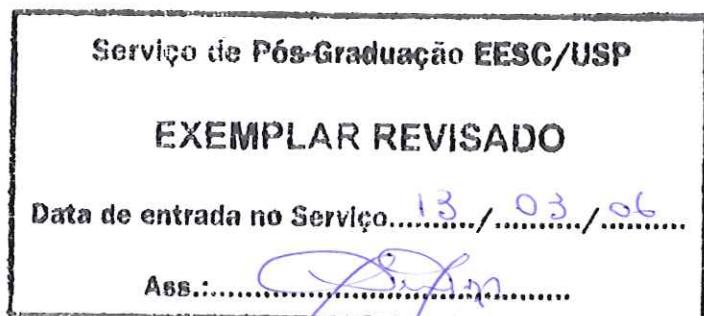


Saulo Ricardo Canola



Alocação de Unidades de Geração Termoelétrica em Sistemas
Elétricos de Potência.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.



Orientador: Prof. Dr Geraldo Roberto Martins da Costa

DEDALUS - Acervo - EESC

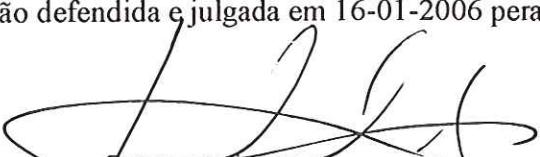
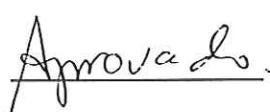

31100053721

São Carlos
2006

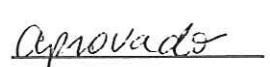
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro SAULO RICARDO CANOLA

Dissertação defendida e julgada em 16-01-2006 perante a Comissão Julgadora:

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

Prof. Titular **RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM**  **Aprovado**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

 
Prof. Dra. **ALESSANDRA MACEDO DE SOUZA** 
(Universidade de Brasília/UnB) **Aprovado**


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


Prof. Associado **MARCIO ROBERTO SILVA CORRÊA**
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação em Exercício

*“Não sou avaro de ouro, e pouco me importo
se vivem às minhas expensas, sinto pouco que
outros usem minhas roupas, essas coisas externas
não encontram abrigo entre as minhas
preocupações; mas se ambicionar a honra é pecado,
sou a alma mais pecadora que existe.”*

(A vida do rei Henrique V, ato IV, cena III
William Shakespeare)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa, por ter acreditado em minha pessoa e motivado minha mente e meu espírito, e sem sombra de dúvidas por sua paciência.

Ao pessoal do LOSEP: Fernando, Edmárcio, Vanusa, Marcus, pelo apoio e ajuda, e principalmente pela alegria.

As meninas da secretaria de Pós-Graduação: Denise e Marisa, por solucionarem todos os transtornos que apresentei a elas.

Resumo

Canola, S. R. (2006). *Alocação de Unidades de Geração Termoelétricas em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de alocação de unidades termoelétricas em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). O Fluxo de Potencia Ótimo (FPO) foi utilizado para se obter o ponto ótimo de operação para o sistema e os multiplicadores de Lagrange associados às restrições. Os multiplicadores de Lagrange indicam a sensibilidade entre a função objetivo e a restrição a ele associada. Esta sensibilidade indica, quais as barras do sistema, são candidatas à alocação de novas usinas termoelétricas. Testes nos sistemas de 5 barras, IEEE 14 barras, IEEE 30 barras, equivalente CESP 440 kV de 53 barras e IEEE 118 barras comprovam a eficiência da abordagem, a qual poderá ser utilizada em estudos de planejamento da expansão do sistema.

Palavras-chave: alocação de unidades geradoras termoelétricas, planejamento em SEP, Fluxo Ótimo de Potência, método primal-dual barreira logarítmica, multiplicadores de Lagrange.

ABSTRACT

Canola, S. R. (2005). *Thermoelectrical Generation Allocation in Electric Power Systems*. Master Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

The aim of this paper is to present a study of thermoelectical generation allocation in electric power systems. The Optimal Power Flow (OPF) was used to evaluate the optimal operation point for the power system and also Lagrange multipliers associated with the constraints. The Lagrange multipliers are the sensitivity between the objective function and its constraints. This sensitivity is used to verify in a power system where is the best place to incentive the allocation of new thermoelectrical power plants. Tests on the systems: 5 buses, IEEE 14 buses, IEEE 30 buses, equivalent CESP 440kV 53 buses and IEEE 118 buses showed the efficiency of the presented approach. This method of analyzing the system can be used in study of expansion planning system.

Keywords: thermoelectric power plants allocation, power system planning, optimal power flow, primal-dual logarithmic barrier method, sensitivity analysis, Lagrange multipliers.

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Linha de transmissão.....	12
Figura 3.2 - Modelo utilizado para a variável <i>tap</i> do transformador.....	13
Figura 4.1 – Croqui sistema elétrico 5 barras	23
Figura 4.2 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	30
Figura 4.3a – Evolução dos <i>mismatches</i>	30
Figura 4.3b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	30
Figura 4.4 –Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5.....	30
Figura 4.5 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	33
Figura 4.6a – Evolução dos <i>mismatches</i>	33
Figura 4.6b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	34
Figura 4.7 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5....	34
Figura 4.8 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.....	36
Figura 4.9a – Evolução dos <i>mismatches</i>	36
Figura 4.9b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	36
Figura 4.10 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5..	36
Figura 4.11 – Perdas ativa x cenários	37
Figura 4.12 – Sistema IEEE 14 barras.....	38
Figura 4.13 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	39
Figura 4.14a – Evolução dos <i>mismatches</i>	39
Figura 4.14b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	40
Figura 4.15 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4..	40
Figura 4.16 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11....	40
Figura 4.17 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	43
Figura 4.18a – Evolução dos <i>mismatches</i>	43
Figura 4.18b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	43
Figura 4.19 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4..	43
Figura 4.20 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11....	43
Figura 4.21 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	45
Figura 4.22a – Evolução dos <i>mismatches</i>	45
Figura 4.22b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	46
Figura 4.23 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4..	46

Figura 4.24 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11....	46
Figura 4.25 - Perdas ativa x cenários.....	47
Figura 4.26 – Sistema IEEE 30 Barras	48
Figura 4.27 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	50
Figura 4.28a – Evolução dos <i>mismatches</i>	50
Figura 4.28b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	50
Figura 4.29 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6..	50
Figura 4.30 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17....	50
Figura 4.31 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	53
Figura 4.32a – Evolução dos <i>mismatches</i>	53
Figura 4.32b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	53
Figura 4.33 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6..	53
Figura 4.34 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17....	53
Figura 4.35 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	55
Figura 4.36a – Evolução dos <i>mismatches</i>	55
Figura 4.36b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	55
Figura 4.37 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6..	55
Figura 4.38 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17....	56
Figura 4.39 - Perdas ativa x cenários.....	57
Figura 4.40 – Sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras.....	58
Figura 4.41 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	60
Figura 4.42a – Evolução dos <i>mismatches</i>	60
Figura 4.42b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	60
Figura 4.43 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.....	60
Figura 4.44 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.....	60
Figura 4.45 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	63
Figura 4.46a – Evolução dos <i>mismatches</i>	63
Figura 4.46b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	64
Figura 4.47 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.....	64
Figura 4.48 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.....	64

Figura 4.49 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	66
Figura 4.50a – Evolução dos <i>mismatches</i>	66
Figura 4.50b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	66
Figura 4.51 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.....	66
Figura 4.52 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.....	67
Figura 4.53 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	69
Figura 4.54a – Evolução dos <i>mismatches</i>	69
Figura 4.54b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	69
Figura 4.55 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.....	69
Figura 4.56 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.....	69
Figura 4.57 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	71
Figura 4.58a – Evolução dos <i>mismatches</i>	71
Figura 4.58b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	72
Figura 4.59 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.....	72
Figura 4.60 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.....	72
Figura 4.61 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	74
Figura 4.62a – Evolução dos <i>mismatches</i>	74
Figura 4.62b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	74
Figura 4.63 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.....	74
Figura 4.64 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.....	75
Figura 4.65 - Perdas ativa x cenários.....	76
Figura 4.66 – Sistema IEEE 118 barras.....	77
Figura 4.67 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	79
Figura 4.68a – Evolução dos <i>mismatches</i>	79
Figura 4.68b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	79
Figura 4.69 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11	79

Figura 4.70 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	82
Figura 4.71a – Evolução dos <i>mismatches</i>	82
Figura 4.71b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	82
Figura 4.72 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11	82
Figura 4.73 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão	84
Figura 4.74a – Evolução dos <i>mismatches</i>	84
Figura 4.74b – Detalhe da convergência dos <i>mismatches</i>	84
Figura 4.75 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11	84
Figura 4.76 - Perdas ativa x cenários.....	85

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Dados iniciais do sistema de 5 barras	24
Tabela 4.2 – Limites de tensão e de geração de potência ativa e reativa.....	24
Tabela 4.3 – Valores iniciais de μ e β.....	29
Tabela 4.4 – Solução para o sistema de 5 barras	29
Tabela 4.5 – multiplicadores de Lagrange associados ao balanço de potência ativa ...	31
Tabela 4.6 – Cenários estudados.....	32
Tabela 4.7 – Valores iniciais de μ e β.....	32
Tabela 4.8 – Solução da nova compilação para o sistema de 5 barras para o cenário 1.....	33
Tabela 4.9 – Valores iniciais de μ e β.....	34
Tabela 4.10 – Solução da nova compilação para o sistema de 5 barras para o cenário 2.....	35
Tabela 4.11 – Valores iniciais de μ e β.....	39
Tabela 4.12 – Solução do sistema com 14 barras	39
Tabela 4.13 – Barra candidata	41
Tabela 4.14 – Cenários estudados.....	41
Tabela 4.15 – Valores iniciais de μ e β.....	42
Tabela 4.16 – Solução do FPO para o cenário 1	42
Tabela 4.17 – Valores iniciais de μ e β.....	44
Tabela 4.18 – Solução do FPO para o cenário 2.....	45
Tabela 4.19 – Barras com restrições de tensão ativas na solução.....	45
Tabela 4.20 – Valores iniciais de μ e β.....	49
Tabela 4.21 – Solução do sistema com 30 barras	49
Tabela 4.22 – Barra candidata	51
Tabela 4.23 – Cenários estudados.....	51
Tabela 4.24 – Valores iniciais de μ e β.....	52
Tabela 4.25 – Solução do FPO para o cenário 1	52
Tabela 4.26 – Valores iniciais de μ e β.....	54
Tabela 4.27 – Solução do FPO para o cenário 2	55
Tabela 4.28 – Valores iniciais de μ e β.....	59

Tabela 4.29 – Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras	59
Tabela 4.30 – Restrições de tensões ativas	59
Tabela 4.31 – Barras candidatas	61
Tabela 4.32 – Cenários estudados.....	62
Tabela 4.33 – Valores iniciais de μ e β.....	62
Tabela 4.34 – Solução do FPO para o cenário 1.....	63
Tabela 4.35 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 1	63
Tabela 4.36 – Valores iniciais de μ e β.....	65
Tabela 4.37 – Solução do FPO para a cenário 2	65
Tabela 4.38 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 2	65
Tabela 4.39 – Valores iniciais de μ e β.....	67
Tabela 4.40 – Solução do FPO para o cenário 3	68
Tabela 4.41 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 3	68
Tabela 4.42 – Valores iniciais de μ e β.....	70
Tabela 4.43 – Solução do FPO para o cenário 4.....	70
Tabela 4.44 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 4	71
Tabela 4.45 – Valores iniciais de μ e β.....	73
Tabela 4.46 – Solução do FPO para o cenário 5	73
Tabela 4.47 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 5	73
Tabela 4.48 – Valores iniciais de μ e β.....	78
Tabela 4.49 – Solução do sistema IEEE 118 barras	78
Tabela 4.50 – Restrições de tensões ativas	78
Tabela 4.51 – Barras candidatas	80
Tabela 4.52 – Cenários estudados.....	80
Tabela 4.53 – Valores iniciais de μ e β.....	81
Tabela 4.54 – Solução do FPO para o cenário 1	81
Tabela 4.55 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 1	81
Tabela 4.56 – Valores iniciais de μ e β.....	83
Tabela 4.57 – Solução do FPO para o cenário 2	83

Listas de Abreviaturas

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

Listas de Símbolos

$C_i(P_{Gi})$ - é a função custo, para o gerador termoelétrico i ;

P_{Gi} - é a geração de potência ativa do gerador i ;

P_{Gi}^{\min} - limite inferior da geração de potência ativa da barra i ;

P_{Gi}^{\max} - limite superior da geração de potência ativa da barra i ;

P_D - é a demanda total do sistema.

V - magnitude de tensão na barra

θ - fase da tensão na barra

t - *tap* do transformador

$f_{km}(V, \theta, t)$ - função fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras k e m

$\Delta P_k(V, \theta, t)$ - equação do balanço da potência ativa

$\Delta Q_k(V, \theta, t)$ - equação do balanço da potência reativa

Q_k^{\min} - limite mínimo de potência reativa da barra k

$Q_k(V, \theta, t)$ - função da potência reativa em função das variáveis de estado

Q_k^{\max} - limite máximo de potência reativa da barra k

P_k^{\min} - limite mínimo de potência ativa da barra k

$P_k(V, \theta, t)$ - função da potência ativa em função das variáveis de estado

P_k^{\max} - limite máximo de potência ativa da barra k

F_{ativo}^{\max} - fluxo máximo de potência ativa

V_k^{\min} - limite mínimo da magnitude da tensão da barra k

V_k - magnitude de tensão da barra k

V_k^{\max} - limite máximo da magnitude da tensão da barra k

t_j^{\min} - limite do *tap* mínimo do transformador j

t_j - *tap* do transformador j

t_j^{\max} - limite de *tap* máximo do transformador j

V_m - magnitude de tensão da barra m

g_{km} - condutância série entre as barras k e m

P_k^G - potência ativa gerada na barra k

P_k^C - potência ativa consumida na barra k

P_{km} - fluxo de potência ativa entre as barras k e m

θ_{km} - defasagem angular entre as barras k e m

b_{km} - susceptância entre as barras k e m

b_{km}^{sh} - susceptância *shunt* entre as barras k e m

Q_k^G - potência reativa gerada na barra k

Q_k^C - potência reativa consumida na barra k

Q_{km} - fluxo de potência reativa entre as barras k e m

Ω - conjunto de barras vizinhas a barra k

NL – número de linhas de transmissão

$f(x)$ - função objetivo

$g(x)$ - corresponde ao vetor das equações de balanço da rede elétrica

h^{\min}

$h(x)$ - corresponde ao vetor das inequações funcionais da rede elétrica

x - é o vetor das variáveis de controle e de estado do sistema

s_1, s_2, s_3, s_4 - são as variáveis *slack*

μ - parâmetro de barreira

λ^T - é o vetor do multiplicador de Lagrange associado às restrições de igualdade

$\pi_1^T, \pi_2^T, \pi_3^T, \pi_4^T$ - são os vetores dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade

L - função Lagrangiano

∇L - gradiente da função lagrangiano

$W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2)$ - é a matriz Hessiana

$J(x)$ - é a matriz Jacobiana

I - é a matriz identidade

α_p - passo primal

α_d - passo dual

σ - é um valor determinado empiricamente (0,9995)

n - é o número de variáveis tratadas por barreira

β - é um valor especificado pelo usuário

ξ – critério de parada (erro permitido na convergência)

Sumário

Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas	xii
Lista de Símbolos	xiii
1 Introdução	1
2 Histórico.....	3
3 Fluxo de Potência Ótimo	8
3.1 – O Problema do Fluxo de Potência Ótimo	8
3.2 – O Método Primal-Dual Barreira Logarítmica.....	13
3.2.1 – Atualização das Variáveis.....	17
3.2.2 – Inicialização das Variáveis	19
3.3 – Algoritmo.....	20
3.4 – Barras Candidatas	20
4 Resultados Numéricos	22
4.1 Sistema de 5 barras	23
4.1.1 Solução do sistema de 5 barras pelo FPO	24
4.1.2 Solução do sistema de 5 barras pelo FPO - cenário 1	32
4.1.3 Solução do sistema de 5 barras pelo FPO - cenário 2.....	34
4.1.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão	36
4.2 Sistema IEEE 14 barras	37

4.2.1 Solução do sistema IEEE 14 barras pelo FPO	38
4.2.2 Solução do sistema IEEE 14 barras pelo FPO – cenário 1	41
4.2.3 Solução do sistema IEEE 14 barras pelo FPO – cenário 2	44
4.2.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão	47
4.3 Sistema IEEE 30 barras	47
4.3.1 Solução do sistema IEEE 30 barras pelo FPO	49
4.3.2 Solução do sistema IEEE 30 barras pelo FPO – cenário 1	52
4.3.3 Solução do sistema IEEE 30 barras pelo FPO – cenário 2	54
4.3.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão	56
4.4 Sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras	57
4.4.1 Solução do sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras pelo FPO	58
4.4.2 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 1	62
4.4.3 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 2	65
4.4.4 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 3	67
4.4.5 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 4	70
4.4.6 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 5	73
4.4.7 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão	75
4.5 Sistema IEEE 118 barras	76
4.5.1 Solução do sistema IEEE 118 barras pelo FPO	78
4.5.2 Solução do sistema IEEE 118 barras pelo FPO – cenário 1	80
4.5.3 Solução do sistema IEEE 118 barras pelo FPO – cenário 2	83
4.5.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão	85
5 Conclusão.....	86
Referências	87
Apêndice	89

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O parque gerador brasileiro, com características únicas no cenário mundial, é composto, em sua maior parte, por usinas hidrelétricas. Com a finalidade de se conseguir o melhor desempenho possível da geração, procura-se sempre alocar estas usinas onde ocorrem os maiores ganhos energéticos em um rio. Nesta etapa do empreendimento não se considera a localização das cargas que serão atendidas pelas usinas. Como consequência, grandes sistemas de transmissão precisam ser construídos para levar a energia gerada aos centros de carga. Porém, as usinas do tipo termoelétricas, que também compõe o parque gerador brasileiro e encontram-se em expansão, possuem a vantagem de poderem ser construídas próximas aos grandes centros de carga, o que evita a construção de extensas linhas de transmissão.

Com a desverticalização do setor elétrico, empresas privadas são motivadas a investir seus recursos na geração, na transmissão ou na distribuição de energia. O retorno do investimento aplicado em geração hidrelétrica é de longo prazo, o que desestimula as empresas privadas a atuarem neste setor. Contudo, as fontes de geração termoelétrica proporcionam ao investidor um retorno mais rápido. Por essa razão este tipo de geração é mais interessante para o capital privado. Neste contexto surge a pergunta: quais os locais mais adequados para a construção de unidades termoelétricas? A determinação deste local deve estar associada a algum critério como a minimização das perdas no sistema de transmissão, do custo na geração de energia ou um outro critério qualquer. Uma maneira científica de determinar os melhores locais para a alocação de novas termoelétricas, considerando a minimização das perdas ativa na transmissão é utilizar a sensibilidade entre a injeção de potência ativa e as perdas no sistema de transmissão. Esta relação de sensibilidade pode ser obtida através da solução de um problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

O FPO, quando resolvido por um método do tipo Lagrangiano, além de fornecer como resultado um ponto ótimo de operação, também fornece os multiplicadores de Lagrange associados a cada restrição física e operacional do sistema. Estes multiplicadores indicam a sensibilidade entre a função objetivo e a restrição a ele associada. As barras do sistema candidatas a instalação de novas gerações apresentaram o maior valor da relação de sensibilidade. Assim, propõe-se neste trabalho, realizar um estudo de alocação de unidades termoelétricas em sistemas elétricos de potência utilizando os multiplicadores de Lagrange obtidos na solução de um problema de FPO.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2 será apresentado o histórico do problema de Fluxo de Potência Ótimo. No Capítulo 3, o problema de FPO e o método primal-dual com barreira logarítmica utilizado para resolvê-lo. No Capítulo 4 serão apresentados os testes realizados. Os seguintes sistemas foram utilizados: 5 barras, IEEE 14 barras, IEEE 30 barras, o sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras e o sistema IEEE 118 barras. Através da utilização de um programa de FPO, serão obtidos para cada sistema, o seu ponto de operação (caso base), a nova configuração do sistema para a alocação de uma unidade geradora termoelétrica na barra indicada pelo multiplicador de Lagrange e a configuração do sistema para a alocação em uma barra de grande carregamento. Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões e apresenta oportunidades futuras para a continuidade do trabalho.

Capítulo 2

HISTÓRICO

Neste capítulo será apresentado um levantamento bibliográfico com as propostas de solução do problema de Fluxo de Potência Ótimo.

2.1 O problema de FPO

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 de FPO um objetivo é estabelecido, como, por exemplo, minimizar as perdas de potência ativa na transmissão ou o custo de geração, ou outro objetivo qualquer, sujeito às restrições físicas e operacionais do sistema elétrico. Desde a formulação proposta por Carpentier (1962) observou-se um crescente interesse na resolução deste problema, pelo fato de ser uma ferramenta que pode ser utilizada no planejamento da operação, na análise da operação ou mesmo da expansão do sistema, tornando-se assim de grande importância para os engenheiros do setor elétrico.

Uma das primeiras propostas para a resolução do problema de FPO foi apresentada por Dommel e Tinney (1968), que propuseram o método do gradiente reduzido. Este método 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 desigualdades associadas às variáveis de controle são tratadas por projeção, e as dependentes ou funcionais, pelo método da função penalidade. A eficiência deste método é de primeira ordem para a minimização da função objetivo. Apesar do seu rigor matemático, essa abordagem apresenta uma convergência lenta. Há, ainda, limitações na determinação do tamanho do passo nas variáveis de controle o que pode comprometer o processo de convergência.

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.

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 em 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).

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 proposta por Rockafellar (1973). 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 método do conjunto ativo como o método de Newton, proposto por Sun *et. al.*(1984) e pode utilizar pontos iniciais infactíveis. A esparsidade da matriz Hessiana foi totalmente explorada na implementação computacional.

Granville (1994) propôs o uso do método de pontos interiores do tipo primal-dual barreira logarítmica para a solução do problema de FPO. 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 *slack*. Essas variáveis devem ser estritamente positivas, pois 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 passo é manter as variáveis *slack* 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. O artigo apresentou resultados numéricos para sistemas de 1.832 e 3.467 barras, nos quais verificou-se a eficiência do método.

No artigo de Torres e Quintana (1988), 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. Comparaçāo entre o uso das coordenadas, retangular e polar também é apresentada.

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 ativa na transmissão, geração de potência reativa, número de iterações e tempo de processamento. Os resultados obtidos mostram que cada método tem vantagens e desvantagens.

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 anciares. A função objetivo minimizada foi à 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.

