

AVANÇOS NA UTILIZAÇÃO DE ANÁLISE LINEAR EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Júlio César Rezende Ferraz

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:



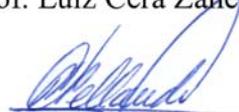
Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.



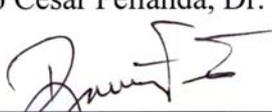
Dr. Nelson Martins, Ph.D.



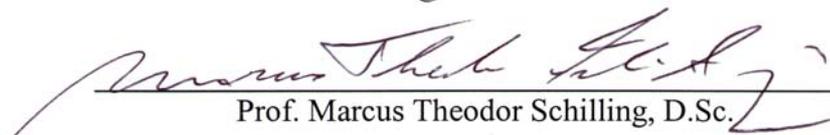
Prof. Luiz Cera Zanetta Jr., D.Sc.



Prof. Paulo César Pellanda, Dr. ENSAE



Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2002

FERRAZ, JÚLIO CÉSAR REZENDE

Avanços na Utilização de Análise Linear em
Sistemas Elétricos de Potência [Rio de Janeiro]
2002

XVIII, 230 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2002)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência
2. Análise Linear de Sistemas Dinâmicos
3. Estabilidade Frente Pequenas Perturbações
4. Ajuste Coordenado de Controladores
5. Robustez de Controladores

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*Esta tese é dedicada aos meus pais, Antônio Márcio e Marília;
aos meus irmãos, Liliane e Antônio Júnior;
e a minha amada Claudia.*

*If I have seen further,
that is because I stood on the shoulders of giants.*

Sir Isaac Newton

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos ao Dr. Nelson Martins (CEPEL) e ao Prof. Dr. Glauco Nery Taranto (COPPE/UFRJ), que me orientaram na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Djalma Mosqueira Falcão (COPPE/UFRJ) e ao Prof. Dr. José Luiz Rezende Pereira (UFJF) pela orientação em trabalhos anteriores.

Aos professores da COPPE/UFRJ e da UFJF que contribuíram na minha formação.

Ao Dr. Nelson Zeni Jr. (Reivax Automação e Controle) pelas inúmeras discussões técnicas fundamentais a realização deste trabalho.

Aos colegas da COPPE/UFRJ e do CEPEL, especialmente ao Dr. Sérgio Gomes Jr. e ao Dr. Hermínio José da Cunha Pereira Pinto, pelas discussões técnicas.

Aos meus amigos, pela grata convivência ao longo dos anos.

Finalmente, agradeço à minha família pelo apoio ao longo da vida.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVANÇOS NA UTILIZAÇÃO DE ANÁLISE LINEAR EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Júlio César Rezende Ferraz

Dezembro / 2002

Orientadores: Glauco Nery Taranto
Nelson Martins

Programa: Engenharia Elétrica

Esta tese apresenta contribuições para a análise linear dos Sistemas Elétricos de Potência, ao tratar três assuntos distintos relacionados com a estabilização destes sistemas. O primeiro assunto abordado é o ajuste coordenado dos ganhos dos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP). É desenvolvido um novo método para coordenação dos ganhos dos ESPs de sistemas de grande porte. O método avalia de forma adequada e simultânea múltiplos cenários, fornecendo soluções robustas. O resultado final é obtido através de melhorias sucessivas de soluções anteriores, utilizando uma direção de avanço que leva em consideração a influência de cada controlador na variação da posição de cada um dos pólos. Esta direção é obtida através da informação de sensibilidade modal, contida nos resíduos da função de transferência da malha de controle associados aos pólos de interesse.

O segundo assunto abordado é a robustez de controladores. É proposta uma nova metodologia para avaliação rápida da robustez do conjunto máquina-regulador de tensão-estabilizador em sistemas de grande porte. Isto é feito através de um sistema sintético de pequeno porte que simula a presença de oscilações de diferentes frequências. A realização deste teste possibilita avaliar de forma simultânea o desempenho do conjunto frente oscilações eletromecânicas de natureza distinta (entre-áreas, locais e intraplanta).

O terceiro assunto abordado é a importância da escolha dos sinais de realimentação dos ESPs e de suas estruturas de controle. É mostrado como o desempenho de tensão e de potência reativa das usinas pode ser deteriorado devido a impactos adversos causados por ESPs. Alguns parâmetros da estrutura do tipo de ESP mais utilizado no mundo são analisados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ADVANCES IN THE USE OF LINEAR ANALYSIS IN
ELECTRIC POWER SYSTEMS

Júlio César Rezende Ferraz

December / 2002

Advisors: Glauco Nery Taranto
Nelson Martins

Department: Electrical Engineering

This thesis presents contributions to the linear analysis of Electric Power Systems, dealing with three different topics related to stabilization of these systems. The first topic deals with the coordination of Power System Stabilizers' (PSS) gains. A new method for PSS gain coordination of large-scale systems is developed. This method assesses simultaneously, and in an adequate manner, multiple scenarios. Therefore, robust solutions are provided. The final solution is reached by successively improving the previous solutions, using a direction that takes into account the influence of each controller in the variation of the position of the poles. This direction is obtained by the information provided by modal sensitivity, given by the control loop transfer function residues associated with the critical poles.

The second topic deals with controller robustness. It is proposed a new methodology for fast assessment of the machine-voltage regulator-stabilizer set in large scale systems. This is carried out using a small synthetic system that simulates the presence of oscillations of different frequencies. The use of such a test enables the simultaneous evaluation of the machine-voltage regulator-stabilizer performance, regarding electromechanical oscillations of different nature (inter-area, local and intra-plant).

The third topic regards to the importance of choosing the PSS feedback signal, as well as its control structure. It is shown how the terminal voltage and reactive power performance can be deteriorated due to adverse impacts caused by PSSs. Some parameters in the structure of the type of PSS mostly used in the world are analyzed.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVII
CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	1
I.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
I.2 ESTRUTURA DA TESE.....	4
I.3 PUBLICAÇÕES	5
CAPÍTULO II AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	9
II.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	9
II.2 METODOLOGIA	13
II.2.1 <i>Conceitos Básicos</i>	13
II.2.2 <i>Contribuição de cada ESP no Esforço de Controle e Estimativa dos Ganhos</i>	18
II.2.3 <i>Posicionamento Parcial Simultâneo de Múltiplos Pólos Através do Método de Newton-Raphson Utilizando Resíduos de Funções de Transferência</i>	21
II.2.4 <i>Cálculo do Vetor de Variação dos Ganhos dos Controladores (ΔK)</i>	24
II.3 ANÁLISE DO SISTEMA TESTE I.....	28
II.3.1 <i>Contribuição de cada ESP no Esforço de Controle e Estimativa dos Ganhos</i>	31
II.3.2 <i>Posicionamento Parcial Simultâneo de Múltiplos Pólos Através do Método de Newton-Raphson Utilizando Resíduos de Funções de Transferência</i>	39
II.3.3 <i>Posicionamento Simultâneo de Pólos para Sistemas sem Solução Única</i>	45
II.4 METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO COM VARIAÇÃO AUTOMÁTICA DE GANHO	49
II.4.1 <i>Reformulação do Problema de Posicionamento</i>	50
II.4.2 <i>Análise de Múltiplos Pontos de Operação</i>	57
II.4.3 <i>Algoritmo de Variação Automática de Ganho</i>	59
II.5 ANÁLISE DO SISTEMA TESTE I.....	68
II.5.1 <i>Sistema Teste I – Configuração A</i>	68
II.5.2 <i>Sistema Teste I – Configuração B</i>	75
II.5.3 <i>Sistema Teste I – Considerações Finais</i>	84
II.6 ANÁLISE DO SISTEMA TESTE II.....	85
II.6.1 <i>Sistema Teste II – RATs Originais</i>	88

II.6.2	<i>Sistema Teste II – RATs Com Alto Ganho</i>	99
II.6.3	<i>Sistema Teste II – Considerações Finais</i>	110
II.7	ANÁLISE DO SISTEMA TESTE III	112
II.7.1	<i>Estudo de 1 Ponto de Operação</i>	113
II.7.2	<i>Estudo de 11 Pontos de Operação</i>	119
II.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
CAPÍTULO III SISTEMA SINTÉTICO PARA AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA		139
III.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	139
III.2	O SISTEMA SINTÉTICO	142
III.3	ESTUDO DA USINA DE XINGÓ	147
III.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	163
CAPÍTULO IV IMPACTOS ADVERSOS CAUSADOS POR ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA NO DESEMPENHO DE TENSÃO E DE POTÊNCIA REATIVA		164
IV.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	164
IV.2	AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM	165
IV.3	ESTUDO DE UM SISTEMA MÁQUINA VERSUS BARRA INFINITA	168
IV.3.1	<i>Estabilizadores Derivados da Velocidade do Rotor ou da Potência Terminal</i>	169
IV.3.2	<i>Estabilizador Derivado da Integral de Potência Acelerante</i>	177
IV.4	ANÁLISE NÃO LINEAR DO ESTABILIZADOR DERIVADO DE INTEGRAL DE POTÊNCIA ACELERANTE	191
IV.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM TESTES DE CAMPO	200
IV.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	203
CAPÍTULO V CONCLUSÃO		204
V.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	204
V.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	206
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		207
APÊNDICE I		217
AI.1	DADOS PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA	217
AI.2	DADOS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS FRENTE PEQUENAS PERTURBAÇÕES	218
APÊNDICE II		219
AII.1	DADOS PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA	219

AII.2	DADOS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS FRENTE PEQUENAS PERTURBAÇÕES	222
APÊNDICE III	227
AIII.1	DADOS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS FRENTE PEQUENAS PERTURBAÇÕES	227

Lista de Figuras

FIGURA 1 – FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA $G(s)$ COM REALIMENTAÇÃO K	13
FIGURA 2 – MALHA UTILIZADA PARA CÁLCULO DOS RESÍDUOS DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$	18
FIGURA 3 – ESTIMATIVA DE GANHO UTILIZANDO RESÍDUO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	20
FIGURA 4 – MALHA UTILIZADA PARA CÁLCULO DOS RESÍDUOS DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$	21
FIGURA 5 – POSICIONAMENTO UTILIZANDO RESÍDUO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.	23
FIGURA 6 – SISTEMA TESTE I.....	28
FIGURA 7 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{1x1}$ PARA O GERADOR DE ITAIPU.	30
FIGURA 8 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2x2}$ PARA OS GERADORES DE ITAIPU E SALTO SEGREDO.	30
FIGURA 9 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{3x3}$ PARA OS GERADORES DE ITAIPU, SALTO SEGREDO E FOZ DO AREIA.	31
FIGURA 10 – CONTRIBUIÇÃO NORMALIZADA DE CADA ESP NA VARIAÇÃO DA PARTE REAL E DA PARTE IMAGINÁRIA DOS PÓLOS DE INTERESSE.	32
FIGURA 11 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPS DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 1 (TABELA 3).	36
FIGURA 12 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES (DETALHE DA FIGURA 11).....	36
FIGURA 13 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPS DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 2 (TABELA 3).	37
FIGURA 14 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES (DETALHE DA FIGURA 13).....	37
FIGURA 15 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPS DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 3 (TABELA 3).	38
FIGURA 16 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES (DETALHE DA FIGURA 15).....	38
FIGURA 17 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPS DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 4 (TABELA 4).	42
FIGURA 18 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPS DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 5 (TABELA 4).	42
FIGURA 19 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPS DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 6 (VIDE TABELA 4).....	43
FIGURA 20 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPS DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ 20 PU/PU.....	44

