Alessandra Macedo de Souza

ESTUDOS DE CASOS EM SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA POR MEIO DO FLUXO DE POTÊNCIA
ÓTIMO E DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço... 07 / 03 / 05
Ass.:

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa

São Carlos

2005

DEDALUS - Acervo - EESC

31100050867

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira ALESSANDRA MACEDO DE SOUZA

Tese defendida e julgada em 21-02-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **MÁRIO OLESKOVICZ**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **UBIRATAN HOLANDA BEZZERA**
(Universidade Federal do Pará/UFPA)

APROVADA

Prof. Dr. **LEONARDO NEPOMUCENO**
(UNESP/Bauru)

APROVADA

Prof. Associado **CARLOS ROBERTO MINUSSI**
(UNESP/Ilha Solteira)

APROVADA

Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Vice-Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica em exercício.

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*“Porque o Filho do homem veio
buscar e salvar o que se havia perdido”
(Lucas 19:10, Jesus Cristo).*

*“Os homens gostam de ser deuses, mas Aquele que se
colocava como Filho de Deus gostava de ser homem”
(O Mestre da Sensibilidade, Augusto Cury, pg 179).*

*Agradeço a Deus pelo constante
cuidado pela minha vida e pela
realização deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa, por todo apoio, amizade e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, José e Graça, pelo incentivo, carinho e apoio durante este período.

Ao meu irmão e cunhada, Fabrício e Ana Julia, pelo companheirismo e convívio aqui na cidade de São Carlos – SP.

Ao Thiago pela amizade e carinho nesta etapa da minha vida.

Aos amigos do LOSEP que conviveram comigo nestes quatro anos de doutorado, Edmárcio e Vanusa, pelas nossas conversas sobre o trabalho e pela nossa amizade.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC – USP – São Carlos pela colaboração.

À CAPES – Coordenadoria de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudo concedida.

RESUMO

SOUZA, A. M. (2005). *Estudos de Casos em Sistemas de Energia Elétrica por meio do Fluxo de Potência Ótimo e da Análise de Sensibilidade*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Este trabalho propõe estudos de casos em sistemas de energia elétrica por meio do Fluxo de Potência Ótimo (FPO) e da Análise de Sensibilidade em diferentes cenários de operação. Para isso, foram obtidos dados teóricos, a partir de levantamento bibliográfico, que explicitaram os conceitos de otimização aplicados ao sistema estático de energia elétrica. A pesquisa fundamentou-se metodologicamente no método primal-dual barreira logarítmica e nas condições necessárias de primeira-ordem de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) para o problema de FPO, e no teorema proposto por Fiacco (1976) para a Análise de Sensibilidade. Os sistemas de equações resultantes das condições de estacionaridade, da função Lagrangiana, foram resolvidos pelo método de Newton. Na implementação computacional foram usadas técnicas de esparsidade. Estudos de casos foram realizados nos sistemas 3, IEEE 14, 30, 118, 300 barras e no equivalente CESP 440 kV com 53 barras, em que foi verificada a eficiência das técnicas apresentadas.

Palavras-chave: programação não-linear; método primal-dual barreira logarítmica; método de Newton; planejamento da operação; congestionamento na transmissão; alocação de carga.

ABSTRACT

SOUZA, A. M. (2005). *Studies of Cases in Power Systems by Optimal Power Flow and Sensitivity Analysis*. Ph. D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

This work proposes a study of cases in power systems by Optimal Power Flow (OPF) and Sensitivity Analysis in different operation scenarios. For this purpose, theoretical data were obtained, starting from a bibliographical review, which enlightened the optimization concepts applied to the static system of electrical energy. The research was methodologically based on the primal-dual logarithmic barrier method and in the first-order necessary Karush-Kuhn-Tucker conditions to the OPF problem and in the theorem proposed by Fiacco (1976) to the Sensitivity Analysis. The equation sets generated by the first-order necessary conditions of the Lagrangian function, were solved by Newton's method. In the computational implementation, sparsity techniques were used. Studies of cases were carried out in the 3, IEEE 14, 30, 118, 300 buses and in the equivalent CESP 440 kV 53 bus, where the efficiency of the presented techniques was verified.

Keywords: non-linear programming; primal-dual logarithmic barrier method; Newton's method; operation planning; transmission congestion, load allocation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
DE	Despacho Econômico
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
MW	Mega Watts
MVAr	Mega Volt Ampere Reativo
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CESP	Companhia Energética de São Paulo
PECO	Philadelphia Electric Company
pu	por unidade

SUMÁRIO

	RESUMO	v
	ABSTRACT	vi
	LISTA DE BREVIATURAS E SIGLAS	vii
1	INTRODUÇÃO	1
2	HISTÓRICO	6
2.1	Histórico do problema de Fluxo de Potência Ótimo	6
2.1.1	Histórico do método de pontos interiores	11
2.2	Histórico do problema de Análise de Sensibilidade aplicada em sistemas elétricos de potência	15
3	FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO	19
3.1	O problema de Fluxo de Potência Ótimo	19
3.2	O método primal-dual barreira logarítmica	25
3.2.1	Atualização das variáveis	31
3.2.2	Inicialização das variáveis	33
3.3	Algoritmo	34
3.4	Implementação computacional	35
4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	37
4.1	Sensibilidade	37
4.2	Análise de Sensibilidade baseada no teorema de Fiacco	39
4.3	Análise de Sensibilidade aplicada ao problema de Fluxo de Potência Ótimo	42
4.4	Algoritmo	44
4.5	Implementação computacional	44
5	ESTUDOS DE CASOS	46
5.1	Sistema de 3 barras	47

5.1.1	Solução do sistema de 3 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo	49
5.1.1.1	Análise dos multiplicadores de Lagrange, das restrições e da condição de folga complementar	57
5.1.2	Solução do Sistema de 3 barras pela Análise de Sensibilidade	61
5.1.2.1	Perturbação na carga do sistema	66
5.1.2.2	Perturbação no limite de fluxo de potência ativa da linha 2-3	69
5.1.2.3	Perturbação simultânea na carga e no limite de fluxo de potência ativa da linha 2-3	71
5.2	Sistema IEEE 14 barras	74
5.2.1	Solução do sistema IEEE 14 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo	75
5.2.2	Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema	79
5.2.3	Análise de Sensibilidade – Perturbação no limite do fluxo de potência ativa das linhas 2-4 e 10-11	80
5.3	Sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras	82
5.3.1	Solução do sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo	83
5.3.2	Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema	85
5.4	Sistema IEEE 118 barras	87
5.4.1	Solução do sistema IEEE 118 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo	89
5.4.2	Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema	90
5.5	Sistema IEEE 300 barras	93
5.5.1	Solução do sistema IEEE 300 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo	93
5.5.2	Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema	96
5.6	Estudo de alocação de cargas por meio de multiplicadores de Lagrange, utilizando o Despacho Econômico ativo e reativo	98
6	CONCLUSÕES	104
6.1	Perspectiva para a continuidade deste trabalho	106
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICE	114

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Há, aproximadamente, 130 anos surgiram os primeiros circuitos em corrente contínua para fornecimento de energia. Inicialmente, a energia era gerada, em termos comerciais, somente para atender à iluminação pública e aos meios de transporte da época (bondes). Em 1882, a Europa e os Estados Unidos iniciaram o fornecimento de energia, ainda em corrente contínua, para o consumidor privado. A eletricidade passou, então, a fazer parte da vida diária das comunidades, pois novos aparelhos e máquinas começaram a ser desenvolvidos e incluídos nas residências e nos estabelecimentos comerciais.

Poucos anos depois, surgiram os primeiros sistemas que forneciam energia em corrente alternada. Uma competição passou a existir entre os defensores da corrente contínua e os da corrente alternada. Esta última prevaleceu devido à invenção do transformador. Os sistemas em corrente alternada se multiplicaram rapidamente. Com o aumento da demanda, esses sistemas, que até então operavam isoladamente, passaram a se interligar, dando origem a um sistema maior, conhecido hoje como Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Um SEP é formado por geradores, transformadores elevadores e abaixadores, linhas de transmissão, alimentadores de distribuição etc., cuja finalidade é suprir a demanda gerando e transmitindo energia até os centros consumidores ao menor custo ecológico e econômico possível. Os engenheiros, cuja função é projetar e operar tais sistemas, enfrentam constantemente os desafios que a função envolve. Sabe-se que ao contrário da água ou do gás, a eletricidade não pode ser armazenada. A geração de energia deve atender toda a demanda do sistema, durante o dia todo, a uma tensão e frequência determinada. Kirchhoff apresentou matematicamente as equações algébricas

que regem o comportamento físico da rede. Portanto, é função dos engenheiros ou operadores do sistema elétrico verificar, a cada intervalo de tempo determinado, se as condições de operação do SEP estão satisfazendo as restrições físicas e operacionais da rede elétrica. As restrições físicas também são conhecidas como equações de balanço do sistema. Resolvendo essas equações, obtém-se o ponto de operação do sistema elétrico, ou seja, a magnitude e fase das tensões em todas as barras da rede e os fluxos de potência que passam nas linhas de transmissão e nos transformadores.

As variáveis de controle e de estado do sistema, como magnitude das tensões e *tap* de transformadores, possuem limites operacionais que devem ser satisfeitos para uma melhor condição de operação. Em algumas situações, o ponto de operação do sistema pode não atender a essas limitações. Nesses casos, um ajuste nas variáveis de controle deve ocorrer até que se obtenha um novo ponto de operação que satisfaça as condições da rede elétrica. Para os grandes sistemas, o ajuste de muitas variáveis de controle torna-se um processo exaustivo de tentativa e erro. Nesse contexto, o Fluxo de Potência Ótimo (FPO) surge como uma ferramenta que otimiza o processo de ajuste das variáveis, fornecendo um ponto de operação que satisfaz as condições do sistema e, ainda, otimiza um determinado desempenho da rede.

O FPO tem por finalidade encontrar um ponto de operação otimizado para o sistema elétrico, o qual satisfaz todas as restrições físicas e operacionais e ainda, minimiza uma função objetivo. Essa função pode ser de perdas de potência ativa no sistema de transmissão, de custo na geração de energia, de desvio de tensão, entre outras. As restrições são formadas pelas equações de balanço e pelos limites de funções e variáveis de controle e de estado. O grande desafio do FPO é tornar-se tão acessível quanto o fluxo de potência utilizado pelas concessionárias de energia elétrica. Os métodos utilizados até o momento para resolver o FPO usam parâmetros empíricos em sua formulação, e o ajuste desses parâmetros nem sempre ocorre de maneira trivial. Porém, a freqüente utilização do FPO cria no usuário uma experiência no ajuste desses parâmetros, tornando-o uma ferramenta eficiente para estudos de análise de redes.

Dois modelos de FPO foram considerados neste trabalho, um com função objetivo perdas de potência ativa na transmissão e outro com função custo na geração de potência ativa. O conjunto de restrições foi formado por: equações de balanço e limites de geração de potência reativa e ativa, de fluxo de potência ativa em linhas de transmissão, de tensão e de *tap* de transformador. No programa computacional de FPO implementado destacou-se a inclusão da restrição de fluxo de potência ativa na transmissão, pois esta restrição é fundamental nas análises de redes no novo cenário de energia elétrica. Nesse novo cenário desverticalizado, isto é, geração, transmissão e distribuição pertencendo a empresas distintas, surgem as transações comerciais entre geração e carga, porém, sujeitas às limitações do sistema de transmissão.

O FPO foi resolvido pelo método de pontos interiores do tipo primal-dual barreira logarítmica. Nesse método, as restrições canalizadas são desmembradas em duas desigualdades. Variáveis de folga ou excesso são acrescentadas, transformando essas desigualdades em igualdades. Essas variáveis de folga ou de excesso devem ser estritamente positivas, pois são tratadas pela função barreira logarítmica. Associa-se a esse problema uma função Lagrangiana. Condições necessárias de primeira-ordem são aplicadas à função Lagrangiana, gerando um sistema de equações não-lineares, o qual é resolvido pelo método de Newton. O método primal-dual barreira logarítmica utiliza parâmetros empíricos na sua formulação, que são os parâmetros de barreira associados à função barreira logarítmica. Esses parâmetros devem ser ajustados de modo que a convergência do algoritmo seja alcançada.

Conhecendo um ponto de operação otimizado para o sistema elétrico via FPO, pode ser interessante realizar estudos de pós-otimização, ou Análise de Sensibilidade. O ponto de operação obtido por meio do FPO é denominado de caso-base. Partindo do caso-base pode-se obter um novo ponto de operação para o sistema quando perturbações ocorrerem na rede elétrica. Por exemplo, por meio de uma curva de demanda verifica-se que há horas de maior e de menor consumo de energia, variando, dessa forma, o ponto de operação do sistema durante o dia. A partir do caso-base a Análise de Sensibilidade pode ser utilizada para se obter um novo ponto de operação para uma determinada variação de carga, sem a necessidade de executar o FPO. Além das perturbações na carga do sistema, também pode-se variar os limites das restrições, e por meio da Análise de Sensibilidade obter a nova solução.

O teorema da sensibilidade proposto por Fiacco (1976) foi utilizado na determinação do sistema de equações de Análise de Sensibilidade. Esse teorema utiliza a solução do problema original não-perturbado. Aplica as condições necessárias de primeira-ordem e o teorema da folga complementar na solução ótima, gerando um sistema de equações, o qual é resolvido pelo método de Newton. As variáveis são atualizadas e obtém-se, então, a nova solução ótima do problema perturbado. A Análise de Sensibilidade tem a vantagem de não ser um processo iterativo e de não utilizar parâmetros empíricos em sua formulação. O programa computacional de Análise de Sensibilidade implementado foi orientado a FPO, isto é, a função objetivo e restrições consideradas no FPO foram utilizadas na Análise de Sensibilidade.

Neste trabalho se propõe o uso de duas ferramentas: Fluxo de Potência Ótimo e Análise de Sensibilidade. Por meio do FPO e da Análise de Sensibilidade estudos de planejamento da operação do SEP podem ser realizados e respostas rápidas e confiáveis podem ser obtidas para tomadas de decisões. Neste contexto três contribuições destacam-se neste trabalho, as quais serão apresentadas separadamente:

A – A restrição de fluxo de potência ativa no sistema de transmissão é considerada no problema de FPO e de Análise de Sensibilidade. Gerenciar os fluxos de potência na transmissão é de fundamental importância no contexto de mercado de energia, pois as transações comerciais de compra e venda de energia estão sujeitas ao sistema de transmissão. A inclusão desta restrição nas duas ferramentas desenvolvidas proporciona aos operadores condições de avaliar o desempenho do sistema para situações de congestionamento.

B – Incorpora-se ao problema de FPO perturbações nas restrições de igualdade e de desigualdade ativas na solução. O FPO perturbado é resolvido por Análise de Sensibilidade. As três condições utilizadas por Fiacco (1976) para construir o sistema de sensibilidade foram consideradas. Essas três condições são satisfeitas no caso-base e são dadas por:

- a) gradiente da função Lagrangiana nulo;
- b) restrições de igualdade satisfeitas;
- c) folga complementar satisfeita.

Utilizando essas condições, obtém-se um sistema de equações para estudos de Análise de Sensibilidade cuja matriz é esparsa e simétrica de posição, mas não de valores.

C – Realizam-se estudos de casos de planejamento da operação do SEP, utilizando as ferramentas de FPO e de Análise de Sensibilidade. Com a utilização dessas duas ferramentas, os estudos de casos podem ser realizados de maneira mais abrangente, já que pode-se conhecer um ponto de operação otimizado por meio do FPO e estimar novas soluções para o FPO perturbado por meio da Análise de Sensibilidade. Em alguns casos, quando as perturbações são incluídas, obter a nova solução do sistema por meio do FPO, pode ser uma tarefa trabalhosa, pois devido às atribuições dadas aos parâmetros empíricos e às características de não-linearidade e não-convexidade do FPO pode-se conduzir o sistema para a região ineficiente. Nesse contexto, a Análise de Sensibilidade, por utilizar como informação inicial o caso-base, estima novas soluções na vizinhança desse ponto. Fornecendo, desta maneira, soluções que satisfazem as restrições do problema.

Neste trabalho adotou-se a seguinte organização: no Capítulo 2 será apresentado o histórico dos problemas de Fluxo de Potência Ótimo e Análise de Sensibilidade. No Capítulo 3, o problema de FPO e o método primal-dual barreira logarítmica utilizado para resolvê-lo. No próximo capítulo tem-se a formulação matemática da Análise de Sensibilidade implementada. No Capítulo 5 serão apresentados os testes realizados. Os seguintes sistemas foram utilizados: 3 barras, IEEE 14, 30, 118 e 300 barras e, o sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras. Para cada sistema os resultados obtidos via FPO e Análise de Sensibilidade serão apresentados. Finalmente, o último capítulo apresenta as conclusões finais e as perspectivas de continuidade deste trabalho.

Capítulo 2

HISTÓRICO

Neste capítulo será apresentado um levantamento bibliográfico do problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) e de Análise de Sensibilidade. O histórico sobre o problema de FPO foi dividido em duas partes. Na primeira parte tem-se uma visão geral da definição do problema e de métodos utilizados na resolução deste, desde sua formulação inicial até o presente momento. Na segunda parte será apresentado o histórico do método de pontos interiores. Destacou-se esse método porque uma variante dele foi utilizada na solução do problema de Fluxo de Potência Ótimo neste trabalho.

2.1 Histórico do problema de Fluxo de Potência Ótimo

O problema de FPO surgiu no início da década de 60, quando Carpentier (1962), partindo da definição do problema de Despacho Econômico, elaborou o modelo do problema de FPO. A partir de então, o problema de Despacho Econômico passou a ser um caso particular do FPO. Em geral, o FPO é um problema de programação não-linear, não-convexo e de grande porte, cujo desenvolvimento segue de perto os avanços das técnicas de otimização. Porém, até o presente momento não há nenhuma abordagem realmente robusta que satisfaça as necessidades dos centros de operação das concessionárias de energia elétrica. No modelo do FPO um objetivo é estabelecido, como, por exemplo, minimizar as perdas de potência ativa na transmissão, sujeitas às restrições físicas e operacionais do sistema elétrico.

Desde a formulação proposta por Carpentier (1962) observou-se um crescente interesse em problemas de FPO, pelo fato de ser uma ferramenta para análises de redes na qual se tem como resultado um ponto de operação otimizado. Na literatura

especializada tem-se uma grande variedade de técnicas aplicadas à resolução do problema de FPO, como por exemplo, técnicas de programação linear, programação não-linear, programação quadrática, entre outras.

Uma das primeiras propostas para resolver esse problema foi feita por Dommel & Tinney (1968). Nesse artigo, os autores propuseram o método do gradiente reduzido, que consiste em um algoritmo de passo descendente aplicado ao subespaço tangente das equações não-lineares do fluxo de potência. Nesse método, após mudanças nas variáveis de controle, as equações do fluxo de potência são resolvidas pelo método de Newton. As restrições de desigualdade associadas às variáveis de controle são tratadas por projeção, e as dependentes ou funcionais, pelo método da função penalidade. Tem uma eficiência de primeira ordem para minimização da função objetivo. Apesar do seu rigor matemático, essa abordagem apresenta convergência lenta, “zigzagueando” próxima à solução ótima. Há, ainda, limitações na determinação do passo nas variáveis de controle e sensibilidade quanto ao tamanho do passo do gradiente – elementos capazes de comprometer o processo de convergência.

Sasson (1969) apresentou uma abordagem para solução do problema de FPO, na qual utiliza dois métodos: o método de Powell, para problemas de otimização com restrição, e o método de Fletcher-Powell, que é uma técnica de minimização irrestrita. O problema de FPO é escrito de acordo com o método de Powell, o qual torna-o um problema irrestrito. Esse método acrescenta novas variáveis ao problema, as quais são reduzidas durante o processo iterativo. Aplica-se, então, o método de Fletcher-Powell, que calcula o gradiente da função gerada pelo método de Powell. As restrições de igualdade são consideradas durante todo o processo iterativo, enquanto que, somente as restrições de desigualdade violadas fazem parte do processo. O algoritmo proposto utiliza um programa de fluxo de potência antes de dar início a técnica de otimização. Essa metodologia forneceu uma solução factível para o problema de FPO. Testes foram realizados no sistema IEEE 30 barras com o objetivo de encontrar um ponto de operação mais econômico para a dada condição de carga. Todo o processamento foi realizado em um computador IBM 7094 e foi necessário aproximadamente 2 minutos para alcançar a solução. Isso incluiu a leitura e impressão de dados, a construção da matriz admitância, o cálculo do fluxo de potência e o processo de otimização.

Sasson *et al.* (1973) aplicaram o método das penalidades no problema de FPO. Esta técnica tem o objetivo de transformar o problema restrito em irrestrito, penalizando todas as restrições de igualdade e de desigualdade violadas. É uma técnica quadrática em que as variáveis são todas atualizadas simultaneamente, usando a matriz Hessiana da função objetivo penalizada. A cada iteração do método, os valores das penalidades são aumentados e a matriz Hessiana da função penalidade é calculada. O processo é repetido até que todas as restrições sejam satisfeitas. Técnicas de esparsidade são aplicadas à matriz Hessiana. Para grandes fatores de penalidade, a matriz Hessiana pode se tornar mal condicionada, comprometendo a convergência do processo de otimização. Esse foi o primeiro trabalho a utilizar matriz Hessiana na resolução do FPO.

Com o objetivo de corrigir as deficiências do método proposto por Dommel & Tinney (1968), Rashed & Kelly (1974) apresentaram uma abordagem de segunda-ordem para atualizar as variáveis de controle do problema. Nesse trabalho, o método do gradiente utilizado para resolver o subsistema formado pelas derivadas da função Lagrangiana em relação às variáveis de controle foi substituído pela matriz Hessiana da função Lagrangiana. As restrições de desigualdade foram tratadas como no método de Dommel & Tinney (1968). Com o objetivo de minimizar oscilações em torno da solução ótima, um fator de aceleração é introduzido na atualização das variáveis de controle. Um sistema de 5 barras foi utilizado e o algoritmo foi implementado em um computador IBM 360/67.

Mamandur & Chenoweth (1981) apresentaram um problema de FPO cujo objetivo era ajustar as variáveis de estado tal que as perdas do sistema fossem minimizadas e todas as restrições físicas e operacionais fossem satisfeitas. Por se tratar de um problema de despacho ótimo de potência reativa, assumiu-se que o despacho de potência ativa foi executado por um outro algoritmo antes de dar início ao processo de despacho de potência reativa. A abordagem proposta nesse artigo é uma extensão do método de Newton-Raphson aplicado ao problema de fluxo de potência. No fluxo de potência, a matriz Jacobiana relaciona a potência ativa e reativa à magnitude e fase da tensão. O inverso dessa matriz é chamado de matriz sensibilidade. Utilizando os valores da matriz sensibilidade, o método lineariza a função objetivo e as restrições do problema. Então, emprega uma técnica de programação linear dual para atualizar as

variáveis de estado do problema. A eficiência da abordagem foi apresentada utilizando os sistemas Ward-Hale 6 barras e o IEEE 30 barras modificado.

O trabalho de Sun *et al.* (1984) apresentou uma abordagem para solução do problema de FPO tendo como base a formulação de Newton. As restrições de desigualdade são divididas em dois grupos: o das restrições penalizadas e o das restrições ativas na solução. As restrições penalizadas são associadas à função objetivo por meio de termos de penalidade quadráticas, enquanto as restrições ativas são incorporadas ao conjunto ativo. O método do conjunto ativo foi utilizado para identificar as restrições de desigualdade ativas na solução, esse método foi aplicado à restrição de injeção de potência reativa nas barras de controle de reativo. A convergência desse método é de segunda-ordem e sua dificuldade está na identificação das restrições de desigualdade ativas durante o processo iterativo.

No artigo de Kirschen & Meeteren (1988), o problema de FPO foi linearizado e resolvido por meio de programação linear. O problema de FPO é dividido em dois subproblemas, os quais realizam o despacho ótimo de potência ativa e reativa, tornando possível a correção das violações nas magnitudes das tensões. O método preserva as características de confiabilidade e velocidade das tradicionais abordagens da programação linear. Testes foram realizados em sistemas de 10 e 685 barras, nos quais a eficiência do método foi verificada.

Santos *et al.* (1988) apresentaram o método da função Lagrangiana Aumentada para resolver problemas de FPO. O método consiste em caminhar pela região infactível, na qual a cada iteração a função Lagrangiana Aumentada é minimizada em relação às variáveis primais por meio do método de Newton. Os multiplicadores de Lagrange são atualizados com o objetivo de maximizar a função Lagrangiana Aumentada Dual associada ao problema original. Esse método não necessita de parâmetros de penalidade muito elevados e foi considerado como um avanço da técnica proposta por Sun *et al.* (1984).

Com base no trabalho apresentado por Sun *et al.* (1984), Monticelli & Liu (1992) propuseram uma nova abordagem para o método de Newton. O método também utiliza o conjunto de restrições ativas e propõe o uso de um movimento adaptativo de penalidade, o qual assegura que a matriz Hessiana seja definida positiva durante o processo iterativo, sem afetar a convergência do método.

Costa (1997) combinou os trabalhos de Sun *et al.* (1984) e Santos *et al.* (1988) para a solução do problema de FPO com despacho de potência reativa. As restrições de igualdade e de desigualdade são associadas a uma função Lagrangiana Aumentada. As restrições de igualdade são tratadas pelo método de Newton e as de desigualdade, por termos de penalidade e multiplicadores de Lagrange. A proposta apresentada não utiliza a busca pelo conjunto ativo e pode utilizar pontos iniciais ineficazes. A esparsidade da matriz Hessiana foi explorada na implementação computacional. Testes foram realizados em sistemas de 57 e 662 barras com o objetivo de verificar o bom desempenho do método.

Momoh *et al.* (1999a, b) traçaram o progresso das técnicas aplicadas a problemas de FPO. Destacaram os métodos de programação quadrática, programação linear, programação inteira, Newton, pontos interiores, entre outros.

Costa *et al.* (2000) apresentaram uma comparação entre três técnicas de otimização aplicadas ao problema de FPO: conjunto ativo e penalidade; Lagrangiana Aumentada; e o método primal-dual barreira logarítmica. Todas as abordagens são baseadas no método de Newton. Os métodos foram comparados quanto ao valor das perdas ativas na transmissão, geração de potência reativa, número de iterações e tempo de processamento.

Costa & Costa (2000) descreveram uma nova abordagem para solução de problemas de FPO, a qual melhora o desempenho do método de Newton. Os multiplicadores de Lagrange são calculados a partir do sistema linearizado. O artigo compara seus resultados com o método proposto por Sun *et al.* (1984). A principal vantagem desse método é seu tempo de processamento e a economia de memória computacional. Com o objetivo de verificar a eficiência da abordagem, testes foram

realizados nos seguintes sistemas: IEEE 14, 30, 118 barras e no sistema brasileiro de 810 barras.

Sousa *et al.* (2003) apresentaram uma nova abordagem para solução do problema de despacho reativo, a qual também melhora o desempenho do método de Newton. O método divide as restrições de desigualdades em dois grupos: restrições tratadas por penalidade e restrições tratadas pela função barreira. As restrições penalizadas são associadas à função objetivo por meio de termos de penalidade, enquanto as do segundo grupo são tratadas por barreira. O sistema de equações gerado pela condição necessária de primeira-ordem é resolvido pelo método de Newton e pela atualização dos termos de penalidade e de barreira. Testes foram realizados em sistemas de 53 e 118 barras, nos quais se verificou a eficiência do método.

2.1.1 Histórico do método de pontos interiores

Desde a década de 40, os problemas lineares de otimização eram resolvidos pelo método Simplex, proposto por George Dantzig. Esse método não tinha concorrentes até que em 1984, Karmarkar (1984) propôs um novo algoritmo para problemas de programação linear. O método Simplex busca a solução ótima por meio de deslocamentos entre os pontos extremos da região factível. O algoritmo de Karmarkar busca a solução ótima caminhando pelo interior da região factível. Da filosofia deste método vem o termo “pontos interiores”. Esse algoritmo, em seu formato original, é muito complexo, o que levou muitos pesquisadores buscarem variantes para esse método. Abordagens mais simples foram elaboradas, como exemplo podem ser citados os métodos afim-escala, afim-escala dual, primal-dual, entre outros, como mencionados em Matumoto (1996). Extensões do método de pontos interiores aplicadas a problemas de programações não-linear e quadrática apresentam resultados promissores, conforme afirmam Momoh *et al.* (1999a).

Apesar do método de pontos interiores ter surgido no início da década de 80, sua aplicação em sistemas de potência começou somente a partir da década de 90. Um primeiro estudo utilizando o método de pontos interiores aplicado em sistemas de

potência foi apresentado por Clements *et al.* (1991). A técnica foi utilizada para solucionar problemas de estimação de estado. Problemas de despacho ótimo com pontos interiores foi, inicialmente, proposto por Vargas *et al.* (1993). Foi apresentado um método de programação linear sucessiva ao problema de otimização com restrições de segurança. O método empregou uma variação do algoritmo de Karmarkar – algoritmo de pontos interiores dual-afim – para a solução do problema linearizado. Desta forma, foi resolvido o problema clássico de Fluxo de Potência Ótimo, minimizando o custo na geração de potência ativa sujeito a restrições físicas e operacionais do sistema.

Momoh *et al.* (1994) apresentaram o método quadrático estendido de pontos interiores para solução de problemas de programações linear e quadrática. O problema apresentado foi o de despacho ótimo e o de planejamento de reativo, com restrições de segurança e limites de geração de potência e de tensão. O algoritmo cria uma sequência de pontos interiores factíveis, convergindo para a solução ótima factível. Resultados numéricos mostraram que o método proposto foi capaz de convergir de forma mais rápida e obteve um melhor desempenho em termos de tempo computacional quando comparado ao algoritmo Simplex.

Granville (1994) propôs o uso do método de pontos interiores do tipo primal-dual barreira logarítmica para a solução do problema de Fluxo de Potência Ótimo. O problema considerado foi de planejamento de reativo, com restrições de igualdade e de desigualdade. A função objetivo foi a de custo de injeção de reativo exigido na operação do sistema e em um segundo modelo, a de perdas de potência ativa na transmissão. O método primal-dual barreira logarítmica foi aplicado diretamente ao problema original. O método apresentado consiste na transformação das restrições de desigualdades em igualdades, por meio do uso de variáveis de folga ou excesso. Essas variáveis – que devem ser estritamente positivas – são introduzidas na função objetivo por meio da função barreira logarítmica. Associado a esta função tem-se o parâmetro de barreira, o qual tende a zero durante o processo iterativo. A função Lagrangiana é construída e multiplicadores de Lagrange são associados às restrições do problema. As condições necessárias de primeira-ordem são aplicadas à função Lagrangiana, gerando um sistema de equações não-lineares, o qual é resolvido pelo método de Newton. O artigo propõe o cálculo do tamanho do passo utilizado na atualização das variáveis primais e duais. O objetivo desse cálculo é manter as variáveis de folga ou excesso estritamente positivas e

satisfazer as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) para os multiplicadores de Lagrange. O algoritmo apresenta sua maior dificuldade na escolha e na atualização do parâmetro de barreira, pois é o dado empírico do problema. O artigo apresentou resultados numéricos para sistemas de 1.832 e 3.467 barras, nos quais se verificou a eficiência do método.

Wu *et al.* (1994) propuseram um novo algoritmo de pontos interiores primal-dual que utiliza o esquema preditor-corretor para a solução do problema de FPO. Esse esquema é uma variante do método de Newton-Raphson. Nesse artigo dois algoritmos são apresentados: o primal-dual puro e o primal-dual preditor-corretor. Testes foram realizados em sistemas de 9 a 2.423 barras. Minimizou-se as funções de custo na geração de potência e de perdas ativas na transmissão. Testes compararam o desempenho dos dois algoritmos. Observou-se que a convergência do algoritmo com esquema preditor-corretor é mais rápida.