Ramos *et al.* (2005) apresentaram uma revisão da aplicação do método de pontos interiores primal-dual para o problema de minimização das perdas. Após a formulação do problema não-linear original e discussão de sua possível solução por uma seqüência de sub-problemas de programação linear, a técnica de barreira logarítmica foi aplicada ao modelo resultante e as equações relevantes foram desenvolvidas. Alguns aspectos da implementação, como a escolha do ponto inicial, solução do sistema de equações, etc. foram subsequentemente discutidas, e a experiência positiva dos autores com uma rede de transmissão real, Espanhola de 775 barras, foi apresentada.

Baptista *et al.* (2005) apresentaram uma nova abordagem para resolver o problema de FPO. Esta abordagem considera a aplicação do método de barreira logarítmica para magnitude de tensão e os *taps* variáveis dos transformadores e as demais restrições são tratadas através do método da Lagrangiana aumentada. Segundo os autores, o problema de FPO possui variáveis de controle, tensão e *tap*, extremamente

sensíveis a grandes ajustes. Caso essas variáveis violem seus limites, normalmente, o problema diverge, pois dificilmente elas retornam a região factível. Enquanto que se essas variáveis permanecerem dentro de seus limites, o processo de otimização tem bom desempenho. Os resultados dos testes numéricos mostram o desempenho efetivo deste algoritmo.

Capítulo 3

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Apresenta-se neste capítulo o desenvolvimento do modelo do problema de Fluxo de Potência Ótimo e o método primal-dual barreira logarítmica aplicado à solução deste problema.

3.1 O Problema de Fluxo de Potência Ótimo

O FPO é uma ferramenta para análise de SEP, que está em desenvolvimento desde a década de 60, onde teve sua origem. O FPO surgiu a partir do problema de Despacho Econômico (DE). O DE tem sido utilizado em concessionárias de energia elétrica, para obter o menor custo possível de geração, de modo a atender a demanda total do SEP. O DE é representado pelo problema (3.1):

$$\text{Minimizar} \sum_{\text{gerador } i} C_i(P_{Gi})$$

Sujeito a :

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (3.1)$$

$$\sum_{\text{gerador } i} P_{Gi} = P_D$$

em que:

- $C_i(P_{Gi})$ é a função custo, para o gerador termoelétrico i ;
- P_{Gi} é a geração de potência ativa do gerador i ;

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

O problema de FPO foi desenvolvido se acrescentado ao problema (3.1) suas restrições físicas e operacionais, como :

- equações de balanço do sistema;
- limites de geração de potência ativa;
- limites de geração de potência reativa;
- limites de tensão;
- limites de *tap* de transformadores;
- limites de fluxo de transmissão de potência ativa nas linhas de transmissão;
- entre outros.

Estas restrições por sua vez, atribuem uma característica não-linear ao problema inicial.

A característica principal do FPO é a de ajustar simultaneamente e de forma ótima todas as variáveis de controle e de estado do sistema.

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, que foi a escolhida como foco neste trabalho. Deste modo, o problema de FPO pode ser representado como:

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

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 :

$$Q_k^{\min} \leq Q_k(V, \theta, t) \leq Q_k^{\max} \quad (3.2)$$

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* do transformador;
- $f_{km}(V, \theta, t)$ é a função objetivo perdas de potência ativa na transmissão dada por

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

- NL é o número de linhas de transmissão do sistema.

As equações de balanço do sistema elétrico são dadas por:

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

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

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

- b) Potência reativa para as barras de carga:

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

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

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

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

$$+ (t V_k) V_m (b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \sin \theta_{km})$$

- 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:

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

em que:

- 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 potências ativas geradas e potências ativas consumidas;
- Q_k^G e Q_k^C potências reativas geradas e potências reativas consumidas;
- P_k^{\min} e P_k^{\max} limites mínimos e limites máximos da potência ativa gerada;
- Q_k^{\min} e Q_k^{\max} limites mínimos e limites máximos da potência reativa gerada;
- V_k^{\min} e V_k^{\max} limites mínimos e limites máximos das magnitudes das tensões;
- t_k^{\min} e t_k^{\max} limites mínimos e limites máximos dos *taps* dos transformadores;
- F_{ativo}^{\max} limite de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão;
- Ω é o conjunto de barras vizinhas a barra k ;
- NL é o número de linhas de transmissão do sistema

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 de fluxo de potência ativa atribuído as linhas de transmissão do SEP são oriundos das características da linha quanto aos seus limites térmicos, para linhas curtas, e aos seus limites de estabilidade, para as linhas longas.

Na Figura 3.1 tem-se uma linha de transmissão 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 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 as fases das tensões das barras que conectam a linha. Por essa razão, nem todos os modelos de FPO consideram essa restrição com o objetivo de reduzir a complexidade do problema, pois, em alguns casos, a inclusão dessa restrição resulta em divergência.

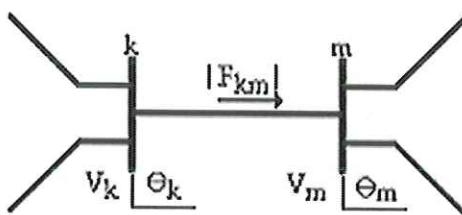


Figura 3.1 – Linha de transmissão.

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 de *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* de transformador está ligado à tensão da barra inicial da linha.

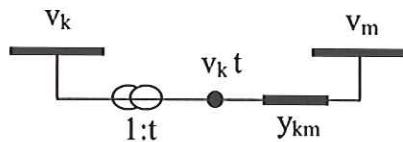


Figura 3.2 – Modelo utilizado para a variável *tap* do transformador.

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. Na próxima sessão 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

O método primal-dual barreira logarítmica é uma variante do método de pontos interiores. Optou-se por utilizá-lo para a solução do problema de FPO, devido a sua robustez e rápida convergência.

Considere o problema de FPO escrito de forma generalizada tal como apresentado em (3.10).

Minimizar $f(x)$

Sujeito a :

$$g(x) = 0 \quad (3.10)$$

$$h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max}$$

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

em que:

- $x^t = (V, \theta, t) \in \mathbb{R}^n$ é o vetor das variáveis de controle e de estado do sistema;
- $f(x)$ é uma função escalar, a qual representa o desempenho do sistema.
- $g(x) \in \mathbb{R}^m$ corresponde ao vetor das equações de balanço da rede elétrica, em que $n \geq m$.
- $h(x) \in \mathbb{R}^p$ 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 $h(x)$.

A solução do problema (3.10) pelo método primal-dual com barreira logarítmica, tem como ponto de partida a transformação das restrições de desigualdade em restrições de igualdade através do uso de variáveis *slack* (s_n , $n= 1, 2, \dots, 4$), como observado a seguir:

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)

Deste modo o problema de FPO é reescrito em (3.13).

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

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:

$s_j > 0$ para $j=1,2,3$ e 4 .

$\mu > 0$ é o parâmetro de barreira, que tende a zero durante o processo iterativo ($\mu_0 > \mu_1 > \dots > \mu_\infty \rightarrow 0$).

Por ser tratar agora de um problema de minimização sujeito a apenas restrições de igualdade, associa-se ao problema (3.13) a função Lagrangiana :

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

em que:

$\lambda \in \mathbb{R}^m$ é o vetor do multiplicador de Lagrange associado às restrições de igualdade;

$\pi_1, \pi_2 \in \mathbb{R}^p$ e $\pi_3, \pi_4 \in \mathbb{R}^n$ são os vetores dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade.

Ao Lagrangiano aplica-se as condições necessárias de primeira ordem, isto é,
 $\nabla L = 0$.

Assim, tem-se:

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

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

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

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

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

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

$$\nabla_{s_1} L = 0 \rightarrow -\frac{\mu}{s_1} + \pi_1 = 0 \tag{3.21}$$

$$\nabla_{s_2} L = 0 \rightarrow -\frac{\mu}{s_2} - \pi_2 = 0 \tag{3.22}$$

$$\nabla_{s_3} L = 0 \rightarrow -\frac{\mu}{s_3} + \pi_3 = 0 \quad (3.23)$$

$$\nabla_{s_4} L = 0 \rightarrow -\frac{\mu}{s_4} - \pi_4 = 0 \quad (3.24)$$

A aplicação da condição necessária de primeira ordem produz um sistema de equações não-lineares dado por (3.15) a (3.24). O sistema obtido será solucionado pelo método de Newton, que utiliza a série de Taylor truncada na primeira ordem, o que resulta em um sistema linear 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. O sistema de equações obtido pela aplicação do método é dado por:

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

$$\nabla_x g(x) \Delta x = 0 \quad (3.26)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 a matriz Jacobiana;
- I é a matriz identidade.

3.2.1 Atualização das variáveis

Durante o processo iterativo exigido pelo método de Newton, deve-se calcular o tamanho do passo utilizado na atualização das variáveis primais e duais a cada iteração do problema (3.35). Estes 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 ($\pi_i, i = 1, 2, 3, 4$) 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 de (3.21) a (3.24), satisfazendo dessa forma as condições de KKT.

Obtêm-se o passo, encontrando-se o menor elemento entre o mínimo tamanho de passo de todos os componentes dos vetores, este menor elemento é comparado ao numeral 1. O menor entre eles é multiplicado por um fator σ com a finalidade de evitar que a variáveis primais atinjam a igualdade. Esta técnica é utilizada por Granville (1994), Irisarri et al. (1997) entre outros, e tem por finalidade satisfazer as condições de não-negatividade das variáveis *slack* e os multiplicadores de Lagrange associados às

restrições de desigualdade. As expressões utilizadas para o cálculo dos passos primais e duais são dadas por (3.36) e (3.37) respectivamente.

$$\alpha_p = \min \left\{ \sigma \left(\min_{\Delta s_1 < 0} \frac{s_1}{|\Delta s_1|}, \min_{\Delta s_2 < 0} \frac{s_2}{|\Delta s_2|}, \min_{\Delta s_3 < 0} \frac{s_3}{|\Delta s_3|}, \min_{\Delta s_4 < 0} \frac{s_4}{|\Delta s_4|} \right); 1,0 \right\} \quad (3.36)$$

$$\alpha_d = \min \left\{ \sigma \left(\min_{\Delta \pi_1 < 0} \frac{\pi_1}{|\Delta \pi_1|}, \min_{\Delta \pi_2 > 0} \frac{-\pi_2}{|\Delta \pi_2|}, \min_{\Delta \pi_3 < 0} \frac{\pi_3}{|\Delta \pi_3|}, \min_{\Delta \pi_4 > 0} \frac{-\pi_4}{|\Delta \pi_4|} \right); 1,0 \right\} \quad (3.37)$$

em que:

$\sigma = 0,9995$ é um valor determinado empiricamente.

Uma vez de posse dos valores dos passos primais e duais, as variáveis do problema são atualizadas conforme apresentado em (3.38).

$$\begin{aligned} x^{i+1} &= x^i + \alpha_p \Delta x & \lambda^{i+1} &= \lambda^i + \alpha_d \Delta \lambda \\ s_1^{i+1} &= s_1^i + \alpha_p \Delta s_1 & \pi_1^{i+1} &= \pi_1^i + \alpha_d \Delta \pi_1 \\ s_2^{i+1} &= s_2^i + \alpha_p \Delta s_2 & \pi_2^{i+1} &= \pi_2^i + \alpha_d \Delta \pi_2 \\ s_3^{i+1} &= s_3^i + \alpha_p \Delta s_3 & \pi_3^{i+1} &= \pi_3^i + \alpha_d \Delta \pi_3 \\ s_4^{i+1} &= s_4^i + \alpha_p \Delta s_4 & \pi_4^{i+1} &= \pi_4^i + \alpha_d \Delta \pi_4 \end{aligned} \quad (3.38)$$

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 (3.39), em que o numerador corresponde ao *gap* de dualidade.

$$\mu = \frac{s_1 \pi_1 + s_3 \pi_3 - s_2 \pi_2 - s_4 \pi_4}{2 n \beta} \quad (3.39)$$

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 (3.39). Na qual o decrescimento de μ foi realizado através da seguinte equação:

$$\mu^{k+1} = \frac{\mu^k}{\beta} \quad (3.40)$$

onde 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 (região factível) 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 *slack* são inicializadas utilizando as equações (3.17) a (3.20). Como essas variáveis devem ser estritamente positivas, devido ao seu emprego na função barreira logarítmica, situações iniciais onde as restrições associadas a essas variáveis possuírem valores fora de seus limites devem ser evitadas, pois situações deste tipo proporcionam um valor negativo para as variáveis *slack*, proporcionando a divergência do algoritmo. Para evitar a divergência do algoritmo, realizou-se o artifício proposto por Quintana *et al.* (1995), isto é, atribui-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. Este valor é utilizado na inicialização dos vetores π , como pode ser observado pelas 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 através do método primal-dual barreira logarítmica. A seguir tem-se o algoritmo para a aplicação do método.

- 1º Passo: Escolha das condições iniciais do sistema (V, θ, t) .
- 2º Passo: Inicialização do vetor das variáveis *slack*, dos multiplicadores de Lagrange e do parâmetro de barreira.
- 3º Passo: Cálculo do sistema dado em (3.35) e resolução do mesmo pelo método de Newton.
- 4º Passo: Cálculo dos passos dados por (3.36) e (3.37).
- 5º Passo: Atualização das variáveis por (3.38).
- 6º Passo: Teste de convergência: se as condições de KKT estiverem satisfeitas, fim do processo iterativo, caso contrário retorne ao 3º passo.

3.4 Escolha das barras candidatas

Considerando o problema de minimização generalizado em (3.41).

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(x) \\ & \text{sujeito a :} \\ & g(x) = b \end{aligned} \tag{3.41}$$

O vetor b pode ser interpretado como sendo uma limitação da quantidade de insumo disponível à função objetivo. Supondo que $x(b)$ é a solução ótima do Problema

(4.1), em Fritzsche (1978) tem-se a demonstração da equação (3.42) em que o multiplicador de Lagrange λ significa uma mudança marginal no valor ótimo da função objetivo, enquanto b está sendo variado.

$$\frac{\partial f(x(b))}{\partial b} = \lambda \quad (3.42)$$

Na demonstração da Equação (3.42), a função Lagrangiana associada ao Problema (3.41) 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 (3.42) deve ser considerada como:

$$\frac{\partial f(x(b))}{\partial b} = -\lambda \quad (3.43)$$

Deste modo torna-se evidente considerar que o valor do multiplicador de Lagrange indica a influência do insumo sobre a função objetivo.

Para as resoluções dos problemas de FPO, que decorrem neste documento em seu capítulo 4, considerou-se os valores dos multiplicadores de Lagrange obtidos para cada barra do sistema em módulo, de forma que os maiores multiplicadores de Lagrange indicariam as barras em que uma nova geração proporciona uma maior influência sobre a função objetivo, ou seja, o multiplicador de Lagrange indicaria a barra onde será obtido uma maior contribuição da nova geração para a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão do sistema em estudo.

Capítulo 4

RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo será realizado um estudo de alocação de unidades termoelétricas em SEP através da ferramenta do FPO. Os sistemas utilizados foram os de 5 barras, sistema IEEE 14 barras, sistema IEEE 30 barras, sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras e o sistema IEEE 118 barras.

Neste trabalho optou-se por minimizar as perdas de potência ativa no sistema de transmissão. A função de perdas de potência ativa na transmissão é não-linear e não-convexa o que torna o problema de FPO de difícil solução, como afirma Monticelli e 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 as equações de balanço da rede elétrica e as demais restrições do problema estão satisfeitas. A determinação desta solução indica o ponto de operação do sistema, ou seja, o valor das variáveis de estado e de controle bem como o valor dos multiplicadores de Lagrange. Conhecendo esses multiplicadores de Lagrange verificam-se quais as barras do sistema serão candidatas à instalação de novas gerações.

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

4.1 Sistema de 5 barras

O sistema 5 barras, por ser um sistema de pequeno porte, foi escolhido para apresentar de forma detalhada a resolução do problema de FPO utilizando o método de pontos interiores primal dual barreira logarítmica.

Considere o sistema 5 barras, como apresentado na Figura 4.1, o qual tem as seguintes características:

- 1 barra de referência (*slack* - barra 1);
- 1 barra de geração (barra 2);
- 3 barras de carga;
- 7 linhas de transmissão;
- controle de fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 2 e 5.

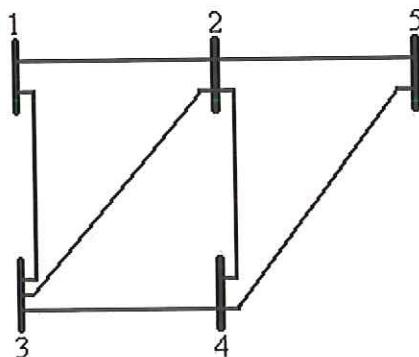


Figura 4.1 – Croqui sistema elétrico 5 barras.

Na Tabela 4.1 têm-se os dados iniciais da magnitude e fase das tensões, e os dados de geração e de carga das barras. Na Tabela 4.2 apresentam-se os limites determinados para a tensão nas barras e geração de potência ativa na barra 2. O limite máximo de fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 2 e 5 foi estabelecido para 55,0 MW.

Tabela 4.1 – Dados iniciais do sistema de 5 barras.

Barra	Tipo	V(pu)	θ°	$P^G(\text{MW})$	$Q^G(\text{MVAr})$	$P^C(\text{MW})$	$Q^C(\text{MVAr})$
1	referência	1,060	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	geração	1,000	0,0	40,0	30,0	20,0	10,0
3	carga	1,000	0,0	0,0	0,0	45,0	15,0
4	carga	1,000	0,0	0,0	0,0	40,0	5,0
5	carga	1,000	0,0	0,0	0,0	60,0	10,0

A restrição de geração de potência reativa na 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.

Tabela 4.2 – Limites de tensão e de geração de potência ativa e reativa¹.

Barra	$V_{\min}(\text{pu})$	$V_{\max}(\text{pu})$	$P_{\min}(\text{MW})$	$P_{\max}(\text{MW})$	$Q_{\min}(\text{MVAr})$	$Q_{\max}(\text{MVAr})$
1	0,95	1,10	-9999	9999	-9999	9999
2	0,95	1,10	0,0	60,0	-9999	9999
3	0,95	1,10	-	-	-	-
4	0,95	1,10	-	-	-	-
5	0,95	1,10	-	-	-	-

4.1.1 Solução do sistema de 5 barras pelo FPO

O Problema (4.1) representa o FPO associado ao sistema 5 barras. A função objetivo são as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão do sistema. Para as barras de carga, têm-se seis equações de igualdade – que são as equações de balanço da rede (ΔP_3 , ΔP_4 , ΔP_5 , ΔQ_3 , ΔQ_4 , ΔQ_5). 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 5, tem-se a restrição de fluxo de potência ativa ($F_{P_{25}}$). Todas as tensões são canalizadas, possuindo limites mínimo e máximo. No Problema (4.1) todos os limites estão em pu:

¹ Os valores -9999 e 9999 indicam que não há limites para as gerações.

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar} \quad + g_{12}(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos\theta_{12}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos\theta_{13}) + \\
& \quad + g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos\theta_{23}) + g_{24}(V_2^2 + V_4^2 - 2V_2V_4 \cos\theta_{24}) + \\
& \quad + g_{25}(V_2^2 + V_5^2 - 2V_2V_5 \cos\theta_{25}) + g_{34}(V_3^2 + V_4^2 - 2V_3V_4 \cos\theta_{34}) + \\
& \quad + g_{45}(V_4^2 + V_5^2 - 2V_4V_5 \cos\theta_{45})
\end{aligned}$$

sujeito a:

$$\Delta P_3 = 0 \quad (4.1)$$

$$\Delta P_4 = 0$$

$$\Delta P_5 = 0$$

$$\Delta Q_3 = 0$$

$$\Delta Q_4 = 0$$

$$\Delta Q_5 = 0$$

$$0 \leq P_2 \leq 0,6$$

$$|F_{P_{25}}| \leq 0,55$$

$$0,95 \leq V_1 \leq 1,10$$

$$0,95 \leq V_2 \leq 1,10$$

$$0,95 \leq V_3 \leq 1,10$$

$$0,95 \leq V_4 \leq 1,10$$

$$0,95 \leq V_5 \leq 1,10$$

em que:

$$\begin{aligned}
\Delta P_3 = & -0,45 - [g_{31}V_3^2 - V_3V_1(g_{31}\cos\theta_{31} + b_{31}\sin\theta_{31}) + \\
& + g_{32}V_3^2 - V_3V_2(g_{32}\cos\theta_{32} + b_{32}\sin\theta_{32}) + \\
& + g_{34}V_3^2 - V_3V_4(g_{34}\cos\theta_{34} + b_{34}\sin\theta_{34})]
\end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_4 = & -0,40 - [g_{45}V_4^2 - V_4V_5(g_{45}\cos\theta_{45} + b_{45}\sin\theta_{45}) + \\
& + g_{42}V_4^2 - V_4V_2(g_{42}\cos\theta_{42} + b_{42}\sin\theta_{42}) + \\
& + g_{43}V_4^2 - V_4V_3(g_{43}\cos\theta_{43} + b_{43}\sin\theta_{43})]
\end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_5 = & -0,60 - [g_{52}V_5^2 - V_5V_2(g_{52}\cos\theta_{52} + b_{52}\sin\theta_{52}) + \\
& + g_{54}V_5^2 - V_5V_4(g_{54}\cos\theta_{54} + b_{54}\sin\theta_{54})]
\end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_3 = & -0,15 - [-V_3^2 b_{31} + V_3 V_1 (b_{31} \cos \theta_{31} - g_{31} \sin \theta_{31}) + \\ & - V_3^2 b_{32} + V_3 V_2 (b_{32} \cos \theta_{32} - g_{32} \sin \theta_{32}) + \\ & - V_3^2 b_{34} + V_3 V_4 (b_{34} \cos \theta_{34} - g_{34} \sin \theta_{34})]\end{aligned}\quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_4 = & -0,05 - [-V_4^2 b_{42} + V_4 V_2 (b_{42} \cos \theta_{42} - g_{42} \sin \theta_{42}) + \\ & - V_4^2 b_{43} + V_4 V_3 (b_{43} \cos \theta_{43} - g_{43} \sin \theta_{43}) + \\ & - V_4^2 b_{45} + V_4 V_5 (b_{45} \cos \theta_{45} - g_{45} \sin \theta_{45})]\end{aligned}\quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_5 = & -0,10 - [-V_5^2 b_{52} + V_5 V_2 (b_{52} \cos \theta_{52} - g_{52} \sin \theta_{52}) + \\ & - V_5^2 b_{54} + V_5 V_4 (b_{54} \cos \theta_{54} - g_{54} \sin \theta_{54})]\end{aligned}\quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}P_2 = & g_{21} V_2^2 - V_2 V_1 (g_{21} \cos \theta_{21} + b_{21} \sin \theta_{21}) + \\ & + g_{23} V_2^2 - V_2 V_3 (g_{23} \cos \theta_{23} + b_{23} \sin \theta_{23}) + \\ & + g_{24} V_2^2 - V_2 V_4 (g_{24} \cos \theta_{24} + b_{24} \sin \theta_{24}) + \\ & + g_{25} V_2^2 - V_2 V_5 (g_{25} \cos \theta_{25} + b_{25} \sin \theta_{25})\end{aligned}\quad (4.8)$$

$$F_{P_{25}} = V_2^2 g_{25} - V_2 V_5 g_{25} \cos \theta_{25} - V_2 V_5 b_{25} \cos \theta_{25} \quad (4.9)$$

O método prima dual barreira logarítmica será utilizado na solução do problema de programação não-linear, apresentado em (4.1). Para isso, será necessário transformar todas as restrições de desigualdades em igualdades por meio do uso das variáveis *slack*.