FIGURA 21 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPs DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 7 (VIDE TABELA 5).....	47
FIGURA 22 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPs DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES ESTIMADOS NO CASO 8 (VIDE TABELA 5).....	47
FIGURA 23 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPs DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ 15 PU/PU.....	48
FIGURA 24 – POSICIONAMENTO UTILIZANDO RESÍDUO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	54
FIGURA 25 – POSICIONAMENTO UTILIZANDO RESÍDUO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	61
FIGURA 26 – ESCOLHA DE QUANTOS PÓLOS SERÃO MONITORADOS.....	63
FIGURA 27 – ESQUEMA BÁSICO DE EXECUÇÃO.....	65
FIGURA 28 – SISTEMA TESTE I – CONFIGURAÇÃO A.....	68
FIGURA 29 – CIRCUITOS ALTERADOS NOS CASOS ANALISADOS.....	70
FIGURA 30 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2x2}$ PARA OS GERADORES DE ITAIPU E SALTO SEGREDO.....	71
FIGURA 31 – GANHOS DOS ESPs PARA DOIS AJUSTES.....	73
FIGURA 32 – GANHO MÉDIO DOS ESPs PARA OS DOIS AJUSTES.....	73
FIGURA 33 – ZEROS (O), PÓLOS EM MALHA ABERTA (X), AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS (AZUL) E AJUSTE VIA LMI (VERDE).....	74
FIGURA 34 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPs DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES MOSTRADOS NA TABELA 11.....	74
FIGURA 35 – SISTEMA TESTE I – CONFIGURAÇÃO B.....	75
FIGURA 36 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2x2}$ PARA OS GERADORES DE ITAIPU E SALTO SEGREDO.....	77
FIGURA 37 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	79
FIGURA 38 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	79
FIGURA 39 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS DOIS ESPs DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES MOSTRADOS NA TABELA 16.....	80
FIGURA 40 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES (DETALHE DA FIGURA 39).....	80
FIGURA 41 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{3x3}$ PARA OS GERADORES DE ITAIPU, SALTO SEGREDO E FOZ DO AREIA.....	81
FIGURA 42 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	82
FIGURA 43 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	82
FIGURA 44 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA VARIÇÃO SIMULTÂNEA DOS GANHOS DOS TRÊS ESPs DE ZERO (MALHA ABERTA) ATÉ OS VALORES MOSTRADOS NA TABELA 18.....	83
FIGURA 45 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES (DETALHE DA FIGURA 44).....	84
FIGURA 46 – SISTEMA TESTE II.....	85
FIGURA 47 – SISTEMA TESTE II – CIRCUITOS ALTERADOS NOS CASOS ANALISADOS.....	87
FIGURA 48 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{9x9}$ PARA OS 14 PONTOS DE OPERAÇÃO.....	88

FIGURA 49 – RELAÇÃO ENTRE GANHO NOS ESPs E MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.	90
FIGURA 50 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	91
FIGURA 51 – EVOLUÇÃO DO GANHO DE CADA ESP.	92
FIGURA 52 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.	93
FIGURA 53 – GANHOS DOS ESPs EM CADA ANÁLISE PARA OBTENÇÃO DE FATOR DE AMORTECIMENTO MÍNIMO DE 15 %.....	94
FIGURA 54 – GANHO MÉDIO DOS ESPs PARA CADA ANÁLISE.	95
FIGURA 55 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM ESPs COM GANHOS IGUAIS A 53 PU/PU (ROXO).	95
FIGURA 56 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE VIA ALGORITMO GENÉTICO (VERDE)..	96
FIGURA 57 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE COORDENADO (AZUL).....	96
FIGURA 58 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO), COM AJUSTE COORDENADO (AZUL), COM AJUSTE VIA ALGORITMO GENÉTICO (VERDE) E COM GANHOS IGUAIS A 53 PU/PU (ROXO).....	97
FIGURA 59 – MODOS DE OSCILAÇÃO ASSOCIADOS A SISTEMAS DE EXCITAÇÃO PARA OS DIFERENTES AJUSTES – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO), COM AJUSTE COORDENADO (AZUL), COM AJUSTE VIA ALGORITMO GENÉTICO (VERDE) E COM GANHOS IGUAIS A 53 PU/PU (ROXO).	97
FIGURA 60 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL NO GERADOR 38 APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO.	98
FIGURA 61 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL NO GERADOR 38 APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO (DETALHE).	98
FIGURA 62 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{9 \times 9}$ PARA OS 14 PONTOS DE OPERAÇÃO.	100
FIGURA 63 – RELAÇÃO ENTRE GANHO NOS ESPs E MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.	101
FIGURA 64 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	102
FIGURA 65 – EVOLUÇÃO DO GANHO DE CADA ESP.	102
FIGURA 66 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.	103
FIGURA 67 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	104
FIGURA 68 – EVOLUÇÃO DO GANHO DE CADA ESP.	105
FIGURA 69 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.	105
FIGURA 70 – GANHOS DOS ESPs EM CADA ANÁLISE PARA OBTENÇÃO DE FATOR DE AMORTECIMENTO MÍNIMO DE 15 %.....	107
FIGURA 71 – GANHO MÉDIO DOS ESPs PARA CADA ANÁLISE.	107
FIGURA 72 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM ESPs COM GANHOS IGUAIS A 19 PU/PU (ROXO).	108
FIGURA 73 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE COORDENADO COM GANHO MÁXIMO DE 19 PU/PU (VERDE) OU 20 PU/PU (AZUL).	108
FIGURA 74 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO), COM AJUSTE COORDENADO COM GANHO MÁXIMO DE 20 PU/PU (AZUL) OU 19 PU/PU (VERDE) E COM GANHOS IGUAIS A 19 PU/PU (ROXO).	109

FIGURA 75 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL NO GERADOR 38 APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO.	109
FIGURA 76 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL NO GERADOR 38 APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO (DETALHE).	110
FIGURA 77 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$	114
FIGURA 78 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	115
FIGURA 79 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	115
FIGURA 80 – EVOLUÇÃO DO GANHO DE CADA ESP.	116
FIGURA 81 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE COORDENADO (AZUL).....	117
FIGURA 82 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL EM ITAIPU APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO.	118
FIGURA 83 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL EM ILHA SOLTEIRA APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO.	118
FIGURA 84 – MAPA DE PÓLOS (X) E ZEROS (O) PARA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MATRICIAL $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$ PARA OS 11 PONTOS DE OPERAÇÃO.....	120
FIGURA 85 – RELAÇÃO ENTRE GANHO NOS ESPs E MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.	121
FIGURA 86 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	122
FIGURA 87 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	122
FIGURA 88 – EVOLUÇÃO DO GANHO DE CADA ESP.	123
FIGURA 89 – MATRIZ UTILIZADA NO POSICIONAMENTO PARA CÁLCULO DO VETOR DE GANHOS $\underline{\Delta K}$	124
FIGURA 90 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	126
FIGURA 91 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	126
FIGURA 92 – EVOLUÇÃO DO GANHO DE CADA ESP.	127
FIGURA 93 – MATRIZ UTILIZADA NO POSICIONAMENTO PARA CÁLCULO DO VETOR DE GANHOS $\underline{\Delta K}$	128
FIGURA 94 – EVOLUÇÃO DO MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	130
FIGURA 95 – EVOLUÇÃO DOS GANHOS DOS ESPs.....	130
FIGURA 96 – EVOLUÇÃO DO GANHO DE CADA ESP.	131
FIGURA 97 – MATRIZ UTILIZADA NO POSICIONAMENTO PARA CÁLCULO DO VETOR DE GANHOS $\underline{\Delta K}$	132
FIGURA 98 – GANHOS DOS ESPs EM CADA ANÁLISE PARA OBTENÇÃO DE FATOR DE AMORTECIMENTO MÍNIMO DE 15 %.....	133
FIGURA 99 – GANHO MÉDIO DOS ESPs PARA CADA ANÁLISE.	133
FIGURA 100 – TEMPO DE PROCESSAMENTO EM CADA ANÁLISE.	134
FIGURA 101 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM TODOS OS GANHOS IGUAIS A 19 PU/PU (MARROM).....	134
FIGURA 102 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE COORDENADO MONITORANDO 36 PÓLOS EM CADA PONTO DE OPERAÇÃO (ROXO).....	135
FIGURA 103 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE COORDENADO MONITORANDO 10 PÓLOS EM CADA PONTO DE OPERAÇÃO (VERDE).	135

FIGURA 104 – SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE COORDENADO MONITORANDO 3 PÓLOS EM CADA PONTO DE OPERAÇÃO (AZUL).	136
FIGURA 105 – PÓLOS DO SISTEMA COM MALHA ABERTA (PRETO) E COM AJUSTE COORDENADO MONITORANDO 3 PÓLOS (AZUL) E OS ZEROS (VERMELHO).	136
FIGURA 106 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL EM ÍTAIPU APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO.	137
FIGURA 107 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA TERMINAL EM ÍLHA SOLTEIRA APÓS DEGRAU DE 0,01 PU NA REFERÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO.	137
FIGURA 108 – SISTEMA SINTÉTICO PARA AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DE ESPs.	142
FIGURA 109 – FUNÇÃO DE VARIAÇÃO DO ÂNGULO $\theta_{12} = F(X_{12})$	145
FIGURA 110 – VARIAÇÃO DE POTÊNCIA NA LINHA (P_{12}) E NA CARGA (P_{SH}).	146
FIGURA 111 – PÓLO DE INTERESSE PARA VALORES DISTINTOS DE X_{12}	146
FIGURA 112 – REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO.	147
FIGURA 113 – FUNÇÃO DE VARIAÇÃO DO ÂNGULO $\theta_{12} = F(X_{12})$	148
FIGURA 114 – PÓLOS DE INTERESSE PARA VALORES DISTINTOS DE X_{12} (VARIAÇÃO DE 0,1 PU ATÉ 25 PU).	149
FIGURA 115 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA DEZ VALORES DE X_{12} (ENTRE 0,1 PU E 25PU).	149
FIGURA 116 – DETALHE DA FIGURA 115.	150
FIGURA 117 – ÂNGULO DE PARTIDA DO DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA O SISTEMA ORIGINAL (VERMELHO) E COM ESP ₁ (PRETO).	151
FIGURA 118 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA COM A INSTALAÇÃO DO ESP ₁	152
FIGURA 119 – SISTEMA ORIGINAL (VERMELHO) E COM ESP ₁ (AZUL) COM GANHO IGUAL A 5PU/PU.	153
FIGURA 120 – ÂNGULO DE PARTIDA DO DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA O SISTEMA ORIGINAL (VERMELHO) E COM ESP ₂ (PRETO).	154
FIGURA 121 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA COM A INSTALAÇÃO DO ESP ₂	155
FIGURA 122 – SISTEMA ORIGINAL (VERMELHO) E COM ESP ₂ (PRETO) COM GANHO IGUAL A 8PU/PU.	156
FIGURA 123 – ÂNGULO DE PARTIDA DO DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES PARA O SISTEMA ORIGINAL (VERMELHO) E COM ESP ₃ (PRETO).	157
FIGURA 124 – DIAGRAMA DO LUGAR DAS RAÍZES DO SISTEMA COM A INSTALAÇÃO DO ESP ₃	158
FIGURA 125 – SISTEMA ORIGINAL (VERMELHO) E COM ESP ₃ (VERDE) COM GANHO IGUAL A 30PU/PU.	159
FIGURA 126 – COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ESPs PARA O SISTEMA SINTÉTICO (SEM ESP: VERMELHO / ESP ₁ : AZUL / ESP ₂ : PRETO / ESP ₃ : VERDE).	160
FIGURA 127 – COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ESPs PARA O SISTEMA SINTÉTICO (SEM ESP: VERMELHO / ESP ₂ : PRETO / ESP ₃ : VERDE / ESP ₄ : ROXO).	161
FIGURA 128 – DIAGRAMA DE BODE PARA OS QUATRO ESPs.	162
FIGURA 129 – DETALHE DA FIGURA 128.	162
FIGURA 130 – COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM.	166
FIGURA 131 – SISTEMA MÁQUINA X BARRA INFINITA.	168
FIGURA 132 – MAPAS DE PÓLOS E ZEROS.	170