Irisarri *et al.* (1997) detalharam a implementação do método primal-dual e do esquema preditor-corretor para a solução do problema de máximo carregamento do sistema. O máximo carregamento pode ser formulado como um problema de otimização não-linear e estático. O objetivo do problema é determinar o máximo acréscimo de carga que o sistema de potência pode ter enquanto satisfaz as restrições físicas e operacionais da rede. Testes em grandes sistemas mostraram que o método é eficiente para determinar a margem de carregamento do sistema.

No artigo de Torres & Quintana (1998), o problema de FPO foi resolvido pelo método primal-dual de pontos interiores. No modelo do FPO, as tensões foram representadas em coordenadas retangulares, o que resultou em função objetivo e restrições quadráticas. Dessa forma, as vantagens das funções quadráticas foram exploradas, como, por exemplo: matriz Hessiana constante e expansão em série de Taylor até segunda-ordem sem erro de truncamento. Essas vantagens facilitam o uso do esquema preditor-corretor, o qual reduz o número de iterações do problema. Testes foram realizados nos sistemas IEEE 30, 57, 118 e 300 barras. Comparação entre o uso das coordenadas retangular e polar também é apresentada.

Nejdawi *et al.* (2000) fizeram uma combinação de algoritmos envolvendo programação quadrática e pontos interiores na solução do problema de FPO. As condições necessárias de primeira-ordem são aplicadas à função Lagrangiana, gerando um sistema de equações. Com o objetivo de resolver este sistema, o método de Newton é dividido em dois estágios. No primeiro estágio, as equações são linearizadas e interpretadas como as condições de KKT para problemas de programação quadrática. O problema de programação quadrática é modelado, e considerado um subproblema do modelo não-linear original do FPO. O segundo estágio é a solução do problema de programação quadrática via pontos interiores. Testes numéricos indicam que as iterações de ambos os estágios não variam muito com a dimensão do sistema.

Jabr *et al.* (2002) utilizaram um algoritmo primal-dual modificado na solução do problema de FPO. As modificações incluídas no algoritmo são: o uso de um filtro no cálculo do tamanho do passo e a introdução de uma perturbação na diagonal da matriz Hessiana, com o objetivo de direcionar a convergência a um ponto mínimo. Esse método requer um tempo de processamento menor quando comparado aos métodos primais-duais tradicionais, pois resolve uma matriz definida positiva cuja dimensão é igual ao número de variáveis primais do problema. O artigo também aborda um modelo de inclusão de transformadores defasadores em problemas de FPO. Esse modelo torna o uso deste tipo de transformador mais simples. Testes numéricos comprovaram que o uso do método proposto é promissor.

Rider *et al.* (2003) minimizaram as perdas de potência ativa em sistema elétricos por meio de um programa de FPO. O problema de FPO é resolvido pelo método primal-dual com esquema preditor-corretor. Nesse trabalho, os autores propõem a otimização do cálculo do tamanho do passo primal e dual, utilizado na atualização das variáveis. Dois problemas de otimização são elaborados para cada tipo de passo. O método da bissecção é usado para a solução desses problemas. As simulações foram realizadas nos sistemas IEEE 30, 57, 118 e 300 barras, e a convergência foi alcançada em todos os testes.

Com a desregulamentação do setor elétrico, ferramentas como FPO têm sido consideradas como uma alternativa para análises econômicas e técnicas. Xie *et al.* (2004) resolveram o problema de FPO por meio do método de pontos interiores primal-

dual para obter o preço ótimo da potência ativa e reativa em ambiente desregulamentado. Os multiplicadores de Lagrange associados às equações de balanço de potência ativa e reativa desempenham um importante papel no cálculo do preço da eletricidade. Esses multiplicadores podem ser decompostos em vários componentes, os quais refletem os preços dos serviços ancilares. A função objetivo minimizada foi a soma dos custos na geração de potência ativa e reativa. Testes utilizando o sistema IEEE 30 barras foram realizados, nos quais se verificou a eficiência da abordagem.

2.2 Histórico do problema de Análise de Sensibilidade aplicada em sistemas elétricos de potência

Na literatura especializada em FPO, muitas são as abordagens propostas com a finalidade de resolvê-lo. Um programa de FPO fornece como resultado um ponto ótimo de operação para o sistema elétrico. Pode ser interessante para determinados estudos conhecer o quanto este ponto varia devido a perturbações que possam ocorrer no sistema. Esta variação do ponto ótimo pode ser obtida, em algumas situações, via Análise de Sensibilidade, sem a necessidade de executar o programa de FPO para cada perturbação que ocorre no sistema. Neste item será apresentado um histórico sobre Análise de Sensibilidade aplicada a sistemas elétricos de potência.

Peschon *et al.* (1968) apresentaram duas relações de sensibilidade que ocorrem no sistema elétrico de potência: a sensibilidade entre variáveis elétricas, como, por exemplo, as tensões nas barras i e as injeções de reativo nas barras j ; e a sensibilidade do custo de operação em relação à demanda e à geração do sistema. O fluxo de potência é resolvido pelo método de Newton, o qual utiliza a matriz Jacobiana. Conhecendo o ponto de operação do sistema, calcula-se o inverso da matriz Jacobiana. Devido à grande esparsidade desta matriz, uma técnica de fatorização triangular é realizada para obter a inversa. Uma vez calculada a matriz inversa, têm-se as relações de sensibilidade. Essa matriz de sensibilidade é utilizada para analisar o desempenho do sistema diante de perturbações. O problema de FPO, com função objetivo custo e restrições de igualdade, foi considerado. Relações de sensibilidade de primeira e segunda-ordem foram

apresentadas com a finalidade de se obter a variação do valor da função objetivo para uma dada perturbação. Um exemplo numérico detalhado foi apresentado.

Kishore & Hill (1971), utilizando as matrizes de sensibilidade apresentadas no trabalho de Peschon *et al.* (1968), elaboraram uma técnica para alocação ótima de reativo em sistemas de potência. A relação de sensibilidade utilizada nesse artigo é a de tensão em um nó da rede com relação à injeção de reativo em um outro nó. A matriz de sensibilidade é construída no ponto de operação do sistema. Verifica-se todas as tensões que se encontram fora de seus limites preestabelecidos. Com a finalidade de levar os níveis de tensão para valores aceitáveis, deve-se alocar reativos no sistema. As relações lineares entre as tensões e os reativos são usadas para formar o problema de programação linear. A solução do problema fornece o incremento de reativo e o nó da rede no qual este incremento deverá ser instalado. Dessa forma, o perfil de tensão satisfará as condições de operação. O objetivo do problema foi minimizar a capacidade total de reativo instalada no sistema. A técnica proposta mostrou-se eficiente e conseguiu colocar os níveis de tensões dentro de seus limites.

Wojciechowski (1988) dividiu as variáveis do sistema elétrico em dois grupos: variáveis primárias, que são as correntes e tensões nos ramos; e variáveis secundárias, as quais são divididas em variáveis de controle e de estado. O teorema de Tellegen foi aplicado como uma ferramenta para desenvolver um método eficiente de Análise de Sensibilidade. Esse teorema foi formulado, em um primeiro momento, em termos das variáveis primárias e, depois, em termos das variáveis secundárias. Um exemplo de 4 barras foi utilizado para ilustrar a técnica de sensibilidade.

Gribik *et al.* (1990) apresentaram um método e a formulação matemática para Análise de Sensibilidade orientada a problemas de FPO. O FPO utilizado minimizou as perdas de potência ativa, sujeita às restrições de balanço do sistema e aos limites de tensão, de *tap* de transformador e de geração de potência ativa e reativa. Com o objetivo de evitar uma maior complexidade, as restrições de limite de transformadores defasadores e o fluxo de potência nas linhas de transmissão não foram considerados. Conhecendo o ponto ótimo de operação, verifica-se o quanto este ponto varia quando uma perturbação ocorre no sistema. Para isso, uma técnica de Análise de Sensibilidade foi utilizada para obter o novo ponto de operação da rede elétrica. Esta técnica constrói

a função Lagrangiana do problema de FPO perturbado e aplica as condições necessárias de primeira-ordem. Gerando, dessa forma, um sistema de equações, o qual é linearizado no ponto ótimo. As restrições de desigualdade ativas são acrescentadas ao conjunto das restrições de igualdade – as de desigualdade folgadas são desprezadas. A matriz de sensibilidade do sistema é esparsa e simétrica. Testes foram realizados em sistemas de 34 e 1.700 barras, nos quais se perturbou a carga das barras de carga em 1 MW.

Venkatesh *et al.* (1992) afirmaram que a Análise de Sensibilidade está se tornando cada vez mais importante para as empresas de energia. O artigo propõe o uso da Análise de Sensibilidade aplicada a problemas de FPO. Um algoritmo baseado na técnica dos mínimos quadrados é utilizado no cálculo das sensibilidades. O método fornece a sensibilidade da solução ótima em relação às restrições operacionais e de segurança. Os testes foram realizados no sistema 1.700 barras, no qual o objetivo foi encontrar a sensibilidade entre o custo na geração de energia em relação às mudanças nas injeções de potência ativa do sistema.

Gurran & Subramanyan (1999) apresentaram uma aplicação de Análise de Sensibilidade baseada no teorema de Tellegen para um sistema de distribuição radial. Termos de sensibilidade de primeira-ordem foram desenvolvidos em termos da magnitude da tensão e das potências ativa e reativa. Sensibilidades foram calculadas para variações nas cargas ativas e reativas, em uma e em várias barras. O algoritmo foi testado em um sistema radial de 400 V, com 12 barras. Os resultados foram comparados ao fluxo de potência, e o erro obtido foi inferior a 1%.

Bell & Kirirschen (2000) descreveram uma derivação da sensibilidade linear usada no controle de despacho ativo com a finalidade de evitar as violações de tensões. A Análise de Sensibilidade é adicionada a uma ferramenta de suporte de decisão em sistemas de potência. Resultados demonstraram a exatidão e a confiabilidade da abordagem proposta para sistemas exemplos e sistemas reais.

Freire *et al.* (2002) apresentaram uma Análise de Sensibilidade por meio dos multiplicadores de Lagrange. Resolvendo o problema de FPO, o ponto ótimo de operação do sistema é conhecido e chamado de caso-base. Uma perturbação pode ser introduzida em uma restrição do problema, como, por exemplo, nos limites de tensões,

aumento ou diminuição de carga ou geração em alguma barra, entre outras. Utilizando a informação do multiplicador de Lagrange referente ao caso-base, associado à restrição perturbada, pode-se conhecer o novo valor da função objetivo sem a necessidade de resolver o problema de FPO novamente. O artigo também propõe o uso do FPO em um simulador de mercado de energia em ambiente competitivo. Programas de FPO, além de fornecerem um ponto de operação que satisfazem as restrições físicas e operacionais do sistema, minimizando um determinado objetivo, também fornecem os multiplicadores de Lagrange associados às restrições. Esses multiplicadores podem ser interpretados como custos marginais, e do ponto de vista da comercialização de energia podem indicar onde é mais vantajoso o consumo ou a geração de energia.

Aumuller & Saha (2002) propuseram um método de análise de estabilidade de tensão utilizando sensibilidade. Técnicas de gradiente são utilizadas para obter os termos de sensibilidade. O método proposto baseia-se nas relações de sensibilidade entre a geração de potência reativa e a variação na carga. Esse método determina quais os geradores que não devem atingir seus limites operacionais e as barras que possuem maior impacto nestes geradores. O corte de carga nestas barras pode manter a geração de potência reativa longe de seus limites. Para o caso da geração operando no limite, as sensibilidades são calculadas e determina-se se a operação neste limite pode levar o sistema ao colapso. Testes foram realizados no sistema Nordic e Queensland, nos quais se destacou a utilidade do método proposto e sua eficiência quanto as análises de estabilidade de tensão.

Souza *et al.* (2004) utilizaram um programa de Fluxo de Potência Ótimo para gerenciar o fluxo de potência ativa na transmissão. Na situação congestionada – fluxo de potência ativa no limite – verificou-se onde seria mais vantajoso incentivar a alocação de novas cargas no sistema. Esse estudo de planejamento da expansão do SEP foi realizado com base na sensibilidade do multiplicador de Lagrange associado às equações de balanço em relação às perdas de potência ativa na transmissão. Testes foram realizados nos sistemas CESP 53 barras e no IEEE 118 barras, bons resultados foram obtidos. O programa de FPO foi executado para comprovar a eficácia da informação fornecida pelo multiplicador de Lagrange.

Capítulo 3

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Neste capítulo serão apresentados o desenvolvimento do modelo do problema de Fluxo de Potência Ótimo e o método primal-dual barreira logarítmica aplicado à solução deste problema. Também serão abordados itens sobre o algoritmo e a implementação computacional.

3.1 O problema de Fluxo de Potência Ótimo

O Fluxo de Potência Ótimo é uma ferramenta para análise de SEP. Está em desenvolvimento desde a década de 60, onde teve a sua origem. O FPO surgiu a partir do problema de Despacho Econômico (DE). O DE tem sido utilizado em concessionárias de eletricidade, fornecendo como resultado a potência gerada pelas unidades geradoras para atender a demanda total do sistema ao menor custo. O DE é representado pelo Problema (3.1):

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } \sum_{\text{gerador } i} C_i(P_{Gi}) \\ &\text{sujeito a :} \\ &P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ &\sum_{\text{gerador } i} P_{Gi} = P_D \end{aligned} \tag{3.1}$$

em que:

- $C_i(P_{Gi})$ é a função custo de geração do sistema termoeletrico.
- P_{Gi} é a geração de potência ativa do gerador i .

- $P_{Gi}^{\min}$ e $P_{Gi}^{\max}$ são os limites inferior e superior da geração de potência ativa da barra i .
- P_D é a demanda total do sistema.

A função custo de geração pode ser representada por uma função quadrática do tipo:

$$C_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (3.2)$$

Em que os parâmetros a , b e c são dados dos geradores. Como pode ser observado, o problema DE possui função objetivo quadrática e restrições lineares, podendo ser, então, resolvido através de um algoritmo de programação quadrática.

O problema de DE foi o precursor do problema de FPO, o qual marcou o fim do período clássico do DE. O problema de DE passou a ser um caso particular do problema de FPO. Um novo modelo passou a ser considerado, acrescentaram-se restrições físicas e operacionais do sistema elétrico ao Problema (3.1). As restrições adicionadas ao modelo inicial dado no Problema (3.1) foram: equações de balanço da rede elétrica e limites de geração de potência reativa, de fluxo de potência em linhas de transmissão, de tensão, de *taps* de transformadores, entre outras. O modelo inicial, que possuía somente restrições lineares, passou a conter restrições funcionais não-lineares. Aumentando, desta forma, o nível de dificuldade na solução do problema. O FPO ajusta de forma ótima as variáveis de controle e de estado do sistema e, simultaneamente, resolve o problema de fluxo de potência, que é formado pelas equações de balanço da rede elétrica.

Em muitos modelos de FPO, a função objetivo custo na geração de potência foi mantida, porém, em outros modelos outras funções foram consideradas como, por exemplo, a função perdas de potência ativa no sistema de transmissão.

O parque gerador brasileiro é composto, quase em sua totalidade, por usinas hidrelétricas. Essas usinas estão localizadas, geralmente, distantes dos centros consumidores, o que exige um amplo sistema de transmissão. Transmitir a energia da

fonte geradora ao centro de carga envolve perdas de potência nas linhas de transmissão. Minimizar essas perdas resultará em uma economia na geração do sistema elétrico.

Dois modelos de FPO foram considerados neste trabalho, um com função objetivo perdas de potência ativa na transmissão e outro com função objetivo custo na geração de potência ativa. O modelo de FPO apresentado em (3.3) considera como função objetivo as perdas de potência ativa na transmissão.

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{(k,m) \in NL} f_{km}(V, \theta, t)$$

sujeito a :

Equações de balanço do sistema elétrico :

$$\Delta P_k(V, \theta, t) = 0$$

$$\Delta Q_k(V, \theta, t) = 0$$

Limite na geração de potência reativa :

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

(3.3)

Limite na geração de potência ativa :

$$P_k^{\min} \leq P_k(V, \theta, t) \leq P_k^{\max}$$

Limite de fluxo ativo na transmissão :

$$|F_{km}(V, \theta, t)| \leq F_{ativo}^{\max}$$

Limite de tensão :

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

Limite de tap de transformador

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

em que:

- V e θ são os vetores da magnitude e fase da tensão, respectivamente.
- t é o *tap* dos transformadores.
- $f_{km}(V, \theta, t)$ é a função perdas de potência ativa na transmissão dada por:

$$f_{km}(V, \theta, t) = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2 V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.4)$$

- As equações de balanço do sistema elétrico são dadas por:

- a) Potência ativa para as barras de carga e de controle de reativo:

$$\Delta P_k(V, \theta, t) = P_k^G - P_k^C - \sum_{m \in \Omega} P_{km}(V, \theta, t); \quad (3.5)$$

em que:

$$P_{km}(V, \theta, t) = (t V_k)^2 g_{km} - (t V_k) V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km})$$

- b) Potência reativa para as barras de carga:

$$\Delta Q_k(V, \theta, t) = Q_k^G - Q_k^C - \sum_{m \in \Omega} Q_{km}(V, \theta, t); \quad (3.6)$$

em que:

$$Q_{km}(V, \theta, t) = -(t V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (t V_k) V_m (b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \sin \theta_{km})$$

- Limite na geração de potência reativa para as barras de controle de reativo e barras de geração:

$$Q_k(V, \theta, t) = \sum_{m \in \Omega} -(t V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (t V_k) V_m (b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.7)$$

- Limite na geração de potência ativa para as barras de geração:

$$P_k(V, \theta, t) = \sum_{m \in \Omega} (t V_k)^2 g_{km} - (t V_k) V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.8)$$

- Limite de fluxo de potência ativa na transmissão:

$$F_{km}(V, \theta, t) = (t V_k)^2 g_{km} - (t V_k) V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.9)$$

- g_{km} , b_{km} e b_{km}^{sh} são a condutância, a susceptância e a susceptância *shunt* da linha, respectivamente.
- P_k^G e P_k^C são as potências ativas, geradas e consumidas, respectivamente.
- Q_k^G e Q_k^C são as potências reativas, geradas e consumidas, respectivamente.
- $Q_k^{\min}$ e $Q_k^{\max}$ são os limites mínimos e máximos da potência reativa gerada.
- $P_k^{\min}$ e $P_k^{\max}$ são os limites mínimos e máximos da potência ativa gerada.

- $V_k^{\min}$ e $V_k^{\max}$ são os limites mínimos e máximos das magnitudes das tensões.
- $t_j^{\min}$ e $t_j^{\max}$ são os limites mínimos e máximos dos *taps* dos transformadores.
- $F_{\text{ativo}}^{\max}$ é o limite de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão.
- Ω é o conjunto de barras vizinhas à barra k .
- NL é o número total de linhas de transmissão.

As equações de balanço do sistema elétrico são obtidas aplicando-se o princípio da conservação de potência em cada barra da rede elétrica.

O limite na transmissão indica a capacidade máxima de transferência de energia em uma linha de transmissão sob certas condições operacionais. Esses limites são determinados sob dados térmicos ou de estabilidade. Se a linha for curta, os limites serão determinados sob dados térmicos; se for longa, sob dados de estabilidade. Quando a restrição de limite de fluxo de potência na transmissão atinge o limite estabelecido, diz-se que o sistema está congestionado.

Na Figura 3.1, tem-se uma linha de transmissão que está conectada entre as barras k e m . Para a situação em que se deseja restringir o fluxo de potência ativa ($|F_{km}|$) desta linha será necessário manter constante a diferença de potencial ($V_k \angle \theta_k - V_m \angle \theta_m$) entre as barras. A restrição de fluxo de potência em linhas de transmissão envolve o ajuste de no mínimo quatro variáveis, que são as magnitudes e fases das tensões das barras que conectam a linha. Por essa razão, a maioria dos modelos de FPO não considera essa restrição com o objetivo de reduzir a complexidade do problema, pois, em alguns casos, a inclusão dessa restrição resulta em divergência.

Figura 3.1 – Linha de transmissão.

Para restringir o fluxo de potência em linhas de transmissão, uma outra possibilidade seria acrescentar ao problema a restrição de diferença de potencial desejada, isto é $\dot{V}_k - \dot{V}_m = \text{constante}$. Em linhas de intercâmbio de áreas, as restrições de limite de fluxo de potência em linhas de transmissão são de grande importância.

A variável de controle *tap* de transformador foi considerada de forma contínua, como as demais restrições. O modelo utilizado para essa variável está representado na Figura 3.2. Neste modelo o *tap* está ligado à tensão da barra inicial da linha.

Figura 3.2 – Modelo utilizado para a variável *tap* do transformador.

Quando a solução do problema de FPO é obtida, tem-se, além do ponto ótimo de operação para o sistema, um parâmetro de muita utilidade – tanto para análises de planejamento da operação como para a comercialização da energia – que é o multiplicador de Lagrange. Esse parâmetro indica a sensibilidade da função objetivo quando uma perturbação é introduzida à restrição a ele associada. Se a função objetivo for custo na geração, o multiplicador de Lagrange é conhecido como custo nodal ou *spot price*.

Em termos gerais, o problema de FPO é definido como sendo não-linear, não-convexo e de grande porte, possuindo um grande número de variáveis e restrições. Essa característica torna o FPO um desafio para pesquisadores desta área, como Stott *et al.* (1980) mencionam. Muitas técnicas de otimização são encontradas na literatura com o objetivo de resolver o problema de FPO (Momoh *et al.* (1999a,b)). Na próxima seção será apresentado o método de pontos interiores – primal-dual barreira logarítmica – utilizado na solução do Problema (3.3).

3.2 O método primal-dual barreira logarítmica

Entre as diversas técnicas aplicadas na resolução do problema de FPO, o método primal-dual barreira logarítmica tem sido considerado um dos mais eficientes. Pois é de fácil implementação e manipula as restrições de desigualdade de maneira simples.

Com o objetivo de simplificar o modelo matemático, o método será apresentado partindo de um modelo geral de um problema de programação não-linear. Considere o seguinte problema de otimização generalizado:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar } f(x) \\
 &\text{sujeito a :} \\
 &g(x) = 0 \\
 &h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max} \\
 &x^{\min} \leq x \leq x^{\max}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

em que:

- $x^T = (V, \theta, t) \in \mathfrak{R}^n$ é o vetor das variáveis de controle e de estado do problema.
- $f(x)$ é a função escalar, a qual representa o desempenho do sistema.
- $g(x) \in \mathfrak{R}^m$ corresponde ao vetor das equações de balanço da rede elétrica, em que $n > m$.
- $h(x) \in \mathfrak{R}^p$ corresponde ao vetor das inequações funcionais da rede elétrica.
- $x^{\min}$ e $x^{\max}$ são os vetores dos limites das variáveis de controle e de estado do problema.
- $h^{\min}$ e $h^{\max}$ são os vetores dos limites das restrições funcionais $h(x)$.

No método primal-dual barreira logarítmica as restrições de desigualdade canalizadas são representadas como duas restrições de desigualdade. Nessas restrições são inseridas variáveis de folga ou excesso, transformando-as em igualdades. Desse modo, (3.10) pode ser reescrito como:

Minimizar $f(x)$

sujeito a :

$$g(x) = 0$$

$$h(x) + s_1 = h^{\max}$$

$$h(x) - s_2 = h^{\min}$$

$$x + s_3 = x^{\max}$$

$$x - s_4 = x^{\min}$$

$$s_1, s_2, s_3, s_4 \geq 0$$

(3.11)

em que:

- $s_1 \in \Re^p$ e $s_3 \in \Re^n$ são os vetores das variáveis de folga.
- $s_2 \in \Re^p$ e $s_4 \in \Re^n$ são os vetores das variáveis de excesso.

As variáveis de folga ou excesso devem ser estritamente positivas, pois são incorporadas à função objetivo por meio da função barreira logarítmica apresentada por Frisch (1955), a qual é dada por:

$$B(x) = - \sum_{i=1}^n \ln x_i, \quad x \in \Re^n, x > 0 \quad (3.12)$$

e de um parâmetro de barreira μ .

Dessa forma, (3.11) pode ser reescrito como:

$$\text{Minimizar } f(x) - \mu \left(\sum_{i=1}^p \ln s_{1i} + \sum_{i=1}^p \ln s_{2i} + \sum_{j=1}^n \ln s_{3j} + \sum_{j=1}^n \ln s_{4j} \right)$$

sujeito a :

$$g(x) = 0$$

$$h(x) + s_1 = h^{\max}$$

$$h(x) - s_2 = h^{\min}$$

$$x + s_3 = x^{\max}$$

$$x - s_4 = x^{\min}$$

(3.13)

em que μ é o parâmetro de barreira, o qual tende a zero durante o processo iterativo, ou seja, $\mu_0 > \mu_1 > \dots > \mu_\infty \rightarrow 0$.

Associa-se ao Problema (3.13) a função Lagrangiana, que é dada por:

$$\begin{aligned}
 L = & f(x) - \mu \left(\sum_{i=1}^p \ln s_{1i} + \sum_{i=1}^p \ln s_{2i} + \sum_{j=1}^n \ln s_{3j} + \sum_{j=1}^n \ln s_{4j} \right) + \\
 & + \lambda^T g(x) + \\
 & + \pi_1^T (h(x) + s_1 - h^{\max}) + \\
 & + \pi_2^T (h(x) - s_2 - h^{\min}) + \\
 & + \pi_3^T (x + s_3 - x^{\max}) + \\
 & + \pi_4^T (x - s_4 - x^{\min})
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

em que $\lambda \in \Re^m, \pi_1 \in \Re^p, \pi_2 \in \Re^p, \pi_3 \in \Re^n, \pi_4 \in \Re^n$ são os vetores multiplicadores de Lagrange.

As condições necessárias de primeira-ordem são aplicadas em (3.14), gerando um sistema de equações não-lineares dado por:

$$\nabla_x L = 0 \rightarrow \nabla_x f(x) + \lambda^T \nabla_x g(x) + \pi_1^T \nabla_x h(x) + \pi_2^T \nabla_x h(x) + \pi_3 + \pi_4 = 0 \tag{3.15}$$

$$\nabla_\lambda L = 0 \rightarrow g(x) = 0 \tag{3.16}$$

$$\nabla_{\pi_1} L = 0 \rightarrow (h(x) + s_1 - h^{\max}) = 0 \tag{3.17}$$

$$\nabla_{\pi_2} L = 0 \rightarrow (h(x) - s_2 - h^{\min}) = 0 \tag{3.18}$$

$$\nabla_{\pi_3} L = 0 \rightarrow (x + s_3 - x^{\max}) = 0 \tag{3.19}$$

$$\nabla_{\pi_4} L = 0 \rightarrow (x - s_4 - x^{\min}) = 0 \tag{3.20}$$

$$\nabla_{s_1} L = 0 \rightarrow (-\mu S_1^{-1} e + \pi_1) = 0 \tag{3.21}$$

$$\nabla_{s_2} L = 0 \rightarrow (-\mu S_2^{-1} e - \pi_2) = 0 \tag{3.22}$$

$$\nabla_{s_3} L = 0 \rightarrow (-\mu S_3^{-1} e + \pi_3) = 0 \tag{3.23}$$

$$\nabla_{s_4} L = 0 \rightarrow (-\mu S_4^{-1} e - \pi_4) = 0 \tag{3.24}$$

em que:

$$e = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix};$$

S_1, S_2, S_3, S_4 são matrizes diagonais cujos elementos são: $s_1^{-1}, s_2^{-1}, s_3^{-1}, s_4^{-1}$, respectivamente.

O sistema de Equações não-lineares de (3.15) a (3.24) é resolvido pelo método de Newton. Esse método utiliza a expansão em série de Taylor até primeira-ordem das equações do sistema, gerando um sistema do tipo $Ax = b$; em que as direções de busca $(\Delta x, \Delta \lambda, \Delta \pi_1, \Delta \pi_2, \Delta \pi_3, \Delta \pi_4, \Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3, \Delta s_4)$ são utilizadas na atualização das variáveis. Dessa forma, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \nabla_x L + (\nabla_{xx}^2 f(x) + \lambda^T \nabla_{xx}^2 g(x) + \pi_1^T \nabla_{xx}^2 h(x) + \pi_2^T \nabla_{xx}^2 h(x)) \Delta x + (\nabla_x g(x))^T \Delta \lambda \\ + (\nabla_x h(x))^T \Delta \pi_1 + (\nabla_x h(x))^T \Delta \pi_2 + \Delta \pi_3 + \Delta \pi_4 = 0 \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\nabla_\lambda L + \nabla_x g(x) \Delta x = 0 \quad (3.26)$$

$$\nabla_{\pi_1} L + \nabla_x h(x) \Delta x + \Delta s_1 = 0 \quad (3.27)$$

$$\nabla_{\pi_2} L + \nabla_x h(x) \Delta x - \Delta s_2 = 0 \quad (3.28)$$

$$\nabla_{\pi_3} L + \Delta x + \Delta s_3 = 0 \quad (3.29)$$

$$\nabla_{\pi_4} L + \Delta x - \Delta s_4 = 0 \quad (3.30)$$

$$\nabla_{s_1} L + \mu S_1^{-2} \Delta s_1 + \Delta \pi_1 = 0 \quad (3.31)$$

$$\nabla_{s_2} L + \mu S_2^{-2} \Delta s_2 - \Delta \pi_2 = 0 \quad (3.32)$$

$$\nabla_{s_3} L + \mu S_3^{-2} \Delta s_3 + \Delta \pi_3 = 0 \quad (3.33)$$

$$\nabla_{s_4} L + \mu S_4^{-2} \Delta s_4 - \Delta \pi_4 = 0 \quad (3.34)$$

Reescrevendo as Equações de (3.25) a (3.34) na forma matricial, tem-se o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix}
 W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2) & J(x) & \nabla_x h(x) & \nabla_x h(x) & I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 J(x)^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \nabla_x h(x)^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\
 \nabla_x h(x)^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\
 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\
 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \\
 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & \mu S_1^{-2} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & \mu S_2^{-2} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & \mu S_3^{-2} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & \mu S_4^{-2}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \Delta x \\
 \Delta \lambda \\
 \Delta \pi_1 \\
 \Delta \pi_2 \\
 \Delta \pi_3 \\
 \Delta \pi_4 \\
 \Delta s_1 \\
 \Delta s_2 \\
 \Delta s_3 \\
 \Delta s_4
 \end{bmatrix}
 = -
 \begin{bmatrix}
 \nabla_x L \\
 \nabla_\lambda L \\
 \nabla_{\pi_1} L \\
 \nabla_{\pi_2} L \\
 \nabla_{\pi_3} L \\
 \nabla_{\pi_4} L \\
 \nabla_{s_1} L \\
 \nabla_{s_2} L \\
 \nabla_{s_3} L \\
 \nabla_{s_4} L
 \end{bmatrix}
 \quad (3.35)$$

em que:

- $W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2) = \nabla_{xx}^2 f(x) + \lambda^T \nabla_{xx}^2 g(x) + \pi_1^T \nabla_{xx}^2 h(x) + \pi_2^T \nabla_{xx}^2 h(x)$ é a matriz Hessiana.
- $J(x) = \nabla_x g(x)$ é uma matriz Jacobiana, dada pela derivada das restrições de igualdade em relação as variáveis do problema.
- $\nabla_x h(x)$ é uma matriz Jacobiana, dada pela derivada das restrições funcionais em relação as variáveis do problema.
- I é a matriz identidade.