Assim o Problema (4.1) será reescrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned}& g_{12} (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \theta_{12}) + \\ & + g_{13} (V_1^2 + V_3^2 - 2V_1 V_3 \cos \theta_{13}) + \\ & + g_{23} (V_2^2 + V_3^2 - 2V_2 V_3 \cos \theta_{23}) + \\ & \text{Minimizar } + g_{24} (V_2^2 + V_4^2 - 2V_2 V_4 \cos \theta_{24}) + \\ & + g_{25} (V_2^2 + V_5^2 - 2V_2 V_5 \cos \theta_{25}) + \\ & + g_{34} (V_3^2 + V_4^2 - 2V_3 V_4 \cos \theta_{34}) + \\ & + g_{45} (V_4^2 + V_5^2 - 2V_4 V_5 \cos \theta_{45})\end{aligned}\quad (4.10)$$

sujeito a:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_3 &= 0 & V_2 - s_{V_2}^{\min} &= 0,95 & s_{V_1}^{\min} &\geq 0 \\
 \Delta P_4 &= 0 & V_3 + s_{V_3}^{\max} &= 1,10 & s_{V_2}^{\max} &\geq 0 \\
 \Delta P_5 &= 0 & V_3 - s_{V_3}^{\min} &= 0,95 & s_{V_2}^{\min} &\geq 0 \\
 \Delta Q_3 &= 0 & V_4 + s_{V_4}^{\max} &= 1,10 & s_{V_3}^{\max} &\geq 0 \\
 \Delta Q_4 &= 0 & V_4 - s_{V_4}^{\min} &= 0,95 & s_{V_3}^{\min} &\geq 0 \\
 \Delta Q_5 &= 0 & V_5 + s_{V_5}^{\max} &= 1,10 & s_{V_4}^{\max} &\geq 0 \\
 P_2 + s_{P_2}^{\max} &= 0,6 & V_5 - s_{V_5}^{\min} &= 0,95 & s_{V_4}^{\min} &\geq 0 \\
 P_2 - s_{P_2}^{\min} &= 0,0 & F_{P_{25}} + s_{fp_{25}}^{\max} &= 0,55 & s_{V_5}^{\min} &\geq 0 \\
 F_{P_{25}} + s_{fp_{25}}^{\max} &= 0,55 & s_{P_2}^{\max} &\geq 0 & s_{V_5}^{\max} &\geq 0 \\
 V_1 + s_{V_1}^{\max} &= 1,10 & s_{P_2}^{\min} &\geq 0 & s_{V_5}^{\min} &\geq 0 \\
 V_1 - s_{V_1}^{\min} &= 0,95 & s_{fp_{25}}^{\max} &\geq 0 & \\
 V_2 + s_{V_2}^{\max} &= 1,10 & s_{V_1}^{\max} &\geq 0 &
 \end{aligned}$$

As variáveis *slack* estão relacionadas aos limites máximos e mínimos das restrições. Essas variáveis, estritamente positivas, são incorporadas à função objetivo, através da função barreira logarítmica e do parâmetro de barreira, como apresentado em (4.11).

$$\begin{aligned}
 & g_{12}(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos\theta_{12}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos\theta_{13}) + \\
 & + g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos\theta_{23}) + g_{24}(V_2^2 + V_4^2 - 2V_2V_4 \cos\theta_{24}) + \\
 & + g_{25}(V_2^2 + V_5^2 - 2V_2V_5 \cos\theta_{25}) + g_{34}(V_3^2 + V_4^2 - 2V_3V_4 \cos\theta_{34}) + \\
 \text{Minimizar } & + g_{45}(V_4^2 + V_5^2 - 2V_4V_5 \cos\theta_{45}) \\
 & - \mu_p(\ln s_{P_2}^{\max} + \ln s_{P_2}^{\min}) - \mu_{fp}(\ln s_{fp_{25}}^{\max}) + \\
 & - \mu_v(\ln s_{V_1}^{\max} + \ln s_{V_1}^{\min}) - \mu_v(\ln s_{V_2}^{\max} + \ln s_{V_2}^{\min}) - \mu_v(\ln s_{V_3}^{\max} + \ln s_{V_3}^{\min}) + \\
 & - \mu_v(\ln s_{V_4}^{\max} + \ln s_{V_4}^{\min}) - \mu_v(\ln s_{V_5}^{\max} + \ln s_{V_5}^{\min})
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

sujeito a:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_3 &= 0 & \Delta Q_4 &= 0 & P_2 - s_{P_2}^{\min} &= 0,0 \\
 \Delta P_4 &= 0 & \Delta Q_5 &= 0 & F_{P_{25}} + s_{fp_{25}}^{\max} &= 0,55 \\
 \Delta P_5 &= 0 & P_2 + s_{P_2}^{\max} &= 0,6 & V_1 + s_{V_1}^{\max} &= 1,10 \\
 \Delta Q_3 &= 0 &
 \end{aligned}$$

$$V_1 - s_{V_1}^{\min} = 0,95$$

$$V_3 + s_{V_3}^{\max} = 1,10$$

$$V_4 - s_{V_4}^{\min} = 0,95$$

$$V_2 + s_{V_2}^{\max} = 1,10$$

$$V_3 - s_{V_3}^{\min} = 0,95$$

$$V_5 + s_{V_5}^{\max} = 1,10$$

$$V_2 - s_{V_2}^{\min} = 0,95$$

$$V_4 + s_{V_4}^{\max} = 1,10$$

$$V_5 - s_{V_5}^{\min} = 0,95$$

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.

Associa-se ao Problema (4.11) a função Lagrangiana. Para cada restrição do problema, tem-se um multiplicador de Lagrange correspondente. A função Lagrangiana encontrada é dada por (4.12):

$$\begin{aligned}
L = & g_{12}(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \theta_{12}) + g_{13}(V_1^2 + V_3^2 - 2V_1V_3 \cos \theta_{13}) + \\
& + g_{23}(V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos \theta_{23}) + g_{24}(V_2^2 + V_4^2 - 2V_2V_4 \cos \theta_{24}) + \\
& + g_{25}(V_2^2 + V_5^2 - 2V_2V_5 \cos \theta_{25}) + g_{34}(V_3^2 + V_4^2 - 2V_3V_4 \cos \theta_{34}) + \\
& + g_{45}(V_4^2 + V_5^2 - 2V_4V_5 \cos \theta_{45}) + \\
& - \mu_P (\ln s_{P_2}^{\max} + \ln s_{P_2}^{\min}) + \\
& - \mu_V (\ln s_{V_1}^{\max} + \ln s_{V_1}^{\min}) - \mu_V (\ln s_{V_2}^{\max} + \ln s_{V_2}^{\min}) - \mu_V (\ln s_{V_3}^{\max} + \ln s_{V_3}^{\min}) + \\
& - \mu_V (\ln s_{V_4}^{\max} + \ln s_{V_4}^{\min}) - \mu_V (\ln s_{V_5}^{\max} + \ln s_{V_5}^{\min}) + \\
& + \lambda_{P_3}(\Delta P_3) + \lambda_{Q_3}(\Delta Q_3) + \lambda_{P_4}(\Delta P_4) + \lambda_{Q_4}(\Delta Q_4) + \\
& + \lambda_{P_5}(\Delta P_5) + \lambda_{Q_5}(\Delta Q_5) + \\
& + \pi_{P_2}^{\max}(P_2 + s_{P_2}^{\max} - 0,6) + \pi_{P_2}^{\min}(P_2 - s_{P_2}^{\min} - 0,0) + \\
& + \pi_{fp_{25}}^{\max}(F_{P_{25}} + s_{fp_{25}}^{\max} - 0,55) + \\
& + \pi_{V_1}^{\max}(V_1 + s_{V_1}^{\max} - 1,10) + \pi_{V_1}^{\min}(V_1 - s_{V_1}^{\min} - 0,95) + \\
& + \pi_{V_2}^{\max}(V_2 + s_{V_2}^{\max} - 1,10) + \pi_{V_2}^{\min}(V_2 - s_{V_2}^{\min} - 0,95) + \\
& + \pi_{V_3}^{\max}(V_3 + s_{V_3}^{\max} - 1,10) + \pi_{V_3}^{\min}(V_3 - s_{V_3}^{\min} - 0,95) + \\
& + \pi_{V_4}^{\max}(V_4 + s_{V_4}^{\max} - 1,10) + \pi_{V_4}^{\min}(V_4 - s_{V_4}^{\min} - 0,95) + \\
& + \pi_{V_5}^{\max}(V_5 + s_{V_5}^{\max} - 1,10) + \pi_{V_5}^{\min}(V_5 - s_{V_5}^{\min} - 0,95)
\end{aligned} \tag{4.12}$$

As condições necessárias de primeira ordem ($\nabla L=0$) são aplicadas em (4.12), 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 $\lambda_{P3}=\lambda_{Q3}=\lambda_{P4}=\lambda_{Q4}=\lambda_{P5}=\lambda_{Q5}=0$. Os multiplicadores do tipo π e as variáveis *slack* foram inicializadas conforme mencionado no Item 3.2.2, satisfazendo KKT. Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,0001$	$\beta_V=1,00015$
$\mu_Q=0,0001$	$\beta_Q=1,00015$
$\mu_P=0,0001$	$\beta_P=1,0015$
$\mu_{fp}=0,00001$	$\beta_{fp}=1,00015$

A Tabela 4.4 apresenta a solução do problema do FPO (4.1), para um erro das equações de balanço (critério de parada) de $\xi=10^{-3}$. Pode ser verificado que nenhuma das restrições de tensão ficaram ativas na solução, notando que o mesmo não acontece para a restrição de fluxo na linha entre as barras 2 e 5 que permaneceu ativa na solução. A geração de potência ativa da barra 2 poderia fornecer até 60 MW, porém a restrição na transmissão limitou a geração ao valor limite do fluxo de potência ativa. A convergência do processo iterativo é dependente dos parâmetros de barreira estimados pelo usuário. Diferentes estimativas podem conduzir o problema de FPO para diferentes soluções. Sendo está convergência garantida para região na vizinhança da solução ótima.

Tabela 4.4 – Solução para o sistema de 5 barras.

Barra	Tipo	V(pu)	θ°	$P^G(\text{MW})$	$Q^G(\text{MVAr})$	$P^C(\text{MW})$	$Q^C(\text{MVAr})$
1	referência	1,0999	0,0	122,9	7,3	0	0
2	geração	1,0859	-2,4	46,3	45,2	20,0	10,0
3	carga	1,0575	-4,4	0,0	0,0	45,0	15,0
4	carga	1,0565	-4,7	0,0	0,0	40,0	5,0
5	carga	1,0522	-5,4	0,0	0,0	60,0	10,0
Total				169,2	52,5	165,0	40,0
Perdas na transmissão					4,18 MW		
Fluxo na linha 2-5						55,0 MW	

As Figuras de 4.2 a 4.4 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5 em MW para as 4 iterações percorridas até a convergência do FPO.

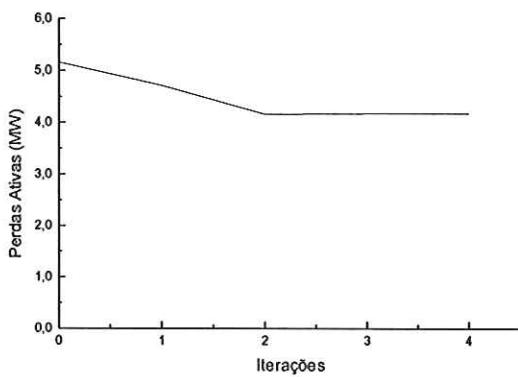


Figura 4.2 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

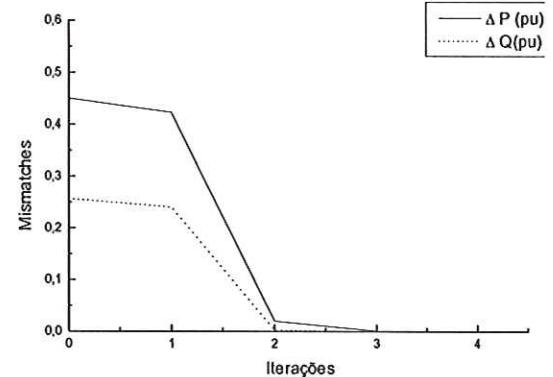


Figura 4.3a – Evolução dos *mismatches*.

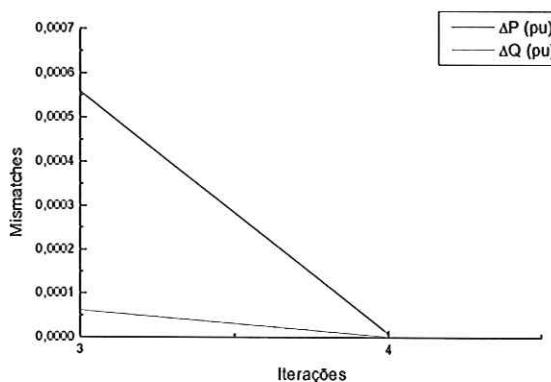


Figura 4.3b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

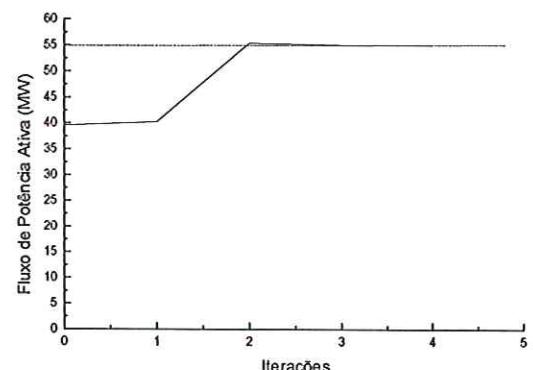


Figura 4.4 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5.

Nota-se que a função objetivo passa a se estabilizar a partir da segunda iteração (Figura 4.2), sendo que o fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5 (Figura 4.4), permanece na região infactível entre as iterações 2 e 3, porém retorna a região factível após a terceira iteração, estabilizando-se em seu limite máximo. Por fim o FPO

converge na quarta iteração. A Figura 4.3b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a quarta iteração.

Da solução do problema do FPO apresentada na Tabela 4.4, o valor obtido das perdas de potência ativa na transmissão, será utilizado para efeito de comparação. Na solução do problema também foram obtidos os multiplicadores de Lagrange para as barras do sistema. Verificando-se os multiplicadores associados às equações de balanço de potência ativa ($\lambda_{\Delta P}$), Tabela 4.5, escolhe-se o de maior valor. A barra associada a este multiplicador será a barra candidata à alocação de novas unidades de geração termoelétrica.

Tabela 4.5 – multiplicadores de Lagrange associados ao balanço de potência ativa.

Barra	$\lambda_{\Delta P}$
3	0,15719
4	0,19417
5	0,68071

Uma vez selecionada a barra candidata, aloca-se a ela uma nova unidade de geração termoelétrica. Soluciona-se novamente o problema de FPO. Nessa nova compilação do problema, as barras de geração originais são configuradas como barras de controle de reativo, com seus valores de potência ativa e reativa fixados para o ponto de operação encontrado anteriormente. A barra candidata à alocação termoelétrica, por sua vez, é configurada como barra de geração com limite de potência ativa correspondente a capacidade da usina termoelétrica a ser implantada. Não foram estabelecidos limites para a capacidade de geração de reativos. Para os testes que se seguiram, utilizaram-se unidades geradoras termoelétricas com limite máximo de capacidade de geração de potência ativa de 20 MW. O valor escolhido corresponde aproximadamente a um terço dos valores das gerações originais do sistema (a mesma abordagem foi seguida para os demais sistemas simulados), com a nova compilação do FPO, torna-se possível determinar a nova minimização de perdas ativas na transmissão. Está por sua vez apresentará um valor inferior à minimização de perdas ativa na transmissão para o ponto de operação do problema do FPO original.

A Tabela 4.6 apresenta os diferentes cenários para os quais os testes foram realizados. Para cada cenário o FPO foi executado obtendo-se um ponto ótimo de operação que satisfez todas as restrições do sistema. A barra 3, embora não indicada pela Tabela 4.5 compõe um segundo cenário de alocação de unidade geradora termoelétrica. Esta foi escolhida para efeito de comparação de que nem sempre a alocação aleatória de novas gerações resulta em uma maior minimização de perdas ativa nas linhas de transmissão. Para as demais simulações procurou-se alocar a geração aleatória nas barras de maior carregamento do sistema, porém no sistema de 5 barras a barra de maior carregamento do sistema é a barra indicada pelo multiplicador de Lagrange, o que comprometeria o sentido de uma comparação, logo optou-se pela escolha da barra 3, sendo esta a segunda barra de maior carregamento do sistema.

Tabela 4.6 – Cenários estudados.

Cenários	Alocação de termoelétrica de 20 MW na barra
1	5
2	3

4.1.2 Solução do sistema de 5 barras pelo FPO - cenário 1

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.7. A solução da nova compilação do problema de FPO para o cenário 1 encontra-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,00100$	$\beta_V=1,001500$
$\mu_Q=0,00100$	$\beta_Q=1,001500$
$\mu_P=0,00001$	$\beta_P=1,000015$
$\mu_{fp}=0,00010$	$\beta_{fp}=1,000150$

Tabela 4.8 – Solução da nova compilação para o sistema de 5 barras para o cenário 1.

Barra	Tipo	V(pu)	θ^o	$P^G(\text{MW})$	$Q^G(\text{MVAr})$	$P^C(\text{MW})$	$Q^C(\text{MVAr})$
1	Referência	1,0285	0,0	106,2	20,7	0	0
2	controle de reativo	1,0081	-2,2	46,3	-0,1	20,0	10,0
3	Carga	0,9849	-4,6	0,0	0,0	45,0	15,0
4	Carga	0,9852	-4,8	0,0	0,0	40,0	5,0
5	Geração	1,0040	-5,4	16,1	30,4	60,0	10,0
Total				168,6	51,0	165,0	40,0
Perdas na transmissão						3,68 MW	
Fluxo na linha 2-5						43,63 MW	

Nota-se através da Tabela 4.8 que não houve restrições ativas na solução do FPO para o cenário 1, e destaca-se o fato de uma maior minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em relação ao ponto de operação e uma maior folga do sistema quanto a restrição do limite de fluxo na linha entre as barras 2 e 5.

As Figuras de 4.5 a 4.7 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5 em MW para as 3 iterações percorridas até a convergência do FPO.

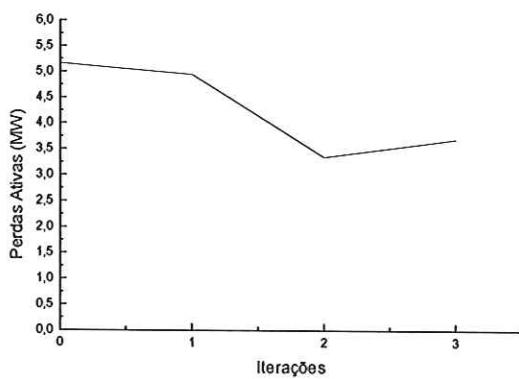


Figura 4.5 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

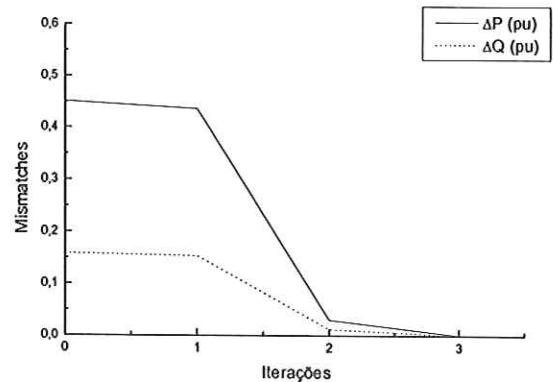


Figura 4.6a – Evolução dos *mismatches*.

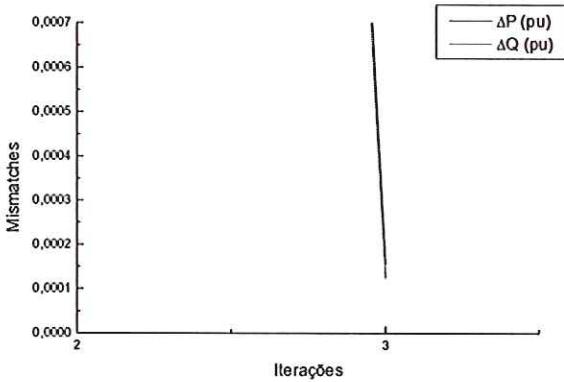


Figura 4.6b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

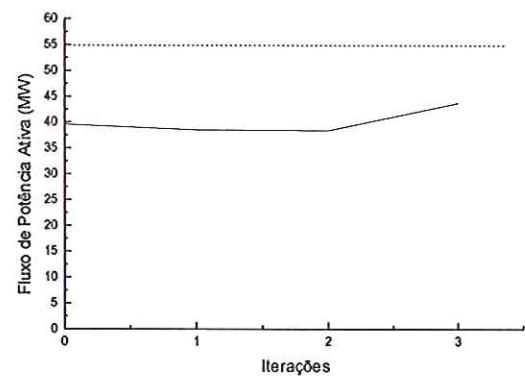


Figura 4.7 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5.

Nota-se que a função objetivo (Figura 4.5) altera seu sentido de convergência no momento em que o fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5 (Figura 4.7) altera seu valor para um novo patamar. Por fim o FPO converge na sua terceira iteração. A Figura 4.6b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a terceira iteração.

4.1.3 Solução do sistema de 5 barras pelo FPO - cenário 2

Os valores iniciais atribuídos a μ e β encontram-se na Tabela 4.9. A solução da nova compilação do problema de FPO para o cenário 2 encontra-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,001$	$\beta_V=1,0015$
$\mu_Q=0,001$	$\beta_Q=1,0015$
$\mu_P=0,010$	$\beta_P=1,0015$
$\mu_{fp}=0,001$	$\beta_{fp}=1,0015$

Tabela 4.10 – Solução da nova compilação para o sistema de 5 barras para o cenário 2.