FIGURA 133 – GRANDEZAS NOS TERMINAIS DA MÁQUINA APÓS DISTÚRBO EM DEGRAU NA POTÊNCIA MECÂNICA.	172
FIGURA 134 – POTÊNCIA ATIVA TERMINAL APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	173
FIGURA 135 – GRANDEZAS NOS TERMINAIS DA MÁQUINA APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	174
FIGURA 136 – ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA UTILIZANDO SINAL DE VELOCIDADE DO ROTOR E POTÊNCIA ELÉTRICA.	176
FIGURA 137 – ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA DERIVADO DA INTEGRAL DE POTÊNCIA ACELERANTE.	176
FIGURA 138 – ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA DERIVADO DA INTEGRAL DE POTÊNCIA ACELERANTE.	177
FIGURA 139 – DIAGRAMA DE BODE PARA O FILTRO PASSA-BAIXA $F(s)$ (PRETO) E PASSA-ALTA $(1-F(s))$ (VERMELHO).	180
FIGURA 140 – ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA DERIVADO DA INTEGRAL DE POTÊNCIA ACELERANTE COM FILTRO $F(s) = 1$	181
FIGURA 141 – MAPAS DE PÓLOS E ZEROS PARA VARIAÇÕES NO FILTRO.	182
FIGURA 142 – GRANDEZAS NOS TERMINAIS DA MÁQUINA APÓS DISTÚRBO EM DEGRAU NA POTÊNCIA MECÂNICA.	185
FIGURA 143 – MAPAS DE PÓLOS E ZEROS.	186
FIGURA 144 – GRANDEZAS NOS TERMINAIS DA MÁQUINA APÓS DISTÚRBO EM DEGRAU NA POTÊNCIA MECÂNICA.	188
FIGURA 145 – POTÊNCIA ATIVA TERMINAL APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	189
FIGURA 146 – VARIAÇÃO DE GRANDEZAS NOS TERMINAIS DA MÁQUINA APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	190
FIGURA 147 – USINA DE XINGÓ.	192
FIGURA 148 – ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA DERIVADO DA INTEGRAL DE POTÊNCIA ACELERANTE COM FILTRO $F(s) = 1$	192
FIGURA 149 – ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA DERIVADO DA INTEGRAL DE POTÊNCIA ACELERANTE COM FILTRO $F(s) = 0$	192
FIGURA 150 – DESEMPENHO DA USINA APÓS DISTÚRBO EM DEGRAU NA POTÊNCIA MECÂNICA.	193
FIGURA 151 – POTÊNCIA ATIVA APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	194
FIGURA 152 – DESEMPENHO DA USINA APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	195
FIGURA 153 – DESEMPENHO DA USINA APÓS DISTÚRBO EM DEGRAU NA POTÊNCIA MECÂNICA.	197
FIGURA 154 – POTÊNCIA ATIVA APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	198
FIGURA 155 – DESEMPENHO DA USINA APÓS DISTÚRBO EM RAMPA NA POTÊNCIA MECÂNICA.	199
FIGURA 156 – COMPARAÇÃO ENTRE TESTE DE CAMPO E SIMULAÇÃO – TENSÃO TERMINAL.	200
FIGURA 157 – COMPARAÇÃO ENTRE TESTE DE CAMPO E SIMULAÇÃO – TENSÃO DE CAMPO.	201
FIGURA 158 – COMPARAÇÃO ENTRE TESTE DE CAMPO E SIMULAÇÃO – POTÊNCIA ATIVA.	201
FIGURA 159 – COMPARAÇÃO ENTRE TESTE DE CAMPO E SIMULAÇÃO – POTÊNCIA REATIVA.	202

Lista de Tabelas

TABELA 1 – MODOS DE OSCILAÇÃO ELETROMECAÂNICA DE INTERESSE.....	29
TABELA 2 – PARÂMETROS RELATIVOS AO AJUSTE DE FASE DOS ESPs.	29
TABELA 3 – ESTIMATIVAS DOS GANHOS DOS ESPs PARA VARIAÇÕES ESPECIFICADAS DA PARTE REAL DOS PÓLOS λ_1 E λ_2	35
TABELA 4 – GANHOS DOS ESPs PARA QUE AS VARIAÇÕES DESEJADAS NA PARTE REAL DE λ_1 E λ_2 SEJAM ATINGIDAS.....	41
TABELA 5 – GANHOS DOS ESPs PARA QUE AS VARIAÇÕES DESEJADAS NA PARTE REAL DE λ_1 E λ_2 SEJAM ATINGIDAS.....	46
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS PONTOS DE OPERAÇÃO ANALISADOS.....	69
TABELA 7 – MODOS DE OSCILAÇÃO ELETROMECAÂNICA DE INTERESSE.....	70
TABELA 8 – PARÂMETROS RELATIVOS AO AJUSTE DOS ESPs PROJETADOS UTILIZANDO LMI.....	71
TABELA 9 – GANHOS DOS 2 ESPs PARA ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA (LMI).....	71
TABELA 10 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	72
TABELA 11 – GANHOS DE 2 ESPs PARA ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA.....	72
TABELA 12 – CARACTERÍSTICAS DOS PONTOS DE OPERAÇÃO ANALISADOS.....	76
TABELA 13 – PARÂMETROS RELATIVOS AO AJUSTE DE FASE DOS ESPs.	76
TABELA 14 – MODOS DE OSCILAÇÃO ELETROMECAÂNICA DE INTERESSE.....	77
TABELA 15 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	78
TABELA 16 – GANHOS DOS ESPs PARA ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA.....	78
TABELA 17 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	81
TABELA 18 – GANHOS DOS 3 ESPs PARA ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA.....	83
TABELA 19 – PONTOS DE OPERAÇÃO ANALISADOS.....	86
TABELA 20 – PARÂMETROS RELATIVOS AO AJUSTE DE FASE DOS ESPs.	89
TABELA 21 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	90
TABELA 22 – OSCILAÇÃO COM MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	91
TABELA 23 – GANHOS DOS ESPs EM CADA ANÁLISE PARA OBTENÇÃO DE FATOR DE AMORTECIMENTO MÍNIMO DE 15 %.....	94
TABELA 24 – PARÂMETROS RELATIVOS AOS REGULADORES DE TENSÃO.....	99
TABELA 25 – PARÂMETROS RELATIVOS AO AJUSTE DE FASE DOS ESPs.	100
TABELA 26 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	101
TABELA 27 – OSCILAÇÃO COM MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	101
TABELA 28 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	104
TABELA 29 – OSCILAÇÃO COM MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	104

TABELA 30 – GANHOS DOS ESPs EM CADA ANÁLISE PARA OBTENÇÃO DE FATOR DE AMORTECIMENTO MÍNIMO DE 15 %.....	106
TABELA 31 – CONFIGURAÇÃO SUL-SUDESTE COM 50 GERADORES.....	112
TABELA 32 – PARÂMETROS RELATIVOS AOS REGULADORES DE TENSÃO.....	112
TABELA 33 – PARÂMETROS RELATIVOS AO AJUSTE DE FASE DOS ESPs.....	113
TABELA 34 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	114
TABELA 35 – OSCILAÇÃO COM MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	114
TABELA 36 – TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	119
TABELA 37 – PONTOS DE OPERAÇÃO ANALISADOS.....	119
TABELA 38 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	121
TABELA 39 – OSCILAÇÃO COM MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	121
TABELA 40 – TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	124
TABELA 41 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	125
TABELA 42 – OSCILAÇÃO COM MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	125
TABELA 43 – TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	128
TABELA 44 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O AJUSTE COORDENADO DOS GANHOS.....	129
TABELA 45 – OSCILAÇÃO COM MENOR FATOR DE AMORTECIMENTO.....	129
TABELA 46 – TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	132
TABELA 47 – DADOS DA USINA DE XINGÓ.....	147
TABELA 48 – DADOS DO SISTEMA SINTÉTICO.....	147
TABELA 49 – PARÂMETROS DO ESP ₁	151
TABELA 50 – PARÂMETROS DO ESP ₂	153
TABELA 51 – PARÂMETROS DO ESP ₃	156
TABELA 52 – PARÂMETROS DO ESP ₄	160
TABELA 53 – PÓLOS E ZERO DE $G(s)$	165
TABELA 54 – COMPORTAMENTO DO SISTEMA FRENTE UM DEGRAU UNITÁRIO.....	166
TABELA 55 – DADOS DA USINA DE XINGÓ.....	168
TABELA 56 – DADOS DO PONTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	169
TABELA 57 – PARÂMETROS DOS ESPs.....	170
TABELA 58 – VALORES PARA OS PARÂMETROS DO ESP.....	179
TABELA 59 – PARÂMETROS DOS FILTROS ANALISADOS.....	181
TABELA 60 – PÓLO ASSOCIADO AO MODO ELETROMECHANICO.....	183
TABELA 61 – POSIÇÃO DO ZERO REAL POSITIVO.....	183
TABELA 62 – PÓLO ASSOCIADO AO MODO ELETROMECHANICO.....	187
TABELA 63 – POSIÇÃO DO ZERO REAL POSITIVO.....	187

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações Gerais

A função principal dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é converter e transportar aos consumidores a energia naturalmente disponível sob alguma outra forma. Por exemplo, converter e transportar ao consumidor a energia potencial da água ou a energia liberada pela queima de combustíveis fósseis. O consumidor, por sua vez, utiliza a energia elétrica em forma de luz, calor ou energia mecânica. A grande vantagem da utilização de energia elétrica é a possibilidade que temos de transportá-la com razoável facilidade e grande nível de eficiência e confiabilidade [Kundur 1994].

Um SEP devidamente projetado e operado deve obedecer aos seguintes requisitos fundamentais:

- O sistema deve ser capaz de suportar as mudanças de carga que ocorrem continuamente;
- O sistema deve suprir a demanda com o menor custo econômico e ecológico possível;
- A energia fornecida deve ser de qualidade, possuindo desempenho mínimo relativo à variação de frequência, à variação de tensão e ao nível de confiabilidade.

Para atingir esses requisitos, os SEPs possuem vários níveis de controle com inúmeros dispositivos. Grandes problemas raramente são causados por falha de um

único equipamento. Normalmente, apenas uma combinação de vários fatores leva o sistema a operar além de seus limites, causando um problema global.

Os SEPs são sistemas dinâmicos, de grande porte e extremamente não lineares. Por causa de sua dimensão e complexidade, é essencial fazer simplificações na análise de cada um dos fenômenos a serem avaliados. Desta forma, o nível de detalhe da representação do sistema a ser utilizada depende fundamentalmente do estudo a ser feito [Kundur 1994].

O problema de estabilidade frente pequenas perturbações envolve a capacidade do sistema em manter suas máquinas em sincronismo quando submetido a variações de pequena escala. Estas alterações ocorrem continuamente no sistema, devido a constante variação de carga e, conseqüentemente, de geração. Estes distúrbios são considerados suficientemente pequenos para que a análise deste problema seja feita utilizando técnicas de análise linear. Assim, o sistema de equações que modelam o SEP é linearizado em torno de um determinado ponto de operação.

Após pequenos distúrbios, a ausência de torque sincronizante ou a ausência de torque amortecedor nas máquinas podem causar aumento contínuo ou oscilações crescentes do ângulo do rotor, indicando que o ponto de operação analisado é instável. A utilização de reguladores de tensão eficientes nas máquinas aumenta o torque sincronizante da máquina, em detrimento do torque amortecedor. Sistemas de excitação estáticos, com constante de tempo pequena e alto ganho, criam a necessidade de inclusão de um sinal adicional estabilizador na malha de controle, com a função de aumentar o torque amortecedor. O equipamento responsável por este sinal adicional é o Estabilizador de Sistema de Potência (ESP).