Com o objetivo de detalhar mais a matriz Hessiana da Lagrangiana dada em (3.35), as submatrizes $W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2)$ e $J(x)$ serão escritas em termos das variáveis do problema de FPO visto em (3.3):

$$W(V, \theta, t, \lambda, \pi_1, \pi_2) = \begin{bmatrix}
 \frac{\partial^2 L}{\partial V^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial V \partial t} \\
 \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \partial V} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \partial t} \\
 \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial V} & \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial t^2}
 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$J(V, \theta, t) = \begin{bmatrix}
 \frac{\partial \Delta P_k}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial V} \\
 \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \theta} \\
 \frac{\partial \Delta P_k}{\partial t} & \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial t}
 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

A matriz Hessiana da Lagrangiana do Sistema (3.35) é esparsa e simétrica de posição e valor. Essas características foram exploradas no processo de solução do sistema. Uma técnica de esparsidade elaborada pelo Grupo de Algoritmos Numéricos do Laboratório Harwell do United Kingdom Atomic Energy Authority foi utilizada. Esta técnica usa uma variante da eliminação de Gauss e é conhecida como MA57. A sub-rotina MA57 necessita, como informação, somente os valores não-nulos da matriz triangular superior (ou inferior). Com isso, economiza-se memória e tempo de processamento, uma vez que o número de elementos a serem calculados e armazenados é bem menor. O problema de FPO foi implementado em Linguagem C++ e a sub-rotina MA57 em Fortran, logo, realizou-se um link entre essas duas linguagens. A matriz Hessiana da Lagrangiana é formada por submatrizes de fácil implementação, tais como: as matrizes identidades e as referentes às variáveis de folga e de excesso. Devido ao fato dessas matrizes possuírem somente elementos na diagonal principal, isto se torna um atrativo na implementação do algoritmo.

O método primal-dual barreira logarítmica, por acrescentar novas variáveis ao problema – variáveis de folga e de excesso –, torna a dimensão da matriz Hessiana da Lagrangiana consideravelmente grande quando comparada a outros métodos. A dimensão dessa matriz para o problema de FPO é igual a:

$$\begin{aligned} \text{Dimensão} = & 6 * (\text{o número de barras do sistema}) + \\ & 5 * (\text{o número de barras do tipo controle de reativo}) + \\ & 2 * (\text{o número de barras de carga}) + \\ & 8 * (\text{o número de barras de geração}) + \\ & 5 * (\text{o número de taps variáveis}) + \\ & 2 * (\text{o número de restrições de fluxo de potência ativa na} \\ & \text{transmissão}) - 1. \end{aligned} \quad (3.38)$$

3.2.1 Atualização das variáveis

A cada iteração, após resolver o Sistema (3.35), deve-se calcular o tamanho do passo utilizado na atualização das variáveis primais e duais do problema. Esses passos são calculados de modo que cada componente das variáveis primais s (s_i , $i = 1, 2, 3, 4$) permaneçam estritamente positivas, e que os elementos do vetor π (π_i , $i = 1, 2, 3, 4$) permaneçam com os seus respectivos sinais, isto é, $\pi_1 \geq 0$, $\pi_2 \leq 0$, $\pi_3 \geq 0$, $\pi_4 \leq 0$, conforme as Equações (3.21) a (3.24), satisfazendo, dessa forma, as condições de KKT.

O passo é obtido encontrando o menor elemento entre o mínimo tamanho de passo de todos os componentes dos vetores, este menor elemento é comparado ao 1. Escolhe-se o menor entre eles e, então, multiplica-se este valor por um fator σ . Essa técnica é utilizada por Granville (1994), Irisarri *et al.* (1997) entre outros, e tem por finalidade satisfazer as condições de não-negatividade das variáveis de folga e de excesso e os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade.

As expressões matemáticas para o cálculo dos passos primal e dual são dadas por:

$$\alpha_p = \sigma \min \left\{ \left(\min_{\Delta s_1 < 0} \frac{s_1}{|\Delta s_1|}, \min_{\Delta s_2 < 0} \frac{s_2}{|\Delta s_2|}, \min_{\Delta s_3 < 0} \frac{s_3}{|\Delta s_3|}, \min_{\Delta s_4 < 0} \frac{s_4}{|\Delta s_4|} \right); 1, 0 \right\} \quad (3.39)$$

$$\alpha_d = \sigma \min \left\{ \left(\min_{\Delta \pi_1 < 0} \frac{\pi_1}{|\Delta \pi_1|}, \min_{\Delta \pi_2 > 0} \frac{-\pi_2}{|\Delta \pi_2|}, \min_{\Delta \pi_3 < 0} \frac{\pi_3}{|\Delta \pi_3|}, \min_{\Delta \pi_4 > 0} \frac{-\pi_4}{|\Delta \pi_4|} \right); 1, 0 \right\} \quad (3.40)$$

em que $\sigma = 0,9995$ é um valor determinado empiricamente ou, segundo Wright (1995), pode ser derivado da fórmula $1 - \frac{1}{9\sqrt{m}}$, na qual m é o número de restrições do problema.

Algumas aplicações de métodos de pontos interiores para problemas de programação não-linear utilizam somente um tamanho de passo na atualização das variáveis. Para o problema de FPO verificou-se que o uso de diferentes passos para a

atualização das variáveis primais e duais resulta em um melhor desempenho do algoritmo.

Conhecendo as direções de busca e o tamanho do passo, as variáveis podem ser atualizadas como segue:

$$\begin{aligned}
 x^{i+1} &= x^i + \alpha_p \Delta x & \lambda^{i+1} &= \lambda^i + \alpha_d \Delta \lambda \\
 s_1^{i+1} &= s_1^i + \alpha_p \Delta s_1 & \pi_1^{i+1} &= \pi_1^i + \alpha_d \Delta \pi_1 \\
 s_2^{i+1} &= s_2^i + \alpha_p \Delta s_2 & \pi_2^{i+1} &= \pi_2^i + \alpha_d \Delta \pi_2 \\
 s_3^{i+1} &= s_3^i + \alpha_p \Delta s_3 & \pi_3^{i+1} &= \pi_3^i + \alpha_d \Delta \pi_3 \\
 s_4^{i+1} &= s_4^i + \alpha_p \Delta s_4 & \pi_4^{i+1} &= \pi_4^i + \alpha_d \Delta \pi_4
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

em que i é a iteração atual.

O método primal-dual barreira logarítmica é muito sensível quanto ao parâmetro de barreira μ . Para problemas de programação linear, a atualização deste parâmetro está geralmente baseada na redução do *gap* de dualidade. Dessa forma, Granville (1994) propõe a atualização de μ através da Equação (3.42), em que o numerador corresponde ao *gap* de dualidade.

$$\mu = \frac{s_1 \pi_1 + s_3 \pi_3 - s_2 \pi_2 - s_4 \pi_4}{2n\beta} \tag{3.42}$$

em que n é o número de variáveis tratadas por barreira e $\beta > 1$ é um valor especificado pelo usuário.

Por tratar-se de um dado empírico do método, neste trabalho a atualização de μ foi realizada de forma mais simples que a apresentada em (3.42). Na qual o decrescimento de μ foi realizado por meio da Equação (3.43)

$$\mu^{i+1} = \frac{\mu^i}{\beta} \tag{3.43}$$

em que i é a iteração atual e $\beta > 1$ é um valor especificado pelo usuário.

3.2.2 Inicialização das variáveis

Quanto à inicialização das variáveis do problema, o método pressupõe que os valores destas estejam dentro de seus limites para o caso das variáveis e restrições funcionais canalizadas. Se para um dado ponto inicial, alguma variável estiver violando um de seus limites, Granville (1994) sugere que esta variável seja modificada a uma certa tolerância do limite da restrição.

As variáveis de folga ou de excesso são inicializadas utilizando as Equações (3.17) a (3.20). Essas variáveis devem ser estritamente positivas. Caso a restrição a qual estas variáveis pertencem possua um valor inicial que não esteja dentro do limite, estas variáveis de folga ou de excesso terão valor negativo. Para evitar a divergência do algoritmo, realizou-se o artifício proposto por Quintana *et al.* (1995), isto é, atribuiu-se a estas variáveis o valor inicial de 0,02.

Artifícios como estes têm por objetivo dar início ao processo de convergência. Durante o processo iterativo, o método ajusta as variáveis de tal forma que consegue satisfazer todas as restrições, conduzindo as restrições violadas para dentro de seus limites.

O valor inicial do parâmetro de barreira é atribuído pelo usuário. Esse valor é utilizado na inicialização dos vetores π , como pode ser observado nas Equações (3.21) a (3.24). Os multiplicadores de Lagrange, associados às restrições de igualdade, são inicializados com o valor nulo. Esses multiplicadores são irrestritos quanto ao sinal, podendo ser negativos ou positivos.

3.3 Algoritmo

O problema de FPO, apresentado em (3.3), pode ser resolvido por um processo iterativo por meio do método primal-dual barreira logarítmica. A seguir tem-se o algoritmo implementado.

Passo 1: Leitura do banco de dados – em que o vetor x^0 será inicializado.

Colocar o Problema (3.3) na forma (3.13) para poder ser aplicado o método primal-dual barreira logarítmica.

Inicializar todas as variáveis utilizadas no método (λ^0, π^0, s^0).

Faça $k = 0$.

Passo 2: Calcular o vetor gradiente ∇L . Se a norma deste vetor for menor que um ξ especificado e as condições de KKT forem satisfeitas, então, PARE, caso contrário, vá para o Passo 3.

Passo 3: Calcular a matriz Hessiana da Lagrangiana e resolver o Sistema (3.35).

Passo 4: Calcular os passos primais e duais.

Passo 5: Atualizar as variáveis e o parâmetro de barreira.

Passo 6: Volte ao Passo 2.

A implementação computacional desse algoritmo e a técnica utilizada para solução do Sistema (3.35) serão discutidas nas próximas seções.

3.4 Implementação computacional

A implementação computacional do método primal-dual barreira logarítmica apresentado neste trabalho foi realizada em Linguagem C++, em um computador Pentium 4, microprocessador de 2GHz, com 256 MB de RAM. Os recursos citados pertencem ao Laboratório de Otimização em Sistemas Elétricos de Potência (LOSEP), do Departamento de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos.

A seguir tem-se uma breve descrição das sub-rotinas implementadas para solução do problema de FPO.

Leitura de Dados – são sub-rotinas responsáveis pela leitura dos dados de barra, de linhas e dos limites das variáveis do sistema elétrico.

Inicia Variáveis – são sub-rotinas que inicializam as variáveis utilizadas pelo método primal-dual barreira logarítmica, como o vetor s , os multiplicadores de Lagrange λ e π , o parâmetro de barreira μ e parâmetro de atualização β .

Topologia da Rede – descreve as ligações existentes entre as barras do sistema. É de fundamental importância para a construção do vetor gradiente e da matriz Hessiana da Lagrangiana.

Constrói Sistema – constrói o vetor gradiente e a matriz Hessiana da Lagrangiana para o sistema. A matriz Hessiana da Lagrangiana é construída de forma vetorial.

MA57 – sub-rotina em Fortran responsável pela solução do sistema de equações. Para esta sub-rotina, enviam-se os seguintes dados: vetor gradiente, matriz Hessiana da Lagrangiana em formato vetorial, vetores que indicam a linha e a coluna de cada elemento na matriz, a dimensão da matriz e o número de elementos não-nulos. Essa sub-rotina utiliza somente a diagonal principal e a matriz triangular superior da matriz Hessiana da Lagrangiana.

Atualização das Variáveis – com a solução do sistema e calculado os passos primais e duais, atualiza-se todas as variáveis do problema de otimização.

Saída – gera o arquivo de saída que contém os resultados obtidos pelo programa.

Capítulo 4

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma questão que surge quando se utiliza técnicas de otimização é: quanto a solução ótima do problema varia quando ocorrem perturbações na demanda ou nos recursos disponíveis do problema? A inclusão dessas perturbações no modelo do problema resultam em uma nova solução. Esta nova solução pode ser obtida executando a técnica de otimização novamente. Para isso serão necessários novos ajustes dos parâmetros empíricos utilizados pelo método aplicado à solução do problema. Porém, para encontrar novas soluções de maneira mais rápida, sem a necessidade de ajuste de parâmetros empíricos, e, dessa forma, poder analisar as consequências da inclusão das perturbações no problema, pode-se utilizar técnicas de Análise de Sensibilidade.

Neste capítulo será apresentada a técnica de Análise de Sensibilidade obtida a partir do teorema de Fiocco (1976) orientada a problemas de Fluxo de Potência Ótimo.

4.1 Sensibilidade

Os métodos do tipo Lagrangianos são muito eficientes na solução de problemas de programação não-linear com restrição de igualdade. Nesses métodos, as restrições são adicionadas à função objetivo por meio dos multiplicadores de Lagrange. O multiplicador de Lagrange indica a sensibilidade da função objetivo em relação à restrição a ele associada. Isto é, quando na restrição for incluída uma perturbação pode-se estimar o novo valor da função objetivo apenas utilizando o multiplicador de Lagrange associado à restrição perturbada.

Considere o problema generalizado dado em (4.1).

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } f(x) \\ &\text{sujeito a :} \\ &g(x) = b \end{aligned} \tag{4.1}$$

O vetor b pode ser interpretado como sendo uma limitação da quantidade do recurso disponível. Esse recurso pode sofrer perturbações, o que resultará em um novo problema e, conseqüentemente, uma nova solução deve ser obtida.

Supondo que $x(b)$ é a solução ótima do Problema (4.1), em Fritzsche (1978) tem-se a demonstração da Equação (4.2) em que o multiplicador de Lagrange λ significa a mudança marginal do valor ótimo da função objetivo, enquanto b está sendo variado.

$$\frac{\partial f(x(b))}{\partial b} = \lambda \tag{4.2}$$

Na demonstração da Equação (4.2), a função Lagrangiana associada ao Problema (4.1) foi considerada como $L = f(x) - \lambda(g(x) - b)$. Com o objetivo de manter o padrão de construção da função Lagrangiana deste documento, isto é, $L = f(x) + \lambda(g(x) - b)$, a Equação (4.2) deve ser considerada como:

$$\frac{\partial f(x(b))}{\partial b} = -\lambda \tag{4.3}$$

A Equação (4.3) também pode ser expressa como:

$$f^{\text{novo}} = f(x(b)) - \lambda \varepsilon \tag{4.4}$$

em que ε é a perturbação introduzida ao valor de b .

A relação de sensibilidade (4.4) foi utilizada por Feire *et al.* (2002), Souza *et al.* (2003) e Souza *et al.* (2004), nos quais bons resultados foram encontrados para pequenos valores de ε . A sensibilidade fornecida pelo multiplicador de Lagrange oferece apenas o novo valor da função objetivo. Para conhecer a nova solução ótima do problema, técnicas de Análise de Sensibilidade mais eficientes precisam ser utilizadas. Na próxima seção será apresentada a técnica de Análise de Sensibilidade aplicada neste trabalho. Esta técnica proposta por Fiacco (1976) fornece os novos valores das variáveis do problema, os novos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade e de desigualdade ativas e o novo valor da função objetivo.

4.2 Análise de Sensibilidade baseada no teorema de Fiacco

A técnica de Análise de Sensibilidade está baseada no teorema de Fiacco (1976). Por esta técnica, novas soluções do problema podem ser obtidas quando perturbações são incluídas ao problema. As perturbações podem ocorrer na função objetivo ou nas restrições. No desenvolvimento da técnica que será apresentada, serão consideradas perturbações nas restrições de igualdade e desigualdade.

No problema generalizado de programação não-linear (4.5), perturbações ε são incluídas às restrições.

Minimizar $f(x)$

sujeito a :

$$g(x) = \varepsilon_1$$

$$h(x) \leq \varepsilon_2$$

(4.5)

em que:

- $x \in \Re^n$ é o vetor das variáveis do problema.
- $f(x)$ é a função objetivo.
- $g(x) \in \Re^m$ é o vetor das restrições de igualdade.
- $h(x) \in \Re^p$ é o vetor das restrições de desigualdade.

- $\varepsilon_1 \in \mathfrak{R}^m$ é o vetor perturbação nas restrições de igualdade.
- $\varepsilon_2 \in \mathfrak{R}^p$ é o vetor perturbação nas restrições de desigualdades.

Associa-se ao Problema (4.5) uma função Lagrangiana:

$$L = f(x) + \lambda^T (g(x) - \varepsilon_1) + \pi^T (h(x) - \varepsilon_2) \quad (4.6)$$

em que λ e π são os vetores dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade e desigualdade, respectivamente.

Esta técnica utiliza como informação inicial a solução ótima do Problema (4.5) não-perturbado, isto é, $(x, \lambda, \pi, \varepsilon) = (x^*, \lambda^*, \pi^*, 0)$. Nesse ponto, são aplicadas as seguintes condições:

a) Condições necessárias de primeira-ordem da função Lagrangiana:

$$\nabla_x f(x^*) + \lambda^{*T} \nabla_x g(x^*) + \pi^{*T} \nabla_x h(x^*) = 0 \quad (4.7)$$

b) Igualdade satisfeita:

$$g(x^*) - \varepsilon_1 = 0 \quad (4.8)$$

c) Folga complementar:

$$\pi^{*T} (h(x^*) - \varepsilon_2) = 0 \quad (4.9)$$

As raízes das Equações (4.7) a (4.9) são encontradas linearizando o sistema no ponto $(x^*, \lambda^*, \pi^*, 0)$, o que resulta em:

$$\begin{aligned}
(\nabla_x f(x^*) + \lambda^{*T} \nabla_x g(x^*) + \pi^{*T} \nabla_x h(x^*)) + \nabla_{xx}^2 L^* \Delta x + \nabla_x g(x^*)^T \Delta \lambda + \nabla_x h(x^*)^T \Delta \pi &= 0 \\
(g(x^*) - \varepsilon_1) + \nabla_x g(x^*)^T \Delta x &= 0 \\
(\pi^{*T} (h(x^*) - \varepsilon_2)) + \pi^{*T} \nabla_x h(x^*) \Delta x + h(x^*)^T \Delta \pi &= 0
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Eliminando os termos nulos de (4.10) tem-se que:

$$\begin{aligned}
\nabla_{xx}^2 L^* \Delta x + \nabla_x g(x^*) \Delta \lambda + \nabla_x h(x^*) \Delta \pi &= 0 \\
\nabla_x g(x^*)^T \Delta x - \varepsilon_1 &= 0 \\
\pi^{*T} \nabla_x h(x^*) \Delta x + h(x^*) \Delta \pi - \pi^{*T} \varepsilon_2 &= 0
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Reescrevendo o Sistema (4.11) em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \nabla_{xx}^2 L^* & \nabla_x g(x^*) & \nabla_x h(x^*) \\ \nabla_x g(x^*)^T & 0 & 0 \\ \pi^{*T} \nabla_x h(x^*) & 0 & h(x^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \\ \Delta \pi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & \pi^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

No Sistema (4.12), a matriz dos coeficientes é a matriz de sensibilidade proposta por Fiacco (1976). O vetor $(\Delta x, \Delta \lambda, \Delta \pi)$ é utilizado na atualização das variáveis e o vetor independente corresponde às perturbações que foram introduzidas ao sistema.

Após a determinação de $(\Delta x, \Delta \lambda, \Delta \pi)$, obtém-se a nova solução ótima do problema para o caso perturbado, em que as variáveis são atualizadas como:

$$\begin{aligned}
x^{*novo} &= x^* + \Delta x \\
\lambda^{*novo} &= \lambda^* + \Delta \lambda \\
\pi^{*novo} &= \pi^* + \Delta \pi
\end{aligned} \tag{4.13}$$

A matriz de sensibilidade (4.13) é esparsa e simétrica de posição, mas não de valores. Para resolver esse sistema, utilizou-se uma técnica de esparsidade elaborada pelo Grupo de Algoritmos Numéricos do Laboratório Harwell do United Kingdom Atomic Energy Authority. A sub-rotina utilizada foi a MA28. Essa sub-rotina é utilizada para resolver sistemas cujas matrizes são esparsas, utilizando uma variante da

eliminação de Gauss. A MA28 trabalha somente com os valores não-nulos da matriz. O problema de Análise de Sensibilidade foi implementado em Linguagem C++ e a sub-rotina MA28, em Fortran, logo se realizou um link entre essas duas linguagens.

Comparando-se as matrizes dos Sistemas (3.35) e (4.13), observa-se que somente a submatriz $h(x^*)$ do Sistema (4.13) precisa ser implementada no programa da Análise de Sensibilidade, pois as demais submatrizes já foram implementadas no programa de FPO e serão utilizadas na implementação da Análise de Sensibilidade.

4.3 Análise de Sensibilidade aplicada ao problema de Fluxo de Potência Ótimo

O FPO fornece para a Análise de Sensibilidade o ponto ótimo de operação do sistema, este ponto é denominado de caso-base. Perturbações podem ocorrer na demanda do sistema ou no limite das restrições funcionais e das variáveis. Um novo ponto de operação precisa ser, então, obtido. Pode-se encontrar esse novo ponto via Análise de Sensibilidade, sem a necessidade de executar o FPO para cada perturbação que ocorra no sistema. O problema de FPO perturbado pode ser representado por:

$$\text{Minimizar } \sum_{(k,m) \in \text{NL}} f_{km}(V, \theta, t)$$

sujeito a :

Equações de balanço do sistema elétrico :

$$P_k^G - (P_k^C + \varepsilon) - \sum_{m \in \Omega} P_{km}(V, \theta, t) = 0$$

$$Q_k^G - (Q_k^C + \varepsilon) - \sum_{m \in \Omega} Q_{km}(V, \theta, t) = 0$$

Limite na geração de potência reativa :

$$(Q_k^{\min} + \varepsilon) \leq Q_k(V, \theta, t) \leq (Q_k^{\max} + \varepsilon)$$

Limite na geração de potência ativa :

$$(P_k^{\min} + \varepsilon) \leq P_k(V, \theta, t) \leq (P_k^{\max} + \varepsilon)$$

Limite de fluxo ativo na transmissão :

$$|F_{km}(V, \theta, t)| \leq (F_{\text{ativo}}^{\max} + \varepsilon)$$

Limite de tensão :

$$(V_k^{\min} + \varepsilon) \leq V_k \leq (V_k^{\max} + \varepsilon)$$

(4.14)

Limite de tap de transformador

$$(t_j^{\min} + \varepsilon) \leq t_j \leq (t_j^{\max} + \varepsilon)$$

em que ε representa a perturbação acrescentada ao problema. As demais funções, variáveis e símbolos, já foram especificados no Capítulo 3.

As restrições de igualdade e de desigualdade de (4.14) correspondem ao conjunto das restrições $g(x)$ e $h(x)$ de (4.5), respectivamente.

O sucesso da técnica de Análise de Sensibilidade está na obtenção do caso-base, isto é, quanto menor for o erro das equações de balanço do sistema e da condição de folga complementar, melhor será o resultado obtido. Por essa razão, será necessário considerar um critério de parada para o FPO que melhor satisfaça as condições para Análise de Sensibilidade.

4.4 Algoritmo

O algoritmo desenvolvido é formado pelos seguintes passos:

Passo 1: Determine o caso-base (x^*, λ^*, π^*) do sistema por meio do programa de FPO.

Passo 2: Construa o sistema de equações para Análise de Sensibilidade.

Passo 3: Determine as perturbações.

Passo 4: Resolva o sistema perturbado.

Passo 5: Atualize as variáveis.

Esse algoritmo tem a vantagem de não ser um processo iterativo e de não utilizar parâmetros empíricos na sua formulação.

4.5 Implementação computacional

A implementação computacional da técnica de análise de sensibilidade apresentada neste trabalho foi realizada em Linguagem C++. A seguir tem-se uma breve descrição das sub-rotinas implementadas para solução do algoritmo.

Leitura de Dados – faz a leitura de dois bancos de dados. No primeiro banco tem-se os parâmetros e os dados do sistema elétrico. No segundo banco tem-se a solução ótima do sistema obtida via FPO.

Topologia da Rede – descreve as ligações existentes entre as barras do sistema. É de fundamental importância para a construção da matriz de sensibilidade.

Constrói Sistema – constrói o vetor de perturbações e a matriz de sensibilidade. Esta matriz é construída de forma vetorial.

MA28 – sub-rotina em Fortran responsável pela solução do sistema de equações. Para essa sub-rotina enviam-se os seguintes dados: vetor de perturbações, matriz de sensibilidade em formato vetorial, vetores que indicam a linha e a coluna de cada elemento na matriz, a dimensão da matriz e o número de elementos não-nulos.

Atualização das Variáveis – atualiza as variáveis elétricas e os multiplicadores de Lagrange.

Saída – gera o arquivo de saída que contém os resultados obtidos pela análise de sensibilidade, isto é, magnitude e fase das tensões, despacho ativo e reativo, fluxo de potência nas linhas de transmissão e os multiplicadores de Lagrange associados às restrições.

Uma das vantagens do uso da Análise de Sensibilidade orientada a FPO é que estudos podem ser realizados para verificar o desempenho do sistema elétrico sem a necessidade de executar um programa de FPO para cada perturbação. Em determinadas situações pode acontecer que a Análise de Sensibilidade forneça uma solução que viole alguma restrição. Essa violação indica que um aumento da capacidade de suprimento dos recursos deve ocorrer para satisfazer a nova condição do sistema, dada pela inclusão da perturbação. Essas indicações podem não ser obtidas por meio do FPO, pois devido à sua não-convexidade, não-linearidade e à necessidade do ajuste de parâmetros empíricos, a inclusão da perturbação pode ocasionar divergências ou conduzir o sistema para uma outra solução, afastando-se do caso-base.

Capítulo 5

ESTUDOS DE CASOS

Neste capítulo serão apresentados os estudos de casos em sistemas de energia elétrica utilizando as ferramentas de FPO e de Análise de Sensibilidade. Por meio dessas ferramentas pode-se avaliar o desempenho do sistema para situações de congestionamento, de alocação de novas cargas, entre outras.

Duas funções objetivos foram implementadas para o problema de FPO: a de perdas de potência ativa na transmissão e a de custo na geração de potência ativa. A função de perdas de potência ativa na transmissão é não-linear e não-convexa, o que torna o problema de FPO difícil de ser resolvido, como afirma Monticelli & Liu (1992). O FPO realiza despacho ativo e reativo, com restrição de tensão, de *tap* de transformador e de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão. Na solução do problema de FPO tem-se as equações de balanço da rede elétrica satisfeitas. Testes foram realizados, nos quais se verificou o comportamento do sistema para situações sem e com a restrição de fluxo de potência em linhas de transmissão. Quando essa restrição atinge o limite, tornando-se ativa, diz-se que o sistema está congestionado. Quando todas as restrições do problema estão satisfeitas, tem-se, então, o ponto de operação do sistema. Esse ponto é denominado de caso-base, o qual é utilizado como informação inicial para estudos de Análise de Sensibilidade.

Conhecendo o caso-base, realizaram-se estudos de Análise de Sensibilidade. Perturbações foram introduzidas na demanda do sistema e na restrição de fluxo de potência ativa em linhas de transmissão. Por meio da Análise de Sensibilidade pode-se obter o novo ponto ótimo de operação para cada perturbação.

No caso do problema de FPO perturbado, algumas restrições podem violar seus limites. Para estudos de planejamento da operação esta informação é de grande utilidade, pois indica quais ações devem ser tomadas, como, por exemplo, o acionamento de bancos de reativos ou o aumento da geração para garantir que o novo ponto de operação satisfaça as restrições físicas e operacionais do sistema.

Os sistemas utilizados foram: 3 barras, IEEE 14, 30, 118, 300 barras e o equivalente CESP 440 kV, com 53 barras. O sistema de 3 barras, por ser de pequeno porte, foi apresentado de forma mais detalhada. Os sistemas IEEE 14, 30, 118, 300 foram obtidos no *site* www.ee.washington.edu/research/pstca/.

Nos testes apresentados somente algumas características dos sistemas foram comentadas, as informações mais detalhadas quanto à topologia e aos limites operacionais encontram-se no Apêndice. A potência-base utilizada foi de 100 MVA.

5.1 Sistema de 3 barras

O sistema de 3 barras, utilizado no trabalho de Dommel & Tinney (1968), por ser um sistema de pequeno porte, foi escolhido para apresentar de forma detalhada as ferramentas desenvolvidas: Fluxo de Potência Ótimo e Análise de Sensibilidade. O modelo de FPO deste sistema será apresentado e resolvido pelo método primal-dual barreira logarítmica. Obtida a solução do sistema, a técnica de Análise de Sensibilidade será aplicada em estudos de perturbação da carga, do limite do fluxo de potência ativa na transmissão e dessas duas restrições simultaneamente.

Considere o sistema de 3 barras, como apresentado na Figura 5.1, o qual tem as seguintes características:

- 1 barra de referência (*slack*);
- 1 barra de geração;
- 1 barra de carga;
- 2 linhas de transmissão;
- controle do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 3.

Figura 5.1 – Sistema elétrico de 3 barras.

Na Tabela 5.1 tem-se os dados iniciais da magnitude e fase das tensões, e os dados de geração e carga das barras. Nas Tabelas 5.2 e 5.3 têm-se os limites determinados para tensão, geração de potência ativa da barra 2 e fluxo de potência ativa na linha de transmissão.

Tabela 5.1 – Dados de barra do sistema de 3 barras.

Barra	Tipo	V(pu)	θ°	P^G (MW)	Q^G (MVar)	P^C (MW)	Q^C (MVar)
1	referência	1,000	0,0	0	0	0	0
2	geração	1,000	0,0	170	0	0	0
3	carga	1,000	0,0	0	0	200	100

Tabela 5.2 – Limites de tensão e de geração de potência ativa e reativa¹.

Barra	$V_{\min}$ (pu)	$V_{\max}$ (pu)	$P_{\min}$ (MW)	$P_{\max}$ (MW)	$Q_{\min}$ (MVar)	$Q_{\max}$ (MVar)
1	0,9	1,1	- 9999	9999	- 9999	9999
2	0,9	1,1	120	200	- 9999	9999
3	0,9	1,1	-	-	-	-

¹ Os valores - 9999 e 9999 indicam que as gerações são livres.

Tabela 5.3 – Limite de fluxo de potência ativa na linha.

Linha	$ F_{p\max} $ (MW)
1-3	-
2-3	140

A restrição de geração de potência reativa da barra de geração não será incorporada ao modelo de FPO deste sistema. Como o objetivo é apresentar de forma detalhada as etapas da formulação das técnicas desenvolvidas, optou-se pela redução das restrições utilizadas no modelo do problema.

5.1.1 Solução do sistema de 3 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo

O Problema (5.1) representa o FPO do sistema da Figura 5.1. A função objetivo representa as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão do sistema. Para a barra de carga, têm-se duas equações de igualdade – que são as equações de balanço da rede (ΔP_3 e ΔQ_3). Para a barra de geração, tem-se a restrição canalizada de geração de potência ativa (P_2). Para a linha de transmissão que conecta as barras 2 e 3, tem-se a restrição do módulo de fluxo de potência ativa, $(|F_{p23}|)$. Por ser uma restrição de módulo, o fluxo é calculado nos dois sentidos e o maior dentre eles é escolhido, resultando assim em uma única restrição. No Problema (5.1) F_{p23} representa o maior fluxo na linha de transmissão. Todas as tensões são canalizadas, possuindo limites mínimo e máximo. No Problema (5.1) todos os limites estão em pu:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar } g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos\theta_{23}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos\theta_{13}) \\
& \text{sujeito a :} \\
& \Delta P_3 = 0 \\
& \Delta Q_3 = 0 \\
& 1,2 \leq P_2 \leq 2,0 \\
& F_{P23} \leq 1,4 \\
& 0,9 \leq V_1 \leq 1,1 \\
& 0,9 \leq V_2 \leq 1,1 \\
& 0,9 \leq V_3 \leq 1,1
\end{aligned} \tag{5.1}$$

em que:

$$\begin{aligned}
\Delta P_3 = & -2 - \left(V_3^2 g_{13} - V_3 V_1 g_{13} \cos\theta_{31} - V_3 V_1 b_{13} \sin\theta_{31} \right) + \\
& - \left(V_3^2 g_{23} - V_3 V_2 g_{23} \cos\theta_{32} - V_3 V_2 b_{23} \sin\theta_{32} \right)
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned}
\Delta Q_3 = & -1 - \left(-V_3^2 b_{13} + V_3 V_1 b_{13} \cos\theta_{31} - V_3 V_1 g_{13} \sin\theta_{31} \right) + \\
& - \left(-V_3^2 b_{23} + V_3 V_2 b_{23} \cos\theta_{32} - V_3 V_2 g_{23} \sin\theta_{32} \right)
\end{aligned} \tag{5.3}$$

$$P_2 = V_2^2 g_{23} - V_2 V_3 g_{23} \cos\theta_{23} - V_2 V_3 b_{23} \sin\theta_{23} \tag{5.4}$$

$$F_{P23} = V_2^2 g_{23} - V_2 V_3 g_{23} \cos\theta_{23} - V_2 V_3 b_{23} \sin\theta_{23} \tag{5.5}$$

O método primal-dual barreira logarítmica será utilizado na solução do problema de programação não-linear, apresentado em (5.1). Para isso, será necessário transformar todas as restrições de desigualdades em igualdades por meio do uso de variáveis de folga ou excesso. Assim, o Problema (5.1) será reescrito da seguinte maneira.

