newton optimal power flow for the ontario hidro ems. In *IEEE Transactions on Power Systems*, volume 2, pages 576,584.
- Momoh, J. A. (1996). Interior point methods and variantes for opf. In *Optimal Power Flow: Solution Techniques, Requirements and Challenges, IEEE Tutorial Course*, pages 26–35.
- Moyano, C. F. (2005). *Soluções Ajustadas do Fluxo de Potência Ótimo*. Tese (doutorado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- Nangia, U., Jain, N. K., and Wadhwa, C. L. (1997). Surrogate worth trade off technique for multiobjective optimal power flows. In *Proceedings of the IEE - part C*, volume 144, pages 547–553.
- Nangia, U., Jain, N. K., and Wadhwa, C. L. (1998). Optimal weight assessment based on a range of objectives in a multiobjective optimal load flow. In *Proceedings of the IEE - part C*, volume 145, pages 65–69.
- Ristanovic, P. (1996). Successive linear programming based opf solution. In *Tutorial Course, IEEE/PES Winter Meeting*, pages 1–9.
- Silva, E. L. d. (2001). *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica*. Sagra Luzzatto, 1 edition.
- Silva, E. L. d. and Finardi, E. C. (2003). Parallel processing applied to the planning of hydrothermal systems. In *IEEE Computer Society*, volume 14, pages 721–729.
- Sun, D., Ashey, B., Hughes, A. B. A., and Tinney, W. F. (1984). Optimal power flow by newton approach. In *IEEE Transactions on Power Systems*, volume 103, pages 2864–2875.
- Wadhwa, C. L. and Jain, N. K. (1990). Multiobjective optimal load flow: a new perspective. In *Proceedings of the IEE - part C*, volume 137, pages 13–18.
- Wu, Y. C., D., S., A., and Marsten, R. E. (1993). A nonlinear programming approach based on an interior point method for optimal power flows.
- Wu, Y. C., D., S., A., and Marsten, R. E. (1994). A direct non-linear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2):876–883.