Barra	Tipo	V(pu)	θ°	$P^G(\text{MW})$	$Q^G(\text{MVAr})$	$P^C(\text{MW})$	$Q^C(\text{MVAr})$
1	Referência	1,0380	0,0	109,8	10,5	0	0
2	controle de reativo	1,0177	-2,3	46,3	-0,1	20,0	10,0
3	Geração	1,0166	-4,6	12,8	41,2	45,0	15,0
4	Carga	1,0098	-4,9	0,0	0,0	40,0	5,0
5	Carga	0,9896	-5,8	0,0	0,0	60,0	10,0
Total				168,9	51,6	165,0	40,0
Perdas na transmissão					3,90 MW		
Fluxo na linha 2-5						53,22 MW	

Nota-se através da Tabela 4.10 que não houve restrições ativas na solução do FPO para o cenário 2, e destaca-se o fato de que a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão obteve um valor intermediário entre o valor obtido no ponto de operação e o valor obtido no cenário 1, que representa a barra indicada pelo multiplicador de Lagrange. O limite de fluxo ativo na linha entre as barras 2 e 5 embora não tenha atingido seu valor máximo, permaneceu próximo ao mesmo diminuindo a folga do sistema em relação ao valor obtido no cenário 1 (Tabela 4.8).

As Figuras de 4.8 a 4.10 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5 em MW para as 2 iterações percorridas até a convergência do FPO.

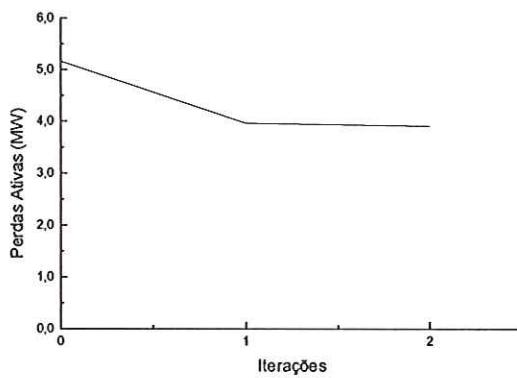


Figura 4.8 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

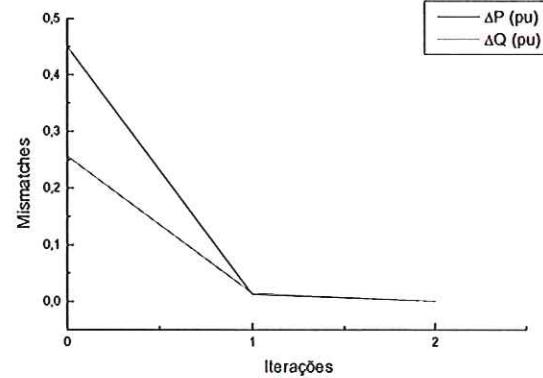


Figura 4.9a – Evolução dos *mismatches*.

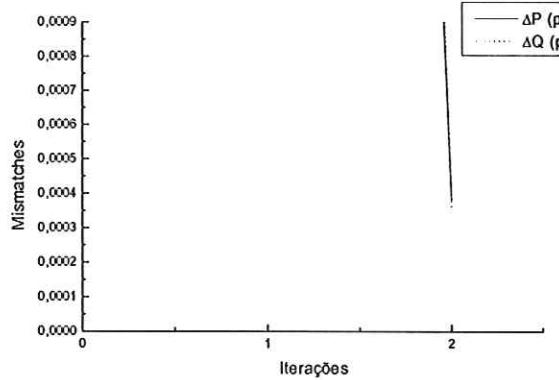


Figura 4.9b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

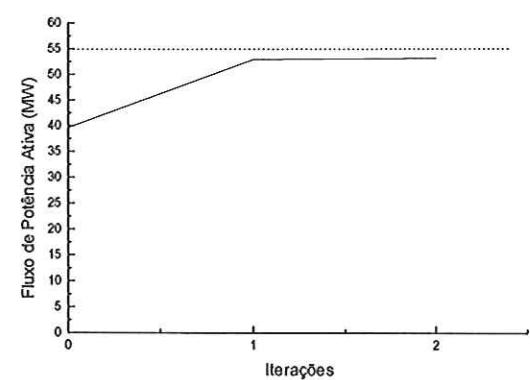


Figura 4.10 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5.

O FPO passa a se estabilizar a partir da primeira iteração, sendo que o fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 5 (Figura 4.10) permaneceu próxima ao seu limite diminuindo a folga do sistema. Por fim o FPO converge na sua segunda iteração.

4.1.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão

A Figura 4.11 apresenta de forma comparativa a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão, para o ponto de operação, o cenário 1 onde a barra selecionada para a alocação da nova unidade geradora termoelétrica foi indicada pelo

multiplicador de Lagrange e o cenário 2 onde a barra foi escolhida aleatoriamente. Observa-se que a melhor situação apresentada decorre da indicada pelo multiplicador de Lagrange.

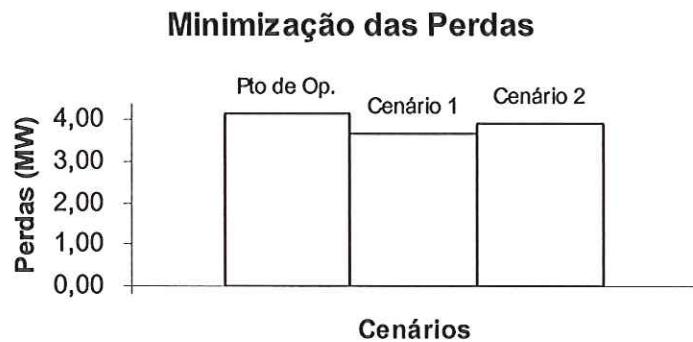


Figura 4.11 –Perdas ativa x cenários.

Durante as simulações dos sistemas propostos no início do capítulo, será apresentado que, os cenários que oferecerão a maior minimização das perdas, serão os que constam da alocação de novas unidades geradoras nas barras que possuírem o maior valor do multiplicador de Lagrange associado às equações de balanço de potência ativa, contrariando o pensamento comum que implica na tendência da alocação de novas unidades geradoras, nas barras que possuírem um maior carregamento.

4.2 Sistema IEEE 14 barras

O sistema IEEE 14 barras, Figura 4.12, têm suas características apresentadas como segue:

- 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;
- $0,90 \leq V_n \leq 1,10$, sendo $n=1,2,3,\dots,14$.

Ao IEEE 14 barras acrescentaram-se restrições de limites de fluxo de potência ativa em duas linhas que o compõem, como apresentado a seguir:

- Limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4 de 65,00 MW;
- Limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11 de 1,00 MW.

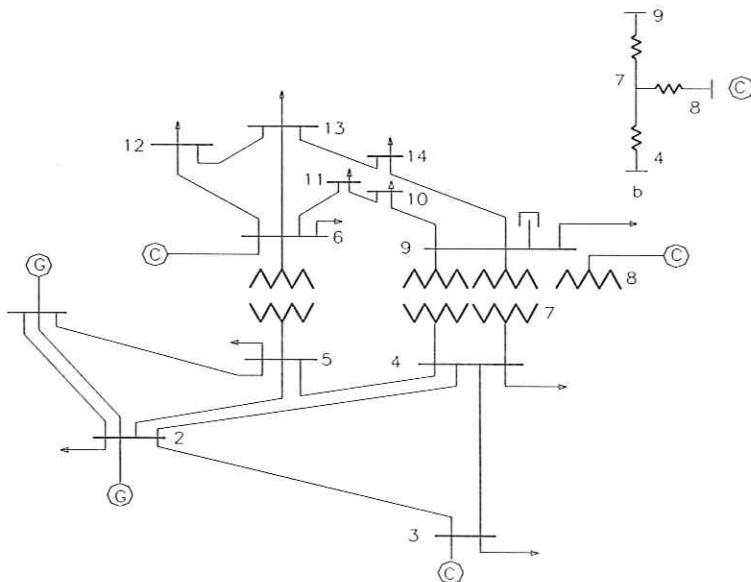


Figura 4.12 – Sistema IEEE 14 barras.

4.2.1 Solução do sistema IEEE 14 barras pelo FPO

O programa de FPO com despacho ativo e reativo foi utilizado para resolver o sistema IEEE 14 barras, considerando $\xi=10^{-3}$. Os valores iniciais para os parâmetros de barreira (μ) e para os parâmetros (β) que os atualizam, encontram-se apresentados através da Tabela 4.11. Os pontos a se destacar nesta solução estão indicados na Tabela 4.12 e são eles: o valor da minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão e o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos. Destaca-se que na solução do problema de FPO não ocorreram restrições de limite de tensão e de limite de fluxo de potência ativa que atingiram seus limites.

Tabela 4.11 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,0010$	$\beta_V=1,0010$
$\mu_Q=0,0010$	$\beta_Q=1,0010$
$\mu_P=0,0010$	$\beta_P=1,0100$
$\mu_{Tap}=0,0010$	$\beta_{Tap}=1,0010$
$\mu_{fp}=0,0001$	$\beta_{fp}=1,0010$

Tabela 4.12 – Solução do sistema com 14 barras.

Perdas na transmissão	9,66 MW
Fluxo na linha 2-4	64,93 MW
Fluxo na linha 10-11	0,18 MW

As Figuras de 4.13 a 4.16 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4 e 10 e 11 em MW para as 25 iterações percorridas até a convergência do FPO.

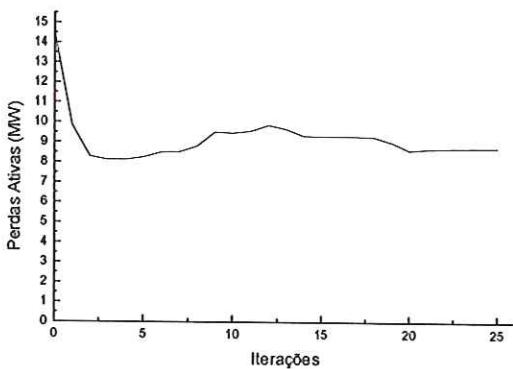


Figura 4.13 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

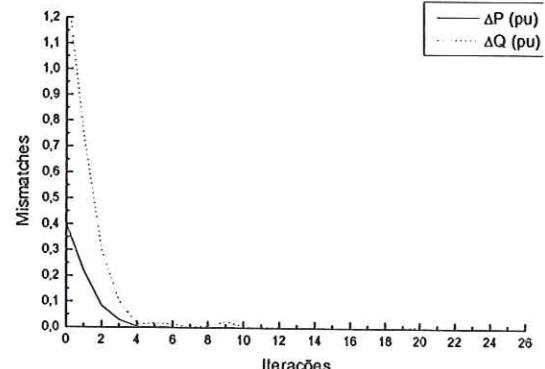


Figura 4.14a – Evolução dos *mismatches*.

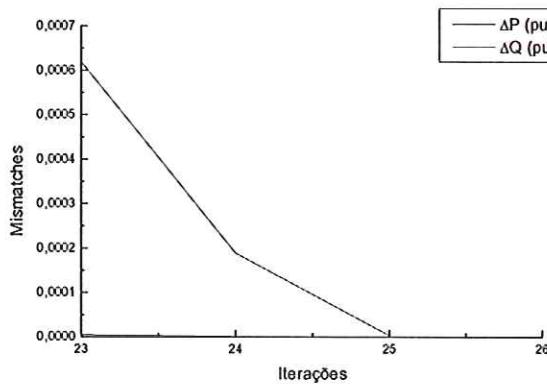


Figura 4.14b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

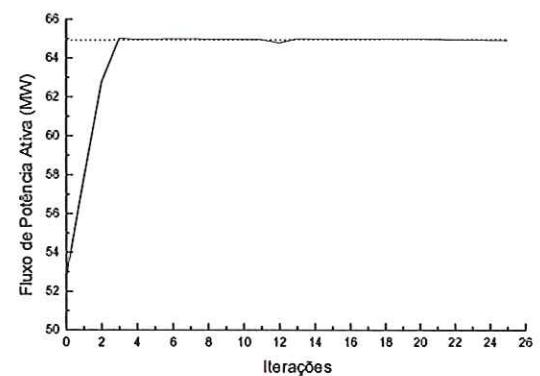


Figura 4.15 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4.

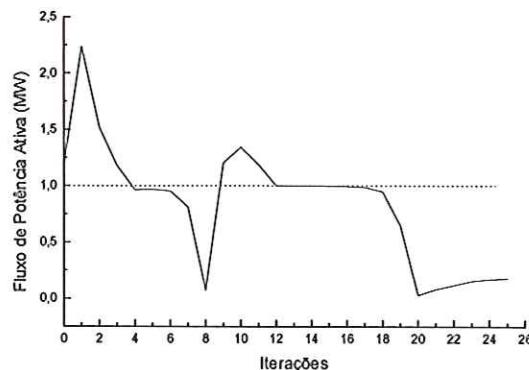


Figura 4.16 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11.

A Figura 4.14b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a vigésima quinta iteração. A restrição que mais demorou a se estabilizar para a convergência do FPO foi à restrição do limite de fluxo na linha entre as barras 10 e 11, cujo fluxo de potência ativa permaneceu oscilando entre as regiões factíveis e não factíveis até a décima segunda iteração (Figura 4.16). Esta por sua vez só atinge a estabilidade a partir da vigésima iteração, sendo que sua convergência é obtida na vigésima quinta iteração juntamente com a convergência do FPO.

O valor das perdas de potência ativa na transmissão, obtido na solução do FPO será utilizado para efeito de comparação entre os demais testes realizados com o sistema. Na solução do sistema, também se obteve os multiplicadores de Lagrange para cada barra do mesmo. Verificando-se os multiplicadores associados às equações de

balanço de potência ativa ($\lambda_{\Delta P}$), escolheu-se o de maior valor conforme apresentado na Tabela 4.13. A barra associada a este multiplicador será a barra candidata à alocação de uma nova unidade de geração termoelétrica.

Tabela 4.13 – Barra candidata.

Barra	$\lambda_{\Delta P}$
14	0,07268

A alocação da nova unidade geradora termoelétrica, com uma capacidade de geração de 90 MW, será realizada para a barra indicada na Tabela 4.13.

A Tabela 4.14 apresenta os diferentes cenários para as quais os testes foram realizados. Para cada cenário o FPO foi executado obtendo-se um ponto ótimo de operação que satisfez todas as restrições do sistema. A barra 3, embora não indicada pela Tabela 4.13 compõe um segundo cenário de alocação de unidade geradora termoelétrica. Esta foi escolhida para enfatizar que nem sempre a barra com maior carregamento (barra 3) será a de maior minimização de perdas ativa nas linhas de transmissão.

Tabela 4.14 – Cenários estudados.

Cenários	Alocação de termoelétrica de 90 MW na barra
1	14
2	3

4.2.2 Solução do sistema IEEE 14 barras pelo FPO – cenário 1

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,0010$	$\beta_V=1,0010$
$\mu_Q=0,0010$	$\beta_Q=1,0010$
$\mu_P=0,0100$	$\beta_P=1,0100$
$\mu_{Tap}=0,0010$	$\beta_{Tap}=1,0010$
$\mu_{fp}=0,0001$	$\beta_{fp}=1,0001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, os valores dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para a o cenário 1, encontram-se na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Solução do FPO para o cenário 1.

Perdas na transmissão	6,10 MW
Fluxo na linha 2-4	51,55 MW
Fluxo na linha 10-11	0,10 MW
Geração Termoelétrica	44,80 MW

As Figuras de 4.17 a 4.20 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4 e 10 e 11 em MW paraas 24 iterações percorridas até a convergência do FPO.

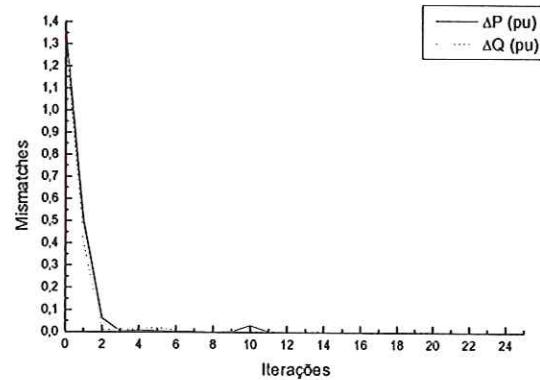
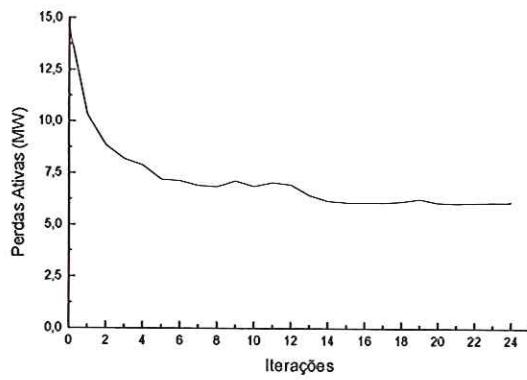


Figura 4.17 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

Figura 4.18a – Evolução dos *mismatches*.

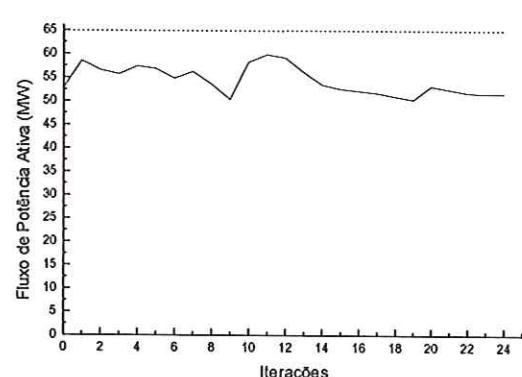
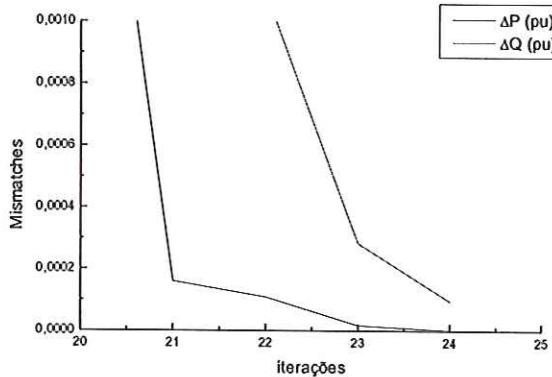
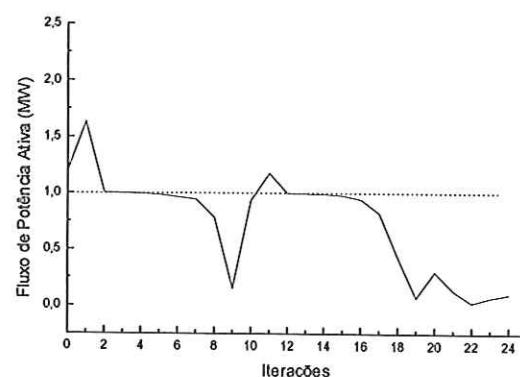


Figura 4.18b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

Figura 4.19 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4.



A Figura 4.18b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a vigésima quarta iteração. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 1,

proporcionou uma maior minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em relação ao resultado obtido para o ponto de operação, aliadas a uma maior folga do sistema devido ao afastamento dos valores dos fluxos de potências ativas das linhas com restrições em relação aos seu valores limites (Figuras 4.19 e 4.20). Observa-se que a restrição que mais demorou a se estabilizar foi à restrição do limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11 (Figura 4.20), cujo fluxo de potência ativa permaneceu oscilando entre as regiões factíveis e não factíveis até a décima segunda iteração. Sua convergência só foi obtida na vigésima quarta iteração juntamente com a convergência do FPO.

Destaca-se que não ocorreram restrições de limite de tensão que permaneceram ativas na solução do FPO para o cenário 1 da Tabela 4.14.

4.2.3 Solução do sistema IEEE 14 barras pelo FPO – cenário 2

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,010$	$\beta_V=1,001$
$\mu_Q=0,010$	$\beta_Q=1,001$
$\mu_P=0,100$	$\beta_P=1,010$
$\mu_{Tap}=0,010$	$\beta_{Tap}=1,001$
$\mu_{fp}=0,001$	$\beta_{fp}=1,001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 2 encontram-se apresentados na Tabela 4.18. As barras com restrições de tensão ativas na solução são apresentadas pela Tabela 4.19.

Tabela 4.18 – Solução do FPO para o cenário 2.

Perdas na transmissão	7,93 MW
Fluxo na linha 2-4	63,55 MW
Fluxo na linha 10-11	0,61 MW
Geração Termoelétrica	10,80 MW

Tabela 4.19 – Barras com restrições de tensão ativas na solução.

Barra	V(pu)
13	0,90

As Figuras de 4.21 a 4.24 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4 e 10 e 11 em MW para as 43 iterações percorridas até a convergência do FPO.

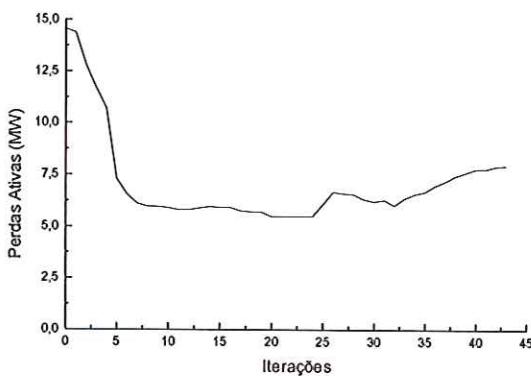
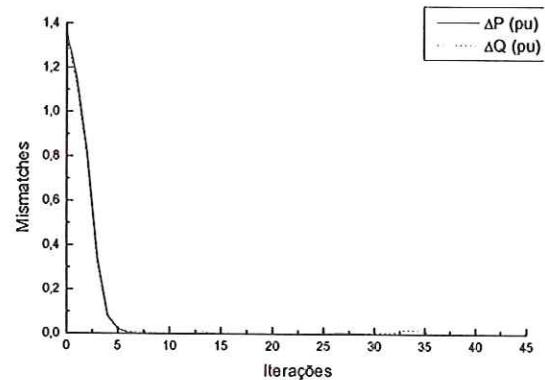


Figura 4.21 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

Figura 4.22a – Evolução dos *mismatches*.

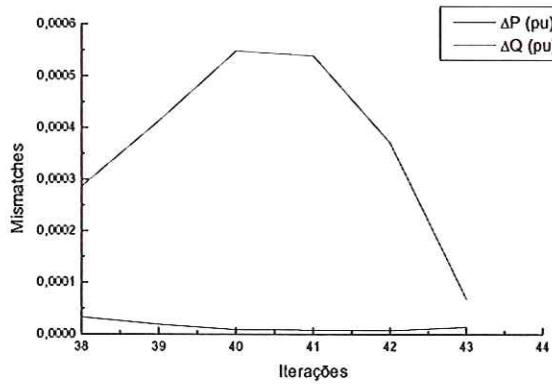


Figura 4.22b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

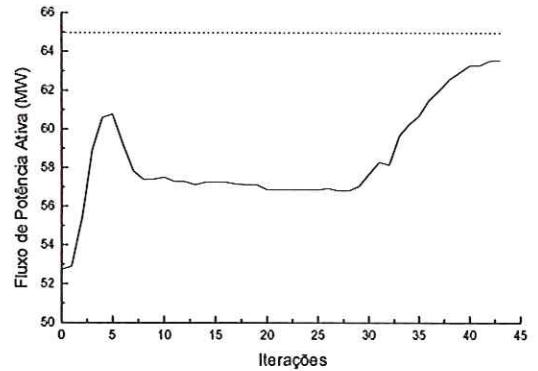


Figura 4.23 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4.