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar } g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos\theta_{23}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos\theta_{13}) \\
& \text{sujeito a :} \\
& \Delta P_3 = 0 \\
& \Delta Q_3 = 0 \\
& P_2 + s_{P2_max} = 2,0 \\
& P_2 - s_{P2_min} = 1,2 \\
& F_{P23} + s_{FP23_max} = 1,4 \\
& V_1 + s_{V1_max} = 1,1 \\
& V_1 - s_{V1_min} = 0,9 \\
& V_2 + s_{V2_max} = 1,1 \\
& V_2 - s_{V2_min} = 0,9 \\
& V_3 + s_{V3_max} = 1,1 \\
& V_3 - s_{V3_min} = 0,9 \\
& s_{P2_max} \geq 0 \\
& s_{P2_min} \geq 0 \\
& s_{FP23_max} \geq 0 \\
& s_{V1_max} \geq 0 \\
& s_{V1_min} \geq 0 \\
& s_{V2_max} \geq 0 \\
& s_{V2_min} \geq 0 \\
& s_{V3_max} \geq 0 \\
& s_{V3_min} \geq 0
\end{aligned} \tag{5.6}$$

As variáveis de folga correspondem às restrições relacionadas ao limite máximo, e as variáveis de excesso estão relacionadas ao limite mínimo. Essas variáveis, estritamente positivas, são incorporadas à função objetivo por meio da função barreira logarítmica e do parâmetro de barreira, como mostrado em (5.7).

$$\begin{aligned}
&\text{Minimizar } g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos\theta_{23}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos\theta_{13}) + \\
&\quad -\mu_P(\ln s_{P2_max} + \ln s_{P2_min}) + \\
&\quad -\mu_{FP}(\ln s_{FP23_max}) + \\
&\quad -\mu_V(\ln s_{V1_max} + \ln s_{V1_min}) + \\
&\quad -\mu_V(\ln s_{V2_max} + \ln s_{V2_min}) + \\
&\quad -\mu_V(\ln s_{V3_max} + \ln s_{V3_min}) +
\end{aligned}$$

sujeito a :

$$\Delta P_3 = 0$$

$$\Delta Q_3 = 0$$

$$P_2 + s_{P2_max} = 2,0$$

$$P_2 - s_{P2_min} = 1,2$$

$$F_{P23} + s_{FP23_max} = 1,4$$

$$V_1 + s_{V1_max} = 1,1$$

$$V_1 - s_{V1_min} = 0,9$$

$$V_2 + s_{V2_max} = 1,1$$

$$V_2 - s_{V2_min} = 0,9$$

(5.7)

$$V_3 + s_{V3_max} = 1,1$$

$$V_3 - s_{V3_min} = 0,9$$

O parâmetro de barreira foi dividido de acordo com a restrição a qual está associado, ou seja, μ_P , μ_{FP} e μ_V , os quais correspondem às restrições de potência ativa gerada, de fluxo de potência ativa na linha de transmissão e de tensão, respectivamente. Verificou-se que as diferentes estimativas de valores para μ melhora o processo de convergência.

Associa-se ao Problema (5.7) a função Lagrangiana. Para cada restrição do problema tem-se um multiplicador de Lagrange correspondente. A função Lagrangiana é dada por:

$$\begin{aligned}
L = & g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos \theta_{23}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos \theta_{13}) + \\
& -\mu_P(\ln s_{P2_max} + \ln s_{P2_min}) + \\
& -\mu_{FP}(\ln s_{FP23_max}) + \\
& -\mu_V(\ln s_{V1_max} + \ln s_{V1_min}) + \\
& -\mu_V(\ln s_{V2_max} + \ln s_{V2_min}) + \\
& -\mu_V(\ln s_{V3_max} + \ln s_{V3_min}) + \\
& \lambda_{p3}(\Delta P_3) + \lambda_{q3}(\Delta Q_3) + \\
& \pi_{P2_max}(P_2 + s_{P2_max} - 2,0) + \\
& \pi_{P2_min}(P_2 - s_{P2_min} - 1,2) + \\
& \pi_{FP23_max}(F_{P23} + s_{FP23_max} - 1,4) + \\
& \pi_{V1_max}(V_1 + s_{V1_max} - 1,1) + \\
& \pi_{V1_min}(V_1 - s_{V1_min} - 0,9) + \\
& \pi_{V2_max}(V_2 + s_{V2_max} - 1,1) + \\
& \pi_{V2_min}(V_2 - s_{V2_min} - 0,9) + \\
& \pi_{V3_max}(V_3 + s_{V3_max} - 1,1) + \\
& \pi_{V3_min}(V_3 - s_{V3_min} - 0,9) +
\end{aligned} \tag{5.8}$$

As condições necessárias de primeira-ordem são aplicadas em (5.8), gerando um sistema de equações não-lineares, cujas raízes serão encontradas pelo método de Newton. A estimativa inicial para os multiplicadores de Lagrange irrestritos é de $\lambda_{p3} = 0$ e $\lambda_{q3} = 0$. Os multiplicadores do tipo π e as variáveis de folga e de excesso s foram inicializadas conforme mencionado no Item 3.2.2, satisfazendo KKT. Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores iniciais para μ e β .

μ inicial	β
$\mu_P = 0,1$	$\beta_P = 2$
$\mu_{FP} = 0,1$	$\beta_{FP} = 5$
$\mu_V = 0,1$	$\beta_V = 2$

A Tabela 5.5 apresenta a solução do Problema (5.1). Pode ser verificado que três restrições ficaram ativas na solução, são elas: tensões nas barras 1 e 2 e o fluxo de potência ativa na linha 2-3. As demais restrições permaneceram folgadas.

A geração de potência ativa da barra 2 poderia fornecer até 200 MW, porém, a restrição na transmissão limitou a geração ao valor-limite do fluxo de potência ativa.

Tabela 5.5 – Solução para o sistema de 3 barras.

Barra	Tipo	V(pu)	θ°	P^G (MW)	Q^G (MVar)	P^C (MW)	Q^C (MVar)
1	referência	1,100	0,0	73,3	39,9	0	0
2	geração	1,100	2,1	140,0	86,4	0	0
3	carga	0,991	-2,7	0	0	200	100
Total				213,3	126,3	200	100
Perdas na transmissão				13,3 MW			
Fluxo na linha 1-3				73,3 MW			
Fluxo na linha 2-3				140,0 MW			

A convergência é dependente dos parâmetros de barreira estimados pelo usuário. Diferentes estimativas podem conduzir o sistema a diferentes soluções. Nesse exemplo, os valores escolhidos para μ , para β e para o erro das equações de balanço (10^{-8} pu) resultaram em um processo iterativo de 18 iterações com 0,07 segundos de tempo de processamento. A Figura 5.2 apresenta a convergência das equações de balanço. Para uma melhor visualização destacou-se a convergência a partir da décima primeira iteração. A restrição de geração de potência ativa partiu de um ponto infactível, porém, a partir da segunda iteração forneceu um resultado dentro dos limites estabelecidos, como pode ser visto na Figura 5.3. O fluxo de potência ativa na linha 2-3 não viola o valor do limite durante o processo iterativo, convergindo para o limite superior, como mostrado na Figura 5.4.

Na Figura 5.5 tem-se a curva de convergência das tensões. Estas permaneceram dentro dos limites predefinidos durante o processo iterativo. Verifica-se que as tensões da barra de referência e da barra de geração atingem o limite superior. Na Figura 5.6 tem-se o comportamento da função objetivo durante a convergência. No início do processo iterativo apresentou um comportamento crescente, tendendo a diminuir a partir

da terceira iteração e apresentando um valor constante a partir da décima segunda iteração.

Figura 5.2 – Equações de balanço da rede elétrica.

Figura 5.3 – Geração de potência ativa na barra de geração.

Figura 5.4 – Fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 2 e 3.

Figura 5.5 – Magnitude das tensões nas 3 barras do sistema.

Figura 5.6 – Perdas ativas do sistema de transmissão.

O FPO conseguiu manipular todas as restrições do problema e fornecer um ponto de operação que as satisfizessem, minimizando as perdas de potência ativa na transmissão.

5.1.1.1 Análise dos multiplicadores de Lagrange, das restrições e da condição de folga complementar

Na Tabela 5.5 verificou-se que as restrições de tensão das barras 1 e 2 e que o fluxo de potência ativa na linha de transmissão, conectada entre as barras 2 e 3, atingiram seus limites superiores. Na solução ótima algumas condições de otimalidade devem ser satisfeitas em relação às restrições de desigualdade, são elas:

- a) para as restrições ativas os multiplicadores associados devem ser diferentes de zero;
- b) para as restrições folgadas os multiplicadores devem ser nulos;
- c) os sinais dos multiplicadores devem obedecer às condições de KKT;
- d) a condição de folga complementar deve ser satisfeita.

Na Tabela 5.6 tem-se os valores dos multiplicadores de Lagrange na solução do Problema (5.1) associados às restrições de igualdade e desigualdade. Os multiplicadores

associados às restrições de igualdade são irrestritos, podendo assumir valores negativos e positivos. Os multiplicadores associados às restrições de desigualdade satisfizeram as condições de (a) a (c).

Tabela 5.6 – Multiplicadores de Lagrange.

$\lambda_{p3} = -0,1391$
$\lambda_{q3} = -0,0706$
$\pi_{P2_max} = 0,0000$
$\pi_{P2_min} = 0,0000$
$\pi_{FP23_max} = 0,0323$
$\pi_{V1_max} = 0,0463$
$\pi_{V1_min} = 0,0000$
$\pi_{V2_max} = 0,2632$
$\pi_{V2_min} = 0,0000$
$\pi_{V3_max} = 0,0000$
$\pi_{V3_min} = 0,0000$

As Figuras 5.7 a 5.9 apresentam o comportamento durante o processo iterativo dos seguintes parâmetros relacionados com a restrição de tensão das barras 1, 2 e 3:

- a) multiplicadores de Lagrange π_{V_max} ;
- b) restrições de tensão $V - V_{max} \leq 0$;
- c) condição de folga complementar $\pi_{V_max}(V - V_{max})$.

Como as tensões das barras 1 e 2 convergiram para o limite superior, os multiplicadores associados a essas restrições decresceram durante a convergência, mas não atingiram o valor nulo, como pode ser visto nas Figuras 5.7 e 5.8. A tensão da barra 3 permaneceu dentro da faixa de limite, não convergindo para nenhum deles, o que fez com que o multiplicador associado a esta restrição tendesse para zero (Figura 5.9).

Como pode ser observado na Figura 5.5, a tensão da barra 2 atinge o limite superior no início do processo iterativo, por essa razão, na Figura 5.8 o valor da restrição torna-se praticamente nulo, coincidindo com os valores da folga complementar.

A Figura 5.10 apresenta o comportamento durante o processo iterativo dos seguintes parâmetros relacionados com a restrição de fluxo de potência ativa na transmissão:

- a) multiplicadores de Lagrange π_{FP23_max} ;
- b) restrição de fluxo de potência ativa na linha de transmissão $F_{P23} - F_{P23_max} \leq 0$;
- c) condição de folga complementar $\pi_{FP23_max} (F_{P23} - F_{P23_max})$.

Na Figura 5.10 pode ser observado que o multiplicador converge para um ponto diferente de zero, enquanto a restrição atinge o limite, tornando nulo o valor da restrição.

Figura 5.7 – Em relação à restrição de tensão da barra 1 (limite superior).

Figura 5.8 – Em relação à restrição de tensão da barra 2 (limite superior).

Figura 5.9 – Em relação à restrição de tensão da barra 3 (limite superior).

Figura 5.10 – Em relação à restrição de fluxo de potência ativa da linha 2 -3.

Pode ser verificado pelas Figuras 5.7 a 5.10 que a condição de folga complementar foi satisfeita na solução, bem como as outras condições de otimalidade. Esses resultados obtidos através do programa de FPO serão os dados de entrada para o programa de Análise de Sensibilidade. Logo, quanto mais preciso, respeitando-se uma certa tolerância, forem esses resultados, melhor será o desempenho do programa de Análise de Sensibilidade.

5.1.2 Solução do Sistema de 3 barras pela Análise de Sensibilidade

A Análise de Sensibilidade parte de uma solução ótima factível, com uma precisão suficientemente grande para permitir estudos confiáveis. Por meio do FPO obteve-se a solução do Problema (5.1). Se perturbações forem incluídas ao FPO, um novo ponto de operação deve ser obtido. A Análise de Sensibilidade determina esse novo ponto de operação da rede elétrica sem a necessidade de executar o programa de FPO novamente.

Considere o Problema (5.1) com perturbações nas restrições de igualdade e desigualdade. O índice utilizado para diferenciar o parâmetro de perturbação ϵ é igual

ao índice do multiplicador de Lagrange associado à restrição. O Problema (5.1) pode ser reescrito da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar } g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos \theta_{23}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos \theta_{13}) \\
 &\text{sujeito a :} \\
 &\Delta P_3 = 0 \\
 &\Delta Q_3 = 0 \\
 &(1,2 + \varepsilon_{P2_min}) \leq P_2 \leq (2,0 + \varepsilon_{P2_max}) \\
 &F_{P23} \leq (1,4 + \varepsilon_{FP23_max}) \\
 &(0,9 + \varepsilon_{V1_min}) \leq V_1 \leq (1,1 + \varepsilon_{V1_max}) \\
 &(0,9 + \varepsilon_{V2_min}) \leq V_2 \leq (1,1 + \varepsilon_{V2_max}) \\
 &(0,9 + \varepsilon_{V3_min}) \leq V_3 \leq (1,1 + \varepsilon_{V3_max})
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Em que:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_3 = &-(2 + \varepsilon_{p3}) - \left(V_3^2 g_{13} - V_3 V_1 g_{13} \cos \theta_{31} - V_3 V_1 b_{13} \sin \theta_{31} \right) + \\
 &-\left(V_3^2 g_{23} - V_3 V_2 g_{23} \cos \theta_{32} - V_3 V_2 b_{23} \sin \theta_{32} \right)
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta Q_3 = &-(1 + \varepsilon_{q3}) - \left(-V_3^2 b_{13} + V_3 V_1 b_{13} \cos \theta_{31} - V_3 V_1 g_{13} \sin \theta_{31} \right) + \\
 &-\left(-V_3^2 b_{23} + V_3 V_2 b_{23} \cos \theta_{32} - V_3 V_2 g_{23} \sin \theta_{32} \right)
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

$$P_2 = V_2^2 g_{23} - V_2 V_3 g_{23} \cos \theta_{23} - V_2 V_3 b_{23} \sin \theta_{23} \tag{5.12}$$

$$F_{P23} = V_2^2 g_{23} - V_2 V_3 g_{23} \cos \theta_{23} - V_2 V_3 b_{23} \sin \theta_{23} \tag{5.13}$$

As restrições de desigualdades são desmembradas em duas e para simplificar a representação do problema fez-se todas as restrições do tipo $\leq$. Dessa forma, o Problema (5.9) é reescrito como:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar } g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos\theta_{23}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos\theta_{13}) \\
& \text{sujeito a :} \\
& \Delta P_3 = 0 \\
& \Delta Q_3 = 0 \\
& P_2 \leq (2,0 + \varepsilon_{P2_max}) \\
& -P_2 \leq -(1,2 + \varepsilon_{P2_min}) \\
& F_{P23} \leq (1,4 + \varepsilon_{FP23_max}) \\
& V_1 \leq (1,1 + \varepsilon_{V1_max}) \\
& -V_1 \leq -(0,9 + \varepsilon_{V1_min}) \\
& V_2 \leq (1,1 + \varepsilon_{V2_max}) \\
& -V_2 \leq -(0,9 + \varepsilon_{V2_min}) \\
& V_3 \leq (1,1 + \varepsilon_{V3_max}) \\
& -V_3 \leq -(0,9 + \varepsilon_{V3_min})
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Para simplificar e facilitar a apresentação da técnica de sensibilidade, considere a função objetivo como $f(x)$, as restrições de igualdade ΔP_3 e ΔQ_3 , como $g_1(x)$ e $g_2(x)$, respectivamente, e as restrições de desigualdade definidas como $h_i(x)$, $i = 1, \dots, 9$, na ordem apresentada em (5.14). Os índices dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade e desigualdade acompanham essa modificação na apresentação do problema. Dessa forma, a função Lagrangiana associada ao problema (5.14) é:

$$\begin{aligned}
L = & f(x) + \lambda_1 g_1(x) + \lambda_2 g_2(x) + \\
& \pi_1 h_1(x) + \pi_2 h_2(x) + \\
& \pi_3 h_3(x) + \\
& \pi_4 h_4(x) + \pi_5 h_5(x) + \\
& \pi_6 h_6(x) + \pi_7 h_7(x) + \\
& \pi_8 h_8(x) + \pi_9 h_9(x)
\end{aligned} \tag{5.15}$$

O sistema para Análise de Sensibilidade é construído aplicando na função Lagrangiana (5.15):

a) as condições necessárias de primeira-ordem em relação às variáveis primais:

$$\nabla_x L(x, \lambda, \pi, \varepsilon) = 0 \quad (5.16)$$

b) as restrições de igualdade satisfeitas:

$$\begin{aligned} g_1(x, \varepsilon) &= 0 \\ g_2(x, \varepsilon) &= 0 \end{aligned} \quad (5.17)$$

c) a condição de folga complementar:

$$\begin{aligned} \pi_1 h_1(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_2 h_2(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_3 h_3(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_4 h_4(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_5 h_5(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_6 h_6(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_7 h_7(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_8 h_8(x, \varepsilon) &= 0 \\ \pi_9 h_9(x, \varepsilon) &= 0 \end{aligned} \quad (5.18)$$

Sendo que $(x, \lambda, \pi, \varepsilon) = (x^*, \lambda^*, \pi^*, 0)$, em que o símbolo * representa a solução ótima do problema não-perturbado.

Expandindo o sistema de equações não-lineares (5.16) a (5.18), em série de Taylor, até primeira-ordem em torno da solução do Problema (5.1) não-perturbado, tem-se o sistema para Análise de Sensibilidade que foi mostrado em (4.10). As submatrizes que formam a matriz de sensibilidade escritas em função das variáveis elétricas são dadas por:

$$\nabla_{xx}^2 L(x^*, \lambda^*, \pi^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial V_1^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_1 \partial V_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_1 \partial V_3} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_1 \partial \theta_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_1 \partial \theta_3} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V_2 \partial V_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_2^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_2 \partial V_3} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_2 \partial \theta_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_2 \partial \theta_3} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V_3 \partial V_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_3 \partial V_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_3^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_3 \partial \theta_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_3 \partial \theta_3} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_2 \partial V_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_2 \partial V_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_2 \partial V_3} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_2^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_2 \partial \theta_3} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_3 \partial V_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_3 \partial V_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_3 \partial V_3} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_3 \partial \theta_2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_3^2} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$\nabla_x g(x^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial V_1} & \frac{\partial g_2}{\partial V_1} \\ \frac{\partial g_1}{\partial V_2} & \frac{\partial g_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial g_1}{\partial V_3} & \frac{\partial g_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial g_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial g_2}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial g_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial g_2}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$\nabla_x h(x^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial V_1} & \frac{\partial h_2}{\partial V_1} & \frac{\partial h_3}{\partial V_1} & \frac{\partial h_4}{\partial V_1} & \frac{\partial h_5}{\partial V_1} & \frac{\partial h_6}{\partial V_1} & \frac{\partial h_7}{\partial V_1} & \frac{\partial h_8}{\partial V_1} & \frac{\partial h_9}{\partial V_1} \\ \frac{\partial h_1}{\partial V_2} & \frac{\partial h_2}{\partial V_2} & \frac{\partial h_3}{\partial V_2} & \frac{\partial h_4}{\partial V_2} & \frac{\partial h_5}{\partial V_2} & \frac{\partial h_6}{\partial V_2} & \frac{\partial h_7}{\partial V_2} & \frac{\partial h_8}{\partial V_2} & \frac{\partial h_9}{\partial V_2} \\ \frac{\partial h_1}{\partial V_3} & \frac{\partial h_2}{\partial V_3} & \frac{\partial h_3}{\partial V_3} & \frac{\partial h_4}{\partial V_3} & \frac{\partial h_5}{\partial V_3} & \frac{\partial h_6}{\partial V_3} & \frac{\partial h_7}{\partial V_3} & \frac{\partial h_8}{\partial V_3} & \frac{\partial h_9}{\partial V_3} \\ \frac{\partial h_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_6}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_7}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_8}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_9}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial h_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_6}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_7}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_8}{\partial \theta_3} & \frac{\partial h_9}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\pi^{*T} \nabla_x h(x^*)^T = [\pi_1 \quad \pi_2 \quad \pi_3 \quad \pi_4 \quad \pi_5 \quad \pi_6 \quad \pi_7 \quad \pi_8 \quad \pi_9]^* \nabla_x h(x^*)^T \quad (5.22)$$

$$h(x^*) = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_9 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

em que:

$$x^* = (V_1, V_2, V_3, \theta_2, \theta_3)^*$$

Após a construção do sistema, foram realizados os seguintes testes:

- perturbação na carga ativa e reativa da barra de carga;
- perturbação no limite do fluxo de potência ativa da linha 2-3;
- perturbação na carga e no limite do fluxo de potência ativa da linha 2-3, simultaneamente.

A seguir tem-se de forma detalhada os resultados obtidos.

5.1.2.1 Perturbação na carga do sistema

Perturbações foram introduzidas na carga ativa e reativa do sistema de 3 barras, o que provocou um aumento de demanda. A Tabela 5.7 apresenta os valores, em pu, utilizados para as perturbações ε_{p3} e ε_{q3} , as quais foram consideradas no modelo do Problema (5.9).

Tabela 5.7 – Valores das perturbações.

Perturbações	1%	2%	3%	4%	5%
ε_{p3}	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
ε_{q3}	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05

As Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam o ponto de operação do sistema elétrico para os diferentes valores de perturbações. Pode ser observado que as três restrições de desigualdade, que atingiram seus limites na solução do caso-base ($\varepsilon = 0\%$), permaneceram ativas nas soluções após as perturbações. Como a geração na barra 2 manteve-se fixa em 140 MW, devido ao limite imposto na linha de transmissão que conecta esta barra a barra 3, o aumento de carga foi suprido pela barra de referência (P_1). Observou-se, também, que o aumento de carga reduziu o valor de tensão da barra 3 e elevou os valores das perdas ativas na transmissão.

Tabela 5.8 – Pontos de operação para diferentes percentuais de perturbação.

ε	Magnitude (pu) e fase das tensões nas barras					
	V_1	V_2	V_3	θ_1^0	θ_2^0	θ_3^0
0%	1,100	1,100	0,991	0,0	2,1	-2,7
1%	1,100	1,100	0,990	0,0	1,9	-2,8
2%	1,100	1,100	0,988	0,0	1,7	-3,0
3%	1,100	1,100	0,987	0,0	1,5	-3,2
4%	1,100	1,100	0,985	0,0	1,3	-3,3
5%	1,100	1,100	0,984	0,0	1,1	-3,5

Tabela 5.9 – Pontos de operação para diferentes percentuais de perturbação.

ε	Geração de potência ativa (MW)		Geração de potência reativa (MVar)		Fluxo de potência ativa nas linhas (MW)		Perdas (MW)
	P_1	P_2	Q_1	Q_2	1-3	2-3	
0%	73,3	140,0	39,9	86,4	73,3	140,0	13,3
1%	75,7	140,0	39,5	88,4	75,7	140,0	13,6
2%	78,0	140,0	39,2	90,3	78,0	140,0	14,0
3%	80,4	140,0	38,8	92,2	80,4	140,0	14,4
4%	82,7	140,0	38,5	94,1	82,7	140,0	14,8
5%	85,1	140,0	38,2	96,0	85,1	140,0	15,2

Observa-se pela Figura 5.11 que a técnica de sensibilidade forneceu pontos de operação com até, aproximadamente, 5% de perturbação na demanda do sistema. Satisfez as equações de balanço da rede elétrica, as quais apresentaram para 5% de perturbação um erro de 0,14 MW e 0,10 MVar.

Figura 5.11 – Equações de balanço da rede elétrica.

A Tabela 5.10 apresenta os multiplicadores de Lagrange associados às restrições que permaneceram ativas para as diferentes situações de perturbação. Não houve violação das condições de KKT quanto aos sinais dos multiplicadores associados às restrições de desigualdade.

Tabela 5.10 – Multiplicadores de Lagrange.

ε	λ_{p3}	λ_{q3}	π_{FP23_max}	π_{V1_max}	π_{V2_max}
0%	-0,1391	-0,0706	0,0323	0,0463	0,2632
1%	-0,1456	-0,0716	0,0384	0,0645	0,2129
2%	-0,1521	-0,0726	0,0444	0,0828	0,1625
3%	-0,1586	-0,0736	0,0504	0,1010	0,1122
4%	-0,1651	-0,0746	0,0565	0,1192	0,0619
5%	-0,1715	-0,0756	0,0625	0,1375	0,0115

5.1.2.2 Perturbação no limite de fluxo de potência ativa da linha 2-3

Por meio da solução do caso-base, sabe-se que três restrições de desigualdade atingiram o limite máximo de operação. Com o objetivo de verificar a técnica de sensibilidade para perturbações nas restrições de desigualdade ativas na solução, optou-se por perturbar o valor do limite do fluxo de potência ativa da linha 2-3. A perturbação introduzida na restrição variou de – 5 a 5 % do valor máximo estabelecido. A Figura 5.12 apresenta o comportamento das equações de potência ativa e reativa para cada perturbação. Verifica-se que, partindo da solução do caso-base ($\varepsilon = 0\%$), em direção aos extremos, ocorre um aumento no valor das equações, porém, esses valores continuam satisfazendo as condições de operação. Com a diminuição do valor do limite, observa-se um aumento nas perdas na transmissão do sistema, como pode ser visto na Figura 5.13.

Figura 5.12 – Equações de balanço da rede elétrica.

Figura 5.13 – Perdas ativas no sistema de transmissão.

Para os diferentes valores de perturbações, as tensões nas barras 1 e 2 permaneceram no limite superior, sem violar a restrição. Pode ser observado pela Tabela 5.11 que o fluxo de potência ativa da linha 2-3 acompanhou os diferentes valores de limites estabelecidos por meio das perturbações. Como a única linha ligada à barra de geração (barra 2) é a linha com restrição de fluxo, a geração ativa da barra 2 limitou-se a gerar somente o especificado na restrição de transmissão. Partindo da solução do caso-base em direção à diminuição de F_{P23_max} , verifica-se uma diminuição no valor de P_2 e um aumento de P_1 , de tal forma que a soma das duas gerações permaneceu em

torno de 213 MW, satisfazendo a condição de carga e perdas ativas do sistema. O multiplicador associado à restrição de fluxo de potência ativa da linha 2-3 está apresentado na Tabela 5.11. Com a redução do limite dessa restrição, observa-se um aumento no valor desse multiplicador. Esse aumento indica que quanto menor for o limite de fluxo estabelecido, maior será a dificuldade do sistema em satisfazer essa restrição.

Tabela 5.11 – Fluxo ativo na linha 2-3, gerações ativas e o multiplicador associado à restrição de fluxo de potência ativa da linha 2-3.

ε	F_{P23_max} (MW)	F_{p23} (MW)	P_1 (MW)	P_2 (MW)	π_{FP23_max}
- 5%	133,0	133,0	80,6	133,0	0,0586
- 4%	134,4	134,4	79,1	134,4	0,0534
- 3%	135,8	135,8	77,7	135,8	0,0481
- 2%	137,2	137,2	76,2	137,2	0,0428
- 1%	138,6	138,6	74,8	138,6	0,0376
0%	140,0	140,0	73,3	140,0	0,0323
1%	141,4	141,4	71,9	141,4	0,0271
2%	142,8	142,8	70,4	142,8	0,0218
3%	144,2	144,2	69,0	144,2	0,0165
4%	145,6	145,6	67,6	145,6	0,0113
5%	147,0	147,0	66,1	147,0	0,0060

Com este teste pode ser verificado que a Análise de Sensibilidade apresentou bons resultados para perturbações nas restrições de desigualdade ativas na solução do caso-base.

5.1.2.3 Perturbação simultânea na carga e no limite de fluxo de potência ativa da linha 2-3

Com o objetivo de verificar a eficiência da técnica de Análise de Sensibilidade quando duas restrições são perturbadas ao mesmo tempo, optou-se por introduzir perturbações na carga do sistema e no valor-limite do fluxo de potência ativa na linha ligada as barras 2-3. As perturbações foram acrescentadas ao sistema, como mostrado na Tabela 5.12

Tabela 5.12 – Perturbações introduzidas ao sistema.

Testes	Perturbação na carga			Perturbação no limite de fluxo	
	ε	MW	MVAr	ε	F_{P23_max} (MW)
0	0%	200,0	100,0	0%	140,0
1	1%	202,0	101,0	- 1%	138,6
2	2%	204,0	102,0	- 2%	137,2
3	3%	206,0	103,0	- 3%	135,8
4	4%	208,0	104,0	- 4%	134,4
5	5%	210,0	105,0	- 5%	133,0

Nas condições dos testes apresentados na Tabela 5.12, verificou-se que devido ao aumento da carga e à diminuição do limite do fluxo houve um aumento do erro das equações de balanço da rede elétrica, como pode ser visto na Figura 5.14. Porém, o erro permaneceu inferior a 0,3 MW e 0,3 MVAr. A Figura 5.15 apresenta o comportamento crescente das perdas ativas na transmissão para os testes realizados.

Figura 5.14 – Equações de balanço da rede elétrica.

Figura 5.15 – Perdas ativas no sistema de transmissão.

As restrições de tensão ativas no caso-base permaneceram inalteradas nos testes. A Tabela 5.13 apresenta os valores do fluxo de potência ativa na linha 2-3 e as gerações de potência ativa nas barras 1 e 2. Notou-se que a geração de potência ativa na barra 1 aumenta e a da barra 2 é reduzida, devido à restrição de fluxo da linha 2-3. Essa restrição de fluxo permaneceu ativa no testes realizados, porém, a partir do teste 4 verificou-se uma violação da restrição de 0,1 MW no valor do fluxo ativo da linha.

Tabela 5.13 – Fluxo ativo na linha 2-3 e gerações ativas.

Testes	$F_{P_{23}}$ (MW)	P_1 (MW)	P_2 (MW)
0	140,0	73,3	140,0
1	138,6	77,1	138,6
2	137,2	80,9	137,2
3	135,8	84,7	135,8
4	134,5	88,5	134,5
5	133,1	92,3	133,1

Por meio de todas as situações de perturbações apresentadas para o sistema de 3 barras pode ser verificado que a Análise de Sensibilidade determinou corretamente novos pontos de operação para a rede elétrica.