Em sistemas de grande porte, os problemas relacionados com oscilações eletromecânicas podem ser de ordem local ou global [Kundur 1988, Kundur 1994]:

- Problemas Locais: oscilações eletromecânicas associadas a uma máquina ou usina oscilando contra o resto do sistema (modo de oscilação local). Podem ocorrer ainda oscilações entre máquinas próximas ou na mesma usina (modo de oscilação intraplanta). Essas oscilações normalmente variam de 0,7 Hz a 2,0 Hz. Existem também

outras oscilações relacionadas com ajustes inadequados de controles (modos de controle) [CIGRE 2000] e com interações dinâmicas envolvendo o sistema de eixos do conjunto turbina-gerador (modos torcionais) [Kundur 1994].

- Problemas Globais: oscilações eletromecânicas causadas pela interação de grupos de máquinas em grandes sistemas interligados. Dois tipos de oscilações entre áreas ocorrem, em geral, em sistemas interligados. Oscilações de 0,1 Hz a 0,3 Hz (0,2 Hz, no caso da Interligação Norte-Sul do Sistema Brasileiro) envolvendo todas as máquinas das regiões envolvidas e oscilações de frequência um pouco maiores (0,4 Hz a 0,7 Hz) envolvendo subgrupos de máquinas.

Oscilações eletromecânicas crescentes ou pouco amortecidas têm sido observadas em SEPs em todo o mundo [Kundur 1994, IEEE 1995]. Observações no sistema real, entretanto, nem sempre são consistentes com as simulações. Nas últimas três décadas houve intenso esforço de pesquisa e desenvolvimento no sentido de melhor modelar e disponibilizar ferramentas capazes de retratar e analisar de maneira eficaz o comportamento do sistema. Nos últimos anos, a ênfase tem sido deslocada para o melhor uso dessas ferramentas desenvolvidas, garantindo a operação confiável dos SEP com um grande número de controles [CIGRE 2000].

Esta tese apresenta contribuições para a análise linear dos SEPs, ao tratar três assuntos distintos relacionados com a estabilização destes sistemas.

O primeiro assunto abordado é o ajuste coordenado dos ganhos dos ESPs. Assim como em [CIGRE 2000], o termo ‘coordenado’ utilizado nesta tese refere-se ao ajuste realizado de forma simultânea dos controladores para que sejam obtidas melhorias no desempenho do sistema.

A inclusão de novos equipamentos para estabilização do sistema e a operação em condições mais severas tornam necessário o desenvolvimento de métodos eficientes que sejam capazes de lidar com a coordenação dos equipamentos de sistemas de grande porte [CIGRE 2000].

Em [IEEE 1995, Hauer 1995] é salientado que a proliferação de equipamentos de controle sem o devido cuidado de coordenar adequadamente a sua atuação conjunta é caminho certo para obtenção de interações adversas e eventualmente problemas de estabilidade.

O segundo assunto tratado é a robustez de controladores. É proposta uma nova metodologia para avaliação rápida da robustez do conjunto máquina-regulador de tensão-estabilizador em sistemas de grande porte. Um teste rápido é muito útil para os estudos práticos de sistemas de grande porte. Antes do início do estudo propriamente dito é possível identificar eventuais anomalias nos dados (erros na preparação dos arquivos) ou nos ajustes (eventualmente inadequados para determinados pontos de operação).

O terceiro assunto abordado na tese é a importância da escolha dos sinais de realimentação dos ESPs e de suas estruturas de controle. É mostrado como o desempenho de tensão e de potência reativa na barra terminal das usinas pode ser deteriorado devido a impactos adversos causados por ESPs. É apresentada uma análise de algumas características de um ESP real amplamente utilizado em toda América Latina.

I.2 Estrutura da Tese

No Capítulo II é apresentada uma nova metodologia para obtenção do ajuste coordenado dos ganhos de ESPs. Isto é feito através do posicionamento parcial simultâneo de pólos, utilizando o método de Newton-Raphson e a informação fornecida pelos resíduos da função de transferência da malha de controle do ESP ($\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}$) associada aos autovalores críticos. Os resultados mostram o ajuste coordenado para múltiplos pontos de operação em três sistemas teste, sendo o de maior porte relativo a uma configuração do sistema Sul-Sudeste Brasileiro.

No Capítulo III é desenvolvida uma metodologia para avaliação da robustez de ESPs, através da utilização de um sistema sintético de duas barras que permite verificar

a performance dos controladores. O sistema sintético aqui proposto permite verificar o comportamento conjunto máquina-regulador de tensão-estabilizador frente oscilações eletromecânicas de diferentes frequências, de natureza intraplanta até entre áreas. Os resultados mostram o desempenho de diferentes ajustes de controladores.

No Capítulo IV são analisados os eventuais impactos adversos causados por ESPs no desempenho de tensão e de potência reativa terminal frente perturbações na potência mecânica da unidade geradora. Este é um fenômeno dinâmico importante em SEPs que foi muito pouco explorado na literatura internacional.

O Capítulo V apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

O Matlab [Mathworks 2000] é o ambiente de desenvolvimento predominante nesta tese. Foram também utilizados os programas PacDyn (Programa de Análise de Estabilidade Frente Pequenas Perturbações), ANAREDE (Programa de Análise de Redes), ANATEM (Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos) e PlotCEPEL (Programa de Visualização de Gráficos), desenvolvidos pelo CEPEL [CEPEL 2002a, CEPEL 2002b, CEPEL 2002c, CEPEL 2002d].

I.3 Publicações

A seguir é apresentada a lista de publicações realizadas durante o período de doutoramento.

I) Publicações Relacionadas com a Tese

J. C. R. FERRAZ, N. Martins, N. Zeni Jr., J. M. C. Soares, G. N. Taranto, “Adverse Increase in Generator Terminal Voltage and Reactive Power Transients Caused by Power System Stabilizers”, Aceito com mudanças obrigatórias para publicação no IEEE Transactions on Power Systems.

J. C. R. FERRAZ, N. Martins, N. Zeni Jr., J. M. C. Soares, G. N. Taranto, “Adverse Increase in Generator Terminal Voltage and Reactive Power Transients Caused by Power System Stabilizers”. In: *Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting 2002*, New York, USA, January 2002.

N. Martins, S. Gomes Jr., P. E. M. Quintão, J. C. R. FERRAZ, S. L. Varrichio, A. de Castro, “Some Recent Developments in Small-Signal Stability and Control”. In: *Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting 2002*, New York, USA, January 2002.

J. C. R. FERRAZ, N. Martins, G. N. Taranto, “Simultaneous Partial Pole Placement for Power System Oscillation Damping Control”. In: *Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting 2001*, Columbus, USA, January 2001.

J. C. R. FERRAZ, N. Martins, G. N. Taranto, S. L. Varricchio, “Método de Newton-Raphson para Posicionamento Parcial Simultâneo de Múltiplos Pólos”. In: *Anais do XII CBA*, pp. 1667-1672, Florianópolis, Brasil, Setembro 2000.

Contribuição à Força Tarefa Internacional do CIGRE TF 38.02.16 – Impact of Interactions Among Power System Controls, *CIGRE Technical Brochure no. 166*, Paris, August 2000.

N. Martins, A. A. Barbosa, J. C. R. FERRAZ, M. G. dos Santos, A. L. Bérghamo, C. S. Yung, V. R. Oliveira, N. J. P. Macedo, “Retuning Stabilizers for the North-South Brazilian Interconnection”. In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting 1999*, Edmonton, Canada, July 1999.

II) Outras Publicações

J. R. M. Bonato, J. C. R. FERRAZ, R. Prada, N. Martins “Controle Coordenado de Tensão em Usinas Termonucleares”. Aceito para publicação nos anais do XXII SNPTEE, Maio 2003.

R. M. Henriques, N. Martins, J. C. R. FERRAZ, H. J. C. P. Pinto, A. C. B. Martins, S. Carneiro Jr., “Impact of Induction Motors Loads into

Voltage Stability Margins of Large Systems”. In: *Proceedings of PSCC 2002*, Seville, Spain, June 2002.

J. A. Cavalcanti, H. J. C. P. Pinto, J. C. R. FERRAZ, “Uma Abordagem AC/DC para Expansão de Redes de Transmissão Utilizando a Metodologia do Fluxo de Potência Continuado e Heurísticas Matemáticas”. In: *Anais do VII SEPOPE*, Brasília, Brasil, Maio 2002.

J. A. Passos F^o, N. Martins, J. C. R. FERRAZ; D. M. Falcão; H. J. C. P. Pinto, “Modelagem de Chaveamento Automático de Bancos de Capacitores/Reatores para Estudos com Fluxo de Potência Continuado”. In: *Anais do VII SEPOPE*, Brasília, Brasil, Maio 2002.

R. M. Henriques, N. Martins, J. C. R. FERRAZ, A. C. B. Martins, H. J. C. P. Pinto, S. Carneiro Jr., “Impact of Induction Motor Loads Into Voltage Stability Margins of Large Systems - Rio Area Analysis”. In: *Anais do VII SEPOPE*, Brasília, Brasil, Maio 2002.

C. B. Gomes, N. Martins, G. N. Taranto, J. C. R. FERRAZ, M. G. dos Santos, “Estudos Preliminares da Aplicação de Controle Coordenado de Tensão na Área Rio”. In: *Anais do VII SEPOPE*, Brasília, Brasil, Maio 2002.

C. B. Gomes, N. Martins, M. G. dos Santos, G. N. Taranto, J. C. R. FERRAZ, S. Gomes Jr., “Estudos Preliminares da Aplicação de Controle Coordenado de Tensão na Área Rio”. In: *Anais do VII EDAO*, Foz do Iguaçu, Brasil, Março 2002.

Contribuição à Força Tarefa Internacional do CIGRE TF 38.02.23 – Coordinated Voltage Control in Transmission Networks, CIGRE *Draft Version*, 2002.

N. Martins, J. C. R. FERRAZ, S. Gomes Jr., P. E. M. Quintão, J. A. Passos F^o, “A Demonstration Example of Secondary Voltage Regulation: Dynamic Simulation and Continuation Power Flow Results”. In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting 2001*, Vancouver, Canada, July 2001.

Colaboração à Força Tarefa de Colapso de Tensão, CCPE – Ministério de Minas e Energia, Novembro 2000.

J. C. R. FERRAZ, N. Martins, H. J. C. P. Pinto, D. M. Falcão, “Fluxo de Potência Continuado e Análise Modal na Avaliação e Melhoria da Estabilidade de Tensão do Sistema Sul-Sudeste”. In: *Anais do VII SEPOPE*, Curitiba, Brasil, Maio 2000.

N. Martins, P. E. M. Quintão, H. J. C. P. Pinto, A. Castro, S. Gomes Jr., J. C. R. FERRAZ, “A Small-Signal Stability Program Incorporating Advanced Graphical User Interface”, In: *Anais do VII SEPOPE*, Curitiba, Brasil, Maio 2000.

H. J. C. P. Pinto, J. L. R. Pereira, N. Martins, J. A. Passos F^o, S. Gomes Jr., F. R. M. Alves, J. C. R. FERRAZ, R. M. Henriques, V. M. da Costa, “Needs and Improvements in Power Flow Analysis”. In: *Anais do VII SEPOPE*, Curitiba, Brasil, Maio 2000.

Capítulo II

Ajuste Coordenado dos Ganhos de Estabilizadores de Sistemas de Potência

II.1 Considerações Gerais

A análise de estabilidade frente pequenas perturbações em sistemas de potência é realizada através de análise linear. Estão envolvidas neste processo questões relacionadas tanto com a determinação dos modos de oscilação críticos quanto com a escolha da melhor estratégia de controle. A avaliação é realizada buscando atender os critérios de estabilidade pré-estabelecidos. A determinação do tipo de controle a ser utilizado e de qual o melhor local do sistema para a instalação deste controle deve ser feita de modo que um determinado critério de amortecimento existente seja cumprido da maneira mais eficiente possível.