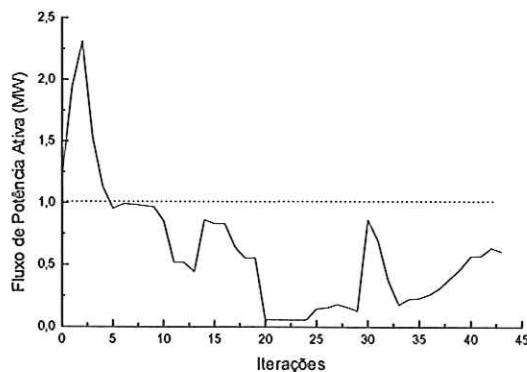


Figura 4.24 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11.

A Figura 4.22b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a quadragésima terceira iteração. O fluxo de potência ativa na linha entre as barras 2 e 4 (Figura 4.23) após a trigésima iteração, teve um grande aumento em seu valor até a convergência do FPO na quadragésima terceira iteração. O fluxo de potência ativa na linha entre as barras 10 e 11 (Figura 4.24) adentrou na região factível a partir da quinta iteração permanecendo na mesma até a convergência do método. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 2, proporcionou uma minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão intermediária em relação ao resultado obtido para o ponto de operação e o obtido pelo cenário 1 indicada pelo multiplicador de Lagrange.

4.2.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão

A Figura 4.25 apresenta de forma comparativa a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão, para o ponto de operação, o cenário 1 onde a barra selecionada para a alocação da nova unidade geradora termoelétrica foi indicada pelo multiplicador de Lagrange e o cenário 2 onde a barra escolhida apresentava um dos maiores carregamentos do sistema. Observa-se que a melhor situação apresentada decorre da indicada pelo multiplicador de Lagrange.

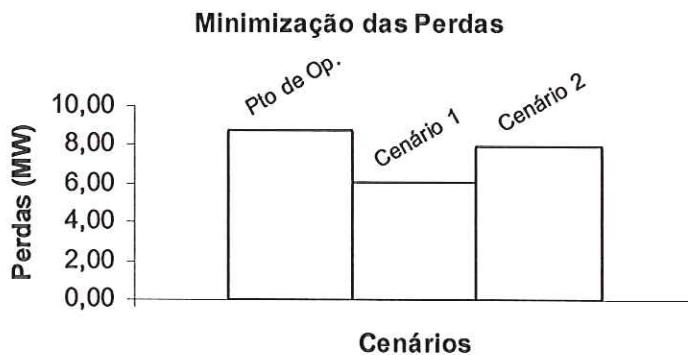


Figura 4.25 - Perdas ativa x cenários.

Outro ponto a se destacar, foi o maior relaxamento do sistema, com a folga das variáveis de controle em relação aos seus limites quando a alocação foi feita na barra indicada na Tabela 4.13. Cita-se também que em nenhum momento os limites de fluxos de potência ativa impostos foram violados.

4.3 Sistema IEEE 30 barras

O sistema IEEE 30 barras, Figura 4.26, tem suas características apresentadas como segue:

- 1 barra de referência (*slack*);
- 1 barras de geração;
- 24 barras de carga;

- 4 barras com controle de reativo;
- 4 *taps* variáveis;
- 41 linhas de transmissão;
- $0,90 \leq V_n \leq 1,10$, sendo $n=1,2,3,\dots,30$ barras.

Ao IEEE 30 barras acrescentaram-se restrições de limites de fluxo de potência ativa em duas linhas que o compõem, como apresentado a seguir:

- Limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6 de 66,50 MW;
- Limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17 de 3,00 MW.

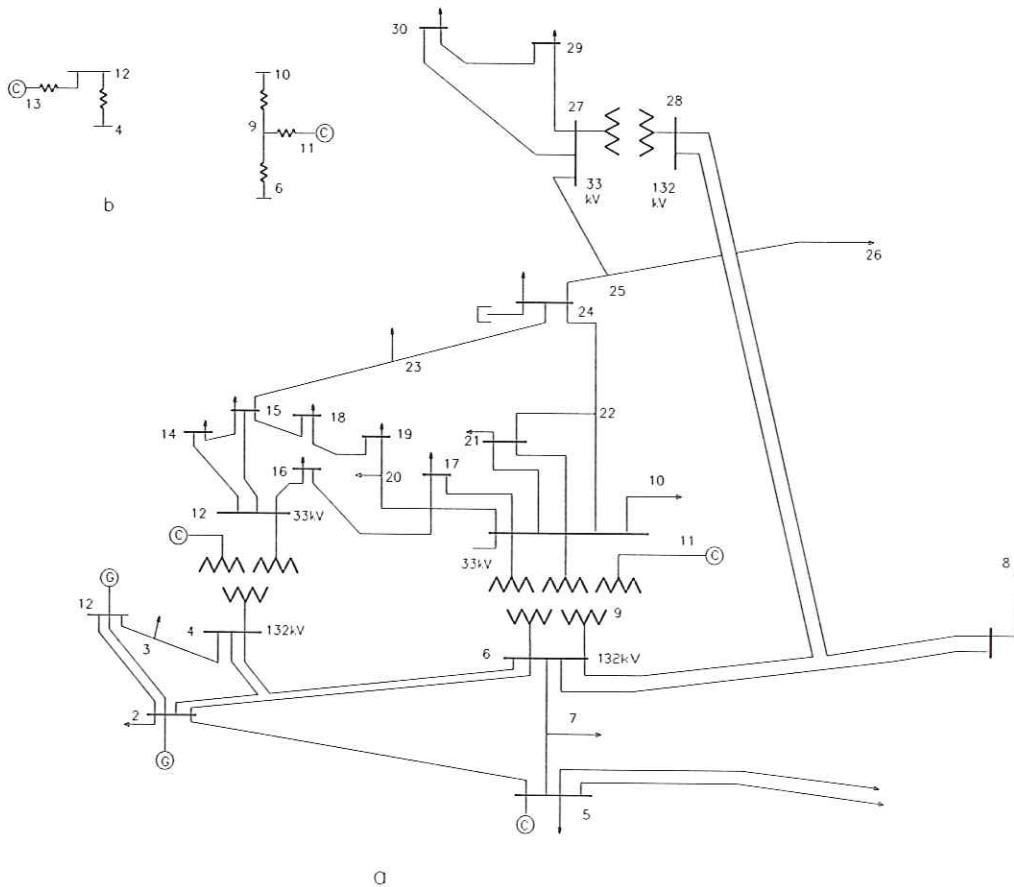


Figura 4.26 – Sistema IEEE 30 Barras.

4.3.1 Solução do sistema IEEE 30 barras pelo FPO

O programa de FPO com despacho ativo e reativo foi utilizado para resolver o sistema IEEE 30 barras, considerando $\xi=10^{-5}$. Os valores iniciais para os parâmetros de barreira (μ) e para os parâmetros (β) que os atualizam, encontram-se apresentados através da Tabela 4.20. Os pontos a se destacar nesta solução estão indicados na Tabela 4.21 e são eles: o valor da minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão e o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos. Destaca-se que na solução do problema de FPO não ocorreram restrições de limite de tensão que atingiram seus limites, ao contrário das restrições de limite de fluxo de potência ativa que atingiram seus limites na solução do FPO.

Tabela 4.20 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,00010$	$\beta_V=1,0001$
$\mu_Q=0,00010$	$\beta_Q=1,0001$
$\mu_P=0,00100$	$\beta_P=1,0010$
$\mu_{Tap}=0,00100$	$\beta_{Tap}=1,0010$
$\mu_{fp}=0,00001$	$\beta_{fp}=1,0010$

Tabela 4.21 – Solução do sistema com 30 barras.

Perdas na transmissão	13,68 MW
Fluxo na linha 4-6	66,50 MW
Fluxo na linha 16-17	3,00 MW

As Figuras de 4.27 a 4.30 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6 e 16 e 17 em MW para as 36 iterações percorridas até a convergência do FPO.

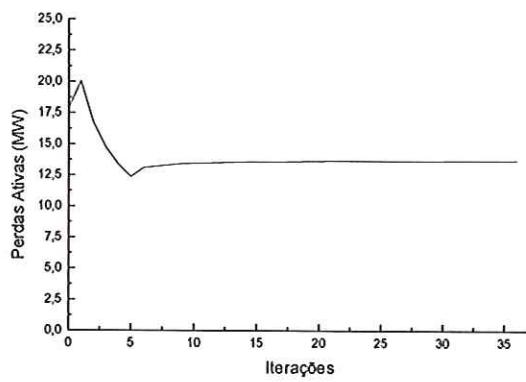


Figura 4.27 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

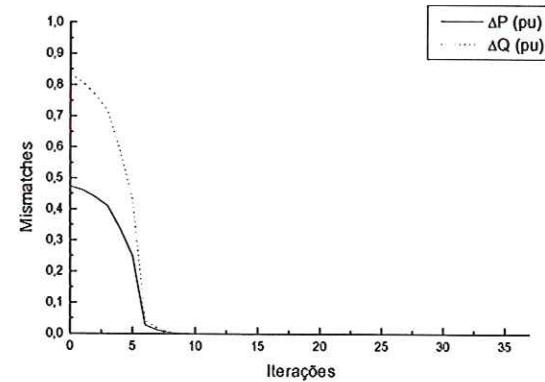


Figura 4.28a – Evolução dos *mismatches*.

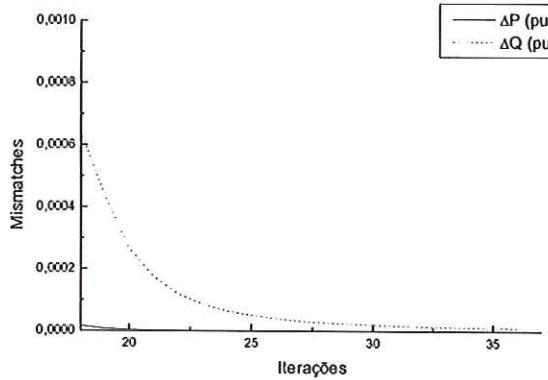


Figura 4.28b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

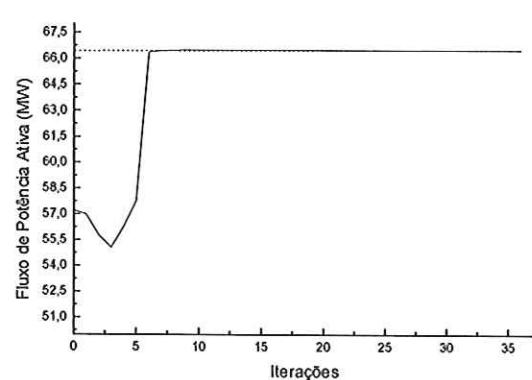


Figura 4.29 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6.

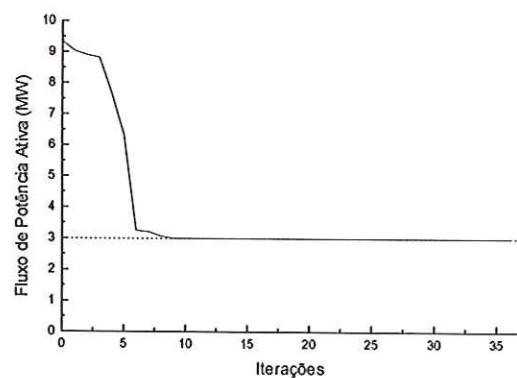


Figura 4.30 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17.

A Figura 4.28b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a trigésima sexta iteração. A partir da décima iteração o fluxo de potência ativa na linha

entre as barras 16 e 17 (Figuras 4.30) adentra na região factível onde permanece estável até a convergência do FPO na trigésima sexta iteração. Nota-se que os valores encontrados durante a convergência do FPO permaneceram praticamente constantes a partir da décima quinta iteração.

O valor das perdas de potência ativa na transmissão, obtido na solução do FPO será utilizado para efeito de comparação entre os demais testes realizados com o sistema. Na solução do sistema, também se obteve os multiplicadores de Lagrange para cada barra do mesmo. Verificando-se os multiplicadores associados às equações de balanço de potência ativa ($\lambda_{\Delta P}$), escolheu-se o de maior valor conforme apresentado na Tabela 4.22. A barra associada a este multiplicador será a barra candidata à alocação de uma nova unidade de geração termoelétrica.

Tabela 4.22 – Barra candidata.

Barra	$\lambda_{\Delta P}$
30	0,25866

A alocação da nova unidade geradora termoelétrica, com uma capacidade de geração de 30 MW, será realizada para a barra indicada na Tabela 4.22.

A Tabela 4.23 apresenta os diferentes cenários para as quais os testes foram realizados. Para cada situação o FPO foi executado obtendo-se um ponto ótimo de operação que satisfez todas as restrições do sistema. A barra 21, embora não indicada pela Tabela 4.22 compõe um segundo cenário de alocação de unidade geradora termoelétrica. Esta foi escolhida para enfatizar que nem sempre a barra com maior carregamento (barra 21) será a de maior minimização de perdas ativa nas linhas de transmissão.

Tabela 4.23 – Cenários estudados.

Cenários	Alocação de termoelétrica de 30 MW na barra
1	30
2	21

4.3.2 Solução do sistema IEEE 30 barras pelo FPO – cenário 1

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,00010$	$\beta_V=1,0010$
$\mu_Q=0,00010$	$\beta_Q=1,0010$
$\mu_P=0,00010$	$\beta_P=1,0100$
$\mu_{Tap}=0,00100$	$\beta_{Tap}=1,0010$
$\mu_{fp}=0,00001$	$\beta_{fp}=1,0001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 1 encontra-se ilustrada pela Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Solução do FPO para o cenário 1.

Perdas na transmissão	11,48 MW
Fluxo na linha 4-6	58,09 MW
Fluxo na linha 16-17	0,89 MW
Geração Termoelétrica	28,00 MW

As Figuras de 4.31 a 4.34 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6 e 16 e 17 em MW para as 26 iterações percorridas até a convergência do FPO.

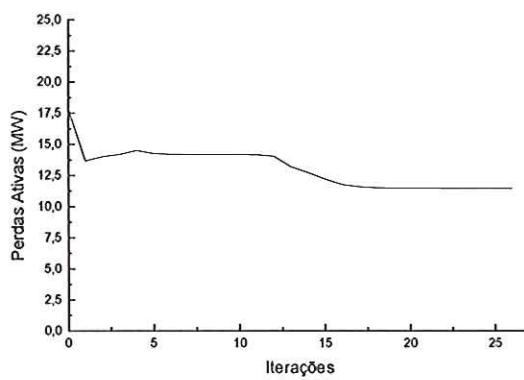


Figura 4.31 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

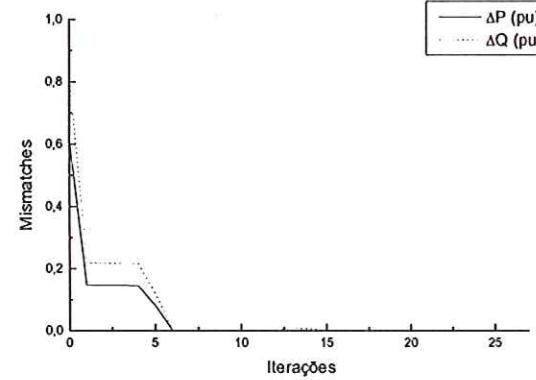


Figura 4.32a – Evolução dos *mismatches*.

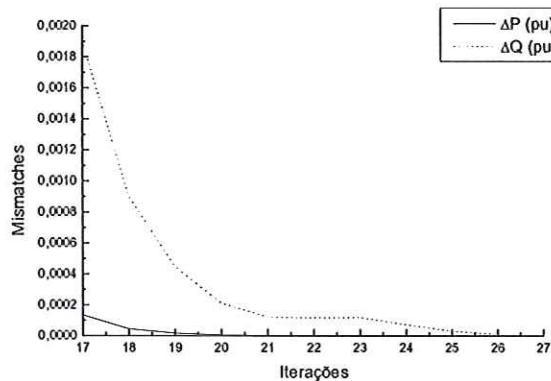


Figura 4.32b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

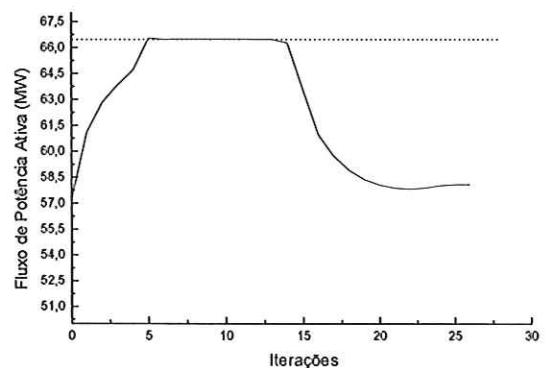


Figura 4.33 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6.

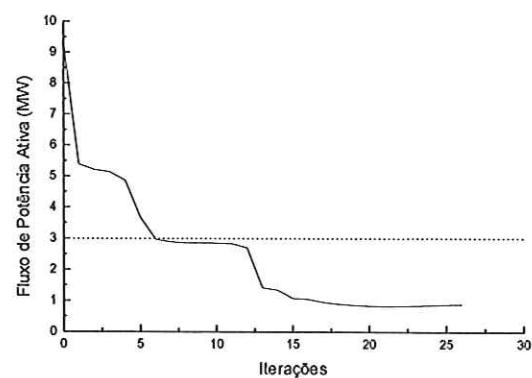


Figura 4.34 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17.

A Figura 4.32b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a vigésima sexta iteração. O fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6 (Figura 4.33) não foi violado em nenhum momento. O fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17 (Figura 4.34) adentrou na região factível após a sexta iteração vindo a se estabilizar após a décima sexta iteração. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 1, proporcionou uma maior minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em relação ao resultado obtido para o ponto de operação, aliadas a uma maior folga do sistema devido ao afastamento dos valores dos fluxos de potências ativas das linhas com restrições em relação aos seus valores limites (Figuras 4.33 e 4.34).

Destaca-se que não ocorreram restrições de limite de tensão que atingiram seus limites na solução do FPO para cenário 1 da Tabela 4.23.

4.3.3 Solução do sistema IEEE 30 barras pelo FPO – cenário 2

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,00010$	$\beta_V=1,0001$
$\mu_Q=0,00010$	$\beta_Q=1,0001$
$\mu_P=0,00010$	$\beta_P=1,0100$
$\mu_{Tap}=0,00010$	$\beta_{Tap}=1,0010$
$\mu_{fp}=0,00001$	$\beta_{fp}=1,0001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 2 encontra-se ilustrada pela Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Solução do FPO para o cenário 2.

Perdas na transmissão	13,15 MW
Fluxo na linha 4-6	63,77 MW
Fluxo na linha 16-17	1,14 MW
Geração Termoelétrica	29,70 MW

As Figuras de 4.35 a 4.38 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6 e 16 e 17 em MW para as 90 iterações percorridas até a convergência do FPO.

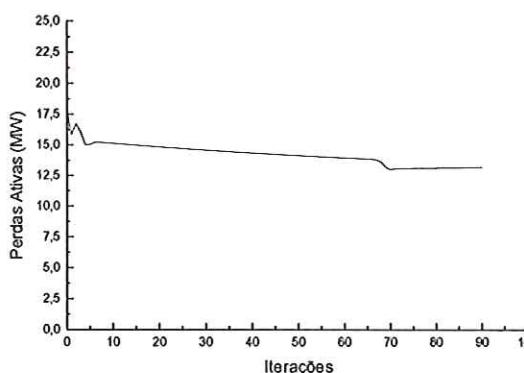


Figura 4.35 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

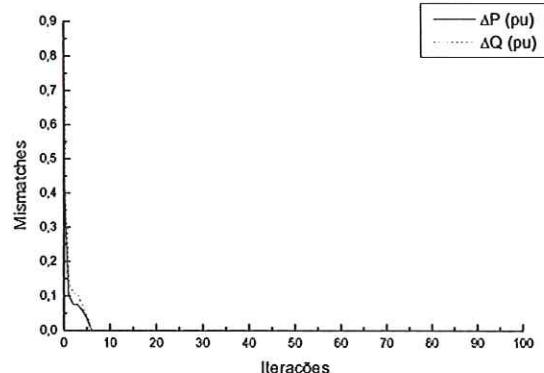


Figura 4.36a – Evolução dos *mismatches*.

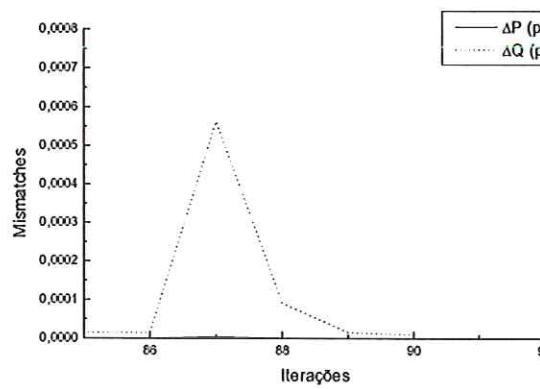


Figura 4.36b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

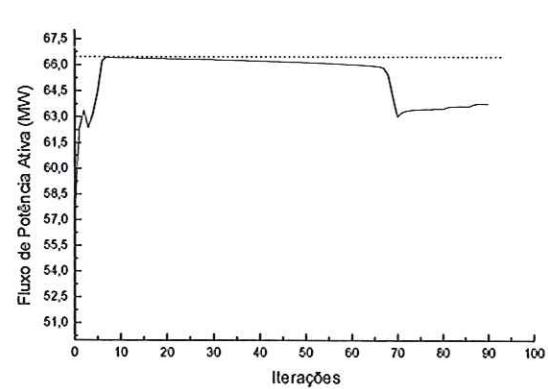


Figura 4.37 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6.

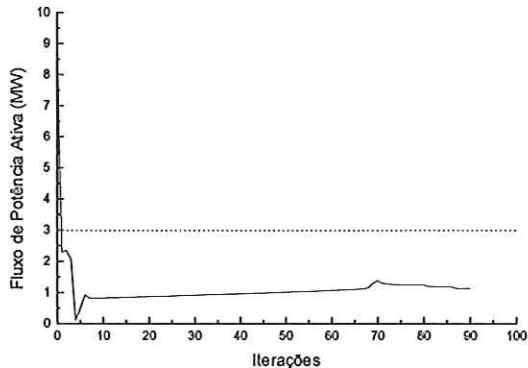


Figura 4.38 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 16 e 17.

A função objetivo se estabiliza após a septuagésima iteração (Figura 4.35), juntamente com o novo patamar de valores do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 4 e 6 (Figura 4.37), que após a septuagésima iteração também se estabiliza até a convergência do FPO na nonagésima iteração. A Figura 4.36b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a nonagésima iteração. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 2 proporcionou uma minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão intermediária em relação ao resultado obtido para o ponto de operação e o obtido pelo cenário 1 onde a barra foi indicada pelo multiplicador de Lagrange.