5.2 Sistema IEEE 14 barras

O programa de FPO com despacho ativo e reativo foi utilizado para resolver o sistema IEEE 14 barras, o qual está apresentado na Figura 5.16. As características utilizadas nesse sistema foram:

- 1 barra de referência (*slack*);
- 1 barra de geração;
- 9 barras de carga;
- 3 barras com controle de reativo;
- 3 *taps* variáveis;
- 20 linhas de transmissão.

A barra de geração considerada foi a barra 2, cujo limite de geração de potência ativa foi de $1 \leq P_2 \leq 250\text{MW}$. Os demais limites de gerações de potência reativa e tensões na barras podem ser vistos no Apêndice.

Utilizando o programa de FPO, testes foram realizados onde duas restrições de fluxo na transmissão foram consideradas. Nessa situação, a Análise de Sensibilidade foi usada para realizar testes em que perturbações foram introduzidas na carga e no limite de fluxo na transmissão.

Figura 5.16 – Sistema elétrico IEEE 14 barras.

5.2.1 Solução do sistema IEEE 14 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo

Com o objetivo de verificar a influência da restrição de fluxo de potência ativa em linhas de transmissão no desempenho do sistema, acrescentou-se ao modelo de FPO duas linhas com limite na transmissão. As linhas escolhidas foram as que ligam as barras 2-4 e 10-11, cujos limites foram 65 MW e 1 MW, respectivamente. A Tabela 5.14 apresenta alguns resultados obtidos para os casos sem e com a restrição na transmissão.

Tabela 5.14 – Parâmetros do sistema para três casos.

Casos	Gerações ativas (MW)		Fluxos nas linhas (MW)		Perdas (MW)
	P_{slack}	P_2	2-4	10-11	
Sem restrição na transmissão	50,0	217,5	67,07	1,20	8,50
Com a restrição na linha 2-4	82,8	184,8	65,00	1,08	8,65
Com as restrições nas linhas 2-4 e 10-11	92,0	176,8	65,00	1,00	9,80

Algumas observações podem ser feitas verificando os resultados por meio da Tabela 5.14:

- a) o despacho de potência ativa é ajustado para satisfazer as restrições e a demanda da rede elétrica;
- b) os fluxos de potência ativa das linhas 2-4 e 10-11 atingem o limite;
- c) a inclusão das restrições de transmissão no modelo do problema aumentam as perdas de potência ativa.

A Tabela 5.15 mostra os valores iniciais atribuídos para os parâmetros μ e β . Os índices P, Q, FP, TAP e V indicam as restrições de geração de potência ativa, geração de potência reativa, fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão, *tap* de transformadores e tensão, respectivamente.

Tabela 5.15 – Valores iniciais para μ e β .

μ inicial	β
$\mu_P = 0,1$	$\beta_P = 1,5$
$\mu_Q = 0,01$	$\beta_Q = 1,5$
$\mu_{FP} = 0,001$	$\beta_{FP} = 1,5$
$\mu_{TAP} = 0,01$	$\beta_{TAP} = 1,5$
$\mu_V = 0,01$	$\beta_V = 1,5$

Considerando a situação com as duas restrições na transmissão, o tempo de processamento foi de 0,82 segundos, com 15 iterações, e o erro considerado para as equações de balanço foi de 0,00001 pu. As tensões das barras 12 e 13 convergiram para o limite inferior, e a geração de potência reativa da barra 2, para o limite superior. A Figura 5.17 apresenta as equações de balanço do sistema durante o processo iterativo. As restrições de fluxo de potência ativa nas linhas 2-4 e 10-11 são mostradas nas Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente. Nessas figuras, a linha grossa representa o limite máximo estabelecido. O fluxo na linha 2-4 parte de um ponto factível e converge para o valor do limite, enquanto o da linha 10-11 inicia na região infactível, oscila em torno do limite e converge para o limite de 1 MW.

Figura 5.17 – Equações de balanço da rede elétrica.

Figura 5.18 – Fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 2 e 4.

Figura 5.19 – Fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 10 e 11.

Como pode ser observado pelos resultados apresentados, o programa de FPO conseguiu convergir para uma solução factível, apesar do acréscimo de duas restrições de transmissão no modelo do problema.

Na solução obtida, considerando as duas restrições na transmissão, testes em que perturbações foram introduzidas na carga e no limite do fluxo de potência ativas das linhas 2-4 e 10-11 foram realizados utilizando a Análise de Sensibilidade.

5.2.2 Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema

A demanda total do sistema de 14 barras é de 259 MW e 73,50 MVar, sendo que a carga das barras de carga é de 131 MW e 34,3 MVar. Perturbações variando de 1% a 5% foram acrescentadas somente na carga das barras de carga, e o comportamento do sistema foi verificado por meio da Análise de Sensibilidade. A Figura 5.20 apresenta as equações de balanço do sistema. O erro da equação de potência ativa é menor que o da potência reativa. O aumento da demanda do sistema elevou o valor das perdas ativas do sistema de transmissão, como pode ser visto na Figura 5.21.

Figura 5.20 – Equações de balanço da rede elétrica.

Figura 5.21 – Perdas ativas no sistema de transmissão.

Para as perturbações de 1% a 5%, verificou-se que os fluxos de potência ativa nas linhas 2-4 e 10-11 permaneceram no limite sem violar a restrição. As barras, que no caso-base estavam com suas tensões no limite inferior, mantiveram-se nesta condição. As barras de referência e geração geraram mais potência para atender a nova demanda. A partir da perturbação de 2%, observou-se uma violação de 0,1 MVar na geração de potência reativa da barra 2. A Análise de Sensibilidade indica, com esta informação, que para esses aumentos de carga, a geração deveria ser expandida, tal que o novo ponto de operação satisfizesse todas as restrições de operação do sistema.

5.2.3 Análise de Sensibilidade – Perturbação no limite do fluxo de potência ativa das linhas 2-4 e 10-11

No caso-base, os fluxos de potência ativa das linhas 2-4 e 10-11 atingiram seus limites de operação, o que tornou estas restrições de desigualdade ativas na solução. Com o objetivo de verificar o comportamento do sistema com a redução dos limites, perturbações variando de – 1% a – 5% foram introduzidas ao problema. As Tabelas 5.16 e 5.17 apresentam os valores dos fluxos nas linhas para as dadas perturbações. Pode ser verificado que as restrições perturbadas não violaram os novos limites impostos. A

perturbação no limite de fluxo da linha 2-4 elevou o valor das perdas do sistema de transmissão, enquanto a perturbação no limite de fluxo da linha 10-11 pouco alterou o valor das perdas. O maior erro das equações de balanço aconteceu para a perturbação no limite de fluxo da linha 2-4, os quais foram 0,11 MW e 0,08 MVar. Nesta situação observou-se uma pequena violação na geração de potência reativa da barra 2. As restrições de tensão ativas no caso-base permaneceram ativas com as perturbações.

Tabela 5.16 – Perturbação no limite do fluxo da linha 2-4, dados em MW.

ε	$F_{p2-4}^{\max}$	F_{p2-4}	$F_{p10-11}^{\max}$	F_{p10-11}	Perdas
0%	65,00	65,00	1,00	1,00	9,80
- 1%	64,35	64,35	1,00	1,00	9,93
- 2%	63,70	63,68	1,00	1,00	10,10
- 3%	63,05	63,01	1,00	1,00	10,30
- 4%	62,40	62,33	1,00	1,00	10,54
- 5%	61,75	61,64	1,00	1,00	10,82

Tabela 5.17 – Perturbação no limite do fluxo da linha 10-11, dados em MW.

ε	$F_{p2-4}^{\max}$	F_{p2-4}	$F_{p10-11}^{\max}$	F_{p10-11}	Perdas
0%	65,00	65,00	1,00	1,00	9,80
- 1%	65,00	65,00	0,99	0,99	9,79
- 2%	65,00	65,00	0,98	0,98	9,79
- 3%	65,00	65,00	0,97	0,97	9,79
- 4%	65,00	65,00	0,96	0,96	9,79
- 5%	65,00	65,00	0,95	0,95	9,78

Como pode ser observado, a Análise de Sensibilidade manteve as restrições de fluxo perturbadas no limite.

5.3 Sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras

O sistema brasileiro equivalente CESP 440 kV de geração e transmissão com 53 barras está apresentado na Figura 5.22 e possui as seguintes características:

- 1 barra de referência (*slack*);
- 6 barras de geração;
- 44 barras de carga;
- 2 barras com controle de reativo;
- 19 *taps* variáveis;
- 65 linhas de transmissão.

A restrição de fluxo de potência ativa da linha que conecta as barras 552 e 561 foi acrescentada ao modelo do problema de FPO.

Figura 5.22 – Sistema elétrico equivalente CESP 53 barras.

5.3.1 Solução do sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo

O programa de FPO com despacho ativo e reativo foi utilizado para resolver o sistema de 53 barras. A Tabela 5.18 apresenta os fluxos da linha 552-561 e as perdas do sistema para os casos sem e com restrição na transmissão. Para a situação com restrição de fluxo, o limite considerado foi de 600 MW. Como pode ser observado pelos

resultados, o programa de FPO conseguiu reduzir o valor do fluxo nesta linha para satisfazer a restrição.

Tabela 5.18 – Parâmetros do sistema para dois casos.

	Fluxo na linha 552-561 (MW)	Perdas (MW)
Sem restrição na transmissão	632,61	190,29
Com restrição na transmissão	598,63	190,38

A Tabela 5.19 mostra os valores iniciais atribuídos aos parâmetros μ e β . Os índices P, Q, FP, TAP e V indicam as restrições de geração de potência ativa, geração de potência reativa, fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão, *tap* de transformadores e tensão, respectivamente.

Tabela 5.19 – Valores iniciais para μ e β .

μ inicial	β
$\mu_P = 0,00001$	$\beta_P = 1,00001$
$\mu_Q = 0,001$	$\beta_Q = 1,001$
$\mu_{FP} = 0,01$	$\beta_{FP} = 1,1$
$\mu_{TAP} = 0,00001$	$\beta_{TAP} = 1,00001$
$\mu_V = 0,0001$	$\beta_V = 1,0001$

Considerando a situação com restrição na transmissão, o tempo de processamento foi de 1,68 segundos, com 52 iterações, e o erro considerado para as equações de balanço foi de 0,00001 pu. As tensões das barras 561 e 559 convergiram para o limite superior. As gerações de potência ativa das barras 502 e 500 atingiram o limite superior. A Figura 5.23 apresenta as equações de balanço do sistema durante o processo iterativo. A parte do gráfico a partir da iteração 38 foi destacada para uma melhor visualização do final da convergência.

Figura 5.23 – Equações de balanço da rede elétrica.

Na situação com restrição de transmissão realizou-se um estudo em que a carga de 2 barras foi perturbada. A Análise de Sensibilidade foi utilizada nesse estudo.

5.3.2 Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema

As cargas das barras 543 (3Irmãos 138 kV) e 548 (Taquaruçu 138 kV) do sistema CESP foram perturbadas de 1% a 5%, ao mesmo tempo. Por meio da topologia do sistema, verifica-se que a barra 543 está ligada à barra 542 (3Irmãos 440 kV), a qual está conectada à geradora 520 (3Irmãos 4 Gr). A barra 548 também está eletricamente próxima da barra geradora 513 (Taquaruçu 4 Gr), sendo separada apenas pela barra 547 (Taquaruçu 440 kV). Na solução do caso-base, obtida por meio do FPO, as duas geradoras, 520 e 513, permaneceram folgadas na solução. Portanto, com condições de suprir um aumento de carga em sua região. As restrições de tensões ativas no caso-base permaneceram ativas com a perturbação. Não houve violação da restrição de fluxo na transmissão. As barras geradoras, operando no limite (barras 502 e 500), continuaram ativas, porém, a partir da perturbação de 4% a geração de potência ativa da barra 500 violou o limite máximo de 0,1 MW. A Figura 5.24 mostra as equações de balanço devido à introdução das perturbações na carga das 2 barras. A Análise de Sensibilidade

forneceu soluções aceitáveis para as restrições de igualdade do problema. A Tabela 5.20 mostra que o acréscimo de carga foi suprido pelas barras geradoras próximas às barras perturbadas. A soma total das outras gerações permaneceu, praticamente, com o mesmo valor. A perdas de potência ativa na transmissão também variaram pouco com a perturbação.

Figura 5.24 – Equações de balanço da rede elétrica.

Tabela 5.20 – Gerações, demanda e perdas para diferentes perturbações.

ε	Gerações (MW)			Demanda total		Perdas
	G_{520}	G_{513}	G_{outras}	MW	MVAr	MW
0%	363,6	644,6	5703,8	6521,60	1803,90	190,388
1%	365,2	645,5	5704,0	6524,32	1804,17	190,387
2%	366,7	646,5	5704,2	6527,03	1804,43	190,386
3%	368,3	647,5	5704,3	6529,75	1804,70	190,385
4%	369,9	648,4	5704,6	6532,47	1804,96	190,385
5%	371,5	649,4	5704,7	6535,18	1805,23	190,384

Como pode ser observado, as novas cargas foram atendidas pelas barras geradoras mais próximas delas.

5.4 Sistema IEEE 118 barras

Nos testes realizados utilizando o sistema IEEE 118 barras foram consideradas as seguintes características:

- 1 barra de referência (*slack*);
- 1 barra de geração;
- 64 barras de carga;
- 52 barras com controle de reativo;
- 9 *taps* fixos;
- 179 linhas de transmissão.

Utilizando o programa de FPO, verificou-se a situação do sistema elétrico quando a restrição de limite de fluxo na transmissão foi adicionada. Considerando a solução do caso-base com a restrição na transmissão, perturbações foram introduzidas à carga da barra final da linha congestionada, e o desempenho do sistema foi analisado por meio da Análise de Sensibilidade.

Figura 5.25 – Sistema elétrico IEEE 118 barras.

5.4.1 Solução do sistema IEEE 118 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo

Acrescentou-se ao modelo do problema a restrição de limite de fluxo de potência ativa na linha de transmissão que conecta as barras de carga 5 e 11. O valor do limite considerado foi de 70 MW. Na Tabela 5.21 tem-se os resultados de alguns parâmetros do sistema para dois casos: sem e com limite na transmissão. O limite de potência ativa gerada pela barra 10 foi de $0 \leq P_{10} \leq 500 \text{ MW}$. O somatório das gerações de potência ativa fixas, distribuídas pelas outras barras do sistema, é de 2837,10 MW e a demanda total ativa de 3668 MW.

Tabela 5.21 – Parâmetros do sistema para dois casos.

	Gerações ativas (MW)		Fluxo na linha (MW)	Perdas (MW)	Iterações
Casos	P_{slack}	P_{10}	5-11		
Sem restrição na transmissão	454,10	493,10	75,73	116,19	23
Com restrição na transmissão	521,30	426,20	69,99	116,69	49

Observou-se que a inclusão da restrição na transmissão elevou o valor das perdas de potência ativa na transmissão e o número de iterações para convergência. Como a geração da barra 10 diminuiu com a inclusão da restrição, a geração da barra de referência aumentou para atender a demanda do sistema. A Figura 5.26 apresenta a convergência das equações de balanço para a situação com restrição na transmissão. A convergência do fluxo de potência ativa da linha 5-11 está demonstrada na Figura 5.27. Nessa figura pode ser observado que na quinta iteração, o valor do fluxo ativo viola o limite, porém, o método consegue retornar essa restrição para a região factível.

Figura 5.26 – Equações de balanço da rede elétrica.

Figura 5.27 – Fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 5 e 11.

5.4.2 Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema

A solução do caso-base, considerada nos testes de perturbação de cargas, foi a que incluiu a restrição de fluxo de potência ativa na linha que conecta as barras 5 e 11. Neste caso, observou-se que essa linha opera praticamente no limite imposto, tornando

o sistema congestionado. Na Figura 5.28, extraída da Figura 5.25, tem-se as barras e as linhas ligadas à barra 11. Perturbações variando de 1% a 5% foram introduzidas na carga da barra 11 com o objetivo de verificar a eficiência da Análise de Sensibilidade quanto à restrição de fluxo da linha 5-11 e a distribuição de fluxos nas linhas que interligam a barra 11 a outras. A carga da barra 11 é de 70 MW e 23 MVar, com a introdução das perturbações o aumento foi de 70,70 MW e 23,23 MVar para $\varepsilon = 1\%$, de 71,40 MW e 23,46 MVar para $\varepsilon = 2\%$ e assim sucessivamente.

Figura 5.28 – Barras e linhas que conectam à barra 11.

A Tabela 5.22 tem os valores dos fluxos de potência ativa das linhas especificadas, as gerações de potência ativa e as perdas do sistema. O fluxo de potência L1 permaneceu em torno de 56 MW e verificou-se que a Análise de Sensibilidade manteve o valor do fluxo de potência ativa L2, praticamente, no limite, não violando a restrição. Os fluxos L3 e L4 diminuíram com o aumento da carga. As barras geradoras do sistema passaram a gerar mais potência para satisfazer o aumento da carga. Esse aumento provocou uma elevação das perdas do sistema.

Tabela 5.22 – Parâmetros do sistema para diferentes perturbações.

ε	Fluxos (MW)				Gerações (MW)		Perdas (MW)
	L1	L2	L3	L4	P_{slack}	P_{10}	
0%	56,53	69,99	27,68	26,96	521,30	426,20	116,69
1%	56,45	69,98	27,15	26,71	522,20	426,40	117,03
2%	56,37	69,98	26,63	26,45	523,00	426,60	117,40
3%	56,28	69,96	26,12	26,19	523,90	426,80	117,79
4%	56,19	69,94	25,61	25,94	524,70	426,90	118,21
5%	56,09	69,91	25,11	25,68	525,60	427,10	118,65

A Figura 5.29 apresenta os valores das equações de balanço do sistema para as diferentes perturbações. Notou-se que a partir de $\varepsilon = 3\%$ a restrição de igualdade referente à potência reativa começa a apresentar valores maiores que 1 MVar.

Figura 5.29 – Equações de balanço da rede elétrica.

Com o objetivo de verificar os resultados apresentados na Tabela 5.22, alterou-se a carga da barra 11 e executou-se o programa de FPO. A Tabela 5.23 mostra os resultados obtidos. Verificou-se que a restrição de transmissão permaneceu praticamente ativa, o valor do fluxo na linha L1 ficou em torno de 56 MW e os fluxos nas linhas L3 e L4 foram reduzidos. Com o aumento da carga, as perdas ativas do sistema aumentaram. Esses comportamentos verificados pela Análise de Sensibilidade foram comprovados pelo programa de FPO, assim, pode-se constatar a eficiência desta técnica para estudos de desempenho do sistema.

Tabela 5.23 – Parâmetros do sistema para diferentes perturbações obtidas por meio do FPO.

ε	Fluxos (MW)				Gerações (MW)		Perdas (MW)
	L1	L2	L3	L4	P _{slack}	P ₁₀	
0%	56,53	69,99	27,68	26,96	521,30	426,20	116,69
1%	56,42	69,98	27,17	26,66	526,60	421,90	116,77
2%	56,48	70,00	26,74	26,47	526,30	423,00	116,92
3%	56,46	69,97	26,29	26,17	530,80	419,40	117,04
4%	56,48	69,98	25,86	25,93	533,00	418,00	117,19
5%	56,54	69,98	25,46	25,69	534,30	417,40	117,31

5.5 Sistema IEEE 300 barras

Para o sistema IEEE 300 barras, as seguintes características foram consideradas:

- 1 barra de referência (*slack*);
- 3 barras de geração;
- 231 barras de carga;
- 65 barras com controle de reativo;
- 50 *taps* variáveis;
- 409 linhas de transmissão.

O sistema foi resolvido pelo programa de FPO, nas situações: sem e com a restrição de limite de fluxo de potência ativa na transmissão. Estudos por meio da Análise de Sensibilidade foram realizados, nos quais a carga do sistema foi perturbada.

5.5.1 Solução do sistema IEEE 300 barras pelo Fluxo de Potência Ótimo

Neste sistema, as barras 84, 124 e 143 são barras de geração, cujos limites de geração de potência ativa são 500, 300 e 800 MW, respectivamente. A geração de potência ativa fixa do sistema é de 21890,30 MW e a demanda ativa de 23247,00 MW. Acrescentou-se a restrição de fluxo de potência ativa na linha que conecta as barras 14 e 15. O valor do limite máximo para o fluxo ativo dessa linha foi de 100 MW. A Tabela 5.24 apresenta alguns dados comparativos obtidos na solução do problema, considerando os casos sem e com restrição na transmissão.

Tabela 5.24 – Parâmetros do sistema para os dois casos.

	Gerações ativas (MW)				Fluxo na linha (MW)	Perdas (MW)	Iteração
Casos	P_{slack}	P_{84}	P_{124}	P_{143}	14-15		
Sem restrição na transmissão	347,80	490,40	272,00	603,60	101,69	356,73	73
Com restrição na transmissão	290,10	490,70	255,70	676,40	99,99	358,97	76

Pode-se observar pela Tabela 5.24 que a inclusão da restrição na transmissão elevou o valor das perdas ativas e o número de iterações. O despacho de potência ativa também foi alterado com a inclusão desta restrição. Verificou-se que o programa de FPO conseguiu manter o valor do fluxo de potência ativa na linha 14-15 praticamente no limite, sem violar a restrição.

A Figura 5.30 tem o gráfico de convergência das equações de balanço da rede elétrica e na Figura 5.31, o comportamento das perdas de potência ativa na transmissão durante o processo iterativo. O fluxo de potência ativa na linha de transmissão que conecta as barras 14 e 15 parte de um ponto inicial infactível, porém, durante o processo iterativo o valor do fluxo converge para o limite, como pode ser observado na Figura 5.32.

Figura 5.30 – Equações de balanço da rede elétrica.

Figura 5.31 – Perdas ativas do sistema de transmissão.

Figura 5.32 – Fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 14 e 15.

Todas as restrições do problema foram satisfeitas na solução obtida pelo programa de FPO. Verifica-se que o método primal-dual barreira logarítmica aplicado à solução do problema de FPO pode ser considerado eficiente mesmo quando aplicado a grandes sistemas.

5.5.2 Análise de Sensibilidade – Perturbação na carga do sistema

O multiplicador de Lagrange indica a sensibilidade da função objetivo em relação à restrição a ele associada. Essa relação de sensibilidade foi mostrada em (4.4). Portanto, para uma perturbação ε na restrição associada ao λ^* , tem-se que:

se $\lambda^* < 0 \rightarrow$ um aumento no valor da função objetivo

se $\lambda^* > 0 \rightarrow$ uma redução no valor da função objetivo

em que o símbolo $*$ indica o λ ótimo, obtido na solução do problema.

Na solução do sistema IEEE 300 barras dada pelo programa de FPO, verificou-se que os multiplicadores associados às restrições de igualdade do problema apresentaram valores pequenos, da ordem de 10^{-4} . Alguns desses multiplicadores tiveram sinais positivos e outros negativos. Escolheu-se duas barras de carga cujos multiplicadores associados às restrições de balanço de potência ativa possuíam sinais negativos e positivos. As barras escolhidas foram 15 e 23, e os valores dos multiplicadores na solução do FPO foram:

$$\lambda_{\Delta p_{15}}^* = -0,00032$$

$$\lambda_{\Delta p_{23}}^* = 0,00023$$

Utilizando a Análise de Sensibilidade apresentada neste trabalho, perturbou-se a carga ativa das barras 15 e 23 de 1% a 5 %, com o objetivo de verificar o aumento e a redução no valor da função objetivo devido a sinal do multiplicador de Lagrange.

a) Perturbação na carga ativa da barra 15:

A demanda ativa da barra 15 é de 127 MW. Essa barra é a barra final da linha que está operando, praticamente, no limite estabelecido para o fluxo ativo. Pode ser observado pela Tabela 5.25 que o valor do fluxo ativo na linha 14-15 não viola o limite

com o aumento de carga. As gerações de potência ativa nas barras de geração tiveram seus valores aumentados, para suprimento da nova carga. Como o multiplicador associado à restrição de balanço de potência ativa desta barra é negativo, o valor das perdas de potência ativa na transmissão aumentou devido ao aumento de carga. A partir da perturbação de 3%, o *mismatche* de potência ativa da barra 10 apresentou valor maior que 1 MW.

Tabela 5.25 – Parâmetros do sistema para perturbação na carga da barra 15.

ε	Gerações ativas (MW)				Fluxo na linha (MW)	Perdas (MW)
	P_{slack}	P_{84}	P_{124}	P_{143}	14-15	
0%	290,10	490,70	255,70	679,40	99,99	358,97
1%	290,60	491,00	256,00	679,80	99,99	359,03
2%	291,10	491,30	256,20	680,10	99,99	359,08
3%	291,60	491,50	256,40	680,50	99,99	359,14
4%	292,00	491,80	256,60	680,80	99,99	359,19
5%	292,50	492,10	256,80	681,20	99,99	359,25

b) Perturbação na carga ativa da barra 23:

A demanda ativa da barra 23 é de 21 MW. As gerações de potência ativa nas barras de geração aumentaram seus valores e o fluxo de potência ativa na linha 14-15 não violou o limite, como se pode observar na Tabela 5.26. Como o multiplicador associado à restrição de balanço de potência ativa dessa barra é positivo, o valor das perdas de potência ativa na transmissão diminuiu devido ao aumento de carga. Para perturbação de 5%, o maior *mismatche* de potência ativa ocorreu na barra 10 e o de potência reativa na barra 117, os valores foram de 0,017 MW e 0,090 MVar, respectivamente.

Tabela 5.26 – Parâmetros do sistema para perturbação na carga da barra 23.

ε	Gerações ativas (MW)				Fluxo na linha (MW)	Perdas (MW)
	P_{slack}	P_{84}	P_{124}	P_{143}	14-15	
0%	290,10	490,70	255,70	679,40	99,99	358,97
1%	290,10	490,80	255,80	679,50	99,99	358,96
2%	290,20	490,80	255,80	679,50	99,99	358,94
3%	290,20	490,90	255,90	679,60	99,99	358,92
4%	290,20	490,90	255,90	679,70	99,99	358,90
5%	290,30	490,90	256,00	679,70	99,99	358,89

Uma análise dos multiplicadores de Lagrange, obtidos na solução do problema de FPO, pode ser considerada em estudos de planejamento da operação e expansão do sistema. Por meio destes multiplicadores pode-se verificar em quais barras da rede elétrica a instalação de novas cargas deve ser incentivada. A relação dada em (4.4) fornece uma indicação para estes estudos, porém, estima somente qual seria o novo valor da função objetivo para uma dada perturbação. A técnica de Análise de Sensibilidade apresentada neste trabalho fornece o novo ponto de operação da rede elétrica quando uma perturbação ocorre no sistema, sendo, dessa forma, uma técnica mais eficiente para estudos de planejamento da operação.

5.6 Estudo de alocação de cargas por meio de multiplicadores de Lagrange, utilizando o Despacho Econômico ativo e reativo

A geração hidrelétrica é predominante no parque gerador brasileiro. Esse tipo de geração está, geralmente, localizada longe dos centros consumidores, o que exige um amplo sistema de transmissão. O processo de desverticalização do setor elétrico procura motivar a iniciativa privada a investir na indústria de energia elétrica. Nesse contexto, a instalação de usinas termoeletricas é o alvo das empresas que atuam na área de geração de energia, pois essas usinas podem ser instaladas próximas aos centros consumidores, evitando, assim, a construção de novas linhas de transmissão de grande porte. Gerar e transmitir a energia ao menor custo possível é a finalidade dessas empresas de geração.

Por essa razão, a utilização do Despacho Econômico torna-se de fundamental importância.

Um FPO com função objetivo custo na geração de potência ativa e restrições, físicas e operacionais – conforme apresentado em (3.3) –, foi desenvolvido e resolvido pelo método primal-dual barreira logarítmica. Para um FPO com função custo na geração de potência ativa, os multiplicadores de Lagrange associados às equações de balanço da rede elétrica são conhecidos como custo nodal, como menciona Gedra (1999), Chen *et al.* (2000) e Christie *et al.* (2000).

Testes de alocação de novas cargas no sistema foram realizados utilizando o FPO com função custo e despacho ativo, reativo e restrição na transmissão.

O sistema IEEE 30 barras, mostrado na Figura 5.32, foi utilizado nos testes e possui as seguintes características:

- 1 barra de referência (*slack*);
- 1 barra de geração;
- 24 barras de carga;
- 4 barras com controle de reativo;
- 4 *taps* variáveis;
- 41 linhas de transmissão.

Figura 5.33 – Sistema elétrico IEEE 30 barras.

Os parâmetros da função objetivo custo na geração de potência ativa foram obtidos em Zhu *et al.* (1998), porém, nos testes realizados considerou-se somente duas barras de geração, sendo uma delas a barra de referência. Em (5.24) tem-se o modelo de FPO implementado para função custo. Inicialmente, a restrição de fluxo de potência ativa na transmissão não foi considerada.

$$\text{Minimizar } C(P_{G1}, P_{G2}) = (A_1 P_{G1}^2 + B_1 P_{G1} + C_1) + (A_2 P_{G2}^2 + B_2 P_{G2} + C_2)$$

sujeito a :

$$\Delta P(V, \theta, t) = 0$$

$$\Delta Q(V, \theta, t) = 0$$

$$P_G^{\min} \leq P_G(V, \theta, t) \leq P_G^{\max}$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G(V, \theta, t) \leq Q_G^{\max}$$

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$$

$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$$

(5.24)

em que:

$$A_1 = 37,50\$/\text{MW} ; B_1 = 200,00\$/\text{MW} ; C_1 = 0,00\$/\text{MW}$$

$$A_2 = 175,00\$/\text{MW} ; B_2 = 175,00\$/\text{MW} ; C_2 = 0,00\$/\text{MW}$$

$$P_{G1}^{\min} = -999\text{MW} ; P_{G1}^{\max} = 999\text{MW}$$

$$P_{G2}^{\min} = 1\text{MW} ; P_{G2}^{\max} = 100\text{MW}$$

Os demais limites podem ser vistos no Apêndice. A solução de (5.24) foi obtida na décima segunda iteração, e o erro determinado para as equações de balanço foi de 0,001 pu. A restrição de geração de potência ativa da barra 2 ficou ativa na solução. O valor da função custo foi de \$ 835,858. Acrescentou-se ao Problema (5.24) a restrição de fluxo de potência ativa na linha que liga as barras 5 e 7. O limite de fluxo foi de 12 MW e, nessa situação, o valor da função custo aumentou para \$ 840,350. A Tabela 5.27 mostra os valores iniciais atribuídos aos parâmetros μ e β .

Tabela 5.27 – Valores iniciais para μ e β .

μ inicial	β
$\mu_P = 0,1$	$\beta_P = 1,1$
$\mu_Q = 0,01$	$\beta_Q = 1,01$
$\mu_{FP} = 0,001$	$\beta_{FP} = 1,001$
$\mu_{TAP} = 0,01$	$\beta_{TAP} = 1,01$
$\mu_V = 0,01$	$\beta_V = 1,01$

Com o objetivo de verificar o comportamento dos multiplicadores de Lagrange, associados às barras 5 e 7 quando a restrição de fluxo de potência ativa desta linha é inserida ao modelo do problema, variou-se o valor do limite máximo para o fluxo, iniciando com o valor de 16 MW até 12 MW. A partir do limite de 11 MW, o sistema não convergiu para uma solução factível. A Figura 5.34 apresenta os valores do fluxo para cada valor de limite estabelecido. Para o limite de 12 MW, o valor do fluxo foi de 11,93 MW, o que torna essa restrição praticamente ativa para essa situação. Para os demais valores de limite a restrição permaneceu folgada. O sentido do fluxo ativo dessa linha é da barra 7 para a 5, por essa razão a barra 7 será adotada como barra inicial e a 5, como final. Pela Figura 5.35 pode ser verificado que quando o sistema atinge o

congestionamento, o multiplicador associado à barra inicial decresce e o da barra final, cresce. Essa indicação serve como parâmetro em estudos de alocação de cargas, pois um crescimento no valor do multiplicador de Lagrange indica um crescimento no valor do custo na geração de potência ativa. Com o objetivo de verificar essa informação, na situação congestionada, alocou-se cargas nos valores de 0,5 a 1 MW, com aumento de 0,1 MW nas barras 7 e 5. Verificou-se pela Figura 5.36 que o maior aumento no valor da função objetivo se deu quando as novas cargas foram instaladas na barra 5.