O procedimento de estudo das oscilações eletromecânicas, recomendado em [CIGRE 1996], envolve a utilização de análise linear complementada por simulações das equações não lineares no domínio do tempo. As etapas deste procedimento podem ser divididas de forma concisa em três partes:

- Determinação dos modos críticos de oscilação eletromecânica, ou seja, aqueles que possuem fator de amortecimento negativo ou abaixo de um mínimo estabelecido;
- Análise linear detalhada para determinar a natureza dos modos críticos, a causa do pouco amortecimento, e desenvolver ações de controle (determinação dos equipamentos onde a instalação de

dispositivos seria mais efetiva para o amortecimento dos modos críticos);

- Simulação dos modelos não lineares no domínio do tempo para confirmar o resultado obtido na análise linear e verificar os impactos das não linearidades no amortecimento dos modos críticos.

A etapa de desenvolvimento e ajuste dos controles é sem dúvida a mais complicada. A base para o projeto da maioria dos estabilizadores em operação no mundo hoje foi fornecida por [De Mello 1969]. Baseado no conceito de torque sincronizante e torque amortecedor, foi apresentado um método para ajuste de Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP) utilizando um sistema máquina-barras infinita. Uma série de publicações apresentam aspectos práticos da implementação e ajuste desse ESP [De Mello 1978, Gooi 1981, IEEE 1981, Larsen 1981a, Larsen 1981b, Larsen 1981c, Farmer 1982].

O problema de coordenação dos ESPs em sistemas multi-máquinas é estudado há décadas em todo o mundo [Sandell 1978, Doraiswami 1981, Fleming 1981, Lefebvre 1982, Abe 1983, Abdalla 1983, Doi 1984, Gibbard 1988]. Levando em consideração que existe um número grande de ESPs e que o sistema deve ter desempenho dentro de parâmetros especificados em vários pontos de operação, procedimentos seqüenciais de ajuste demandam muito tempo.

A ordem de grandeza do tempo utilizado para o ajuste seqüencial de cada ESP para cada ponto de operação em sistemas de grande porte é de meses, como descrito em [Martins 1999] para o caso da Interligação Norte-Sul no Brasil, e em [Barbosa 1999] para o Sistema Interligado Argentino. Desta forma, é clara a utilidade do desenvolvimento de ferramentas que aumentem o nível de automação de um estudo de coordenação em sistemas de grande porte.

Em [CIGRE 2000] são apresentadas diferentes abordagens para coordenação dos controladores de sistemas de grande porte. A primeira utiliza programação linear e o conceito de torque amortecedor para ajustar os ganhos dos ESPs. A compensação de fase é feita uma única vez no início do processo levando em consideração a

característica PVr de cada gerador [Gibbard 1988, Gibbard 1991, Vowles 1997, Pourbeik 1998, Gibbard 1999].

A segunda abordagem é baseada na aplicação de uma técnica de controle ótimo para coordenar os controladores do sistema. A solução do problema LQR (*Linear Quadratic Regulator*) fornece a estratégia de controle a ser utilizada [Sanchez-Gasca 1989, Sanchez-Gasca 1998].

A terceira abordagem [Freitas 1995] utiliza posicionamento parcial de pólos de forma não simultânea, baseado no trabalho inicialmente proposto por [Elangovan 1987]. Cada controlador tem seus parâmetros ajustados em seqüência, uma iteração do procedimento termina quando todos os controladores tiverem seus parâmetros ajustados. Outros exemplos da utilização de posicionamento de pólos são apresentadas em [Yu 1989, Chow 1988, Araujo 2000].

Outra abordagem utiliza a equação generalizada de Riccati para obter uma solução ótima do problema de coordenação [Costa 1997]. Em [Bazanella 1995] é apresentado um método que fornece solução robusta, porém a dimensão do problema é restrita. Em [Bazanella 1997, Boukarim 2000] a utilização de LMI (*Linear Matrix Inequalities*) fornece soluções robustas, mas também com restrições na dimensão do problema a ser analisado.

O ajuste coordenado e robusto também foi investigado em [Yu 1986, Chen 1987a, Chen 1987b, Silva 1992, Taranto 1994, Taranto 1995, Pellanda 1996, Taranto 1997, Bourlès 1997, Yoshimura 1999].

Outra abordagem analisada em [CIGRE 2000] foi a coordenação simultânea realizada utilizando Algoritmo Genético (AG) [Falcão 1997]. Neste caso múltiplos cenários são avaliados de forma simultânea e a solução garante o desempenho adequado do sistema [Bomfim 1999, Bomfim 2000a, Bomfim 2000b].

Neste capítulo é apresentada uma nova metodologia de ajuste coordenado. O método avalia de forma adequada e simultânea múltiplos cenários, fornecendo soluções robustas para sistemas de grande porte. O algoritmo desenvolvido é fundamentalmente um procedimento de posicionamento de pólos modificado. A influência de cada

controlador em cada pólo é avaliada a partir da informação de sensibilidade modal, contida nos resíduos de funções de transferência da malha de controle do ESP ($\Delta V_{PSS}/\Delta V_{REF}$) associados aos modos de oscilação críticos.

Em [Gibbard 1988, Gibbard 1991, Vowles 1997, Pourbeik 1998, Gibbard 1999] é salientado o fato verificado na prática (em campo) que a compensação de fase a ser provida pelo ESP permanece praticamente invariável para uma faixa consideravelmente grande de condições de operação e configurações. Desta forma, o ajuste de fase do ESP é considerado previamente ajustado. A análise concentra-se, portanto, no ajuste dos valores adequados para os ganhos dos ESPs.

A metodologia é avaliada na coordenação dos ESPs de três sistemas teste e o procedimento utilizado na estabilização do sistema considera adequadamente vários cenários de operação.

Na Seção II.2 é apresentada a metodologia básica para utilização de resíduos de funções de transferência no posicionamento de pólos. Na Seção II.3 o conceito é aplicado num sistema teste de pequeno porte. Na Seção II.4 o algoritmo final é apresentado e na Seção II.5, II.6 e II.7 são apresentados os resultados finais para três sistemas (de pequeno, médio e grande porte) em múltiplos pontos de operação.

II.2 Metodologia

A seguir são apresentados os conceitos básicos da metodologia desenvolvida nesta tese para posicionamento de pólos (Seção II.2.1). Em seguida é mostrado como avaliar a contribuição de cada controlador no esforço de controle (Seção II.2.2) e o algoritmo básico para posicionamento de pólos (Seção II.2.3). Finalmente, na Seção II.2.4, é descrita a maneira de se tratar problemas onde não existe solução única (problemas sem solução exata ou com número infinito de soluções).

II.2.1 Conceitos Básicos

Nesta seção são apresentados os conceitos fundamentais envolvendo a importante relação entre as seguintes grandezas:

- Variação do ganho da malha de realimentação;
- Variação da posição de um determinado pólo do sistema;
- Resíduo da função de transferência associado a esse pólo.

Seja um sistema de controle compreendido de uma função de transferência $G(s)$ com uma malha de realimentação negativa com ganho K (Figura 1). A função $G(s)$ pode ser expressa como em (II.1), onde z_i , λ_i e R_i são respectivamente os zeros, pólos e resíduos de $G(s)$.

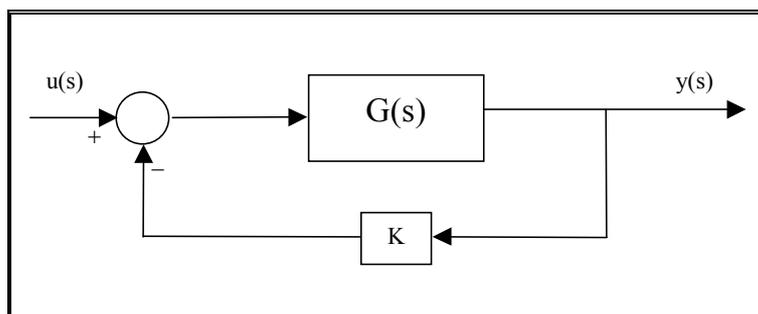


Figura 1 – Função de transferência $G(s)$ com realimentação K .

$$G(s) = \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i}{s - \lambda_i} \right) \quad m \leq n \quad (\text{II.1})$$

Reescrevendo a equação (II.1), temos:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i}{s - \lambda_i} \right) = \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)}. \quad (\text{II.2})$$

Isolando da equação (II.2) o termo referente ao i -ésimo resíduo (R_i):

$$\frac{R_i}{s - \lambda_i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \left(\frac{R_j}{s - \lambda_j} \right) = \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)}; \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{R_i}{s - \lambda_i} = \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \left(\frac{R_j}{s - \lambda_j} \right); \quad (\text{II.4})$$

$$R_i = \left[\frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \left(\frac{R_j}{s - \lambda_j} \right) \right] (s - \lambda_i). \quad (\text{II.5})$$

Simplificando a equação (II.5):

$$R_i = \left[\frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)} \right] (s - \lambda_i) - \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \left(\frac{R_j}{s - \lambda_j} \right) \right] (s - \lambda_i); \quad (\text{II.6})$$

$$R_i = \left[\frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (s - \lambda_j)} \right] - \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \left(\frac{R_j}{s - \lambda_j} \right) \right] (s - \lambda_i); \quad (\text{II.7})$$

$$R_i = \left. \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (s - \lambda_j)} \right|_{s=\lambda_i}. \quad (\text{II.8})$$

A equação (II.8) mostra o valor do resíduo R_i da função de transferência $G(s)$ associado ao i -ésimo pólo λ_i .

Vejam agora como varia a posição de um determinado pólo do sistema, quando o ganho da malha de realimentação é alterado $\left(\frac{ds}{dK} \right)$.

Sejam $G(s)$ e $F(s)$ as funções de transferência de malha aberta e de malha fechada respectivamente:

$$G(s) = \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)}; \quad (\text{II.9})$$

$$F(s) = \frac{G(s)}{1 + KG(s)}. \quad (\text{II.10})$$

Substituindo (II.9) em (II.10), temos:

$$F(s) = \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\left[\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i) \right] + K \left[\prod_{i=1}^m (s - z_i) \right]}. \quad (\text{II.11})$$

Seja $D(s)$ o denominador de $F(s)$, expresso na equação (II.12).

$$D(s) = \left[\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i) \right] + K \left[\prod_{i=1}^m (s - z_i) \right] \quad (\text{II.12})$$

Os pólos do sistema são dados pela solução de $D(s) = 0$. Deseja-se encontrar $\frac{ds}{dK}$, assim temos:

$$\frac{\partial D(s)}{\partial s} ds + \frac{\partial D(s)}{\partial K} dK = 0; \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{ds}{dK} = - \frac{\frac{\partial D(s)}{\partial K}}{\frac{\partial D(s)}{\partial s}}. \quad (\text{II.14})$$

Ou ainda,

$$\frac{ds}{dK} = - \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\frac{d}{ds} \left[\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i) \right]}; \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{ds}{dK} = - \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{d}{ds} (s - \lambda_i) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (s - \lambda_j) \right]}; \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{ds}{dK} = - \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\sum_{i=1}^n \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (s - \lambda_j) \right]}. \quad (\text{II.17})$$

Calculando $\frac{ds}{dK}$ para o i -ésimo pólo λ_i , ou seja $\left. \frac{ds}{dK} \right|_{s=\lambda_i}$, temos:

$$\left. \frac{ds}{dK} \right|_{s=\lambda_i} = - \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\sum_{i=1}^n \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (s - \lambda_j) \right]} \Bigg|_{s=\lambda_i} ; \quad (II.18)$$

$$\left. \frac{ds}{dK} \right|_{s=\lambda_i} = - \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (s - \lambda_j)} \Bigg|_{s=\lambda_i} . \quad (II.19)$$

Desta forma, de (II.8) e (II.19) temos:

$$\left. \frac{ds}{dK} \right|_{s=\lambda_i} = - \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (s - \lambda_j)} \Bigg|_{s=\lambda_i} = -R_i . \quad (II.20)$$

Ou seja:

$$\frac{d\lambda_i}{dK} = -R_i . \quad (II.21)$$

A equação (II.21) mostra que a variação de um determinado pólo em função da variação incremental do ganho de realimentação é dada pelo resíduo da função de transferência $G(s)$ relativo a este pólo.