Destaca-se que não ocorreram restrições de limite de tensão que atingiram seus limites na solução do FPO para o cenário 2 da Tabela 4.23.

4.3.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão

A Figura 4.39 apresenta de forma comparativa a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão, para o ponto de operação, o cenário 1 onde a barra selecionada para a alocação da nova unidade geradora termoelétrica foi indicada pelo multiplicador de Lagrange e o cenário 2 onde a barra escolhida apresentava um dos maiores carregamentos do sistema. Observa-se que a melhor situação apresentada decorre da indicada pelo multiplicador de Lagrange.

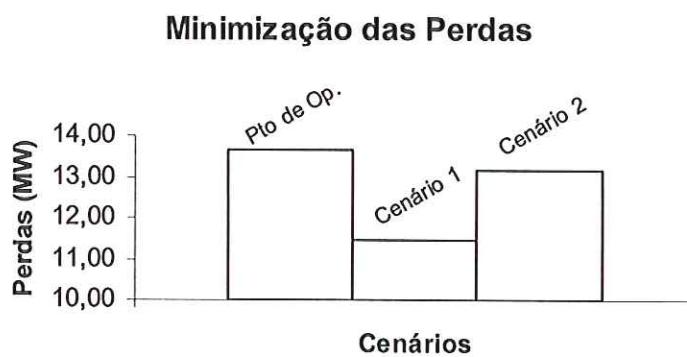


Figura 4.39 - Perdas ativa x cenários.

Outro ponto a se destacar, foi o maior relaxamento do sistema, com a folga das variáveis de controle em relação aos seus limites quando a alocação foi feita na barra indicada na Tabela 4.22. Cita-se também que em nenhum momento os limites de tensão e de fluxos de potência ativa impostos foram violados.

4.4 Sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras

O sistema brasileiro equivalente CESP 440kV, Figura 4.40, de geração e transmissão com 53 barras têm suas características apresentadas como segue:

- 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;
- $0,90 \leq V_n \leq 1,10$, sendo $n=1,2,3.....53$ barras.

Ao sistema equivalente Cesp 440 kV com 53 barras acrescentaram-se restrições de limites de fluxo de potência ativa em duas linhas que o compõem, como apresentado a seguir:

- Limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561 de 250 MW;
- Limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581 de 125 MW.

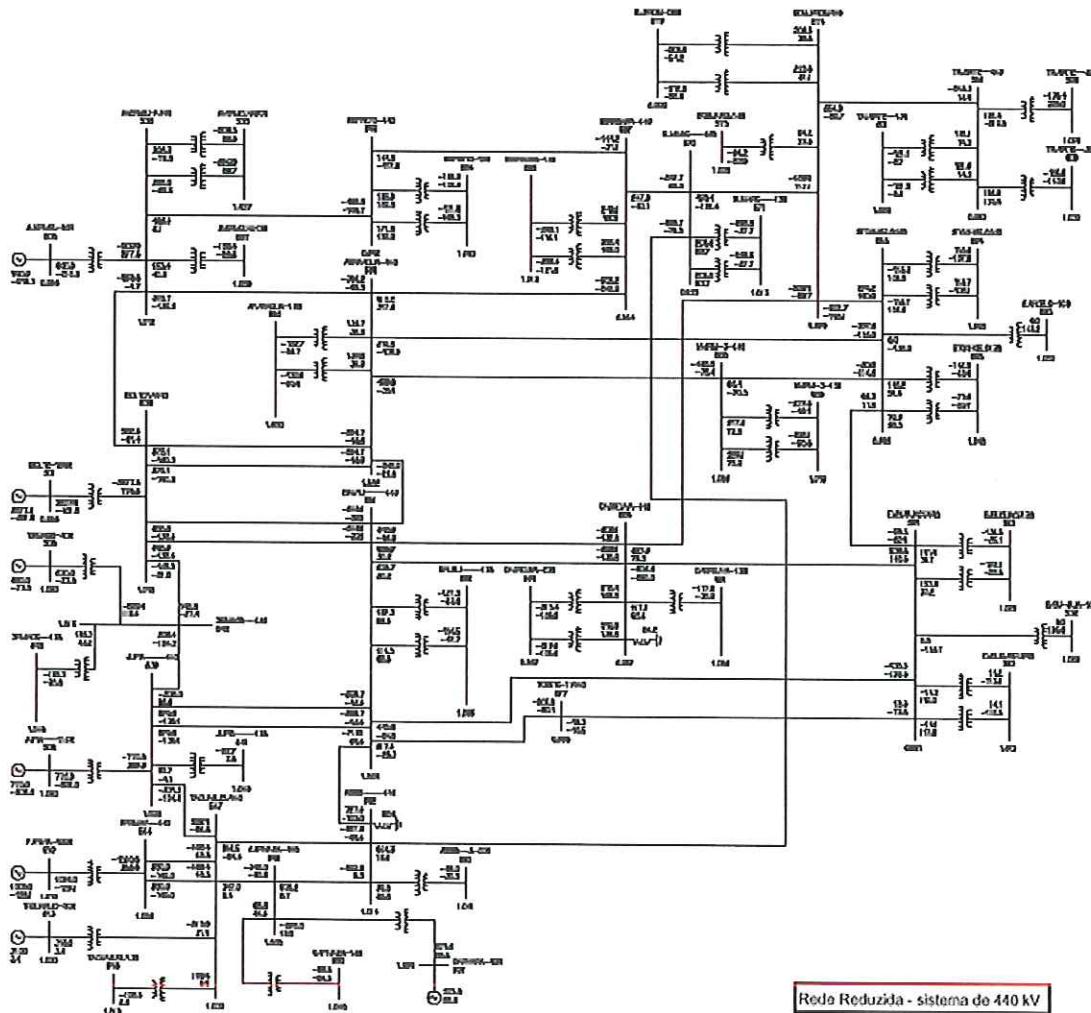


Figura 4.40 – Sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras.

4.4.1 Solução do sistema equivalente CESP 440 kV com 53 barras pelo FPO

O programa de FPO com despacho ativo e reativo foi utilizado para resolver o sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras, considerando $\xi=10^{-4}$. Os valores iniciais para os parâmetros de barreira (μ) e para os parâmetros (β) que os atualizam,

encontram-se apresentados através da Tabela 4.28. Os pontos a se destacar nesta solução estão indicados nas Tabela 4.29 e são eles: o valor da minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão e o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos. As barras cujas restrições de tensão atingiram seus limites na solução encontram-se indicadas na Tabela 4.30. As restrições de limite de fluxo de potência ativa não atingiram seus limites na solução.

Tabela 4.28 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,000001$	$\beta_V=1,00010$
$\mu_Q=0,000001$	$\beta_Q=1,00010$
$\mu_P=0,000001$	$\beta_P=1,00100$
$\mu_{Tap}=0,000100$	$\beta_{Tap}=1,00100$
$\mu_{fp}=0,000010$	$\beta_{fp}=1,00001$

Tabela 4.29 – Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras.

Perdas na transmissão	201,95 MW
Fluxo na linha 552-561	249,89 MW
Fluxo na linha 593-581	124,92 MW

Tabela 4.30 – Restrições de tensões ativas.

Barras	V(pu)
537	1,100
561	1,100
559	1,100
583	0,900

As Figuras de 4.41 a 4.44 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 em MW para as 47 iterações percorridas até a convergência do FPO.

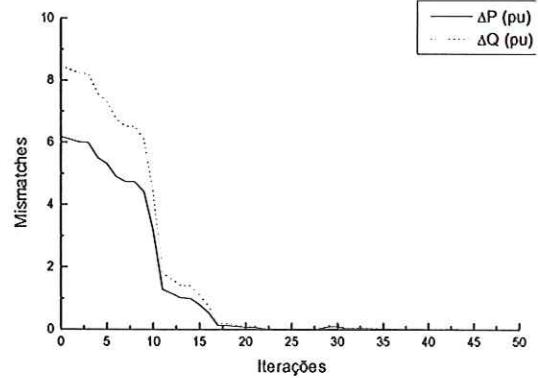
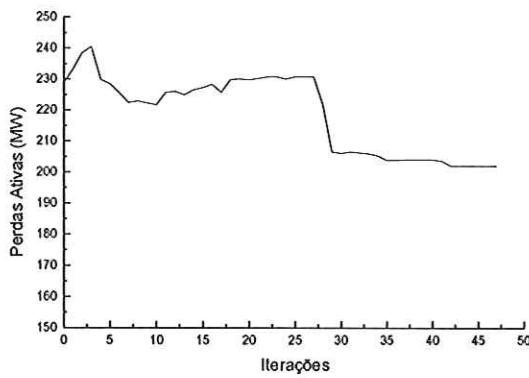


Figura 4.41 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

Figura 4.42a – Evolução dos *mismatches*.

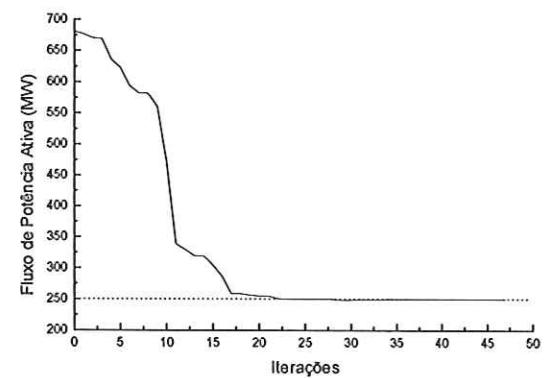
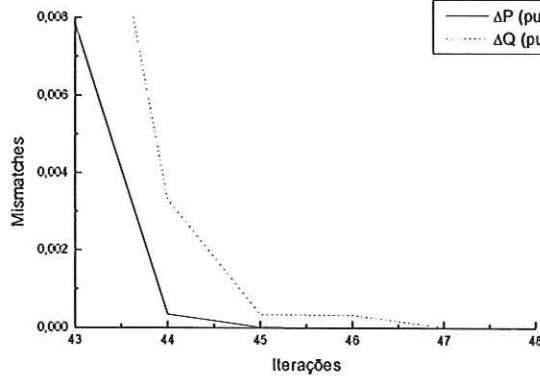


Figura 4.42b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

Figura 4.43 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.

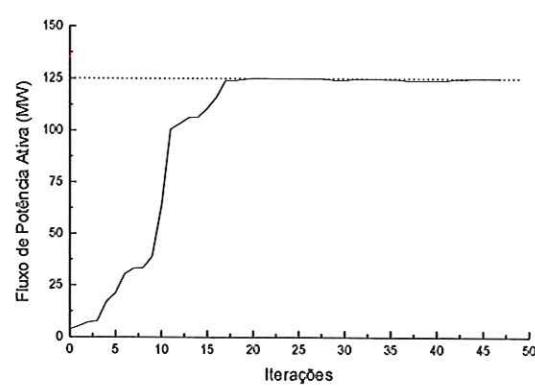


Figura 4.44 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.

A Figura 4.42b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a quadragésima sexta iteração. O fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e

561 (Figura 4.43) inicia-se na região infactível, atingindo a região factível somente após a vigésima segunda iteração. A convergência do FPO é obtida na quadragésima sexta iteração.

O valor das perdas de potência ativa na transmissão, obtido na solução do FPO será utilizado para efeito de comparação entre os demais testes realizados com o sistema. Na solução do sistema, também se obteve os multiplicadores de Lagrange para cada barra do mesmo. Verificando-se os multiplicadores associados às equações de balanço de potência ativa ($\lambda_{\Delta P}$), escolheu-se o de maior valor conforme apresentado na Tabela 4.31. Para o sistema equivalente CESP de 440kV com 53 barras foram encontradas quatro barras com multiplicadores associados às equações de balanço de potência ativa de mesmo valor. Isto ocorreu, pois as quatro barras indicadas ocupam a mesma região do sistema, sendo esta a região de Taubaté. As barras associadas a estes multiplicadores serão as barras candidatas à alocação de uma nova unidade de geração termoelétrica.

Tabela 4.31 – Barras candidatas.

Barra	$\lambda_{\Delta P}$
598	0,10155
599	0,10162
600	0,10113
601	0,10132

A alocação da nova unidade geradora termoelétrica, com uma capacidade de geração de 300 MW, será realizada para as barras indicadas na Tabela 4.31.

A Tabela 4.32 apresenta os diferentes cenários para as quais os testes foram realizados. Para cada cenário o FPO foi executado obtendo-se um ponto ótimo de operação que satisfez todas as restrições do sistema. A barra 577, embora não indicada pela Tabela 4.31 compõe um quinto cenário de alocação de unidade geradora termoelétrica. Esta foi escolhida para enfatizar que nem sempre a barra com maior carregamento (barra 577) será a de maior minimização de perdas ativa nas linhas de transmissão.

Tabela 4.32 – Cenários estudados.

Cenários	Alocação de termoelétrica de 300 MW na barra
1	598
2	599
3	600
4	601
5	577

4.4.2 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 1

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.33.

Tabela 4.33 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,000010$	$\beta_V=1,00010$
$\mu_Q=0,000010$	$\beta_Q=1,00010$
$\mu_P=0,000001$	$\beta_P=1,00100$
$\mu_{Tap}=0,000100$	$\beta_{Tap}=1,00100$
$\mu_{fp}=0,000010$	$\beta_{fp}=1,00001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 1 encontram-se na Tabela 4.34.

Tabela 4.34 – Solução do FPO para o cenário 1.

Perdas na transmissão	176,10 MW
Fluxo na linha 552-561	250,00 MW
Fluxo na linha 593-581	125,00 MW
Geração Termoelétrica	299.00 MW

As barras com restrições de tensão ativas na solução encontram-se indicadas na Tabela 4.35.

Tabela 4.35 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 1.

Barras	V(pu)
561	1,100

As Figuras de 4.45 a 4.48 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 em MW para as 47 iterações percorridas até a convergência do FPO.

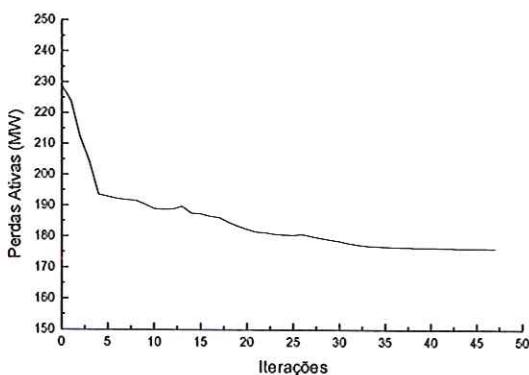


Figura 4.45 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

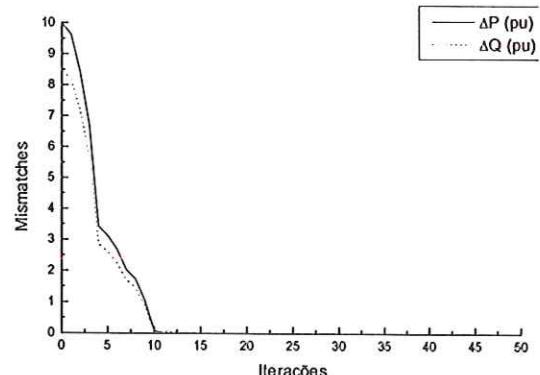


Figura 4.46a – Evolução dos *mismatches*.

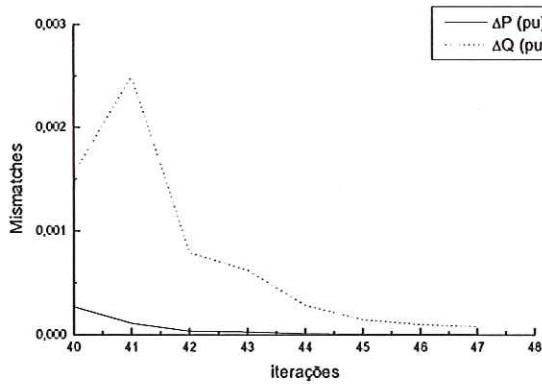


Figura 4.46b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

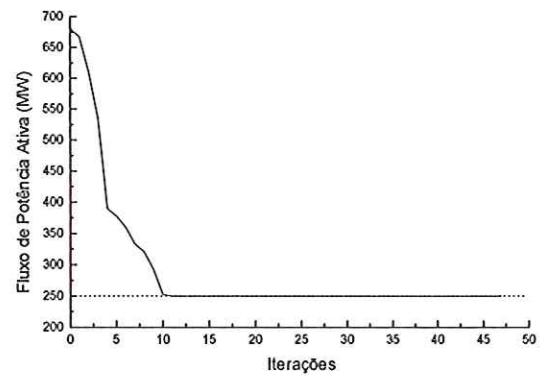


Figura 4.47 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.

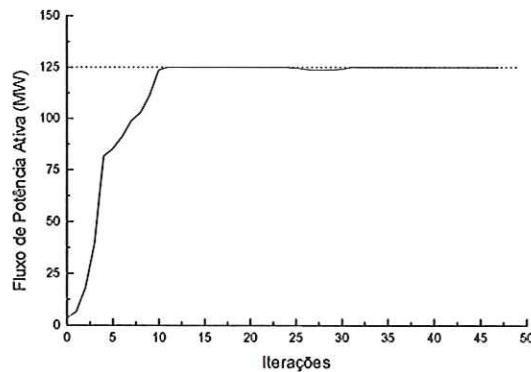


Figura 4.48 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.

A Figura 4.46b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a quadragésima sétima iteração. O fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561 (Figura 4.47) adentrou na região factível após a décima iteração e mantendo-se estável em seu limite juntamente com o fluxo na linha entre as barras 593 e 581 (Figura 4.48) até a convergência do FPO na quadragésima sétima iteração. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 1, proporcionou uma maior minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em relação ao resultado obtido para o ponto de operação, aliadas a uma maior folga do sistema devido a diminuição de barras com as restrições de limites de tensão ativas na solução.

4.4.3 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 2

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.36.

Tabela 4.36 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,00001$	$\beta_V=1,0001$
$\mu_Q=0, 00001$	$\beta_Q=1,0001$
$\mu_P=0, 00001$	$\beta_P=1,0010$
$\mu_{Tap}=0, 00010$	$\beta_{Tap}=1,0010$
$\mu_{fp}=0,00001$	$\beta_{fp}=1,0001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 2 encontra-se apresentada na Tabela 4.37.

Tabela 4.37 – Solução do FPO para o cenário 2.

Perdas na transmissão	176,44 MW
Fluxo na linha 552-561	250,00 MW
Fluxo na linha 593-581	125,00 MW
Geração Termoelétrica	298,30 MW

As barras com restrições de tensão ativas na solução encontram-se indicadas na Tabela 4.38.

Tabela 4.38 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 2.

Barras	V(pu)
561	1,100

As Figuras de 4.49 a 4.52 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 em MW para as 60 iterações percorridas até a convergência do FPO.

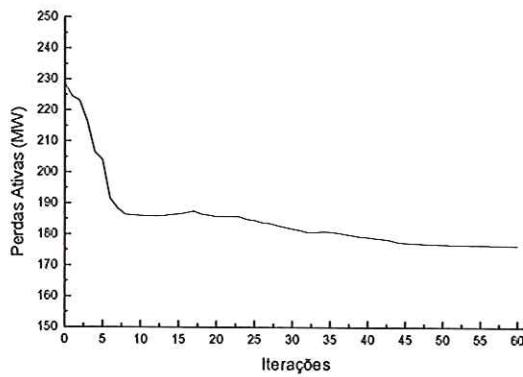


Figura 4.49 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

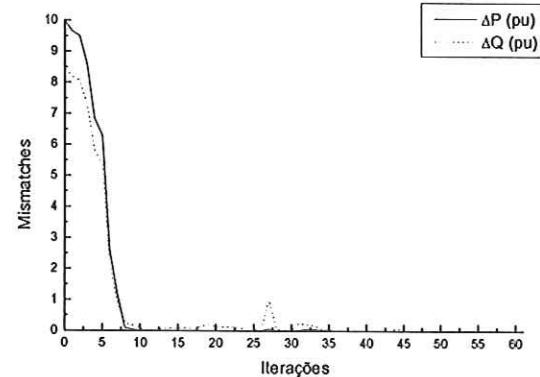


Figura 4.50a – Evolução dos *mismatches*.

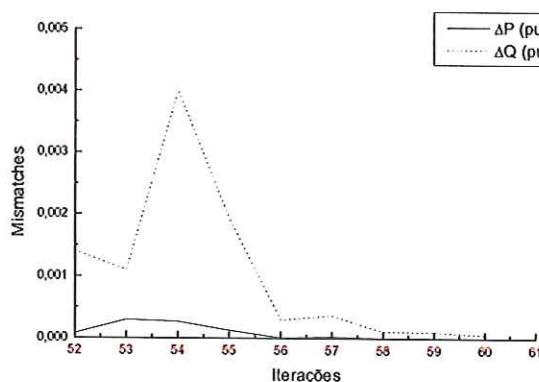


Figura 4.50b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

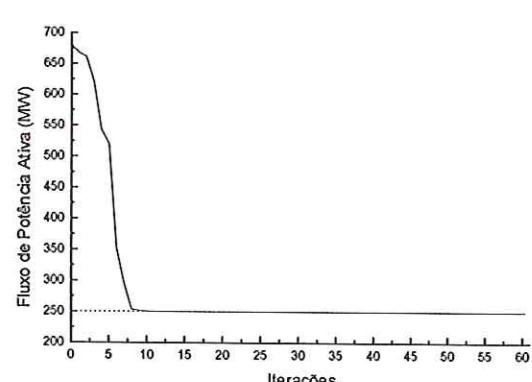


Figura 4.51 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.

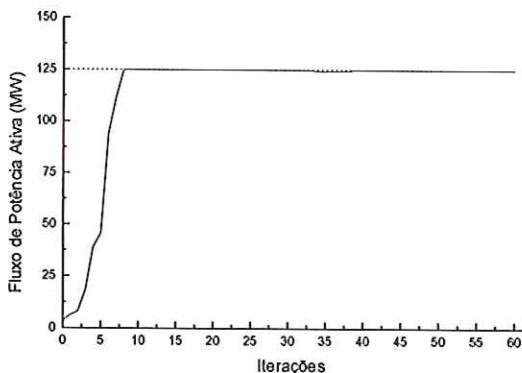


Figura 4.52 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.

A Figura 4.50b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a setuagésima iteração. Após a oitava iteração, os fluxos de potência ativa das linhas entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 (Figuras 4.51 e 4.52) permanecem estáveis em seus limites máximos, enquanto que a função objetivo caminha para a convergência do FPO. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 2, proporcionou uma minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão de valor próximo ao cenário 1 como esperado, pois tratam-se de barras na mesma região indicadas pelo multiplicador de Lagrange.

4.4.4 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 3

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.39.