Figura 5.34 – Fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 5 e 7.

Figura 5.35 – Multiplicadores de Lagrange².

² Para uma melhor visualização, este gráfico foi construído considerando o módulo dos multiplicadores. Seus valores obtidos pelo programa de FPO são todos negativos.

Figura 5.36 – Custo na geração de potência ativa.

Testes similares a este foram realizados por Souza *et al.* (2003) e Souza *et al.* (2004), porém, nessa última referência, minimizou-se as perdas de potência ativa na transmissão. Para as funções perdas de potência ativa na transmissão e custo na geração de potencia ativa, observou-se o mesmo comportamento dos multiplicadores de Lagrange quando o sistema aproxima-se do congestionamento. O uso do FPO deve ser incentivado como ferramenta em estudos de planejamento da operação, pois além de fornecer um ponto de operação que satisfaz as restrições da rede elétrica, também fornece os multiplicadores de Lagrange. Como essas variáveis estão associadas às restrições do problema, elas indicam o quanto a função objetivo varia para uma dada alteração na restrição. Dessa forma, pode-se conhecer quais as barras do sistema devem ser as barras candidatas para a instalação de novas cargas, com o objetivo de se ter um melhor desempenho do sistema.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

As empresas concessionárias de energia elétrica buscam constantemente a melhoria de seu processo e a satisfação do cliente, portanto, analisar os sistemas elétricos de potência por meio de ferramentas rápidas e eficientes é o desejado por essas concessionárias.

Duas ferramentas para análises de redes foram apresentadas neste trabalho: Fluxo de Potência Ótimo e Análise de Sensibilidade. A utilização dessas duas ferramentas é de grande utilidade em estudos de planejamento da operação do SEP. Por meio do FPO obteve-se um ponto de operação otimizado para o sistema, o qual além de minimizar um determinado desempenho do sistema, satisfaz as restrições físicas e operacionais da rede elétrica. Perturbações foram incluídas ao modelo de FPO, resultando em um novo problema. O FPO perturbado foi resolvido pela Análise de Sensibilidade.

No FPO desenvolvido neste trabalho, duas funções objetivos foram consideradas: a de perdas de potência ativa na transmissão e a de custo na geração de potência ativa. O conjunto das restrições foi formado por: equações de balanço da rede elétrica e limites de geração de potência reativa e ativa, de fluxo de potência ativa em linhas de transmissão, de tensão e de *tap* de transformador. A restrição de fluxo de potência ativa em linhas de transmissão foi manipulada da mesma forma que as demais restrições de desigualdade. Por se tratar de uma restrição de linha de transmissão, o fluxo que flui através dessa linha é dependente de, no mínimo, quatro variáveis, que são as magnitudes e fases das tensões nas barras que conectam essa linha. Durante o processo iterativo, o FPO deve determinar valores para essas variáveis que satisfaçam os seus limites operacionais e a restrição de fluxo na linha de transmissão, o que em termos operacionais não é um processo trivial.

O método utilizado para resolver o problema de FPO foi o primal-dual barreira logarítmica. As restrições canalizadas foram desmembradas em duas desigualdades, nas quais acrescentou-se variáveis de folga ou de excesso, tornando essas desigualdades em igualdades. As variáveis de folga ou de excesso devem ser estritamente positivas, pois foram tratadas pela função barreira logarítmica e por um parâmetro de barreira. O valor inicial desse parâmetro é determinado pelo usuário. O método é dependente dos valores estimados para o parâmetro de barreira e para o parâmetro utilizado na atualização deste. Apesar dessa dependência, após o ajuste desses parâmetros a convergência é alcançada, isto é, um ponto de operação da rede elétrica é obtido, o qual satisfaz todas as restrições do problema. Verificou-se que o método é muito eficiente para parâmetros empíricos corretamente ajustados. As restrições infactíveis tornam-se factíveis durante o processo iterativo.

Conhecendo o ponto ótimo de operação do SEP por meio do FPO, perturbações foram incluídas ao sistema. O novo ponto de operação foi obtido por meio da Análise de Sensibilidade. O teorema de Fiacco (1976) foi utilizado para construir o sistema de Análise de Sensibilidade. Esse teorema utiliza as condições necessárias de primeira-ordem e o teorema da folga complementar, satisfeitos na solução ótima do problema original não-perturbado, para construir o sistema de sensibilidade. Por meio desse sistema, perturbações foram incluídas às restrições de igualdade e/ou de desigualdade.

Estudos de casos foram realizados utilizando o FPO e a Análise de Sensibilidade. O ponto ótimo de operação foi obtido por meio do FPO. Perturbações foram incluídas à demanda do sistema e ao limite da restrição de fluxo de potência ativa na transmissão, e um novo ponto de operação foi obtido por meio da Análise de Sensibilidade. Verificou-se que a Análise de Sensibilidade forneceu pontos factíveis de operação, satisfazendo todas as restrições na maioria dos testes apresentados. Em alguns casos a restrição de balanço de potência ativa apresentou um erro menor quando comparado à restrição de balanço de potência reativa para diferentes perturbações. Constatou-se que a Análise de Sensibilidade é uma ferramenta eficiente na realização de estudos de planejamento da operação do sistema, pois estima bons resultados para as redes elétricas. Possui a vantagem de não ser um processo iterativo e de não utilizar parâmetros empíricos em sua formulação.

Os testes foram realizados nos sistemas: 3 barras, IEEE 14, 30, 118 e 300 barras e no sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras. Para o sistema IEEE 300 barras realizou-se uma análise dos multiplicadores de Lagrange obtido por meio do programa de FPO. Verificou-se que os multiplicadores associados às restrições de igualdade podem ser utilizados em estudos de planejamento da operação. Em determinadas situações, a alocação de cargas no sistema contribui para a redução das perdas de potência ativa na transmissão, como foi verificado através do programa de Análise de Sensibilidade. Por meio dos multiplicadores de Lagrange pode-se saber onde será mais vantajoso para o sistema elétrico a alocação de novas cargas. Para o sistema IEEE 30 barras um estudo de alocação de carga por meio de Despacho Econômico foi realizado. Neste verificou-se, para o caso congestionado, onde seria mais vantajoso, em termos econômicos, a alocação de novas cargas.

6.1 Perspectiva para a continuidade deste trabalho

Como perspectiva para continuidade deste trabalho sugere-se alguns estudos:

- Por meio dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de balanço de potência ativa, obtidos na solução do FPO, pode-se realizar estudos em que se analisa onde seria mais vantajoso para o sistema elétrico a instalação de novas unidades geradoras (termoelétricas).
- Por meio do Despacho Econômico, estudos sob o cenário de mercado de energia podem ser realizados, pois os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de balanço indicam o custo nodal da energia em cada barra.
- Implementar um programa computacional de Análise de Sensibilidade com função objetivo custo na geração de potência ativa.
- Por meio das ferramentas FPO e Análise de Sensibilidade, novos estudos de casos podem ser realizados. Como, por exemplo, perturbações no limite da geração de potência ativa e reativa ou tensão, com a finalidade de verificar o novo desempenho do sistema devido essas alterações.

REFERÊNCIAS

AUMULLER, C.; SAHA, T.K. (2002). Analysis and Assessment of Large Scale Power System Voltage Stability by a novel Sensitivity Based Method, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, v. 3, p. 1621-1626, July.

BELL, K.R.W; KIRSCHEN, D.S. (2000). Improved Sensitivities in MW Dispatch for Control of Voltage, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.15, n. 3 p.1034-1040, August.

CARPENTIER, J.L. (1962). Contribution a L'etude du Dispatching Economique. *Bull-Soc. Fr. Elec. Ser. B3*, p. 431 - 447.

CHEN, L.; SUZUKI, H; WACHI, T.; SHIMURA, Y. (2000). Decomposition of Nodal Price for Electric Power System. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, v.4, p. 2156-2161, 16-20 July.

CHRISTIE, R.D.; WOLLENBERG, B.F.; WANGENSTEEN, I. (2000). Transmission Management in the Deregulated Environment, *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 2, p. 170-195, February.

CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W.; FREY, K.D. (1991). An Interior Point Algorithm for Weighted Least Absolute value Power System State Estimation, IEEE/PES 1991 Winter Meeting.

COSTA, G.R.M. (1997). Optimal Reactive Dispatch Through Primal-Dual Method, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.12, n. 2, p.669-674, May.

COSTA, G.R.M; COSTA, C.E.U.; SOUZA, A.M. (2000). Comparative Studies of Optimization Methods for the Optimal Power Flow Problem, *Electric Power Systems Research*, v. 56, p. 249-254, December.

COSTA, G.R.M.; COSTA, C.E.U. (2000). Improved Newton Method for Optimal Power Flow Problem, *Electrical Power & Energy System*, v. 22, p. 459-462.

DOMMEL, H.W.; TINNEY, W.F. (1968). Optimal Power Flow Solutions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.87, n. 10, p.1866-1876, October.

FIACCO, A.V. (1976). Sensitivity Analysis for Nonlinear Programming Using Penalty Methods, *Mathematical Programming*, 10(3), p. 278-311.

FREIRE, L.M.; MONTICELLI, A.J.; GARCIA, A.V. (2002). Aplicações dos Resultados do Fluxo de Potência Ótimo na Nova Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro, XIV Congresso Brasileiro de Automática, p. 2072-2077, Setembro.

FRISCH, K.R. (1955). The Logarithmic Potential Method of Convex Programming, Memorandum, University Institute of Economics, Oslo, Norway.

FRITZSCHE, H. (1978). Programação Não-Linear Análise e Métodos. Edgard Blucher: Editora da Universidade de São Paulo, p. 52-53

GEDRA, T.W. (1999). On Transmission Congestion and Pricing. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n.1, p. 241-248, February.

GRANVILLE, S. (1994). Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 1, p. 136-146, February.

GRIBIK, P.R.; SHIRMOHAMMADI, D.; HAO, S.; THOMAS, C.L. (1990). Optimal Power Flow Sensitivity Analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 3, p. 969-976, August.

GURRAN, R.; SUBRAMANYAM, B. (1999). Sensitivity Analysis of Radial Distribution Network – Adjoint Network Method, *Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier, 21, p. 323-326.

IRISARRI, G.D.; WANG, X.; TONG, J.; MOKHTARI, S. (1997). Maximum Loadability of Power Systems using Interior Point Non-Linear Optimization Method, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.12, n. 1, p.162-169, February.

JABR, R.A.; COONICK, A.H.; CORY, B.J. (2002). A Primal-Dual Interior Point Method for Optimal Power Flow Dispatching, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 3, p.654-662, August.

KARMAKAR, N. (1984). A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming. *Combinatorica* 4, v.4, p. 373 - 395.

KIRSCHEN, D.S.; MEETERN, H.P.V. (1988). MW / Voltage Control in a Linear Programming Based Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p.481-486, May.

KISHORE, A.; HILL, E.F. (1971). Static Optimization of Reactive Power Sources By use of Sensitivity Parameters, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 90, n. 3, p. 1166-1173, May.

MAMANDUR, K.R.C.; CHENOWETH, R.D. (1981). Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v. 100, n. 7, p.3185-3194, July.

MATUMOTO, L.T. (1996). Algoritmos de Pontos Interiores para Programação Linear e uma Extensão para Programação Linear por Partes. São Carlos. 56p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MOMOH, J.A.; GUO, S.X.; OGBUOBIRI, E.C.; ADAPA, R. (1994). The Quadratic Interior Point Method Solving Power System Optimization Problems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 3, p. 1327-1336, August.

MOMOH, J.A.; EL-HAWARY, M.E.; ADAPA, R. (1999.a). A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part I: NonLinear and Quadratic Programming Approaches. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 1, p. 96-104, February.

MOMOH, J.A.; EL-HAWARY, M.E.; ADAPA, R. (1999.b). A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 1, p. 105-111, February.

MONTICELLI, A.; LIU, WH. E. (1992). Adaptive Movement Penalty Method for the Newton Optimal Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 334-342, February.

NEJDAWI, I.M.; CLEMENTS, K.A.; DAVIS P.W. (2000). An Efficient Interior Point Method for Sequential Quadratic Programming Based Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, p. 1179-1183, November.

PESCHON, J.; PIERCY, D.S.; TINEEY, W.F. (1968). Sensitivity in Power Sytems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 87, n. 8, p. 1987-1695, August.

QUINTANA, V.H.; GOMEZ, A.; MARTINEZ, J.L. (1995). Nonlinear Optimal Power Flows by Logarithmic-Barrier Primal-Dual Algorithm. IEEE NAPS Meeting.

RASHED, A.M.H.; KELLY, D.H. (1974). Optimal Load Flow Solutions Using Lagrangian Multipliers and the Hessian Matrix. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 93, n. 5, p. 1292-1297, November.

RIDER, M.J.; PAUCAR, V.L.; GARCIA, A.V.; BENDRINANA, M.F. (2003). A Higher Order Interior Point Method to Minimize Active Power Loss in Electric Energy Systems, Power Engineering, Large Engineering Systems Conference, p. 189-193, May.

SANTOS, A.Jr.; DECKMANN, S.; SOARES, S. (1988). A Dual Augmented Lagrangian Approach for Optimal Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 3, p. 1020-1025, August.

SASSON, A. M. (1969). Combined Use of the Powell and Fletcher-Powell Nonlinear Programming Methods for Optimal Load Flows, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 88, n. 10, p. 1530-1537, October.

SASSON, A. M.; VILORIA, F.; ABOYTES, F. (1973). Optimal Load Flow Solutions Using the Hessian Matrix. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 92, p. 31-41, January.

SOUSA, V.A.; NUNES, L.C.T.; BELATI, E.A.; COSTA, G.R.M. (2003). A New Approach Type-Newton for Optimal Reactive Dispatch Problem. IEEE Power Engineering Society General Meeting. ISBN 0-7803-7990-x, Toronto, Canadá, July.

SOUZA, A.M.; COSTA, G.R.M. (2003). Estudo do Comportamento dos Multiplicadores de Lagrange em Redes Elétricas Congestionadas. V Congresso Latino-Americano Geração e Transmissão de Energia Elétrica. Book of Abstract and Proceedings ISBN 85-903471-1-7, código B-083. São Pedro - SP, Novembro.

SOUZA, A.M.; SOUSA, V.A.; COSTA, G.R.M. (2004). Optimal Power Flow: a Tool for Managing the Transmission Congestion. IEEE Power Engineering Society General Meeting. ISBN 0-7803-8466-0, Denver, Colorado, June.

STOTT, B.; ALSAC, O.; MARINHO, J.L.; (1980). The Optimal Power Problem. In *Electric Power Problems: The Mathematical Challenge*, A.M.Erisman et Al (editors). SIAM, p. 327-351.

SUN, D.I.; ASHLEY, B.; BREWER, B.; HUGLES, A.; TINNEY, W.F. (1984). Optimal Power Flow by Newton Approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 103, n. 10, p. 2864-2875, October.

TORRES, G.L.; QUINTANA, V.H. (1998). An Interior Point Method for Nonlinear Optimal Power Flow Using Voltage Rectangular Coordinates, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 4, p. 1211-1218, November.

VARGAS, L.S.; QUINTANA, V.H.; VANELLI, A. (1993). A Tutorial Description of an Interior Point Method and its Applications to Security-Constrained Economic Dispatch, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 3, p. 1315-1324, August.

VENKATESH, S.V.; LIU, W.H.E.; PAPALEXOPOULOS, A.D. (1992). A Least Squares Solution for Optimal Power Flow Sensitivity Calculation, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.7, n.3, p. 1394-1401, August.

XIE, K; SONG, Y.H.; ZHANG, D.; NAKANISHI, Y.; NAKAZAWA, C. (2004). Calculation and Decomposition of Spot Price Using Interior Point Nonlinear Optimisation Methods, *Electrical Power & Energy System*, v. 26, p. 349-356.

WOJCIECHOWSKI, J.M. (1988). A General Approach to Sensitivity Analysis in Power Systems, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, v.1, p. 417-420, June.

WRIGHT, M.H. (1995). Why a pure primal Newton barrier step may be infeasible. *SIAM Journal on Optimization*, v.5, n.1, p.1-12.

WU, Y.C.; DEBS, A.S.; MARSTEN, R.E. (1994) . A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.9, n.2, p. 876-883, May.

ZHU, J.Z.; IRVING, M. R.; XU, G.Y. (1998). A New Approach to Secure Economic Power Dispatch. *Electrical Power & Energy Systems*, v.20, n. 8, p. 553-538.

LEITURAS COMPLEMENTARES

BAZARAA, M.S.; SHERALI, H.D.; SHETTY, C.M. (1993). NonLinear Programming: Theory and Algorithms. 2 ed. New York, John Wiley.

LUENBERGER, D.G. (1984). Linear and Nonlinear Programming. 2 ed. California, Addison-Wesley.

MONTICELLI, A. (1983). Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Editora Edgar Blucher Ltda.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. (2000). Introdução a Sistemas de Energia Elétrica. Editora da Unicamp.

WEEDY, B.M. (1977). Electric Power Systems. 2. ed. John Wiley & Sons Ltd.

APÊNDICE

DADOS DOS SISTEMAS

Os bancos de dados apresentados neste Apêndice estão no formato PECO (Philadelphia Electric Company). Os tipos de barras foram definidos da seguinte maneira:

tipo de barra	índice
referência	2
geração	-1
controle de reativo	1
carga	0

Após os dados de barra e de linhas, tem-se os limites das tensões, para todas as barras do sistema, o limite de fluxo de potência ativa na linha especificada, e os limites na geração de potência ativa para as barras de geração, respectivamente.

• 3 BARRAS

```

1 2 barra1 1000 0. 0.0 0.0-9999 9999 0.0 0.0
2 -1 barra2 1000 0. 170 0.0-9999 9999 0.0 0.0
3 0 barra3 1000 0. 0.0 0.0 200 100
9999
2 3 3.44828.6206 900
3 1 9.756012.195 900
9999
1 0.90 1.10
2 0.90 1.10
3 0.90 1.10
9999
2 3 140.0
9999
2 120 200
9999

```

• IEEE 14 BARRAS

```

1 2 barra1 1060 0. 0.0 0.0-9999 9999 0.0 0.0 1
2 -1 barra2 1045 -5. 40. 42.4 -40 50 21.7 12.7 1
3 1 barra3 1010-13. 0.0 23.4 0 40 94.2 19.0 1
4 0 barra4 1019-10. 0.0 0.0 47.8 -3.9 1
5 0 barra5 1020-8.8 0.0 0.0 7.6 1.6 1
6 1 barra6 1070-14. 0.0 12.2 -6 24 11.2 7.5 1
7 0 barra7 1062-13. 0.0 0.0 0.0 0.0 1
8 1 barra8 1090-13. 0.0 17.4 -6 24 0.0 0.0 1
9 0 barra9 1000-15. 0.0 0.0 29.5 16.6 19 1
10 0 barra10 1051-15. 0.0 0.0 9.0 5.8 1
11 0 barra11 1057-15. 0.0 0.0 3.5 1.8 1
12 0 barra12 1055-15. 0.0 0.0 6.1 1.6 1
13 0 barra13 1050-15. 0.0 0.0 13.5 5.8 1
14 0 barra14 1036-16. 0.0 0.0 14.9 5.0 1
9999
1 2 1.938 5.917 5.28 900
1 5 5.40322.304 4.92 900
2 3 4.69919.797 4.38 900
2 4 5.81117.632 3.74 900
2 5 5.69517.388 3.40 900
3 4 6.70117.103 3.46 900
4 5 1.335 4.211 1.28 900
4 7 20.912 0.9780.9001.100 900
4 9 55.618 0.9690.9001.100 900
5 6 25.202 0.9320.9001.100 900
6 11 9.49819.890 900
6 12 12.29125.581 900
6 13 6.61513.027 900
7 8 0.00117.615 900
7 9 11.001 900
9 10 3.181 8.450 900
9 14 12.71127.038 900
10 11 8.20519.207 900
12 13 22.09219.988 900
13 14 17.09334.802 900
9999
0.90 1.10

```

9999

2	4	65.0
10	11	1.0

9999

2	1	250
---	---	-----

9999

• IEEE 30 BARRAS

1	2	BARRA1	SLACK	1060	.0	-9999	9999	0.	0.
2	-1	BARRA2	GERA.	1043-5.4	40.	-40.	50.	21.7	12.7
3	0	BARRA3	CARG.	1021-7.9				2.4	1.2
4	0	BARRA4	CARG.	1012-9.6				7.6	1.6
5	1	BARRA5	C.RE.	1010-14.		-40.	40.	94.2	19.0
6	0	BARRA6	CARG.	1010-11.				.0	.0
7	0	BARRA7	CARG.	1002-13.				22.8	10.9
8	1	BARRA8	C.RE.	1010-12.		-10.	40.	30.0	30.0
9	0	BARRA9	CARG.	1051-14.				.0	.0
10	0	BARRA10	CARG	1045-15.				5.8	2.0 19.
11	1	BARRA11	C.RE	1071-14.		-6.	24.	.0	.0
12	0	BARRA12	CARG	1019-15.				11.2	7.5
13	1	BARRA13	C.RE	1057-15.		-6.	24.	.0	.0
14	0	BARRA14	CARG	1042-16.				6.2	1.6
15	0	BARRA15	CARG	1038-16.				8.2	2.5
16	0	BARRA16	CARG	1045-15.				3.5	1.8
17	0	BARRA17	CARG	1040-16.				9.0	5.8
18	0	BARRA18	CARG	1028-16.				3.2	0.9
19	0	BARRA19	CARG	1026-17.				9.5	3.4
20	0	BARRA20	CARG	1030-16.				2.2	0.7
21	0	BARRA21	CARG	1033-16.				17.5	11.2
22	0	BARRA22	CARG	1033-16.				.0	.0
23	0	BARRA23	CARG	1027-16.				3.2	1.6
24	0	BARRA24	CARG	1021-16.				8.7	6.7 4.3
25	0	BARRA25	CARG	1017-16.				.0	.0
26	0	BARRA26	CARG	1000-16.				3.5	2.3
27	0	BARRA27	CARG	1023-15.				.0	.0
28	0	BARRA28	CARG	1007-11.				.0	.0
29	0	BARRA29	CARG	1003-17.				2.4	0.9
30	0	BARRA30	CARG	992-17.				10.6	1.9
9999									
1	2		1.92	5.75	2.64			9000	0
1	3		4.52	18.52	2.04			9000	0
2	4		5.70	17.37	1.84			9000	0
3	4		1.32	3.79	0.42			9000	0
2	5		4.72	19.83	2.09			9000	0
2	6		5.81	17.63	1.87			9000	0
4	6		1.19	4.14	0.45			9000	0
5	7		4.60	11.60	1.02			9000	0
6	7		2.67	8.20	0.85			9000	0
6	8		1.20	4.20	0.45			28	0
6	9		.0	20.80		0.9780.9501.100		9000	0
6	10		.0	55.60		0.9690.9501.100		16	0
9	11		.001	20.80				9000	0
9	10		.001	11.00				9000	0
4	12		.0	25.60		0.9320.9501.100		40	0
12	13		.0	14.00				9000	0
12	14		12.31	25.59				9000	0
12	15		6.62	13.04				9000	0

12	16	9.45	19.87		9000	0
14	15	22.10	19.97		9000	0
16	17	8.24	19.23		9000	0
15	18	10.70	21.85		9000	0
18	19	6.39	12.92		9000	0
19	20	3.40	6.80		9000	0
10	20	9.36	20.90		9000	0
10	17	3.24	8.45		9000	0
10	21	3.48	7.49		9000	0
10	22	7.27	14.99		9000	0
21	22	1.16	2.36		9000	0
15	23	10.00	20.20		9000	0
22	24	11.50	17.90		9000	0
23	24	13.20	27.00		9000	0
24	25	18.85	32.92		9000	0
25	26	25.44	38.00		9000	0
25	27	10.93	20.87		9000	0
28	27	0.0	39.60	0.9680.9501.100	9000	0
27	29	21.98	41.53		9000	0
27	30	32.02	60.27		9000	0
29	30	23.99	45.33		9000	0
8	28	6.36	20.00	2.14	0.01	0
6	28	1.69	5.99	0.65	18.8	0
9999						
	0.95	1.10				
9999						
5	7	16.0				
9999						
1	-999	999				
2	1	100				
9999						
1	37.50000	200.0000	0.000000			
2	175.0000	175.0000	0.000000			
9999						

• Equivalente CESP 440 kV com 53 BARRAS

501	2	I.SOLTE-19GR	995	0.	-99999999	501	11000
502	-1	JUPIA---11GR	1000-2.3	770.-218.-528.	528.	502	11000
536		AVERMELHA440	1013-14.				51000
535		AVERMELHA500	1079-16.		433.3-176.		21000
537		AVERMELHA138	1050-18.		153.4 28.8		21000
500	-1	A.VERMEL-6GR	995-11.	900.-237.-540.	540.	500	11000
538		ISOLTEIRA440	1013-5.6				51000
520	-1	T.IRMAOS-4GR	1000-.27	520.-67.4-200.	200.	520	11000
541		JUPIA----138	1045-9.2		67.7 -7.8		21000
542		3IRMAOS--440	1015-5.1				51000
543		3IRMAOS--138	1048-9.2		165.3 30.6		21000
539		JUPIA----440	1021-6.1				51000
547		TAQUARUCU440	1033-1.9				51000
510	-1	P.PRIMA-12GR	10108.551000.-129.-540.	540.	510		11000
513	-1	TAQUARUC-4GR	1030 2.8 310.1.596-192.	192.	513		11000
544		PPRIMAV--440	10263.44				11000
548		TAQUARUCU138	1010-4.5		106.4 -4.0		21000
507	-1	CAPIVARA-4GR	10302.62 575.51.11-308.	308.	507		11000
549		CAPIVARA-440	1026-4.1				51000
550		CAPIVARA-138	1040-9.5		88.8 34.3		21000
552		ASSIS---440	1015-13.		0.0 -90.		51000

553	ASSIS--A-230	1041-15.	59.0	30.5	21000
561	BAURU---440	1017-22.	0.0	0.	51000
577	TOESTE-1Y440	1001-34.	625.2	90.6	51000
562	BAURU---138	1035-28.	241.8	100.7	21000
559	ARARAQUA-440	1014-26.		0.	51000
560	ARARAQUA-138	1030-31.	403.	90.2	21000
563	RIBPRETO-440	966-31.			51000
564	RIBPRETO-138	1030-36.	340.7	214.7	21000
568	SBARBARA-138	1013-42.	504.5	237.9	21000
567	SBARBARA-440	972-34.			51000
576	B.JARDIM-088	999-42.	419.4	110	21000
574	BOMJARDIM440	987-36.			51000
570	SUMARE---440	976-35.			51000
575	BOMJARDIM138	1035-42.	94.2	62.	21000
571	SUMARE---138	1013-41.	413.0	115.4	21000
598	TAUBATE--500	1056-39.	138.4	-223	21000
599	TAUBATE--440	1013-40.			51000
600	TAUBATE--230	1030-45.	167.1	144.3	21000
601	TAUBATE--138	1020-43.	243.	13.7	21000
593	STOANGELO440	1008-34.			51000
594	STOANGELO345	1016-33.	-231.2	15.9	21000
533	1 S. ANGELO-1CS	1050-34.	-175.	250.	533 11000
595	STOANGELO138	1049-38.	214.8	61.3	21000
565	MMIRIM-3-440	1014-33.			51000
566	MMIRIM-3-138	1019-39.	443.4	99.7	21000
584	CABREUVA-440	986-35.		-90.	51000
590	CABREUVA-230	1008-38.	10352	12.9	21000
591	CABREUVA-138	1029-41.	117.9	35.9	21000
581	EMBUGUACU440	1002-34.			51000
582	EMBUGUACU345	1023-34.	-28.3	234.7	21000
583	EMBUGUACU138	1029-38.	305.7	50.6	21000
532	1 EMBU-GUA-1CS	1050-34.	-175.	250.	532 11000
9999					
536	500 1	.68333			15001500
536	535 1	1.533			750 750
536	535 2	1.42			750 750
536	538 1	.19 2.52136.89			15221522
536	559 1	.4 5.36290.92			15221522
536	563 1	.41 5.64304.12			15221522
537	536 1	4.7 1.0480.8601.187	537	300 30032	
538	501 1 T	.34632			34003400
538	542 1	.06 .81 48.63			11411141
559	538 1	.24 2.98769.92			15221522
561	538 1	.41 5.09 327.9			15221522
561	538 2	.41 5.09 327.9			15221522
542	520 1 T	1.645			840 840
543	542 1	4.45 1.0440.8601.180	543	300 30032	
539	542 1 T	.06 .73 43.83			11411141
539	502 1 T	.87545			13441344
541	539 1	8.33 1.0150.8601.190	541	150 15032	
547	539 1	.27 3.6197.09			11431520
561	539 1	.39 4.96319.72			15221522
561	539 2	.39 4.96319.72			15221522
544	510 1 T	.9225			13201320
544	547 1	.15 1.94108.73			15241829
544	547 2	.15 1.94108.73			15241829
547	513 1	2.7875			560 560
547	549 1	.09 1.2 66.94			11431520
547	552 1	.24 3.14175.77			19361936

548	547 1	4.66	0.9750.8601.187	548 300 30032
549	552 1	.14 1.82 102.2		11431520
550	549 1	10.78	1.0460.8501.187	550 150 15032
549	507 1	2.1625		680 680
552	561 1	.18 2.37132.67		11431520
552	570 1	.43 5.69318.89		19361936
553	552 1	.07 7.237	1.0480.9001.100	553 336 33632
559	561 1	.13 1.71102.88		10651065
561	577 1 T	.28 3.54228.28		15221522
561	581 1	.39 4.86313.39		15221522
561	584 1	.3 3.76242.06		15221522
561	584 2	.3 3.76242.06		15221522
562	561 1	4.35	1.0570.8601.190	562 150 15032
559	565 1	.21 2.65170.71		15221522
559	567 1 T	.18 2.38 134.8		15221522
559	593 1	.38 4.7303.36		15221522
560	559 1	1.58	1.0330.8601.187	560 300 30032
563	567 1	.22 3.03163.37		15221522
564	563 1	2.33	1.1230.8601.187	564 300 30032
568	567 2	2.26	1.0960.8601.187	568 315 31532
567	570 1 T	.03 .34 19.21		15221522
576	574 2	2.29	1.0340.8611.187	576 300 30032
574	599 1	.2 2.56151.95		15221522
575	574 1	9.66	1.1120.8601.192	575 150 15032
574	570 1	.06 .8 45.81		15221522
574	584 1	.03 .38 23.71		15221522
574	593 1	.15 1.98118.81		15221522
571	570 1	2.38	1.0630.8601.187	571 300 30032
599	598 1	1.03		900 990
600	599 1	4.77	1.0860.8601.187	600 300 30032
601	599 1	2.323	1.0080.8601.187	601 315 31532
565	593 1 T	.23 2.88185.57		15221522
581	593 1	.09 1.22 73.61		15221522
593	533 1	3.76		250 250
594	593 1	.716		750 750
594	593 2	.714		750 750
595	593 1	3.10	1.0580.8601.180	595 300 30032
566	565 1	2.26	1.0230.8601.187	566 300 30032
584	581 1	.09 1.22 73.5		15241829
590	584 1	.746		750 750
590	584 2	.74		750 750
591	584 1	8.27	1.0700.8601.190	591 150 15032
577	581 1	.11 1.32 85.11		15221522
581	532 1	3.76		250 250
582	581 1	.71		750 750
582	581 2	.717		750 750
583	581 1	2.317	1.0370.8601.184	583 300 30032
9999				
	0.90	1.1		
9999				
552	561	600.0		
9999				
502	0	1000.		
500	0	1000.		
520	0	1000.		
510	0	1000.		
513	0	1000.		
507	0	1000.		
9999				