A informação fornecida pelos resíduos [Pagola 1989, IEEE 1989, Martins 1990] é utilizada tanto na seleção dos geradores a serem equipados com ESPs, como também no ajuste destes ESPs. Neste trabalho, esta informação é utilizada também na coordenação dos ganhos dos ESPs do sistema.

II.2.2 Contribuição de cada ESP no Esforço de Controle e Estimativa dos Ganhos

A equação (II.21), para o caso do ESP, estabelece que:

$$\frac{d\lambda_i}{dK} = R\left(\frac{\Delta V_{ESPj}}{\Delta V_{REFj}}, \lambda_i\right). \quad (II.22)$$

Onde o termo à direita da equação corresponde à notação aqui adotada para o resíduo da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ associada ao ESP instalado no gerador j , relativo ao pólo λ_i . No caso do ESP, como a realimentação é normalmente positiva (por exemplo, vide Figura 2) não há na equação (II.22) o sinal negativo apresentado na equação (II.21).

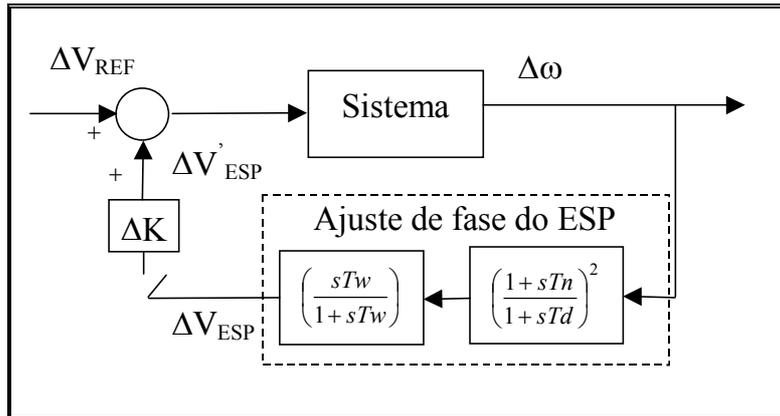


Figura 2 – Malha utilizada para cálculo dos resíduos da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$.

Como demonstrado em [Varricchio 1999], tem-se que:

$$\frac{d \operatorname{Re}[\lambda_i]}{dK} = \operatorname{Re}\left[\frac{\Delta\lambda_i}{\Delta K}\right] = \operatorname{Re}\left[R\left(\frac{\Delta V_{ESPj}}{\Delta V_{REFj}}, \lambda_i\right)\right]. \quad (II.23)$$

Para um ESP com a estrutura mostrada em (II.24), o resíduo da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ (Figura 2) fornece uma estimativa linear do ganho de realimentação K que resulta numa variação especificada na parte real do pólo λ_i . Como mencionado na Seção II.1, o ajuste de fase do ESP é previamente realizado.

$$ESP(s) = K \left(\frac{sTw}{1+sTw} \right) \left(\frac{1+sTn}{1+sTd} \right)^2 \quad (\text{II.24})$$

Onde:

$K \Rightarrow$ Ganho do ESP;

$$\left(\frac{sTw}{1+sTw} \right) \left(\frac{1+sTn}{1+sTd} \right)^2 \Rightarrow \text{Ajuste de fase do ESP.}$$

A variação incremental da parte real de, por exemplo, dois pólos de interesse λ_1 e λ_2 devido a variação simultânea nos ganhos dos ESPs instalados em dois geradores do sistema é dada pela equação matricial de sensibilidade mostrada em (II.25).

$$\begin{bmatrix} \text{Re}[\Delta\lambda_1] \\ \text{Re}[\Delta\lambda_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) & R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \right] \\ \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) & R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Onde:

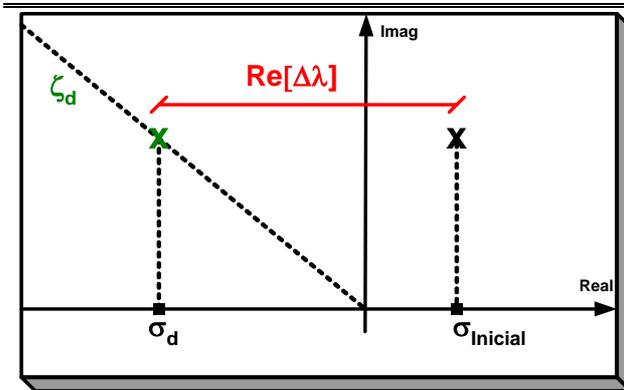
$\text{Re}[\Delta\lambda_i] \Rightarrow$ Parte real da variação do pólo λ_i ;

$\text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESPj}}{\Delta V_{REFj}}, \lambda_i \right) \right] \Rightarrow$ Parte real do resíduo associado à FT do gerador j e do pólo λ_i ;

$\Delta K_j \Rightarrow$ Variação no ganho do ESP $_j$.

A equação (II.25) pode ser utilizada de duas formas:

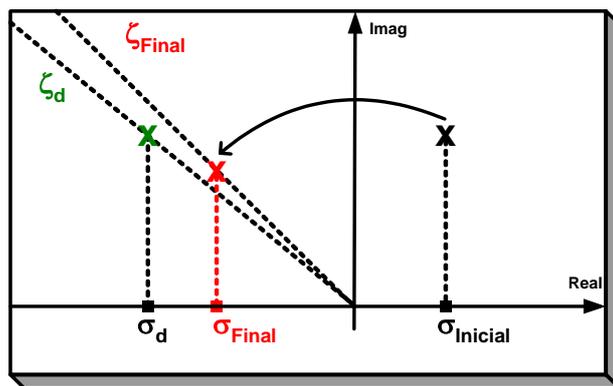
- A partir de valores especificados de variação dos ganhos dos ESPs (vetor $\underline{\Delta K}$), podem ser obtidas as contribuições dos ESPs (individual ou combinada) no amortecimento dos dois pólos;
- A partir de variações impostas nos pólos, podem ser estimados os valores necessários para os ganhos dos ESPs (Figura 3).



A posição inicial do pólo indica que o sistema é instável. O objetivo é posicioná-lo em local adequado do semiplano esquerdo do plano complexo.

$$\Delta K = \left[\text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \right] \right]^{-1} \text{Re}[\Delta\lambda]$$

Utilizando a $Re[R]$ estima-se que a variação ΔK deve ser feita para que ocorra a variação $Re[\Delta\lambda]$ na posição do pólo.



Com o novo ganho ($K+\Delta K$) o pólo tem sua nova posição calculada. Como o resíduo fornece uma informação linear, é provável a existência de diferença entre o valor desejado e a posição final efetiva.

Figura 3 – Estimativa de ganho utilizando resíduo de função de transferência.

II.2.3 Posicionamento Parcial Simultâneo de Múltiplos Pólos Através do Método de Newton-Raphson Utilizando Resíduos de Funções de Transferência

O posicionamento parcial dos pólos pode ser feito utilizando os resíduos da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ (Figura 4).

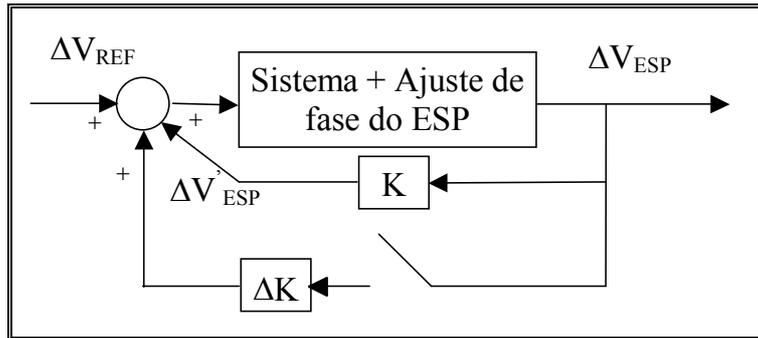


Figura 4 – Malha utilizada para cálculo dos resíduos da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$.

O objetivo principal é determinar os novos valores dos ganhos dos ESPs para que os pólos críticos se desloquem o necessário para que um determinado critério de amortecimento modal seja atingido. Este critério pode estabelecer, por exemplo, o valor da parte real do pólo associado a esse modo.

O problema pode ser formulado da seguinte forma, sejam:

- σ_d o valor desejado para a parte real de um pólo λ ;
- $f(K)$ a função que expressa a variação da parte real do pólo em função do ganho K do ESP.

Deseja-se encontrar o valor de K tal que a condição $f(K) = 0$ seja satisfeita. A partir do valor inicial do pólo λ e do valor desejado σ_d , o problema expresso na equação (II.26) pode ser resolvido através do processo iterativo de Newton-Raphson.

$$f(K) = \text{Re}[\lambda(K)] - \sigma_d \quad (\text{II.26})$$

Para calcular o incremento de ganho a cada iteração (II.27), utiliza-se a relação descrita em (II.28).

$$\Delta \operatorname{Re}[\lambda] = \frac{d \operatorname{Re}[\lambda]}{dK} \Delta K \quad (\text{II.27})$$

$$\frac{d \operatorname{Re}[\lambda]}{dK} = \operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \right] \quad (\text{II.28})$$

O processo é descrito no algoritmo apresentado a seguir. Por simplicidade, a formulação do método de Newton-Raphson foi descrita para o caso de posicionamento de um pólo através da variação do ganho de um único ESP. A convergência ocorre quando o incremento de ganho ΔK causa uma variação no pólo $\Delta \lambda$ menor que uma certa tolerância especificada.

início

➤ Cálculo do pólo λ e do resíduo R da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ associado a λ ;

➤ Cálculo de $K^{i+1} = K^i + \Delta K$, onde

$$\Delta K = \left[\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \right] \right]^{-1} \operatorname{Re}[\Delta \lambda];$$

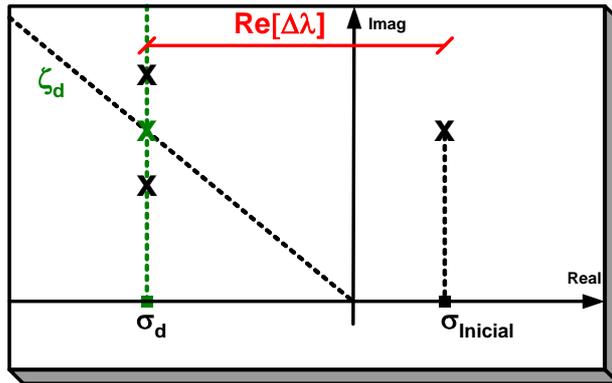
➤ Cálculo do novo pólo λ e do novo resíduo R associado;

➤ Enquanto a variação $(\operatorname{Re}[\lambda(K^{i+1})] - \sigma_d)$ for maior que a tolerância, incrementar o contador ($i=i+1$) e retornar ao início.

fim

Este método permite calcular os ganhos dos ESPs tal que a parte real dos pólos de interesse tenham os valores desejados. Neste caso, a parte imaginária do pólo não é controlada, podendo variar livremente.

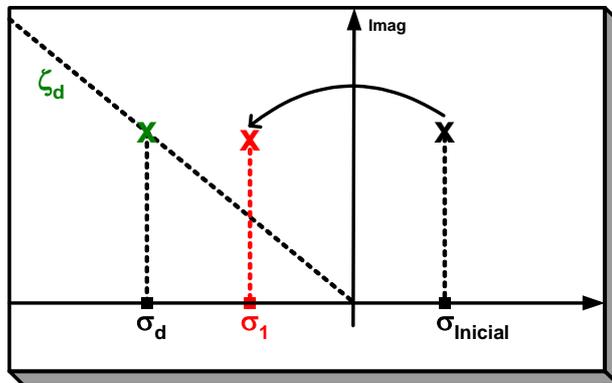
Para o caso de um ganho ser variado para obter a variação do posicionamento de um pólo, o que se busca é a interseção do diagrama do lugar das raízes com a reta $\operatorname{Re}[\Delta \lambda] = \sigma_d$. A Figura 5 ilustra o algoritmo.