Tabela 4.39 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,000010$	$\beta_V=1,00010$
$\mu_Q=0,000010$	$\beta_Q=1,00010$
$\mu_P=0,000001$	$\beta_P=1,00100$
$\mu_{Tap}=0,000100$	$\beta_{Tap}=1,00100$
$\mu_{fp}=0,000010$	$\beta_{fp}=1,00001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 3 encontra-se na Tabela 4.40.

Tabela 4.40 – Solução do FPO para o cenário 3.

Perdas na transmissão	175,94 MW
Fluxo na linha 552-561	249,99 MW
Fluxo na linha 593-581	125,00 MW
Geração Termoelétrica	299,90 MW

As barras que permaneceram com as restrições de limites de tensões ativas na solução, encontram-se indicadas na Tabela 4.41.

Tabela 4.41 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 3.

Barras	V(pu)
561	1,100

As Figuras de 4.53 a 4.56 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 em MW para as 44 iterações percorridas até a convergência do FPO.

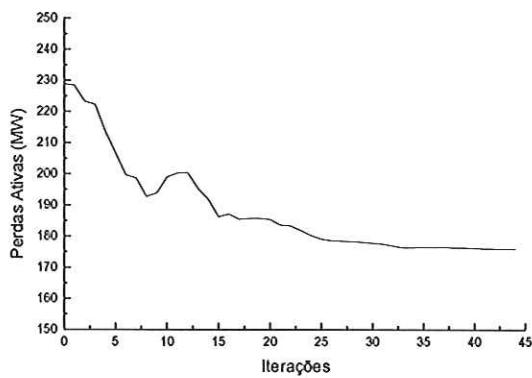


Figura 4.53 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

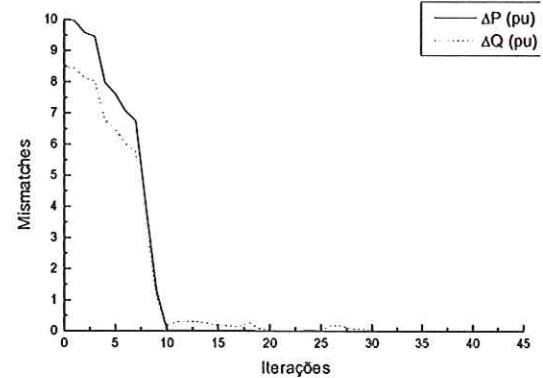


Figura 4.54a – Evolução dos *mismatches*.

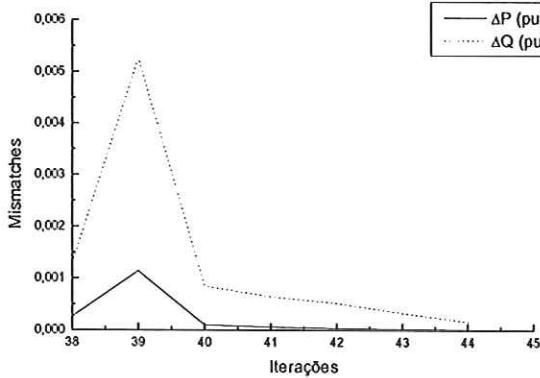


Figura 4.54b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

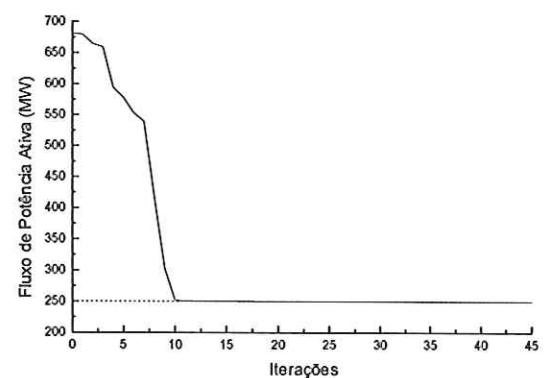


Figura 4.55 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.

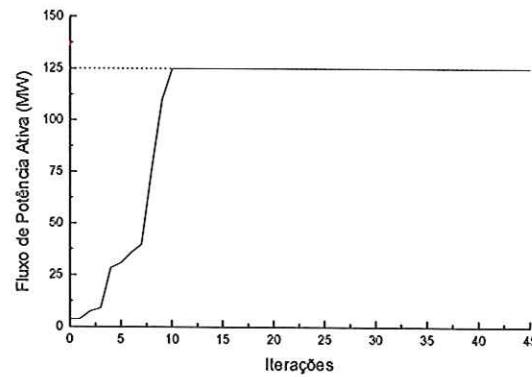


Figura 4.56 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.

A Figura 4.54b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a quadragésima quarta iteração. Após a décima iteração, os fluxos de potência ativa das

linhas entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 (Figuras 4.55 e 4.56) permanecem estáveis em seus limites máximos, enquanto que a minimização das perdas caminha para a convergência do FPO. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 3 proporcionou uma minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão de valor próximo aos cenários 1 e 2 como esperado, pois tratam-se de barras na mesma região indicadas pelo multiplicador de Lagrange.

4.4.5 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 4

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.42.

Tabela 4.42 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,000010$	$\beta_V=1,00010$
$\mu_Q=0,000010$	$\beta_Q=1,00010$
$\mu_P=0,000001$	$\beta_P=1,00100$
$\mu_{Tap}=0,000100$	$\beta_{Tap}=1,00100$
$\mu_{fp}=0,000010$	$\beta_{fp}=1,00001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 4 encontram-se na Tabela 4.43.

Tabela 4.43 – Solução do FPO para o cenário 4.

Perdas na transmissão	176,65 MW
Fluxo na linha 552-561	250,00 MW
Fluxo na linha 593-581	125,00 MW
Geração Termoelétrica	293,10 MW

As barras que permaneceram com as restrições de limites de tensões ativas na solução, encontram-se indicadas na Tabela 4.44.

Tabela 4.44 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 4.

Barras	V(pu)
520	1,100
539	1,100
550	1,100
561	1,100

As Figuras de 4.57 a 4.60 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 em MW para as 26 iterações percorridas até a convergência do FPO.

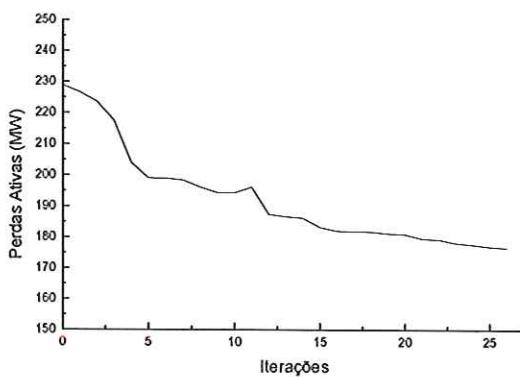


Figura 4.57 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

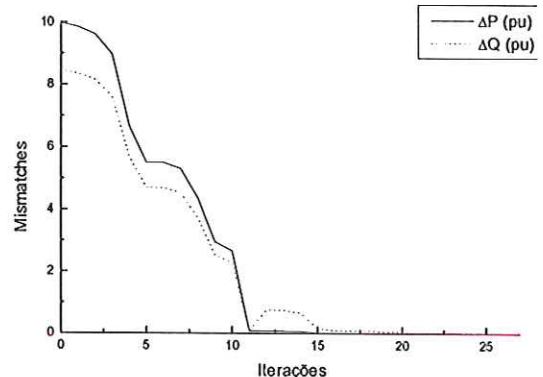


Figura 4.58a – Evolução dos *mismatches*.

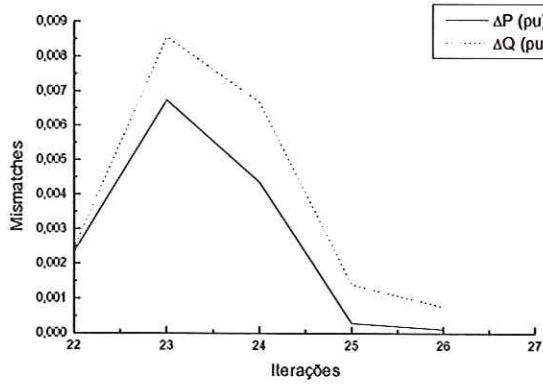


Figura 4.58b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

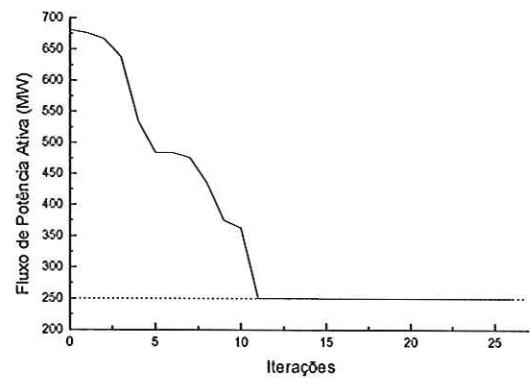


Figura 4.59 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.

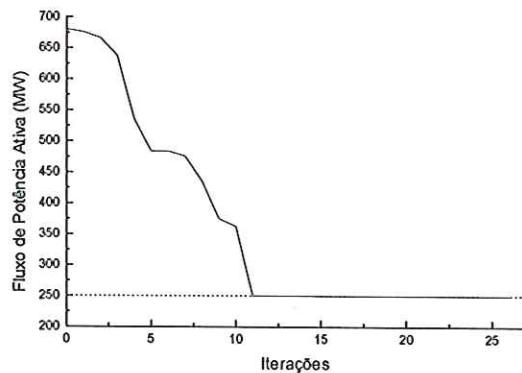


Figura 4.60 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.

A Figura 4.58b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a vigésima sexta iteração. Após a décima quinta iteração, os fluxos de potência ativa das linhas entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 (Figuras 4.59 e 4.60) permanecem estáveis em seus limites máximos, enquanto que a minimização das perdas caminha para a convergência do FPO. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 4, proporcionou uma minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão de valor próximo aos cenários 1, 2 e 3 como esperado, pois tratam-se de barras na mesma região indicadas pelo multiplicador de Lagrange.

4.4.6 Solução do sistema equivalente CESP 440kV com 53 barras pelo FPO – cenário 5

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.45.

Tabela 4.45 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,000001$	$\beta_V=1,00010$
$\mu_Q=0,000001$	$\beta_Q=1,00010$
$\mu_P=0,000001$	$\beta_P=1,00100$
$\mu_{Tap}=0,000100$	$\beta_{Tap}=1,00100$
$\mu_{fp}=0,000010$	$\beta_{fp}=1,00001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 5 encontram-se na Tabela 4.46.

Tabela 4.46 – Solução do FPO para o cenário 5.

Perdas na transmissão	182,70 MW
Fluxo na linha 552-561	250,00 MW
Fluxo na linha 593-581	125,00 MW
Geração Termoelétrica	299,40 MW

As barras que permaneceram com as restrições de limites de tensões ativas na solução, encontram-se indicadas na Tabela 4.47.

Tabela 4.47 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 5.

Barras	V(pu)
520	1,100
561	1,100

As Figuras de 4.61 a 4.64 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561 e 593 e 581 em MW para as 40 iterações percorridas até a convergência do FPO.

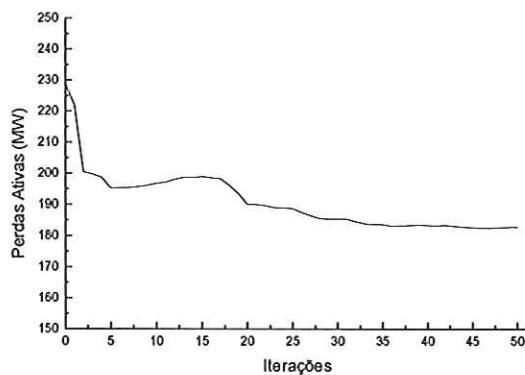


Figura 4.61 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

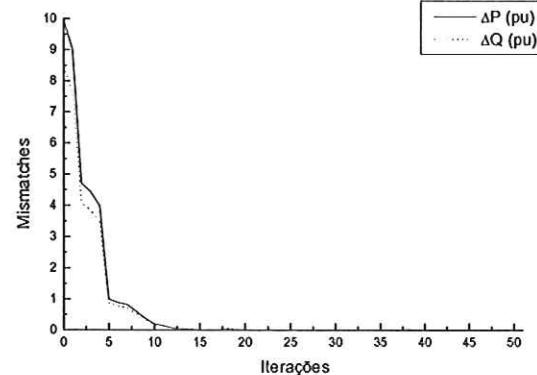


Figura 4.62a – Evolução dos *mismatches*.

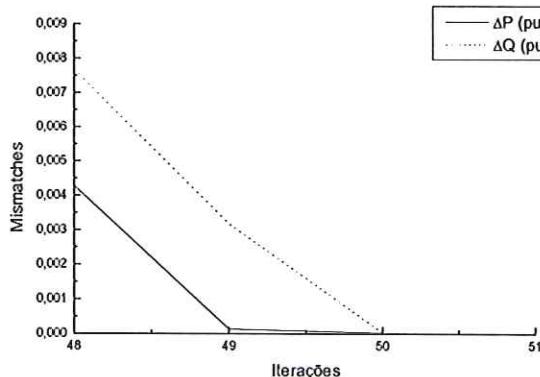


Figura 4.62b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

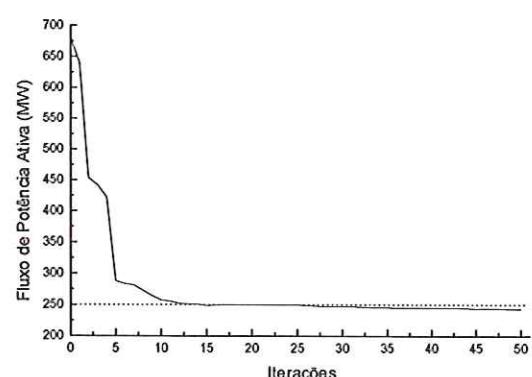


Figura 4.63 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 552 e 561.

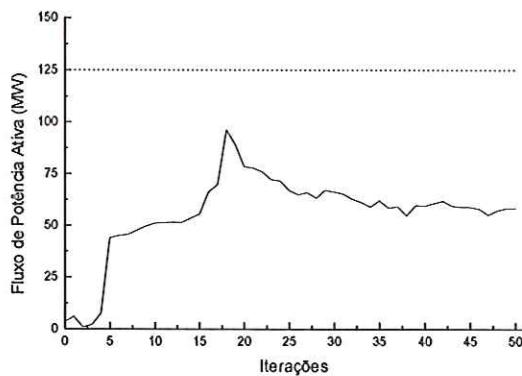


Figura 4.64 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 593 e 581.

A Figura 4.62b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a quinquagésima iteração. Após a décima primeira iteração, o fluxo de potência ativa da linha entre as barras 552 e 561 (Figura 4.63) atinge a região factível e permanece próxima ao seu limite máximo, enquanto que o fluxo de potência ativa da linha 593 e 581 (Figura 4.64) permanece afastado de seu limite máximo. Esta situação persiste até a convergência do FPO. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 5, proporcionou uma minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão de valor intermediário entre a situação do ponto de operação e os valores obtidos para os cenários de 1 a 4, onde as barras foram indicadas pelo multiplicador de Lagrange.

4.4.7 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão

A Figura 4.65 apresenta de forma comparativa a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão, para o ponto de operação, os cenários de 1 a 4 onde a barra selecionada para a alocação da nova unidade geradora termoelétrica foi indicada pelo multiplicador de Lagrange e o cenário 5 onde a barra escolhida apresentava um dos maiores carregamentos do sistema. Observa-se que os melhores cenários apresentadas decorrem das indicadas pelo multiplicador de Lagrange, sendo a melhor minimização das perdas representada pelo cenário 3.

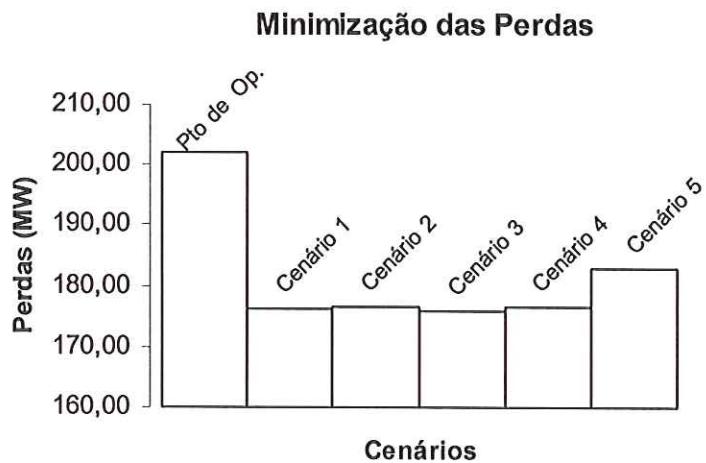


Figura 4.65 - Perdas ativa x cenários.

4.5 Sistema IEEE 118 barras

O sistema IEEE 118 barras, Figura 4.66, têm suas características apresentadas como segue:

- 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;
- $0,90 \leq V_n \leq 1,10$, sendo $n=1,2,3,\dots,118$ barras.

Ao IEEE 118 barras acrescentou-se uma restrição de limite de fluxo de potência ativa em uma das linhas que o compõem, como apresentado a seguir:

- Limite de fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11 de 70,00 MW;

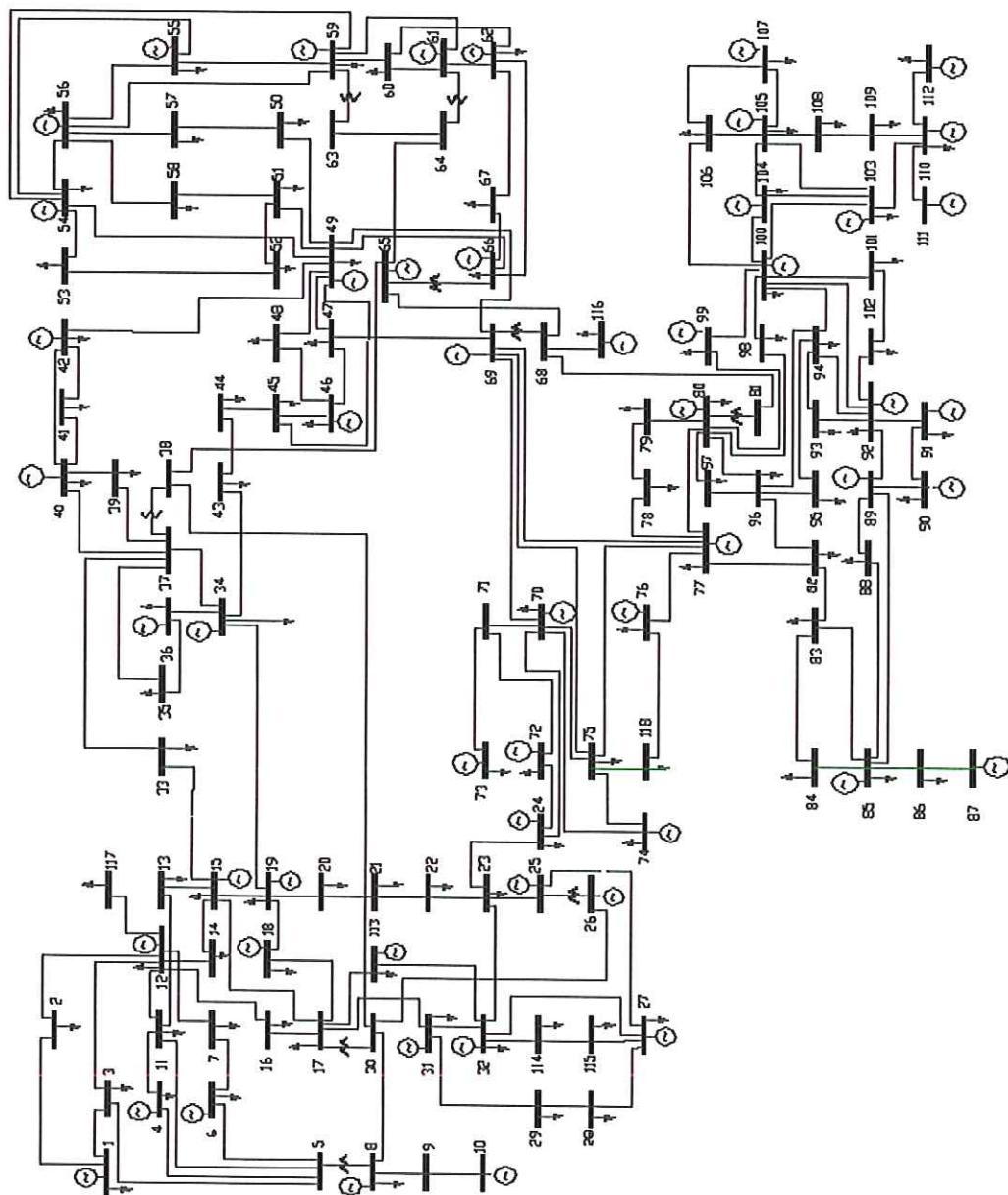


Figura 4.66 – Sistema IEEE 118 barras.

4.5.1 Solução do sistema IEEE 118 barras pelo FPO

O programa de FPO com despacho ativo e reativo foi utilizado para resolver o sistema IEEE 118 barras, considerando $\xi=10^{-5}$. Os valores iniciais para os parâmetros de barreira (μ) e para os parâmetros (β) que os atualizam, encontram-se apresentados através da Tabela 4.48. Os pontos a se destacar nesta solução estão indicados nas Tabela 4.49 e são eles: o valor da minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão e o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos. As barras cujas restrições de tensão permaneceram ativas na solução encontram-se indicadas na Tabela 4.50. As restrições de limite de fluxo de potência ativa não permaneceram ativas na solução.

Tabela 4.48 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,00001$	$\beta_V=1,001$
$\mu_Q=0,00001$	$\beta_Q=1,001$
$\mu_P=0,00010$	$\beta_P=1,010$
$\mu_{fp}=0,00010$	$\beta_{fp}=1,001$

Tabela 4.49 – Solução do sistema IEEE 118 barras.

Perdas na transmissão	115,93 MW
Fluxo na linha 5-11	69,97 MW

Tabela 4.50 – Restrições de tensões ativas.

Barras	V(pu)
1	0,900
66	1,100
69	1,100
89	1,100

As Figuras de 4.67 a 4.69 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos

mismatches em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11 em MW para as 66 iterações percorridas até a convergência do FPO.