• IEEE 118 BARRAS

	69	2	Sporn	138	1035	0			-999	999	69	0	0	1
1	1	Riverside	138	955	0			-5	15	1	51	27		1
2		Pokagon	138	1000	0						20	9		1
3		HickoryCk	138	1000	0						39	10		1
4	1	NCarlisle	138	998	0	-9	0	-300	300	4	30	12		1
5		Olive	138	1000	0						0	0	-40	1
6	1	Kankakee	138	990	0			-13	50	6	52	22		1
7		JacksonRd	138	1000	0						19	2		1
8	1	Olive	345	1015	0	-28	0	-300	300	8	0	0		1
9		Beguine	345	1000	0						0	0		1
10	-1	Breed	345	1050	0	450	0	-147	200	10	0	0		1
11		SouthBend	138	1000	0						70	23		1
12	1	TwnBranch	138	990	0	85		-35	120	12	47	10		1
13		Concord	138	1000	0						34	16		1
14		GoshenJct	138	1000	0						14	1		1
15	1	FortWayne	138	970	0			-10	30	15	90	30		1
16		N. E.	138	1000	0						25	10		1
17		Sorenson	138	1000	0						11	3		1
18	1	McKinley	138	973	0			-16	50	18	60	34		1
19	1	Lincoln	138	962	0			-8	24	19	45	25		1
20		Adams	138	1000	0						18	3		1
21		Jay	138	1000	0						14	8		1
22		Randolph	138	1000	0						10	5		1
23		CollgeCnr	138	1000	0						7	3		1
24	1	Trenton	138	992	0	-13		-300	300	24	0	0		1
25	1	TannersCk	138	1050	0	220		-47	140	25	0	0		1
26	1	TannersCk	345	1015	0	314		-1000	1000	26	0	0		1
27	1	Madison	138	968	0	-9		-300	300	27	62	13		1
28		Mullin	138	1000	0						17	7		1
29		Grant	138	1000	0						24	4		1
30		Sorenson	345	1000	0						0	0		1
31	1	DeerCreek	138	967	0	7		-300	300	31	43	27		1
32	1	Delaware	138	963	0			-14	42	32	59	23		1
33		Haviland	138	1000	0						23	9		1
34	1	Rockhill	138	984	0			-8	24	34	59	26	14	1
35		West Lima	138	1000	0						33	9		1
36	1	Sterling	138	980	0			-8	24	36	31	17		1
37		East Lima	138	1000	0						0	0	-25	1
38		East Lima	345	1000	0						0	0		1
39		NwLiberty	138	1000	0						27	11		1
40	1	West End	138	970	0	-46		-300	300	40	20	23		1
41		S. Tiffin	138	1000	0						37	10		1
42	1	Howard	138	985	0	-59		-300	300	42	37	23		1
43		S. Kenton	138	1000	0						18	7		1
44		WMtVernon	138	1000	0						16	8	10	1
45		N. Newark	138	1000	0						53	22	10	1
46	1	W.Lancstr	138	1005	0	19		-100	100	46	28	10	10	1
47		Crooksvill	138	1000	0						34	0		1
48		Zanesvile	138	1000	0						20	11	15	1
49	1	Philo	138	1025	0	204		-85	210	49	87	30		1
50		W.Cambrdg	138	1000	0						17	4		1
51		Newcmrstn	138	1000	0						17	8		1
52		SCoshoctn	138	1000	0						18	5		1
53		Wooster	138	1000	0						23	11		1
54	1	Torrey	138	955	0	48		-300	300	54	113	32		1
55	1	Wagenhals	138	952	0			-8	23	55	63	22		1

56	1	Sunnysidel	138	954	0		-8	15	56	84	18	1
57		WNwPhila1	138	1000	0					12	3	1
58		WNwPhila2	138	1000	0					12	3	1
59	1	Tidd	138	985	0	155	-60	180	59	277	113	1
60		SW Kammer	138	1000	0					78	3	1
61	1	W. Kammer	138	995	0	160	-100	300	61	0	0	1
62	1	Natrium	138	998	0		-20	20	62	77	14	1
63		Tidd	345	1000	0					0	0	1
64		Kammer	345	1000	0					0	0	1
65	1	Muskingum	345	1005	0	391	-67	200	65	0	0	1
66	1	Muskingum	138	1050	0	392	-67	200	66	39	18	1
67		Summerfld	138	1000	0					28	7	1
68		Sporn	345	1000	0					0	0	1
70	1	Portsmouth	138	984	0		-10	32	70	66	20	1
71		NPortsmouth	138	1000	0					0	0	1
72	1	Hillsboro	138	980	0	-12	-100	100	72	0	0	1
73	1	Sargents	138	991	0	-6	-100	100	73	0	0	1
74	1	Bellefont	138	958	0		-6	9	74	68	27	12 1
75		Sth Point	138	1000	0					47	11	1
76	1	Darrah	138	943	0		-8	23	76	68	36	1
77	1	Turner	138	1006	0		-20	70	77	61	28	1
78		Chemical	138	1000	0					71	26	1
79		CapitolHl	138	1000	0					39	32	20 1
80	1	Cabin Crk	138	1040	0	477	-165	280	80	130	26	1
81		Kanawha	345	1000	0					0	0	1
82		Logan	138	1000	0					54	27	20 1
83		Sprigg	138	1000	0					20	10	10 1
84		BetsyLayn	138	1000	0					11	7	1
85	1	BeaverCrk	138	985	0		-8	23	85	24	15	1
86		Hazard	138	1000	0					21	10	1
87	1	Pineville	161	1015	0	4	-100	1000	87	0	0	1
88		Fremont	138	1000	0					48	10	1
89	1	ClinchRvr	138	1005	0	607	-210	300	89	0	0	1
90	1	Holston	138	985	0	-85	-300	300	90	78	42	1
91	1	HolstonTP	138	980	0	-10	-100	100	91	0	0	1
92	1	Saltville	138	990	0		-3	9	92	65	10	1
93		Tazewell	138	1000	0					12	7	1
94		Switchbak	138	1000	0					30	16	1
95		Caldwell	138	1000	0					42	31	1
96		Baileysvl	138	1000	0					38	15	1
97		Sundial	138	1000	0					15	9	1
98		Bradley	138	1000	0					34	8	1
99	1	Hinton	138	1010	0	-42	-100	100	99	0	0	1
100	1	Glen Lyn	138	1017	0	252	-50	155	100	37	18	1
101		Wythe	138	1000	0					22	15	1
102		Smyth	138	1000	0					5	3	1
103	1	Claytor	138	1010	0	40	-15	40	103	23	16	1
104	1	Hancock	138	971	0		-8	23	104	38	25	1
105	1	Roanoke	138	965	0		-8	23	105	31	26	20 1
106		Cloverdle	138	1000	0					43	16	1
107	1	Reusens	138	952	0	-22	-200	200	107	28	12	6 1
108		Blaine	138	1000	0					2	1	1
109		Franklin	138	1000	0					8	3	1
110	1	Fieldale	138	973	0		-8	23	110	39	30	6 1
111	1	Dan River	138	980	0	36	-100	1000	111	0	0	1
112	1	Danville	138	975	0	-43	-100	1000	112	25	13	1
113	1	DeerCk TP	138	993	0	-6	-100	200	113	0	0	1
114		W Medford	138	1000	0					8	3	1
115		Medford	138	1000	0					22	7	1

116	1 Kyger Crk138	1005 0	-184	-1000 1000	116	0	0	1
117	Corey	138 1000 0				20	8	1
118	WHuntngdn138	1000 0				33	15	1
9999								
1	2	3.03 9.99 2.540				900.	900.0	
1	3	1.29 4.24 1.082				900.	900.0	
4	5	0.176 0.798 0.210				900.	900.0	
3	5	2.41 10.80 2.840				900.	900.0	
5	6	1.19 5.40 1.426				900.	900.0	
6	7	0.459 2.08 0.550				900.	900.0	
8	9	0.244 3.05 116.62				900.	900.0	
8	5	0.00 2.67 0.0000.9850.9850.985						
9	10	0.258 3.22 123.00				900.	900.0	
4	11	2.09 6.88 1.748				900.	900.0	
5	11	2.03 6.82 1.738				900.	900.0	
11	12	0.595 1.96 0.502				900.	900.0	
2	12	1.87 6.16 1.572				900.	900.0	
3	12	4.84 16.00 4.060				900.	900.0	
7	12	0.862 3.40 0.874				900.	900.0	
11	13	2.225 7.31 1.876				900.	900.0	
12	14	2.15 7.07 1.816				900.	900.0	
13	15	7.44 24.44 6.268				900.	900.0	
14	15	5.95 19.50 5.020				900.	900.0	
12	16	2.12 8.34 2.140				900.	900.0	
15	17	1.32 4.37 4.440				900.	900.0	
16	17	4.54 18.01 4.660				900.	900.0	
17	18	1.23 5.05 1.298				900.	900.0	
18	19	1.119 4.93 1.142				900.	900.0	
19	20	2.52 11.70 2.980				900.	900.0	
15	19	1.20 3.94 1.010				900.	900.0	
20	21	1.83 8.49 2.160				900.	900.0	
21	22	2.09 9.70 2.460				900.	900.0	
22	23	3.42 15.90 4.040				900.	900.0	
23	24	1.35 4.92 4.980				900.	900.0	
23	25	1.56 8.00 8.640				900.	900.0	
26	25	0.00 3.82 0.0000.9600.9600.960						
25	27	3.18 16.30 17.640				900.	900.0	
27	28	1.913 8.55 2.160				900.	900.0	
28	29	2.37 9.43 2.380				900.	900.0	
30	17	0.00 3.88 0.0000.9600.9600.960						
8	30	.431 5.04 51.400				900.	900.0	
26	30	.799 8.60 91.800				900.	900.0	
17	31	4.74 15.63 3.990				900.	900.0	
29	31	1.08 3.31 0.830				900.	900.0	
23	32	3.17 11.53 11.730				900.	900.0	
31	32	2.98 9.85 2.510				900.	900.0	
27	32	2.29 7.55 1.926				900.	900.0	
15	33	3.80 12.44 3.194				900.	900.0	
19	34	7.52 24.70 6.320				900.	900.0	
35	36	.224 1.02 .268				900.	900.0	
35	37	1.10 4.97 1.318				900.	900.0	
33	37	4.15 14.20 3.660				900.	900.0	
34	36	.871 2.68 0.568				900.	900.0	
34	37	.256 0.94 0.988				900.	900.0	
38	37	0.00 3.75 0.0000.9350.9350.935						
37	39	3.21 10.60 2.700				900.	900.0	
37	40	5.93 16.80 4.200				900.	900.0	
30	38	.464 5.40 42.200				900.	900.0	
39	40	1.84 6.05 1.552				900.	900.0	

40	41	1.45	4.87	1.222	900.	900.0
40	42	5.55	18.30	4.660	900.	900.0
41	42	4.10	13.50	3.440	900.	900.0
43	44	6.08	24.54	6.068	900.	900.0
34	43	4.13	16.81	4.226	900.	900.0
44	45	2.24	9.01	2.240	900.	900.0
45	46	4.00	13.56	3.320	900.	900.0
46	47	3.80	12.70	3.160	900.	900.0
46	48	6.01	18.90	4.720	900.	900.0
47	49	1.91	6.25	1.604	900.	900.0
42	49	3.57	16.15	17.200	900.	900.0 *
45	49	6.84	18.60	4.440	900.	900.0
48	49	1.79	5.05	1.258	900.	900.0
49	50	2.67	7.52	1.874	900.	900.0
49	51	4.86	13.70	3.420	900.	900.0
51	52	2.03	5.88	1.396	900.	900.0
52	53	4.05	16.35	4.058	900.	900.0
53	54	2.63	12.20	3.110	900.	900.0
49	54	4.00	14.76	14.680	900.	900.0 *
54	55	1.69	7.07	2.020	900.	900.0
54	56	.275	.955	0.732	900.	900.0
55	56	.488	1.51	0.374	900.	900.0
56	57	3.43	9.66	2.420	900.	900.0
50	57	4.74	13.40	3.320	900.	900.0
56	58	3.43	9.66	2.420	900.	900.0
51	58	2.55	7.19	1.788	900.	900.0
54	59	5.03	22.93	5.980	900.	900.0
56	59	4.06	12.24	11.080	900.	900.0 *
55	59	4.739	21.58	5.646	900.	900.0
59	60	3.17	14.50	3.760	900.	900.0
59	61	3.28	15.00	3.880	900.	900.0
60	61	.264	1.35	1.456	900.	900.0
60	62	1.23	5.61	1.468	900.	900.0
61	62	.824	3.76	0.980	900.	900.0
63	59	0.00	3.86	0.0000.9600.9600.960		
63	64	.172	2.00	21.60	900.	900.0
64	61	0.00	2.68	0.0000.9850.9850.985		
38	65	.901	9.86	114.6	900.	900.0
64	65	.269	3.02	38.00	900.	900.0
49	66	0.90	4.60	4.960	900.	900.0 *
62	66	4.82	21.80	5.780	900.	900.0
62	67	2.58	11.70	3.100	900.	900.0
65	66	0.00	3.70	0.0000.9350.9350.935		
66	67	2.24	10.15	2.682	900.	900.0
65	68	.138	1.60	63.80	900.	900.0
47	69	8.44	27.78	7.092	900.	900.0
49	69	9.85	32.40	8.280	900.	900.0
68	69	0.00	3.70	0.0000.9350.9350.935		
69	70	3.00	12.70	12.20	900.	900.0
24	70	10.22141.15	10.198		900.	900.0
70	71	.882	3.55	0.878	900.	900.0
24	72	4.88	19.60	4.880	900.	900.0
71	72	4.46	18.00	4.444	900.	900.0
71	73	.866	4.54	1.178	900.	900.0
70	74	4.01	13.23	3.368	900.	900.0
70	75	4.28	14.10	3.600	900.	900.0
69	75	4.05	12.20	12.40	900.	900.0
74	75	1.23	4.06	1.034	900.	900.0
76	77	4.44	14.80	3.680	900.	900.0

69	77	3.09	10.10	10.38	900.	900.0
75	77	6.01	19.99	4.978	900.	900.0
77	78	.376	1.24	1.264	900.	900.0
78	79	.546	2.44	0.648	900.	900.0
77	80	1.09	3.32	7.000	900.	900.0 *
79	80	1.56	7.04	1.870	900.	900.0
68	81	.175	2.02	80.80	900.	900.0
81	80	0.00	3.70	0.0000.9350.9350.935		
77	82	2.98	8.53	8.174	900.	900.0
82	83	1.12	3.665	3.796	900.	900.0
83	84	6.25	13.20	2.580	900.	900.0
83	85	4.30	14.80	3.480	900.	900.0
84	85	3.02	6.41	1.234	900.	900.0
85	86	3.50	12.30	2.760	900.	900.0
86	87	2.828	20.74	4.450	900.	900.0
85	88	2.00	10.20	2.760	900.	900.0
85	89	2.39	17.30	4.700	900.	900.0
88	89	1.39	7.12	1.934	900.	900.0
89	90	1.63	6.52	15.880	900.	900.0*
90	91	2.54	8.36	2.140	900.	900.0
89	92	0.80	3.83	9.620	900.	900.0*
91	92	3.87	12.72	3.268	900.	900.0
92	93	2.58	8.48	2.180	900.	900.0
92	94	4.81	15.80	4.060	900.	900.0
93	94	2.23	7.32	1.876	900.	900.0
94	95	1.32	4.34	1.110	900.	900.0
80	96	3.56	18.20	4.940	900.	900.0
82	96	1.62	5.30	5.440	900.	900.0
94	96	2.69	8.69	2.300	900.	900.0
80	97	1.83	9.34	2.540	900.	900.0
80	98	2.38	10.80	2.860	900.	900.0
80	99	4.54	20.60	5.460	900.	900.0
92	100	6.48	29.50	7.720	900.	900.0
94	100	1.78	5.80	6.040	900.	900.0
95	96	1.71	5.47	1.474	900.	900.0
96	97	1.73	8.85	2.400	900.	900.0
98	100	3.97	17.90	4.760	900.	900.0
99	100	1.80	8.13	2.160	900.	900.0
100	101	2.77	12.62	3.280	900.	900.0
92	102	1.23	5.59	1.464	900.	900.0
101	102	2.46	11.20	2.840	900.	900.0
100	103	1.60	5.25	5.360	900.	900.0
100	104	4.51	20.40	5.410	900.	900.0
103	104	4.66	15.84	4.070	900.	900.0
103	105	5.35	16.25	4.080	900.	900.0
100	106	6.05	22.90	6.200	900.	900.0
104	105	.994	3.78	0.986	900.	900.0
105	106	1.40	5.47	1.434	900.	900.0
105	107	5.30	18.30	4.720	900.	900.0
105	108	2.61	7.03	1.844	900.	900.0
106	107	5.30	18.30	4.720	900.	900.0
108	109	1.05	2.88	0.760	900.	900.0
103	110	3.906	18.13	4.610	900.	900.0
109	110	2.78	7.62	2.020	900.	900.0
110	111	2.20	7.55	2.000	900.	900.0
110	112	2.47	6.40	6.200	900.	900.0
17	113	.913	3.01	0.768	900.	900.0
32	113	6.15	20.30	5.180	900.	900.0
32	114	1.35	6.12	1.628	900.	900.0

27	115	1.64	7.41	1.972	900.	900.0
114	115	0.23	1.04	0.276	900.	900.0
68	116	.034	.405	16.40	900.	900.0
12	117	3.29	14.00	3.580	900.	900.0
75	118	1.45	4.81	1.198	900.	900.0
76	118	1.64	5.44	1.356	900.	900.0
9999						
	0.90	1.1				
9999						
5	11	70.0				
9999						
10	0	500				

• IEEE 300 BARRAS

7049	2	1050	0.	0.	0.-99999999.	0.	0.	0.
1	0	1028	6.	0.	0.	0.	90.	49.
2	0	1035	8.	0.	0.	0.	56.	15.
3	0	997	7.	0.	0.	0.	20.	0.
4	0	1030	5.	0.	0.	0.	0.	0.
5	0	1019	5.	0.	0.	0.	353.	130.
6	0	1031	7.	0.	0.	0.	120.	41.
7	0	993	6.	0.	0.	0.	0.	0.
8	1	1015	2.	-5.	0.	-10.	58.	14.
9	0	1003	3.	0.	0.	0.	96.	43.
10	1	1020	1.	-5.	0.	-20.	148.	33.
11	0	1005	2.	0.	0.	0.	83.	21.
12	0	997	5.	0.	0.	0.	0.	0.
13	0	997	-1.	0.	0.	0.	58.	10.
14	0	999	-5.	0.	0.	0.	160.	60.
15	0	1034	-9.	0.	0.	0.	127.	23.
16	0	1031	-3.	0.	0.	0.	0.	0.
17	0	1064-13.	0.	0.	0.	0.	561.	220.
19	0	981	1.	0.	0.	0.	0.	0.
20	1	1001	-2.	-10.	0.	-20.	595.	120.
21	0	975	2.	0.	0.	0.	77.	1.
22	0	996	-2.	0.	0.	0.	81.	23.
23	0	1050	4.	0.	0.	0.	21.	7.
24	0	1005	6.	0.	0.	0.	0.	0.
25	0	1023	1.	0.	0.	0.	45.	12.
26	0	998	-2.	0.	0.	0.	28.	9.
27	0	975	-5.	0.	0.	0.	69.	13.
33	0	1024-12.	0.	0.	0.	0.	55.	6.
34	0	1041	-8.	0.	0.	0.	0.	0.
35	0	975-26.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
36	0	1001-23.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
37	0	1020-11.	0.	0.	0.	0.	85.	32.
38	0	1020-13.	0.	0.	0.	0.	155.	18.
39	0	1053	-6.	0.	0.	0.	0.	0.
40	0	1021-13.	0.	0.	0.	0.	46.	-21.
41	0	1029-10.	0.	0.	0.	0.	86.	0.
42	0	1044	-7.	0.	0.	0.	0.	0.
43	0	1000-17.	0.	0.	0.	0.	39.	9.
44	0	1008-17.	0.	0.	0.	0.	195.	29.
45	0	1021-15.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
46	0	1034-12.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
47	0	977-23.	0.	0.	0.	0.	58.	12.
48	0	1001-16.	0.	0.	0.	0.	41.	19.

49	0	1047	-3.	0.	0.	0.	0.	92.	26.	0.
51	0	1025	-8.	0.	0.	0.	0.	-5.	5.	0.
52	0	997	-12.	0.	0.	0.	0.	61.	28.	0.
53	0	995	-18.	0.	0.	0.	0.	69.	3.	0.
54	0	1004	-16.	0.	0.	0.	0.	10.	1.	0.
55	0	1014	-12.	0.	0.	0.	0.	22.	10.	0.
57	0	1033	-8.	0.	0.	0.	0.	98.	20.	0.
58	0	991	-6.	0.	0.	0.	0.	14.	1.	0.
59	0	978	-5.	0.	0.	0.	0.	218.	106.	0.
60	0	1024	-10.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
61	0	990	-3.	0.	0.	0.	0.	227.	110.	0.
62	0	1016	-1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
63	1	958	-18.	0.	0.	-25.	25.	70.	30.	0.
64	0	948	-13.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
69	0	962	-26.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
70	0	951	-35.	0.	0.	0.	0.	56.	20.	0.
71	0	979	-30.	0.	0.	0.	0.	116.	38.	0.
72	0	969	-27.	0.	0.	0.	0.	57.	19.	0.
73	0	977	-26.	0.	0.	0.	0.	224.	71.	0.
74	0	996	-22.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
76	1	963	-27.	0.	0.	-12.	35.	208.	107.	0.
77	0	983	-25.	0.	0.	0.	0.	74.	28.	0.
78	0	990	-24.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
79	0	981	-25.	0.	0.	0.	0.	48.	14.	0.
80	0	987	-25.	0.	0.	0.	0.	28.	7.	0.
81	0	1034	-19.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
84	-1	1024	-17.	375.	0.	-240.	240.	37.	13.	0.
85	0	987	-18.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
86	0	990	-14.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
87	0	992	-8.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
88	0	1015	-21.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
89	0	1031	-11.	0.	0.	0.	0.	44.	0.	0.
90	0	1027	-11.	0.	0.	0.	0.	66.	0.	0.
91	1	1052	-9.	155.	0.	-11.	96.	17.	0.	0.
92	1	1052	-6.	290.	0.	-153.	153.	16.	0.	0.
94	0	992	-9.	0.	0.	0.	0.	60.	0.	0.
97	0	1018	-13.	0.	0.	0.	0.	40.	0.	0.
98	1	1000	-15.	68.	0.	-30.	56.	67.	0.	0.
99	0	989	-20.	0.	0.	0.	0.	83.	0.	0.
100	0	1006	-14.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
102	0	1000	-15.	0.	0.	0.	0.	78.	0.	0.
103	0	1028	-12.	0.	0.	0.	0.	32.	0.	0.
104	0	995	-17.	0.	0.	0.	0.	9.	0.	0.
105	0	1022	-13.	0.	0.	0.	0.	50.	0.	0.
107	0	1009	-16.	0.	0.	0.	0.	5.	0.	0.
108	1	990	-20.	117.	0.	-24.	77.	112.	0.	0.
109	0	974	-26.	0.	0.	0.	0.	31.	0.	0.
110	0	972	-25.	0.	0.	0.	0.	63.	0.	0.
112	0	972	-29.	0.	0.	0.	0.	20.	0.	0.
113	0	970	-25.	0.	0.	0.	0.	26.	0.	0.
114	0	974	-29.	0.	0.	0.	0.	18.	0.	0.
115	0	960	-14.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
116	0	1024	-13.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
117	0	934	-5.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	325.
118	0	929	-4.	0.	0.	0.	0.	14.	650.	0.
119	1	1043	5.1930.	0.	-500.	1500.		0.	0.	0.
120	0	958	-9.	0.	0.	0.	0.	777.	215.	55.
121	0	987	-13.	0.	0.	0.	0.	535.	55.	0.
122	0	972	-14.	0.	0.	0.	0.	229.	12.	0.

123	0	1000-18.	0.	0.	0.	0.	78.	1.	0.
124	-1	1023-13.	240.	0.	-60.	120.	276.	59.	0.
125	1	1010-18.	0.	0.	-25.	200.	515.	83.	0.
126	0	997-13.	0.	0.	0.	0.	58.	5.	0.
127	0	1000-11.	0.	0.	0.	0.	381.	37.	0.
128	0	1002 -5.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
129	0	1002 -4.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
130	0	1019 6.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
131	0	986 6.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
132	0	1004 3.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
133	0	1001 -5.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
134	0	1021 -8.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
135	0	1019 -7.	0.	0.	0.	0.	169.	42.	0.
136	0	1047 2.	0.	0.	0.	0.	55.	18.	0.
137	0	1047 -1.	0.	0.	0.	0.	274.	100.	0.
138	1	1054 -6.-192.	0.	-125.	350.		827.	135.	0.
139	0	1011 -4.	0.	0.	0.	0.	595.	83.	0.
140	0	1042 -3.	0.	0.	0.	0.	388.	115.	0.
141	1	1050 0. 281.	0.	-50.	75.		145.	58.	0.
142	0	1015 -3.	0.	0.	0.	0.	56.	24.	0.
143	-1	1043 4. 696.	0.	-100.	300.		89.	35.	0.
144	0	1016 -1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
145	0	1008 0.	0.	0.	0.	0.	24.	14.	0.
146	1	1052 4. 84.	0.	-15.	35.		0.	0.	0.
147	1	1052 8. 217.	0.	-50.	100.		0.	0.	0.
148	0	1057 0.	0.	0.	0.	0.	63.	25.	0.
149	1	1073 5. 103.	0.	-25.	50.		0.	0.	0.
150	0	986 6.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
151	0	1004 4.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
152	1	1053 9. 372.	0.	-50.	175.		17.	9.	0.
153	1	1043 10. 216.	0.	-50.	90.		0.	0.	0.
154	0	966 -2.	0.	0.	0.	0.	70.	5.	34.
155	0	1017 7.	0.	0.	0.	0.	200.	50.	0.
156	1	962 5.	0.	0.	-10.	15.	75.	50.	0.
157	0	984-12.	0.	0.	0.	0.	123.	-24.	0.
158	0	998-11.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
159	0	986-10.	0.	0.	0.	0.	33.	16.	0.
160	0	999-13.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
161	0	1036 9.	0.	0.	0.	0.	35.	15.	0.
162	0	991 18.	0.	0.	0.	0.	85.	24.	0.
163	0	1041 3.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
164	0	983 10.	0.	0.	0.	0.	0.	0.-212.	
165	0	1000 26.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
166	0	997 30.	0.	0.	0.	0.	0.	0.-103.	
167	0	971 -7.	0.	0.	0.	0.	300.	96.	0.
168	0	1002 -5.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
169	0	987 -7.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
170	1	929 0. 205.	0.	-40.	90.		482.	205.	0.
171	1	982-10.	0.	0.	-50.	150.	764.	291.	0.
172	0	1024 -6.	0.	0.	0.	0.	26.	0.	0.
173	0	983-13.	0.	0.	0.	0.	163.	43.	53.
174	0	1062 -3.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
175	0	972 -7.	0.	0.	0.	0.	176.	83.	0.
176	1	1052 5. 228.	0.	-45.	90.		5.	4.	0.
177	1	1007 1. 84.	0.	-15.	35.		28.	12.	0.
178	0	939 -7.	0.	0.	0.	0.	427.	174.	0.
179	0	969 -9.	0.	0.	0.	0.	74.	29.	45.
180	0	979 -3.	0.	0.	0.	0.	69.	49.	0.
181	0	1051 -1.	0.	0.	0.	0.	73.	0.	0.

182	0	1044	-4.	0.	0.	0.	0.	241.	89.	0.
183	0	971	7.	0.	0.	0.	0.	40.	4.	0.
184	0	1038	-7.	0.	0.	0.	0.	137.	17.	0.
185	1	1052	-4.	200.	0.	-50.	80.	0.	0.	0.
186	1	1065	2.1200.	0.	-100.	400.		60.	24.	0.
187	1	1065	1.1200.	0.	-100.	400.		60.	24.	0.
188	0	1053	-1.	0.	0.	0.	0.	183.	44.	0.
189	0	997	-26.	0.	0.	0.	0.	7.	2.	0.
190	1	1055	-21.	475.	0.	-300.	300.	0.	0.	-150.
191	1	1043	12.1973.	0.	-1000	1000.		489.	53.	0.
192	0	937	-11.	0.	0.	0.	0.	800.	72.	0.
193	0	989	-26.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
194	0	1048	-19.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
195	0	1035	-21.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
196	0	969	-25.	0.	0.	0.	0.	10.	3.	0.
197	0	990	-24.	0.	0.	0.	0.	43.	14.	0.
198	1	1014	-21.	424.	0.	-260.	260.	64.	21.	0.
199	0	952	-26.	0.	0.	0.	0.	35.	12.	0.
200	0	954	-26.	0.	0.	0.	0.	27.	12.	0.
201	0	969	-27.	0.	0.	0.	0.	41.	14.	0.
202	0	990	-25.	0.	0.	0.	0.	38.	13.	0.
203	0	1003	-22.	0.	0.	0.	0.	42.	14.	0.
204	0	971	-26.	0.	0.	0.	0.	72.	24.	0.
205	0	983	-26.	0.	0.	0.	0.	0.	-5.	0.
206	0	999	-27.	0.	0.	0.	0.	12.	2.	0.
207	0	1013	-27.	0.	0.	0.	0.	-21.	-14.	0.
208	0	992	-26.	0.	0.	0.	0.	7.	2.	0.
209	0	999	-26.	0.	0.	0.	0.	38.	13.	0.
210	0	978	-24.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
211	0	1001	-23.	0.	0.	0.	0.	96.	7.	0.
212	0	1013	-23.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
213	1	1009	-12.	272.	0.	-150.	150.	0.	0.	0.
214	0	991	-18.	0.	0.	0.	0.	22.	16.	0.
215	0	986	-20.	0.	0.	0.	0.	47.	26.	0.
216	0	975	-23.	0.	0.	0.	0.	176.	105.	0.
217	0	1021	-22.	0.	0.	0.	0.	100.	75.	0.
218	0	1007	-23.	0.	0.	0.	0.	131.	96.	0.
219	0	1055	-21.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
220	1	1008	-22.	100.	0.	-60.	60.	285.	100.	0.
221	1	1000	-22.	450.	0.	-320.	320.	171.	70.	0.
222	1	1049	-23.	250.	0.	-300.	300.	328.	188.	0.
223	0	996	-23.	0.	0.	0.	0.	428.	232.	0.
224	0	1000	-22.	0.	0.	0.	0.	173.	99.	0.
225	0	945	-11.	0.	0.	0.	0.	410.	40.	0.
226	0	1018	-22.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
227	1	1000	-27.	303.	0.	-300.	300.	538.	369.	0.
228	0	1042	-21.	0.	0.	0.	0.	223.	148.	0.
229	0	1049	-20.	0.	0.	0.	0.	96.	46.	0.
230	1	1039	-14.	345.	0.	-250.	250.	0.	0.	0.
231	0	1053	-21.	0.	0.	0.	0.	159.	107.	-300.
232	0	1041	-23.	0.	0.	0.	0.	448.	143.	0.
233	1	1000	-26.	300.	0.	-500.	500.	404.	212.	0.
234	0	1038	-21.	0.	0.	0.	0.	572.	244.	0.
235	0	1009	-21.	0.	0.	0.	0.	269.	157.	0.
236	1	1016	-15.	600.	0.	-300.	300.	0.	0.	0.
237	0	1055	-21.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
238	1	1009	-21.	250.	0.	-200.	200.	255.	149.	-150.
239	1	1000	-16.	550.	0.	-400.	400.	0.	0.	0.
240	0	1023	-20.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	-140.