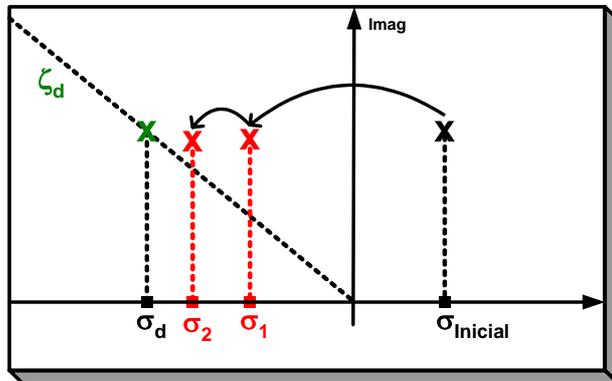
A posição inicial do pólo indica que o sistema é instável. O objetivo é posicioná-lo em local adequado do semiplano esquerdo do plano complexo. O algoritmo descrito anteriormente encontrará (caso exista) solução na reta $Re[\lambda] = \sigma_d$. A parte imaginária do pólo não é controlada, podendo variar livremente.

$$\Delta K = \left[\text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \right] \right]^{-1} \text{Re}[\Delta\lambda]$$

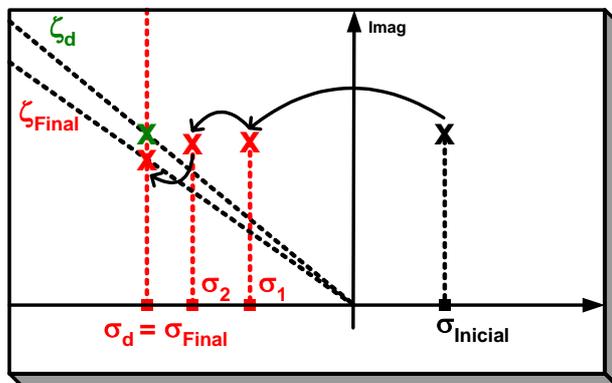
O cálculo da variação ΔK é feita utilizando $Re[R]$. A variação deve ser feita para que ocorra a variação $Re[\Delta\lambda]$ na posição do pólo.



Com o novo ganho ($K+\Delta K$) o pólo tem sua nova posição calculada, assim como o novo resíduo associado.



O processo é repetido enquanto o erro ($Re[\Delta\lambda] - \sigma_d$) for maior que uma determinada tolerância.



Havendo solução, a posição final efetiva será o valor desejado da parte real do pólo (considerando uma tolerância especificada). Como a parte imaginária não é controlada, não há garantia que o fator de amortecimento será o desejado.

Figura 5 – Posicionamento utilizando resíduo de função de transferência.

II.2.4 Cálculo do Vetor de Variação dos Ganhos dos Controladores ($\underline{\Delta K}$)

Parte fundamental do algoritmo descrito na seção anterior, o cálculo do vetor de variação dos ganhos dos controladores é feito solucionando o problema descrito em (II.29), onde m representa o número de pólos a serem posicionados e n representa o número de controladores utilizados no posicionamento.

$$\operatorname{Re}[R]_{m \times n} \underline{\Delta K}_{n \times 1} = \operatorname{Re}[\underline{\Delta \lambda}]_{m \times 1} \quad (\text{II.29})$$

Este é um problema do tipo (II.30), onde a forma de obtenção do vetor $\underline{x}_{n \times 1}$ depende dos valores de m e n .

$$A_{m \times n} \underline{x}_{n \times 1} - \underline{b}_{m \times 1} = \underline{0}_{m \times 1} \quad (\text{II.30})$$

Se $m = n$ e a matriz A é não-singular, a solução de (II.30) é dada por (II.31), onde a matriz inversa de A é única e dada por A^{-1} .

$$\underline{x}_{n \times 1} = [A_{n \times n}]^{-1} \underline{b}_{n \times 1} \quad (\text{II.31})$$

Isto ocorre, por exemplo, para o caso onde o número de pólos a serem posicionados é igual ao número de controladores utilizados no posicionamento ($m = n$). Neste caso, temos:

$$\underline{\Delta K}_{n \times 1} = [\operatorname{Re}[R]_{n \times n}]^{-1} \operatorname{Re}[\underline{\Delta \lambda}]_{n \times 1}. \quad (\text{II.32})$$

Caso $m \neq n$, a solução do problema envolve encontrar uma matriz de ordem $n \times m$ determinada exclusivamente por $A_{m \times n}$. Para isto, pode ser utilizado o conceito de matriz inversa generalizada, também conhecida como matriz pseudo-inversa ou matriz de Moore-Penrose [Penrose 1955, Lawson 1974].

Seja uma matriz A de ordem $m \times n$. Sua matriz inversa generalizada, denominada A^+ , de ordem $n \times m$, é a matriz única que satisfaz as seguintes condições (Condições de Penrose):

$$\text{i) } AA^+A = A; \quad (\text{II.33})$$

$$\text{ii) } A^+AA^+ = A^+; \quad (\text{II.34})$$

$$\text{iii) } (AA^+)^T = AA^+; \quad (\text{II.35})$$

$$\text{iv) } (A^+A)^T = A^+A. \quad (\text{II.36})$$

Para uma matriz A quadrada e não-singular, temos:

$$A^+ = A^{-1}. \quad (\text{II.37})$$

A matriz inversa generalizada A^+ , de ordem $n \times m$, pode ser expressa de duas formas distintas (II.38), dependendo da conveniência do problema.

$$A_{m \times n} \Rightarrow A_{n \times m}^+ = A^T (AA^T)^{-1} = (A^T A)^{-1} A^T \quad (\text{II.38})$$

Seja o caso sub-determinado, onde o número de equações no problema é inferior ao número de incógnitas:

$$A_{m \times n} \underline{x}_{n \times 1} - \underline{b}_{m \times 1} = \underline{0}_{m \times 1}, m < n. \quad (\text{II.39})$$

Nesta situação há um número infinito de soluções para o problema. Entretanto, é possível garantir que a solução obtida seja aquela em que a norma do vetor de solução é mínima ($\min \|x\|$). Para isto, a solução de (II.39) deve ser dada por (II.40) [Brogan 1991].

$$\underline{x}_{n \times 1} = [A_{m \times n}]^T (A_{m \times n} [A_{m \times n}]^T)^{-1} \underline{b}_{m \times 1}, m < n \quad (\text{II.40})$$

Ou ainda,

$$\underline{x}_{n \times 1} = [A_{m \times n}]^+ \underline{b}_{m \times 1}, m < n. \quad (\text{II.41})$$

Seja agora o caso sobre-determinado, onde o número de equações é maior que o número de incógnitas:

$$A_{m \times n} \underline{x}_{n \times 1} - \underline{b}_{m \times 1} = \underline{0}_{m \times 1}, m > n. \quad (\text{II.42})$$

Não existe solução exata para este problema, a solução pode ser calculada apenas de maneira aproximada. Assim sendo, temos:

$$A_{m \times n} \underline{x}_{n \times 1} - \underline{b}_{m \times 1} = \underline{e}_{m \times 1}, m > n. \quad (\text{II.43})$$

Para assegurar que o vetor de erro possua norma mínima ($\min \|\underline{e}\|$), a solução de (II.42) deve ser calculada por (II.44) [Brogan 1991].

$$\underline{x}_{n \times 1} = \left([A_{m \times n}]^T A_{m \times n} \right)^{-1} [A_{m \times n}]^T \underline{b}_{m \times 1}, m > n \quad (\text{II.44})$$

Ou ainda,

$$\underline{x}_{n \times 1} = [A_{m \times n}]^+ \underline{b}_{m \times 1}, m > n. \quad (\text{II.45})$$

A solução apresentada em (II.45) é a solução do problema dos mínimos quadrados e o seu erro é dado por:

$$\|\underline{e}_{m \times 1}\|^2 = \|\underline{b}_{m \times 1} - A_{m \times n} \underline{x}_{n \times 1}\|^2, m > n. \quad (\text{II.46})$$

Reescrevendo de forma concisa o que foi apresentado nas equações anteriores, temos a solução geral de um sistema do tipo $A\underline{x} - \underline{b} = 0$, em função da matriz generalizada inversa de A :

$$\underline{x} = A^+ \underline{b}. \quad (\text{II.47})$$

Onde a matriz inversa generalizada A^+ , é dada por:

$$A_{n \times n}^+ = A_{n \times n}^{-1} \quad (\text{II.48})$$

$$A_{m \times n}^+ = [A_{m \times n}]^T \left(A_{m \times n} [A_{m \times n}]^T \right)^{-1}, m < n \quad (\text{II.49})$$

$$A_{m \times n}^+ = \left([A_{m \times n}]^T A_{m \times n} \right)^{-1} [A_{m \times n}]^T, m > n \quad (\text{II.50})$$

Portanto, o problema de obtenção do vetor de variação dos ganhos dos controladores (II.51) é solucionado utilizando (II.52).

$$\text{Re}[R]_{m \times n} \underline{\Delta K}_{n \times 1} = \text{Re}[\underline{\Delta \lambda}]_{m \times 1} \quad (\text{II.51})$$

$$\underline{\Delta K}_{n \times 1} = [\text{Re}[R]_{m \times n}]^+ \text{Re}[\underline{\Delta \lambda}]_{m \times 1} \quad (\text{II.52})$$

Assim, quando $m < n$, a solução obtida é aquela onde a norma do vetor de variação de ganho dos ESPs é mínima ($\min \|\underline{\Delta K}\|$). Isto acontece, por exemplo, no caso onde dois ESPs são utilizados para o posicionamento, através da variação dos seus ganhos, de um único pólo. Para uma determinada variação da parte real do pólo, o problema tem um número infinito de soluções possíveis para a variação dos ganhos ΔK_1 e ΔK_2 dos ESPs.

De maneira análoga, quando $m > n$, a solução obtida é aquela onde o vetor de erro possui norma mínima ($\min \|\text{Re}[R]\underline{\Delta K} - \text{Re}[\underline{\Delta \lambda}]\|$). Como exemplo disto, temos o caso onde se quer posicionar dois pólos através da variação do ganho de apenas um ESP. Não é possível obter solução sem erro no posicionamento.

O uso do conceito de matriz inversa generalizada permite a obtenção de soluções para os problemas nos quais o número de equações não é igual ao número de incógnitas. Na coordenação dos ganhos dos ESPs, este conceito é utilizado no caso de número distinto de modos de oscilação e de controladores e também quando são analisados múltiplos pontos de operação. As referências [Borkowska 1976, Stroev 1995] descrevem aplicações de matrizes pseudo-inversas em outros problemas de sistemas de potência.

II.3 Análise do Sistema Teste I

A utilização dos resíduos da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ no posicionamento parcial simultâneo dos pólos críticos é apresentada nesta seção para o sistema teste mostrado na Figura 6. Este sistema é uma representação muito simplificada da região Sul do sistema brasileiro. Os dados são apresentados no Apêndice I e iguais aos descritos em [Martins 1989], com exceção das excitatrizes estáticas que aqui têm alto ganho ($K_a = 100$ pu/pu) e da representação do Sudeste por uma barra infinita.