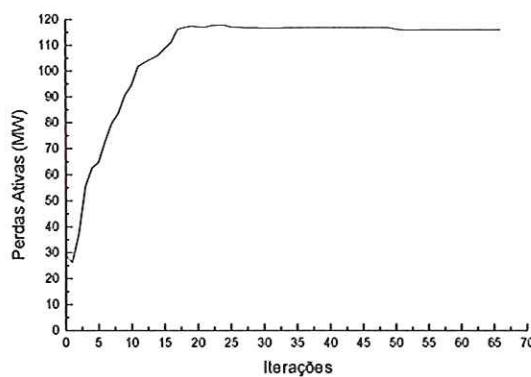


Figura 4.67 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

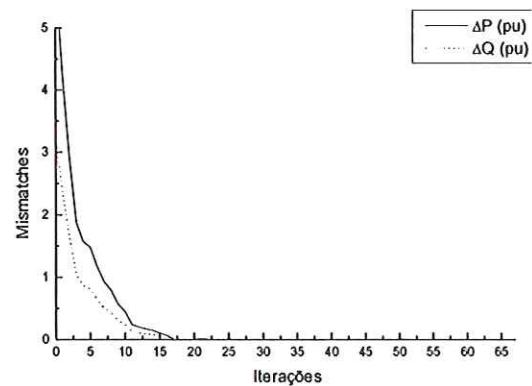


Figura 4.68a – Evolução dos *mismatches*.

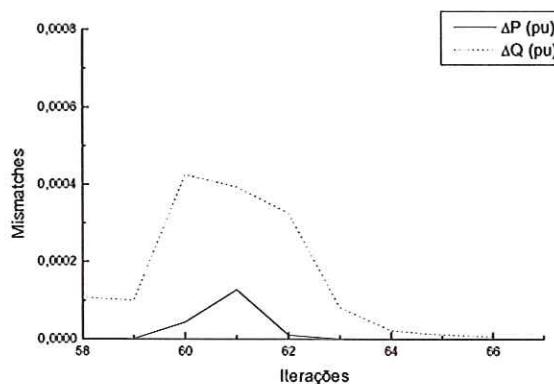


Figura 4.68b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

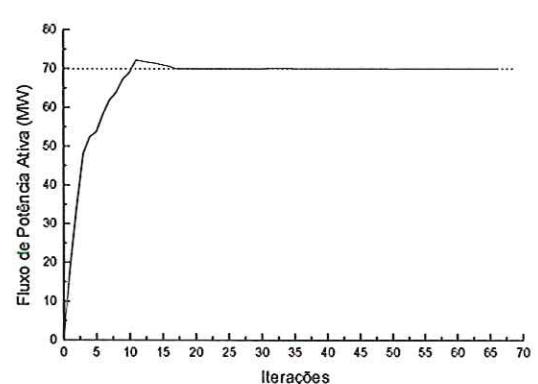


Figura 4.69 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11.

A Figura 4.68b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a setuagésima sexta iteração. O fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11 (Figura 4.69) deixa a região factível e retorna a ela entre a décima e a décima sétima iterações, tornando-se estável para o seu limite máximo até a convergência do FPO.

O valor das perdas de potência ativa na transmissão, obtido na solução do FPO será utilizado para efeito de comparação entre os demais testes realizados com o sistema. Na solução do sistema, também se obteve os multiplicadores de Lagrange para cada barra do mesmo. Verificando-se os multiplicadores associados às equações de

balanço de potência ativa ($\lambda_{\Delta P}$), escolheu-se o de maior valor conforme apresentado na Tabela 4.51.

Tabela 4.51 – Barras candidatas.

Barra	$\lambda_{\Delta P}$
11	0,20538

A alocação da nova unidade geradora termoelétrica, com uma capacidade de geração de 200 MW, será realizada para as barras indicadas na Tabela 4.51.

A Tabela 4.52 apresenta os diferentes cenários para as quais os testes foram realizados. Para cada cenário o FPO foi executado obtendo-se um ponto ótimo de operação que satisfez todas as restrições do sistema. A barra 59, embora não indicada pela Tabela 4.51 compõe uma segunda situação de alocação de unidade geradora termoelétrica. Esta foi escolhida para enfatizar que nem sempre a barra com maior carregamento (barra 59) será a de maior minimização de perdas ativa nas linhas de transmissão.

Tabela 4.52 – Cenários estudados.

Cenários	Alocação de termoelétrica de 200 MW na barra
1	11
2	59

4.5.2 Solução do sistema IEEE 118 barras pelo FPO – cenário 1

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.53.

Tabela 4.53 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,00001$	$\beta_V=1,0015$
$\mu_Q=0,00001$	$\beta_Q=1,0015$
$\mu_P=0,00010$	$\beta_P=1,0150$
$\mu_{fp}=0,00010$	$\beta_{fp}=1,0150$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 1 encontram-se na Tabela 4.54.

Tabela 4.54 – Solução do FPO para o cenário 1.

Perdas na transmissão	101,03 MW
Fluxo na linha 5-11	30,48 MW
Geração Termoelétrica	195,60 MW

As barras que permaneceram com as restrições de limites de tensões ativas na solução, encontram-se indicadas na Tabela 4.55.

Tabela 4.55 – Restrições de limites de tensão ativas para o cenário 1.

Barras	V(pu)
4	1,100
11	1,100
25	1,100
66	1,100
89	1,100

As Figuras de 4.70 a 4.72 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11 em MW para as 35 iterações percorridas até a convergência do FPO.

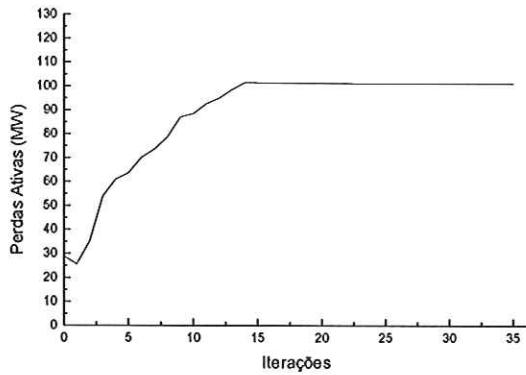


Figura 4.70 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

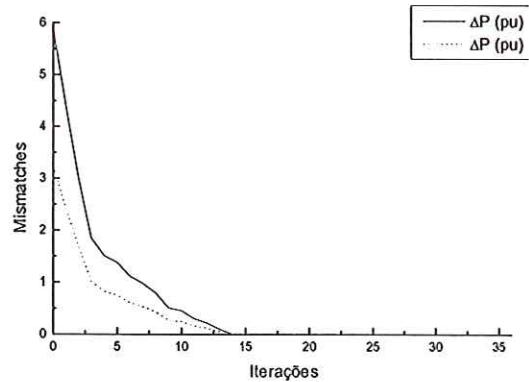


Figura 4.71a – Evolução dos *mismatches*.

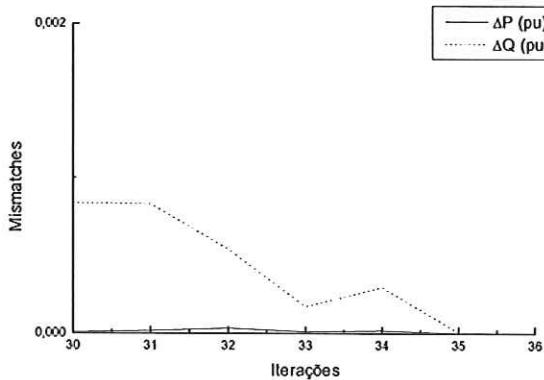


Figura 4.71b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

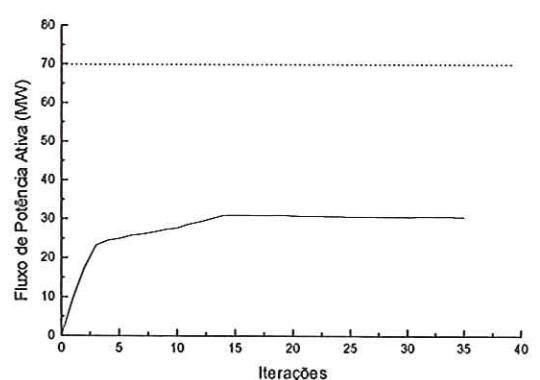


Figura 4.72 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11.

A minimização das perdas tornou-se estável a partir da décima quarta iteração (Figura 4.70) até a convergência do FPO. A Figura 4.71b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a trigésima quinta iteração. O fluxo de potência ativa da linha entre as barras 5 e 11 (Figura 4.72) permaneceu afastada de seu limite máximo em todo o processo iterativo. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 1, proporcionou uma minimização maior das perdas ativas nas linhas de transmissão em relação ao ponto de operação, aliada a uma notável folga do sistema quanto ao fluxo ativo destinado a linha entre as barras 5 e 11.

4.5.3 Solução do sistema IEEE 118 barras pelo FPO – cenário 2

Os valores iniciais atribuídos a μ e β estão apresentados na Tabela 4.56.

Tabela 4.56 – Valores iniciais de μ e β .

μ inicial	β
$\mu_V=0,0010$	$\beta_V=1,001$
$\mu_Q=0,0010$	$\beta_Q=1,001$
$\mu_P=0,0001$	$\beta_P=1,010$
$\mu_{fp}=0,0010$	$\beta_{fp}=1,001$

A solução encontrada para a minimização das perdas ativa nas linhas de transmissão, o valor dos fluxos de potência ativa nas linhas com limites dos mesmos e o valor da geração termoelétrica atingido na nova compilação do problema de FPO para o cenário 2 encontram-se na Tabela 4.57.

Tabela 4.57 – Solução do FPO para o cenário 2.

Perdas na transmissão	114,35 MW
Fluxo na linha 5-11	69,95 MW
Geração Termoelétrica	198,60 MW

Não houve barras com as restrições de limites de tensões ativas na solução. As Figuras de 4.73 a 4.75 apresentam respectivamente a evolução da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão em MW, a evolução dos *mismatches* em pu e a evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11 em MW para as 30 iterações percorridas até a convergência do FPO.

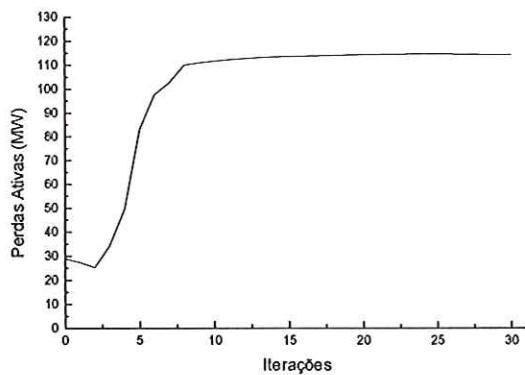


Figura 4.73 – Evolução da minimização de perdas ativas na transmissão.

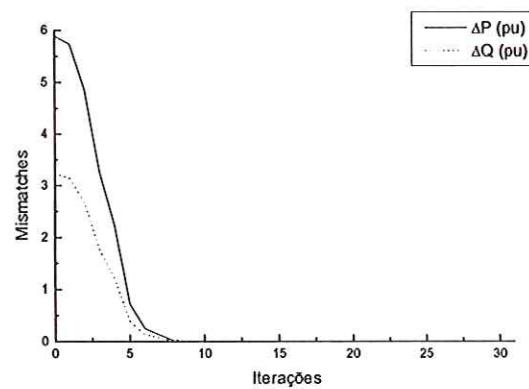


Figura 4.74a – Evolução dos *mismatches*.

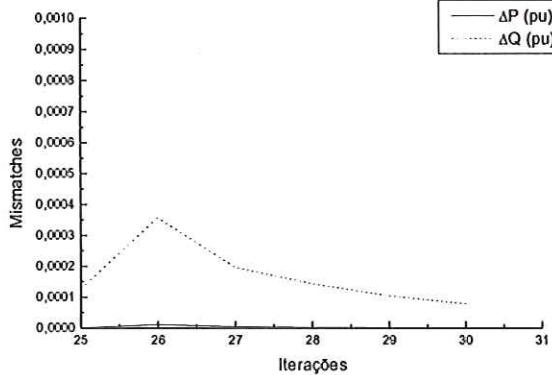


Figura 4.74b – Detalhe da convergência dos *mismatches*.

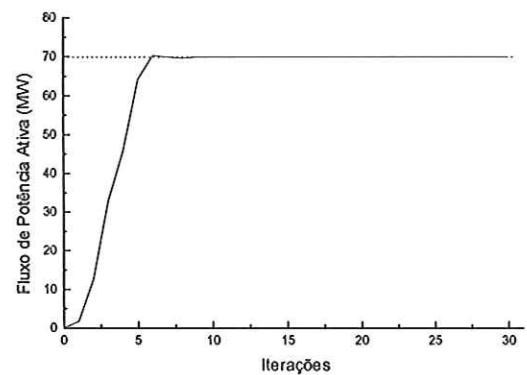


Figura 4.75 – Evolução do fluxo de potência ativa na linha entre as barras 5 e 11.

A função objetivo (Figura 4.73) tornou-se estável a partir da décima sétima iteração até a convergência do FPO. A Figura 4.74b apresenta em detalhe a convergência dos *mismatches* para a trigésima iteração. O fluxo de potência ativa da linha entre as barras 5 e 11 (Figura 4.75) invade a região infactível antes de se estabilizar em seu limite máximo a partir da sétima iteração. Destaca-se que a alocação da termoelétrica para o cenário 2, proporcionou um valor intermediário, entre o obtido pelo ponto de operação e o obtido pelo cenário 1 onde a barra foi indicada pelo multiplicador de Lagrange, para a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão. O cenário 2 não propiciou uma maior folga do sistema em relação a linha entre as barras 5 e 11, mantendo sua operação em seu valor limite.

4.5.4 Comparação da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão

A Figura 4.76 apresenta de forma comparativa a minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão, para o ponto de operação, o cenário 1 onde a barra selecionada para a alocação da nova unidade geradora termoelétrica foi indicada pelo multiplicador de Lagrange e o cenário 2 onde a barra escolhida apresentava um dos maiores carregamentos do sistema. Observa-se que a melhor situação apresentada decorre da indicada pelo multiplicador de Lagrange.

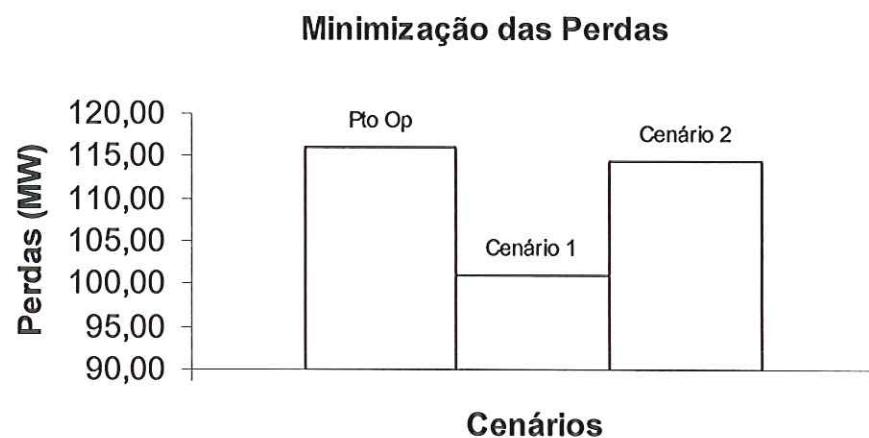


Figura 4.76 - Perdas ativa x cenários.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de alocação de termoelétricas em sistemas elétricos de potência. Um programa de FPO foi utilizado para se obter um ponto ótimo de operação do sistema e também os multiplicadores de Lagrange associados às restrições do problema. Um método Lagrangiano de pontos interiores do tipo primal-dual barreira logarítmica foi utilizado na solução do problema de FPO.

Os multiplicadores de Lagrange indicam a sensibilidade entre a função objetivo e a restrição a ele associada. Esta relação de sensibilidade foi utilizada para se verificar, entre as barras dos sistemas estudados, quais delas seriam as candidatas à instalação de novas unidades de geração termoelétricas. Observou-se que a injeção de potência nas barras indicadas pelos multiplicadores de Lagrange reduziu ainda mais as perdas do sistema quando comparada com uma situação de injeção de potência em uma barra aleatória. Por essa razão, constata-se que a técnica de análise apresentada é eficiente para estudos de planejamento da expansão do sistema.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, E.C.; BELATI, E.A. and COSTA, G.R.M. (2005). Logarithmic Barrier-Augmented Lagrangian Function to the Optimal Power Flow Problem, *Electrical Power & Energy System*, v. 24, no. 2, p. 215-226.
- CARPENTIER, J.L. (1962). Contribution a L'etude du Dispatching Economique. *Bull-Soc. Fr. Elec. Ser. B3*, p. 431-447.
- COSTA, G.R.M. (1997). Optimal Reactive Dispatch Through Primal-Dual Method, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, nº 2, p. 669-674, May.
- DOMMEL, H.W.; TINNEY, W.F. (1968). Optimal Power Flow Solutions. IEEE Trans. on PAS., v. 87, p. 1866-1876, October.
- FRISCH, K.R. (1955). The logarithmic Potential Method of Convex Programming, Memorandum, University Institute of Economics, Oslo, Norway.
- FRITZCHE, H. (1978). Programação Não-Linear Análise e Métodos. Edgard Blucher: Editora da Universidade de São Paulo, p. 52-53.
- GRANVILLE, S. (1994). Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, nº 1, p. 136-146, February.
- 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, nº 1, p. 162-169, February.
- KARMAKAR, N. (1984). A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming. *Combinatorica 4*, v. 4, p. 373-395.

- MONTICELLI, A.; LIU, W.H.E. (1992). Adaptive Movement Penalty Method For The Newton Optimal Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n° 1, p. 334 - 341, February.
- QUINTANA, V.H., GOMEZ, A., MARTINEZ, J.L. (1995). Nonlinear Optimal Power Flows by Logarithmic-Barrier Primal-Dual Algorithm. *IEEE NAPS Meeting*.
- RAMOS, J.L.M.; EXPÓSITO, A. G. and QUINTANA, V.H. (2005). Transmission Power Loss Reduction by Interior-Point Methods: Implementation Issues and Practical Experience, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, v. 152, no. 1, p. 90-98, January.
- ROCKFELLAR R. T. (1973), A Dual Approach to Solving Nonlinear Programming Problems by Unconstrained Optimization. *Mathematical Programming*, 5, pp. 354-373.
- SANTOS, A.; DECKMANN, S.; SOARES, S. (1988). A Dual Augmented Lagrangian Approach for Optimal Power Flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 3, p. 1020-1025, August.
- SUN, D.I.; ASHELEY, B.; BREWER, B.; HUGHES, B.A.; TINNEY, W. F. (1984) Optimal Power Flow by Newton Approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 103, 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.
- XIE, K; SONG, Y.H.; ZHANG, D.; NAKANISHI, Y.; NAKAZAWA, C. (2004). Calculation and Decomposition of Spot Price Using Interior Point Nonlinear Optimization Methods, *Electrical Power & Energy Systems*, v. 26, p. 349-356.

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, têm-se os limites das extensões, 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.

- 5 barras

1	2		1060	0		-999	999		0	0
2	-1		1000	0	40.0	30	-999	999	20	10
3	0		1000	0	00	00			45	15
4	0		1000	0	00	00			40	5
5	0		1000	0	00	00			60	10
9999										
1	2		2.000	6.00	6.0					
1	3		8.000	24.00	5.0					
2	3		6.000	18.00	4.0					
2	4		6.000	18.00	4.0					
2	5		4.000	12.00	3.0					
3	4		1.000	3.00	2.0					
4	5		8.000	24.00	5.0					
9999										
			0.95	1.10						
9999										
2	5		55.0							
9999										
2	0		60							
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	3.304	4.92					900		
2	3		4.69919	7.797	4.38					900		
2	4		5.81117	6.632	3.74					900		
2	5		5.69517	3.388	3.40					900		
3	4		6.70117	1.103	3.46					900		
4	5		1.335	4.211	1.28					900		
4	7		20.912		0.9780	9.001	1.100			900		
4	9		55.618		0.9690	9.001	1.100			900		
5	6		25.202		0.9320	9.001	1.100			900		
6	11		9.49819	8.890						900		
6	12		12.29125	5.581						900		
6	13		6.61513	0.027						900		
7	8		0.00117	6.615						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.				.464	.0	
10	0	BARRA10	CARG	1045-15.				5.8	2.0	
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	
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						
		0.90	1.10			
9999						
4	6	66.50				
16	17	3.00				
9999						
2	20	80				
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	4.4				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.		241.8100.7		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.		340.7214.7		21000
568		SBARBARA-138	1013	-42.		504.5237.9		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.		413.0115.4		21000
598		TAUBATE--500	1056	-39.		138.4 -223		21000
599		TAUBATE--440	1013	-40.				51000
600		TAUBATE--230	1030	-45.		167.144.3		21000
601		TAUBATE--138	1020	-43.		243. 13.7		21000
593		STOANGELO440	1008	-34.				51000
594		STOANGELO345	1016	-33.		-231.215.9		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.		1035212.9		21000
591	CABREUVA-138	1029-41.		117.9	35.9	21000
581	EMBUGUACU440	1002-34.				51000
582	EMBUGUACU345	1023-34.		-28.3234.7		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	250.0					
593	581	125.0					
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
5		Olive	138	1000	0				0	0	-40
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
9		Beguine	345	1000	0				0	0	1
10	-1	Breed	345	1050	0	450	0	-147	200	10	0
11		SouthBend	138	1000	0				70	23	1
12	1	TwnBranch	138	990	0	85	-35	120	12	47	10
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		CollgeCnhr	138	1000	0				7	3	1
24	1	Trenton	138	992	0	-13	-300	300	24	0	0
25	1	TannersCk	138	1050	0	220	-47	140	25	0	0
26	1	TannersCk	345	1015	0	314	-1000	1000	26	0	0
27	1	Madison	138	968	0	-9	-300	300	27	62	13
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
32	1	Delaware	138	963	0		-14	42	32	59	23
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		Crooksville	138	1000	0					34	0		1
48		Zanesville	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		SCoshocn	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	Sunnyside	138	954	0		-8	15	56	84	18		1
57		WNwPhilal	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		NPortsmth	138	1000	0					0	0		1
72	1	Hillsboro	138	980	0	-12	-100	100	72	0	0		1
73	1	Sargent	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
88	Fremont	138	1000	0				48	10	1
89	1 ClinchRvr	138	1005	0	607	-210	300	89	0	0
90	1 Holston	138	985	0	-85	-300	300	90	78	42
91	1 HolstonTP	138	980	0	-10	-100	100	91	0	0
92	1 Saltville	138	990	0		-3	9	92	65	10
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
100	1 Glen Lyn	138	1017	0	252	-50	155	100	37	18
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
104	1 Hancock	138	971	0		-8	23	104	38	25
105	1 Roanoke	138	965	0		-8	23	105	31	26
106	Cloverdle	138	1000	0				43	16	1
107	1 Reusens	138	952	0	-22	-200	200	107	28	12
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
111	1 Dan River	138	980	0	36	-100	1000	111	0	0
112	1 Danville	138	975	0	-43	-100	1000	112	25	13
113	1 DeerCk TP	138	993	0	-6	-100	200	113	0	0
114	W Medford	138	1000	0				8	3	1
115	Medford	138	1000	0				22	7	1
116	1 Kyger Crk	138	1005	0	-184	-1000	1000	116	0	0
117	Corey	138	1000	0				20	8	1
118	WHuntnngdn	138	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	3.90618.13	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				
9999						