241	1	1049-16.	575.	0.	-600.	600.	0.	0.	0.
242	1	992-18.	170.	0.	-40.	100.	0.	0.	0.
243	1	1009-19.	84.	0.	-40.	80.	8.	3.	0.
244	0	992-20.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
245	0	971-21.	0.	0.	0.	0.	61.	30.	0.
246	0	965-22.	0.	0.	0.	0.	77.	33.	0.
247	0	968-22.	0.	0.	0.	0.	61.	30.	0.
248	0	976-25.	0.	0.	0.	0.	29.	14.	46.
249	0	975-26.	0.	0.	0.	0.	29.	14.	0.
250	0	1019-24.	0.	0.	0.	0.	-23.	-17.	0.
281	0	1025-20.	0.	0.	0.	0.	-33.	-29.	0.
319	0	1015	1.	0.	0.	0.	116.	-24.	0.
320	0	1014	-2.	0.	0.	0.	2.	-13.	0.
322	0	1000-18.	0.	0.	0.	0.	2.	-4.	0.
323	0	981-14.	0.	0.	0.	0.	-15.	26.	0.
324	0	975-23.	0.	0.	0.	0.	25.	-1.	0.
526	0	942-34.	0.	0.	0.	0.	145.	-35.	0.
528	0	972-38.	0.	0.	0.	0.	28.	-20.	0.
531	0	960-29.	0.	0.	0.	0.	14.	2.	0.
552	0	1000-23.	0.	0.	0.	0.	-11.	-1.	0.
562	0	977-28.	0.	0.	0.	0.	50.	17.	0.
609	0	958-29.	0.	0.	0.	0.	30.	1.	0.
664	0	1030-17.	0.	0.	0.	0.	-114.	77.	0.
1190	0	1012	4.	0.	0.	0.	100.	29.	0.
1200	0	1024	-8.	0.	0.	0.	-100.	34.	0.
1201	0	1012-15.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2040	0	965-15.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
7001	1	1050	11.	467.	0.	-210.	210.	0.	0.
7002	1	1050	12.	623.	0.	-280.	280.	0.	0.
7003	1	1032	14.	1210.	0.	-420.	420.	0.	0.
7011	1	1014	5.	234.	0.	-100.	100.	0.	0.
7012	1	1050	12.	372.	0.	-224.	224.	0.	0.
7017	1	1050-10.	330.	0.	0.	350.	0.	0.	0.
7023	1	1050	6.	185.	0.	0.	120.	0.	0.
7024	1	1029	13.	410.	0.	-224.	224.	0.	0.
7039	1	1049	2.	500.	0.	-200.	200.	0.	0.
7044	1	1014-14.	37.	0.	0.	42.	0.	0.	0.
7055	1	996	-8.	45.	0.	0.	25.	0.	0.
7057	1	1021	-3.	165.	0.	-90.	90.	0.	0.
7061	1	1014	2.	400.	0.	-150.	150.	0.	0.
7062	1	1001	6.	400.	0.	0.	150.	0.	0.
7071	1	989-25.	116.	0.	0.	87.	0.	0.	0.
7130	1	1050	19.	1292.	0.	-100.	600.	0.	0.
7139	1	1050	3.	700.	0.	-125.	325.	0.	0.
7166	1	1014	35.	553.	0.	-200.	300.	0.	0.
9001	0	1011-11.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9002	1	994-19.	-4.	0.	-2.	2.	0.	0.	0.
9003	0	983-20.	0.	0.	0.	0.	3.	1.	2.
9004	0	976-20.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9005	0	1011-11.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9006	0	1002-17.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9007	0	991-19.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9012	0	1002-17.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9021	0	988-19.	0.	0.	0.	0.	5.	2.	0.
9022	0	964-22.	0.	0.	0.	0.	2.	1.	0.
9023	0	974-19.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9024	0	970-21.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9025	0	964-20.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9026	0	965-20.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

9031	0	931-25.	0.	0.	0.	0.	2.	1.	0.
9032	0	944-24.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9033	0	928-25.	0.	0.	0.	0.	2.	1.	0.
9034	0	997-21.	0.	0.	0.	0.	2.	1.	2.
9035	0	950-23.	0.	0.	0.	0.	2.	1.	0.
9036	0	959-23.	0.	0.	0.	0.	3.	1.	0.
9037	0	957-23.	0.	0.	0.	0.	2.	1.	0.
9038	0	939-24.	0.	0.	0.	0.	3.	1.	0.
9041	0	963-21.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9042	0	950-22.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9043	0	964-21.	0.	0.	0.	0.	2.	1.	0.
9044	0	978-20.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9051	1	1000-19.	-36.	0.	-17.	17.	0.	0.	0.
9052	0	978-17.	0.	0.	0.	0.	30.	23.	0.
9053	1	1000-18.	-26.	0.	-13.	13.	0.	0.	0.
9054	1	1000 -7.	50.	0.	-38.	38.	0.	0.	0.
9055	1	1000 -8.	8.	0.	-6.	6.	0.	0.	0.
9071	0	975-20.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9072	0	980-20.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9121	0	979-19.	0.	0.	0.	0.	4.	1.	0.
9533	0	1040-18.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
9999									
37	9001	0.01	0.05	0.0001	0.0080	9.0001	1.00		0.
9001	9005	0.08	0.35	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9001	9006	2.44	43.68	0.0000	9.660	9.0001	1.00		0.
9001	9012	3.62	64.90	0.0000	9.790	9.0001	1.00		0.
9005	9051	1.58	37.49	0.0001	0.430	0.0000	0.00		0.
9005	9052	1.58	37.49	0.0000	9.390	9.0001	1.00		0.
9005	9053	1.60	38.05	0.0001	0.430	0.0000	0.00		0.
9005	9054	0.00	15.20	0.0001	0.430	0.0000	0.00		0.
9005	9055	0.00	80.00	0.0001	0.430	0.0000	0.00		0.
9006	9007	5.56	24.67	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9006	9003	11.12	49.33	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9006	9003	11.12	49.33	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9012	9002	7.62	43.29	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9012	9002	7.62	43.29	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9002	9021	5.37	7.03	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9021	9023	110.68	95.28	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9021	9022	44.36281	52	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9002	9024	50.75322	02	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9023	9025	66.69394	40	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9023	9026	61.13361	52	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9007	9071	44.12296	68	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9007	9072	30.79205	70	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9007	9003	5.58	24.67	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9031	73.63467	24	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9032	76.98488	46	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9033	75.73480	56	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9044	7.38	6.35	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9044	9004	3.83	2.89	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.
9004	9041	36.61245	60	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9004	9042	105.93545	36	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9004	9043	15.67169	94	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9034	13.01139	12	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9035	54.48345	72	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9036	15.43167	29	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9037	38.49257	12	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9003	9038	44.12296	68	0.0001	0.0000	0.0000	0.00		0.
9012	9121	23.55	99.04	0.0000	0.0000	0.0000	0.00		0.

9053	9533	0.00	75.00	0.0000.9580.0000.000	
1	5	0.10	0.60	0.0000.0000.0000.000	0.
2	6	0.10	0.90	0.0000.0000.0000.000	0.
2	8	0.60	2.70	5.4000.0000.0000.000	0.
3	7	0.00	0.30	0.0000.0000.0000.000	0.
3	19	0.80	6.9013.9000.0000.0000.000	0.	
3	150	0.10	0.70	0.0000.0000.0000.000	0.
4	16	0.20	1.90112.700.0000.0000.000	0.	
5	9	0.60	2.90	1.8000.0000.0000.000	0.
7	12	0.10	0.90	7.0000.0000.0000.000	0.
7	131	0.10	0.70	1.4000.0000.0000.000	0.
8	11	1.30	5.95	3.3000.0000.0000.000	0.
8	14	1.30	4.20	8.1000.0000.0000.000	0.
9	11	0.60	2.70	1.3000.0000.0000.000	0.
11	13	0.80	3.40	1.8000.0000.0000.000	0.
12	21	0.20	1.5011.8000.0000.0000.000	0.	
13	20	0.60	3.40	1.6000.0000.0000.000	0.
14	15	1.40	4.20	9.7000.0000.0000.000	0.
15	37	6.50	24.8012.1000.0000.0000.000	0.	
15	89	9.90	24.80	3.5000.0000.0000.000	0.
15	90	9.60	36.30	4.8000.0000.0000.000	0.
16	42	0.20	2.20128.000.0000.0000.000	0.	
19	21	0.20	1.80	3.6000.0000.0000.000	0.
19	87	1.30	8.0015.1000.0000.0000.000	0.	
20	22	1.60	3.30	1.5000.0000.0000.000	0.
20	27	6.90	18.60	9.8000.0000.0000.000	0.
21	24	0.40	3.4028.0000.0000.0000.000	0.	
22	23	5.20	11.10	5.0000.0000.0000.000	0.
23	25	1.90	3.90	1.8000.0000.0000.000	0.
24	319	0.70	6.8013.4000.0000.0000.000	0.	
25	26	3.60	7.10	3.4000.0000.0000.000	0.
26	27	4.50	12.00	6.5000.0000.0000.000	0.
26	320	4.30	13.00	1.4000.0000.0000.000	0.
33	34	0.00	6.30	0.0000.0000.0000.000	0.
33	38	0.25	1.20	1.3000.0000.0000.000	0.
33	40	0.60	2.90	2.0000.0000.0000.000	0.
33	41	0.70	4.30	2.6000.0000.0000.000	0.
34	42	0.10	0.80	4.2000.0000.0000.000	0.
35	72	1.20	6.00	0.8000.0000.0000.000	0.
35	76	0.60	1.40	0.2000.0000.0000.000	0.
35	77	1.00	2.90	0.3000.0000.0000.000	0.
36	88	0.40	2.70	4.3000.0000.0000.000	0.
37	38	0.80	4.70	0.8000.0000.0000.000	0.
37	40	2.20	6.40	0.7000.0000.0000.000	0.
37	41	1.00	3.60	2.0000.0000.0000.000	0.
37	49	1.70	8.10	4.8000.0000.0000.000	0.
37	89	10.20	25.40	3.3000.0000.0000.000	0.
37	90	4.70	12.70	1.6000.0000.0000.000	0.
38	41	0.80	3.70	2.0000.0000.0000.000	0.
38	43	3.20	8.70	4.0000.0000.0000.000	0.
39	42	0.06	0.6440.4000.0000.0000.000	0.	
40	48	2.60	15.40	2.2000.0000.0000.000	0.
41	42	0.00	2.90	0.0000.0000.0000.000	0.
41	49	6.50	19.10	2.0000.0000.0000.000	0.
41	51	3.10	8.90	3.6000.0000.0000.000	0.
42	46	0.20	1.4080.6000.0000.0000.000	0.	
43	44	2.60	7.20	3.5000.0000.0000.000	0.
43	48	9.50	26.20	3.2000.0000.0000.000	0.
43	53	1.30	3.90	1.6000.0000.0000.000	0.

44	47	2.70	8.40	3.9000.0000.0000.000	0.
44	54	2.80	8.40	3.7000.0000.0000.000	0.
45	60	0.70	4.1031.2000.0000.0000.000	0.	
45	74	0.90	5.4041.1000.0000.0000.000	0.	
46	81	0.50	4.2069.0000.0000.0000.000	0.	
47	73	5.20	14.50	7.3000.0000.0000.000	0.
47	113	4.30	11.80	1.3000.0000.0000.000	0.
48	107	2.50	6.20	0.7000.0000.0000.000	0.
49	51	3.10	9.40	4.3000.0000.0000.000	0.
51	52	3.70	10.90	4.9000.0000.0000.000	0.
52	55	2.70	8.00	3.6000.0000.0000.000	0.
53	54	2.50	7.30	3.5000.0000.0000.000	0.
54	55	3.50	10.30	4.7000.0000.0000.000	0.
55	57	6.50	16.90	8.2000.0000.0000.000	0.
57	58	4.60	8.00	3.6000.0000.0000.000	0.
57	63	15.90	53.70	7.1000.0000.0000.000	0.
58	59	0.90	2.60	0.5000.0000.0000.000	0.
59	61	0.20	1.30	1.5000.0000.0000.000	0.
60	62	0.90	6.5048.5000.0000.0000.000	0.	
62	64	1.60	10.5020.3000.0000.0000.000	0.	
62	144	0.10	0.70	1.3000.0000.0000.000	0.
63	526	2.65	17.20	2.6000.0000.0000.000	0.
69	211	5.10	23.20	2.8000.0000.0000.000	0.
69	79	5.10	15.70	2.3000.0000.0000.000	0.
70	71	3.20	10.00	6.2000.0000.0000.000	0.
70	528	2.00	12.34	2.8000.0000.0000.000	0.
71	72	3.60	13.10	6.8000.0000.0000.000	0.
71	73	3.40	9.90	4.7000.0000.0000.000	0.
72	77	1.80	8.70	1.1000.0000.0000.000	0.
72	531	2.56	19.30	0.0000.0000.0000.000	0.
73	76	2.10	5.70	3.0000.0000.0000.000	0.
73	79	1.80	5.20	1.8000.0000.0000.000	0.
74	88	0.40	2.70	5.0000.0000.0000.000	0.
74	562	2.86	20.1337.9000.0000.0000.000	0.	
76	77	1.60	4.30	0.4000.0000.0000.000	0.
77	78	0.10	0.60	0.7000.0000.0000.000	0.
77	80	1.40	7.00	3.8000.0000.0000.000	0.
77	552	8.91	26.76	2.9000.0000.0000.000	0.
77	609	7.82	21.27	2.2000.0000.0000.000	0.
78	79	0.60	2.20	1.1000.0000.0000.000	0.
78	84	0.00	3.60	0.0000.0000.0000.000	0.
79	211	9.90	37.50	5.1000.0000.0000.000	0.
80	211	2.20	10.70	5.8000.0000.0000.000	0.
81	194	0.35	3.3053.0000.0000.0000.000	0.	
81	195	0.35	3.3053.0000.0000.0000.000	0.	
85	86	0.80	6.4012.8000.0000.0000.000	0.	
86	87	1.20	9.3018.3000.0000.0000.000	0.	
86	323	0.60	4.80	9.2000.0000.0000.000	0.
89	91	4.70	11.90	1.4000.0000.0000.000	0.
90	92	3.20	17.40	2.4000.0000.0000.000	0.
91	94	10.00	25.30	3.1000.0000.0000.000	0.
91	97	2.20	7.70	3.9000.0000.0000.000	0.
92	103	1.90	14.40	1.7000.0000.0000.000	0.
92	105	1.70	9.20	1.2000.0000.0000.000	0.
94	97	27.80	42.70	4.3000.0000.0000.000	0.
97	100	2.20	5.30	0.7000.0000.0000.000	0.
97	102	3.80	9.20	1.2000.0000.0000.000	0.
97	103	4.80	12.20	1.5000.0000.0000.000	0.
98	100	2.40	6.40	0.7000.0000.0000.000	0.

98	102	3.40	12.10	1.5000.0000.0000.000	0.
99	107	5.30	13.50	1.7000.0000.0000.000	0.
99	108	0.20	0.40	0.2000.0000.0000.000	0.
99	109	4.50	35.40	4.4000.0000.0000.000	0.
99	110	5.00	17.40	2.2000.0000.0000.000	0.
100	102	1.60	3.80	0.4000.0000.0000.000	0.
102	104	4.30	6.40	2.7000.0000.0000.000	0.
103	105	1.90	6.20	0.8000.0000.0000.000	0.
104	108	7.60	13.00	4.4000.0000.0000.000	0.
104	322	4.40	12.40	1.5000.0000.0000.000	0.
105	107	1.20	8.80	1.1000.0000.0000.000	0.
105	110	15.70	40.00	4.7000.0000.0000.000	0.
108	324	7.40	20.80	2.6000.0000.0000.000	0.
109	110	7.00	18.40	2.1000.0000.0000.000	0.
109	113	10.00	27.40	3.1000.0000.0000.000	0.
109	114	10.90	39.30	3.6000.0000.0000.000	0.
110	112	14.20	40.40	5.0000.0000.0000.000	0.
112	114	1.70	4.20	0.6000.0000.0000.000	0.
115	122	0.36	1.99	0.4000.0000.0000.000	0.
116	120	0.20	10.49	0.1000.0000.0000.000	0.
117	118	0.01	0.18	1.7000.0000.0000.000	0.
118	119	0.00	2.71	0.0000.0000.0000.000	0.
118	1201	0.00	61.63	0.0000.0000.0000.000	0.
1201	120	0.00	-36.97	0.0000.0000.0000.000	0.
118	121	0.22	29.15	0.0000.0000.0000.000	0.
119	120	0.00	3.39	0.0000.0000.0000.000	0.
119	121	0.00	5.82	0.0000.0000.0000.000	0.
122	123	8.08	23.44	2.9000.0000.0000.000	0.
122	125	9.65	36.69	5.4000.0000.0000.000	0.
123	124	3.60	10.76	11.7000.0000.0000.000	0.
123	125	4.76	14.14	14.9000.0000.0000.000	0.
125	126	0.06	1.97	0.0000.0000.0000.000	0.
126	127	0.59	4.05	25.0000.0000.0000.000	0.
126	129	1.15	11.06	18.5000.0000.0000.000	0.
126	132	1.98	16.88	32.1000.0000.0000.000	0.
126	157	0.50	5.00	33.0000.0000.0000.000	0.
126	158	0.77	5.38	33.5000.0000.0000.000	0.
126	169	1.65	11.57	17.1000.0000.0000.000	0.
127	128	0.59	5.77	9.5000.0000.0000.000	0.
127	134	0.49	3.36	20.8000.0000.0000.000	0.
127	168	0.59	5.77	9.5000.0000.0000.000	0.
128	130	0.78	7.73	12.6000.0000.0000.000	0.
128	133	0.26	1.93	3.0000.0000.0000.000	0.
129	130	0.76	7.52	12.2000.0000.0000.000	0.
129	133	0.21	1.86	3.0000.0000.0000.000	0.
130	132	0.16	1.64	2.6000.0000.0000.000	0.
130	151	0.17	1.65	2.6000.0000.0000.000	0.
130	167	0.79	7.93	12.7000.0000.0000.000	0.
130	168	0.78	7.84	12.5000.0000.0000.000	0.
133	137	0.17	1.17	28.9000.0000.0000.000	0.
133	168	0.26	1.93	3.0000.0000.0000.000	0.
133	169	0.21	1.86	3.0000.0000.0000.000	0.
133	171	0.02	1.01	0.0000.0000.0000.000	0.
134	135	0.43	2.93	18.0000.0000.0000.000	0.
134	184	0.39	3.81	25.8000.0000.0000.000	0.
135	136	0.91	6.23	38.5000.0000.0000.000	0.
136	137	1.25	8.90	54.0000.0000.0000.000	0.
136	152	0.56	3.90	95.3000.0000.0000.000	0.
137	140	0.15	1.14	28.4000.0000.0000.000	0.

137	181	0.05	0.34	2.1000.0000.0000.000	0.
137	186	0.07	1.5112.6000.0000.0000.000	0.	
137	188	0.05	0.34	2.1000.0000.0000.000	0.
139	172	5.62	22.48	8.1000.0000.0000.000	0.
140	141	1.20	8.3612.3000.0000.0000.000	0.	
140	142	1.52	11.3268.4000.0000.0000.000	0.	
140	145	4.68	33.6951.9000.0000.0000.000	0.	
140	146	4.30	30.3146.3000.0000.0000.000	0.	
140	147	4.89	34.9253.8000.0000.0000.000	0.	
140	182	0.13	0.8911.9000.0000.0000.000	0.	
141	146	2.91	22.6734.2000.0000.0000.000	0.	
142	143	0.60	5.7076.7000.0000.0000.000	0.	
143	145	0.75	7.7311.9000.0000.0000.000	0.	
143	149	1.27	9.0913.5000.0000.0000.000	0.	
145	146	0.85	5.88	8.7000.0000.0000.000	0.
145	149	2.18	15.1122.3000.0000.0000.000	0.	
146	147	0.73	5.04	7.4000.0000.0000.000	0.
148	178	5.23	15.26	7.4000.0000.0000.000	0.
148	179	13.71	39.19	7.6000.0000.0000.000	0.
152	153	1.37	9.5714.1000.0000.0000.000	0.	
153	161	0.55	2.8819.0000.0000.0000.000	0.	
154	156	17.46	31.61	4.0000.0000.0000.000	0.
154	183	8.04	30.54	4.5000.0000.0000.000	0.
155	161	1.10	5.6838.8000.0000.0000.000	0.	
157	159	0.08	0.98	6.9000.0000.0000.000	0.
158	159	0.29	2.8519.0000.0000.0000.000	0.	
158	160	0.66	4.4827.7000.0000.0000.000	0.	
162	164	0.24	3.2623.6000.0000.0000.000	0.	
162	165	0.18	2.45166.200.0000.0000.000	0.	
163	164	0.44	5.14359.700.0000.0000.000	0.	
165	166	0.02	1.23	0.0000.0000.0000.000	0.
167	169	0.18	1.78	2.9000.0000.0000.000	0.
172	173	6.69	48.43	6.3000.0000.0000.000	0.
172	174	5.58	22.10	3.1000.0000.0000.000	0.
173	174	8.07	33.31	4.9000.0000.0000.000	0.
173	175	7.39	30.71	4.3000.0000.0000.000	0.
173	176	17.99	50.17	6.9000.0000.0000.000	0.
175	176	9.04	36.26	4.8000.0000.0000.000	0.
175	179	7.70	30.92	5.4000.0000.0000.000	0.
176	177	2.51	8.29	4.7000.0000.0000.000	0.
177	178	2.22	8.47	5.0000.0000.0000.000	0.
178	179	4.98	18.55	2.9000.0000.0000.000	0.
178	180	0.61	2.90	8.4000.0000.0000.000	0.
181	138	0.04	2.02	0.0000.0000.0000.000	0.
181	187	0.04	0.8311.5000.0000.0000.000	0.	
184	185	0.25	2.4516.4000.0000.0000.000	0.	
186	188	0.07	0.8611.5000.0000.0000.000	0.	
187	188	0.07	0.8611.5000.0000.0000.000	0.	
188	138	0.04	2.02	0.0000.0000.0000.000	0.
189	208	3.30	9.50	0.0000.0000.0000.000	0.
189	209	4.60	6.90	0.0000.0000.0000.000	0.
190	231	0.04	0.22620.000.0000.0000.000	0.	
190	240	0.00	2.75	0.0000.0000.0000.000	0.
191	192	0.30	4.80	0.0000.0000.0000.000	0.
192	225	0.20	0.90	0.0000.0000.0000.000	0.
193	205	4.50	6.30	0.0000.0000.0000.000	0.
193	208	4.80	12.70	0.0000.0000.0000.000	0.
194	219	0.31	2.8650.0000.0000.0000.000	0.	
194	664	0.24	3.5536.0000.0000.0000.000	0.	

195	219	0.31	2.8650.0000.0000.0000.000	0.
196	197	1.40	4.00 0.4000.0000.0000.000	0.
196	210	3.00	8.10 1.0000.0000.0000.000	0.
197	198	1.00	6.00 0.9000.0000.0000.000	0.
197	211	1.50	4.00 0.6000.0000.0000.000	0.
198	202	33.20	68.80 0.0000.0000.0000.000	0.
198	203	0.90	4.60 2.5000.0000.0000.000	0.
198	210	2.00	7.30 0.8000.0000.0000.000	0.
198	211	3.40	10.90 3.2000.0000.0000.000	0.
199	200	7.60	13.50 0.9000.0000.0000.000	0.
199	210	4.00	10.20 0.5000.0000.0000.000	0.
200	210	8.10	12.80 1.4000.0000.0000.000	0.
201	204	12.40	18.30 0.0000.0000.0000.000	0.
203	211	1.00	5.90 0.8000.0000.0000.000	0.
204	205	4.60	6.80 0.0000.0000.0000.000	0.
205	206	30.20	44.60 0.0000.0000.0000.000	0.
206	207	7.30	9.30 0.0000.0000.0000.000	0.
206	208	24.00	42.10 0.0000.0000.0000.000	0.
212	215	1.39	7.78 8.6000.0000.0000.000	0.
213	214	0.25	3.80 0.0001.0000.0000.000	0.
214	215	0.17	1.85 2.0000.0000.0000.000	0.
214	242	0.15	1.08 0.2000.0000.0000.000	0.
215	216	0.45	2.49 2.6000.0000.0000.000	0.
216	217	0.40	4.97 1.8000.0000.0000.000	0.
217	218	0.00	4.56 0.0000.0000.0000.000	0.
217	219	0.05	1.77 2.0000.0000.0000.000	0.
217	220	0.27	3.9583.2000.0000.0000.000	0.
219	237	0.03	0.18520.000.0000.0000.000	0.
220	218	0.37	4.8443.0000.0000.0000.000	0.
220	221	0.10	2.9550.3000.0000.0000.000	0.
220	238	0.16	0.4640.2000.0000.0000.000	0.
221	223	0.03	0.13100.000.0000.0000.000	0.
222	237	0.14	5.1433.0001.0000.0000.000	0.
224	225	1.00	6.4048.0000.0000.0000.000	0.
224	226	0.19	0.8186.0000.0000.0000.000	0.
225	191	0.10	6.10 0.0000.0000.0000.000	0.
226	231	0.05	2.12 0.0000.0000.0000.000	0.
227	231	0.09	4.7218.6001.0000.0000.000	0.
228	229	0.19	0.87128.000.0000.0000.000	0.
228	231	0.26	9.17 0.0000.0000.0000.000	0.
228	234	0.13	2.8881.0000.0000.0000.000	0.
229	190	0.00	6.26 0.0000.0000.0000.000	0.
231	232	0.02	0.69136.400.0000.0000.000	0.
231	237	0.01	0.06357.0 0.0000.0000.000	0.
232	233	0.17	4.85 0.0000.0000.0000.000	0.
234	235	0.02	2.5914.4000.0000.0000.000	0.
234	237	0.06	2.72 0.0000.0000.0000.000	0.
235	238	0.02	0.0680.0000.0000.0000.000	0.
241	237	0.05	1.54 0.0001.0000.0000.000	0.
240	281	0.03	0.43 0.9000.0000.0000.000	0.
242	245	0.82	8.51 0.0000.0000.0000.000	0.
242	247	1.12	7.23 0.0000.0000.0000.000	0.
243	244	1.27	3.55 0.0000.0000.0000.000	0.
243	245	3.26	18.04 0.0000.0000.0000.000	0.
244	246	1.95	5.51 0.0000.0000.0000.000	0.
245	246	1.57	7.32 0.0000.0000.0000.000	0.
245	247	3.60	21.19 0.0000.0000.0000.000	0.
246	247	2.68	12.85 0.0000.0000.0000.000	0.
247	248	4.28	12.15 0.0000.0000.0000.000	0.

248	249	3.51	10.04	0.0000.0000.0000.000	
249	250	6.16	18.57	0.0000.0000.0000.000	
3	1	0.00	5.20	0.0000.9470.9001.100	
3	2	0.00	5.20	0.0000.9560.9001.100	
3	4	0.00	0.50	0.0000.9710.9001.100	
7	5	0.00	3.90	0.0000.9480.9001.100	
7	6	0.00	3.90	0.0000.9590.9001.100	
10	11	0.00	8.90	0.0001.0460.9001.100	
12	10	0.00	5.30	0.0000.9850.0000.000	
15	17	1.94	3.11	0.0000.9560.9001.100	
16	15	0.10	3.80	0.0000.9710.9001.100	
21	20	0.00	1.40	0.0000.9520.0000.000	
24	23	0.00	6.40	0.0000.9430.9001.100	
36	35	0.00	4.70	0.0001.0100.9001.100	
45	44	0.00	2.00	0.0001.0080.9001.100	
45	46	0.00	2.10	0.0001.0000.9001.100	
62	61	0.00	5.90	0.0000.9750.9001.100	
63	64	0.00	3.80	0.0001.0170.9001.100	
73	74	0.00	2.44	0.0001.0000.9001.100	
81	88	0.00	2.00	0.0001.0000.9001.100	
85	99	0.00	4.80	0.0001.0000.9001.100	
86	102	0.00	4.80	0.0001.0000.9001.100	
87	94	0.00	4.60	0.0001.0150.9001.100	
114	207	0.00	14.90	0.0000.9670.9001.100	
116	124	0.52	1.74	0.0001.0100.0000.000	
121	115	0.00	2.80	0.0001.0500.9001.100	
122	157	0.05	1.95	0.0001.0000.9001.100	
130	131	0.00	1.80	0.0001.0520.9001.100	
130	150	0.00	1.40	0.0001.0520.9001.100	
132	170	0.10	4.02	0.0001.0500.0000.000	
141	174	0.24	6.03	0.0000.9750.9001.100	
142	175	0.24	4.98-8.7001.0000.9001.100		
143	144	0.00	8.33	0.0001.0350.9001.100	
143	148	0.13	3.71	0.0000.9560.9001.100	
145	180	0.05	1.82	0.0001.0000.9001.100	
151	170	0.10	3.92	0.0001.0500.0000.000	
153	183	0.27	6.39	0.0001.0730.9001.100	
155	156	0.08	2.56	0.0001.0500.0000.000	
159	117	0.00	1.60	0.0001.0500.9001.100	
160	124	0.12	3.96	0.0000.9750.0000.000	
163	137	0.13	3.84-5.7000.9800.9001.100		
164	155	0.09	2.31-3.3000.9560.9001.100		
182	139	0.03	1.31	0.0001.0500.9001.100	
189	210	0.00	25.20	0.0001.0300.9001.100	
193	196	0.00	23.70	0.0001.0300.9001.100	
195	212	0.08	3.66	0.0000.9850.9001.100	
200	248	0.00	22.00	0.0001.0000.9001.100	
201	69	0.00	9.80	0.0001.0300.9001.100	
202	211	0.00	12.80	0.0001.0100.9001.100	
204	2040	2.00	20.40-1.2001.0500.9001.100		
209	198	2.60	21.10	0.0001.0300.0000.000	
211	212	0.30	1.22	0.0001.0000.9001.100	
218	219	0.10	3.54-1.0000.9700.9001.100		
223	224	0.12	1.95-36.401.0000.9001.100		
229	230	0.10	3.32	0.0001.0200.0000.000	
234	236	0.05	1.60	0.0001.0700.0000.000	
238	239	0.05	1.60	0.0001.0200.0000.000	
196	2040	0.01	2.00	0.0001.0000.0000.000	
119	1190	0.10	2.30	0.0001.0220.9001.100	

120	1200	0.00	2.30	0.0000.9280.9001.100	0.
7002	2	0.10	1.46	0.0001.0000.0000.000	0.
7003	3	0.00	1.05	0.0001.0000.0000.000	0.
7061	61	0.00	2.38	0.0001.0000.0000.000	0.
7062	62	0.00	3.21	0.0000.9500.0000.000	0.
7166	166	0.00	1.54	0.0001.0000.0000.000	0.
7024	24	0.00	2.89	0.0001.0000.0000.000	0.
7001	1	0.00	1.95	0.0001.0000.0000.000	0.
7130	130	0.00	1.93	0.0001.0000.0000.000	0.
7011	11	0.00	1.92	0.0001.0000.0000.000	0.
7023	23	0.00	2.30	0.0001.0000.0000.000	0.
7049	49	0.00	1.24	0.0001.0000.0000.000	0.
7139	139	0.00	1.67	0.0001.0000.0000.000	0.
7012	12	0.00	3.12	0.0001.0000.0000.000	0.
7017	17	0.00	1.65	0.0000.9420.0000.000	0.
7039	39	0.00	3.16	0.0000.9650.0000.000	0.
7057	57	0.00	5.35	0.0000.9500.0000.000	0.
7044	44	0.00	18.18	0.0000.9420.0000.000	0.
7055	55	0.00	19.61	0.0000.9420.0000.000	0.
7071	71	0.00	6.90	0.0000.9560.0000.000	0.
9999					
	0.90	1.1			
9999					
14	15	100.			
9999					
84	1	500			
124	1	300			
143	1	800			
9999					