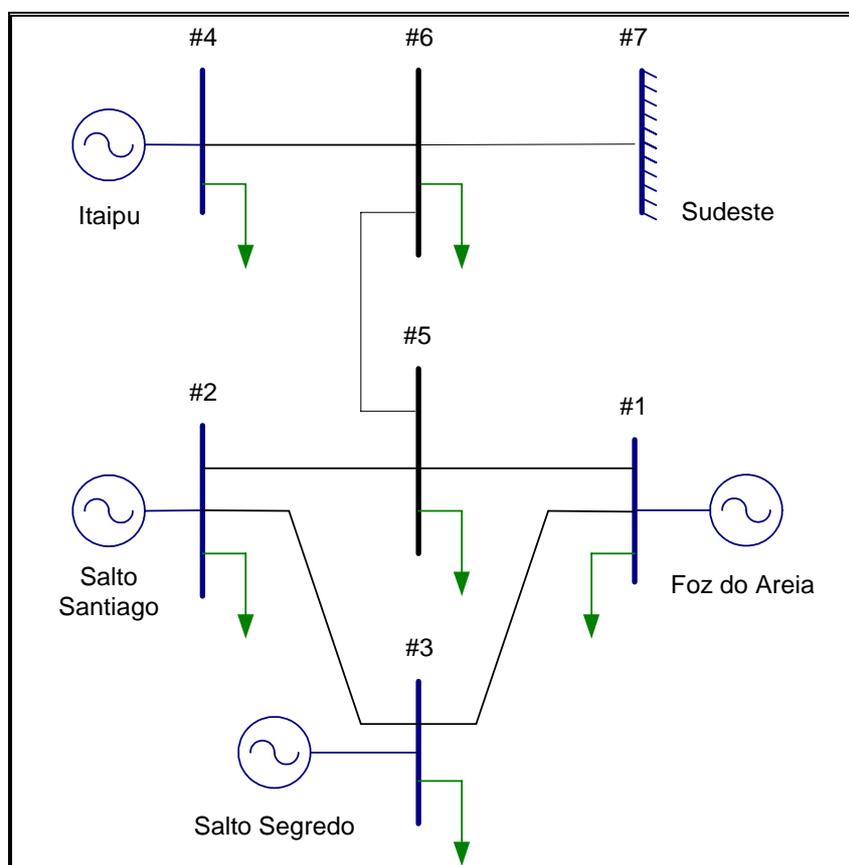


Figura 6 – Sistema teste I.

Este sistema possui dois modos de oscilação eletromecânica com amortecimento negativo (Tabela 1), devido à sua topologia e elevado carregamento aliados à presença de sistemas de excitação estáticos de alto ganho nos quatro geradores.

Tabela 1 – Modos de oscilação eletromecânica de interesse.

	Real (1/s)	Imag. (rad/s)	Freq. (Hz)	Amortecimento	Natureza
λ_1	+ 0,15309	$\pm 5,9138$	0,94121	- 2,59 %	Itaipu x (Sul + Sudeste)
λ_2	+ 0,17408	$\pm 4,6435$	0,73904	- 3,75 %	Sudeste x (Sul + Itaipu)

Com o objetivo de estabilizar o sistema foram instalados ESPs em Itaipu, Salto Segredo e Foz do Areia. Cada ESP utiliza como sinal de entrada a variação da velocidade do rotor e a sua estrutura é mostrada em (II.24). Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros utilizados no ajuste de fase dos ESPs. Seu avanço de fase máximo é centrado na frequência de 30 rad/s, reduzindo assim problemas relacionados aos modos associados às excitatrizes [Rogers 2000a, Rogers 2000b].

Tabela 2 – Parâmetros relativos ao ajuste de fase dos ESPs.

Nº de blocos	Tw (s)	Tn (s)	Td (s)
2	3	0,100	0,010

Através da análise modal do sistema, os geradores de Itaipu, Salto Segredo e Foz do Areia foram determinados como sendo os mais indicados (nesta ordem) para instalação de equipamentos para melhoria do desempenho do sistema.

Na Figura 7, na Figura 8 e na Figura 9 são apresentados os mapas de pólos e zeros do sistema para as funções de transferência matriciais $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{1 \times 1}$, $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2 \times 2}$ e $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{3 \times 3}$ [Martins 1992, Van de Wal 2001]. Estas funções estão associadas, respectivamente, aos geradores de Itaipu (1x1), de Itaipu e Salto Segredo (2x2) e aos geradores de Itaipu, Salto Segredo e Foz do Areia (3x3).

A Figura 7 mostra a presença de um zero bastante próximo aos dois pólos com parte real negativa. Esta informação antecipa a impossibilidade de estabilizar o sistema com a instalação de apenas um ESP. Por maior que seja a eficiência do ESP, não é viável o posicionamento de ambos os pólos no semiplano esquerdo com fator de amortecimento adequado.

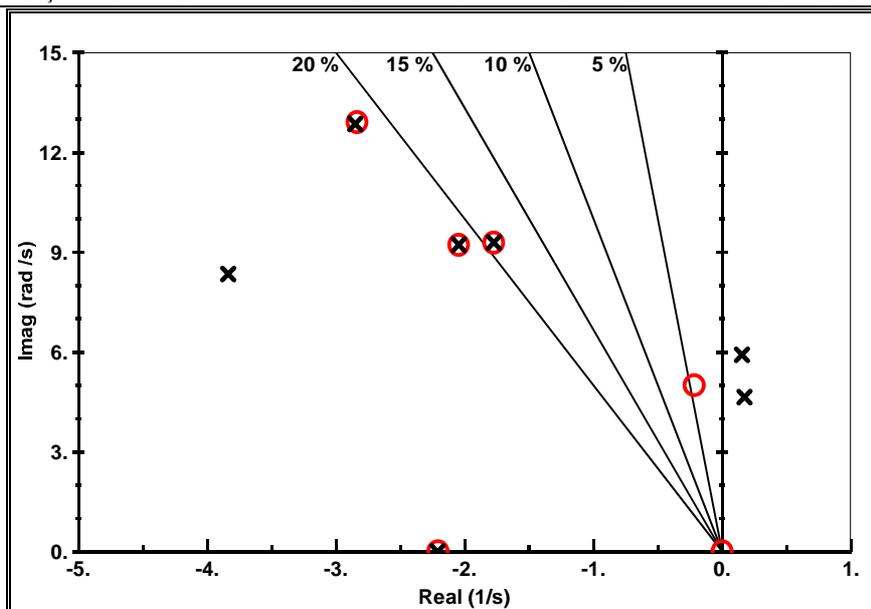


Figura 7 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{1 \times 1}$ para o gerador de Itaipu.

A localização dos dois zeros de transferência não cancelados por pólos na Figura 8 indica, a princípio, que a instalação dos ESPs nas máquinas de Itaipu e Salto Segredo permitirá a adequada estabilização do sistema.

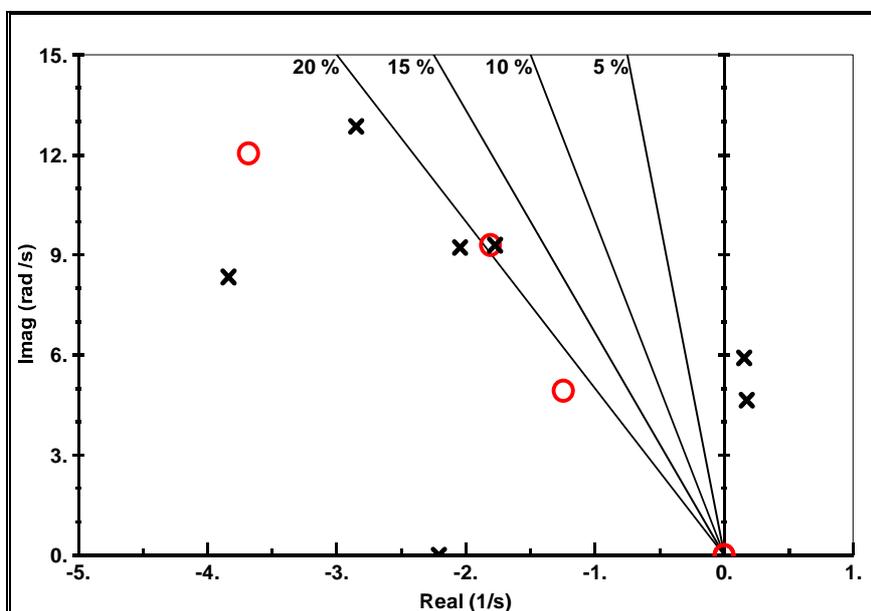


Figura 8 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2 \times 2}$ para os geradores de Itaipu e Salto Segredo.

A Figura 9 mostra que a instalação de um terceiro equipamento em Foz do Areia facilitaria o procedimento de estabilização, já que os zeros estão suficientemente afastados da região desejável de posicionamento dos pólos críticos.

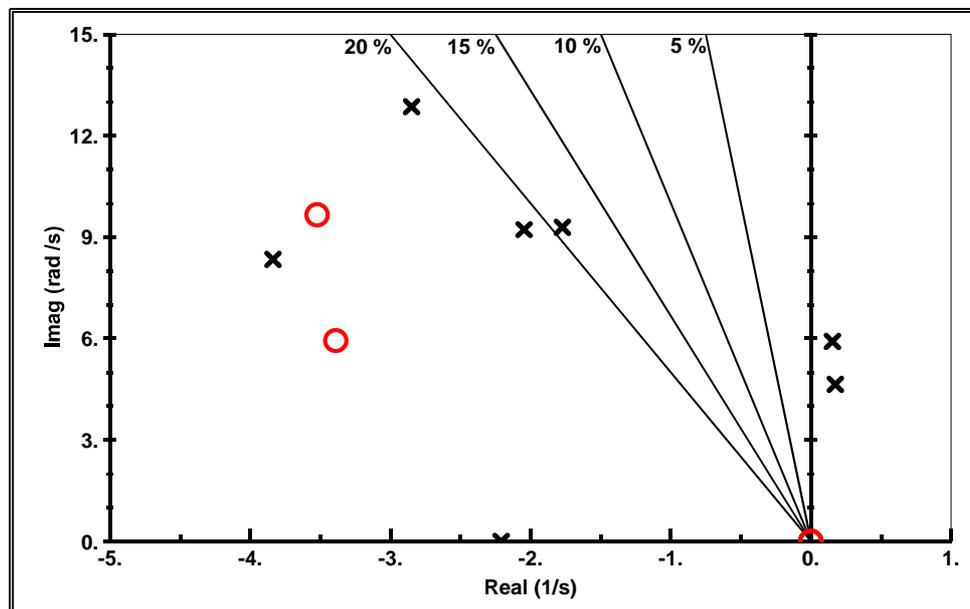


Figura 9 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{3 \times 3}$ para os geradores de Itaipu, Salto Segredo e Foz do Areia.

Na Seção II.3.1 é mostrada a contribuição de cada ESP no esforço de controle. Em seguida, na Seção II.3.2, o algoritmo de posicionamento de pólos é utilizado para estabilização do sistema. Finalmente, a Seção II.3.3 trata do problema de estabilização quando o número de ESPs e de pólos a serem posicionados é distinto.

II.3.1 Contribuição de cada ESP no Esforço de Controle e Estimativa dos Ganhos

Uma informação útil extraída diretamente da matriz dos resíduos da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ é o valor aproximado da contribuição de cada ESP no esforço de amortecimento dos diversos modos de oscilação.

Assim, a variação dos pólos de interesse λ_1 e λ_2 , devido a variação no ganho dos ESPs instalados nos sistema, é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1\right) & R\left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1\right) & R\left(\frac{\Delta V_{PSS3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_1\right) \\ R\left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2\right) & R\left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2\right) & R\left(\frac{\Delta V_{PSS3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_2\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \\ \Delta K_3 \end{bmatrix} \quad (II.53)$$

A equação (II.53) pode ser expandida em parte real e imaginária (II.54).

$$\begin{bmatrix} \text{Re}[\Delta\lambda_1] \\ \text{Im}[\Delta\lambda_1] \\ \text{Re}[\Delta\lambda_2] \\ \text{Im}[\Delta\lambda_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re} \left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_1\right) \right] \\ \text{Im} \left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_1\right) \right] \\ \text{Re} \left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_2\right) \right] \\ \text{Im} \left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2\right) & R\left(\frac{\Delta V_{ESP3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_2\right) \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \\ \Delta K_3 \end{bmatrix} \quad (II.54)$$

Na Figura 10 são mostradas as contribuições individuais dos ESPs na alteração da partes real e imaginária dos dois pólos de interesse para variação dos ganhos dos ESPs.

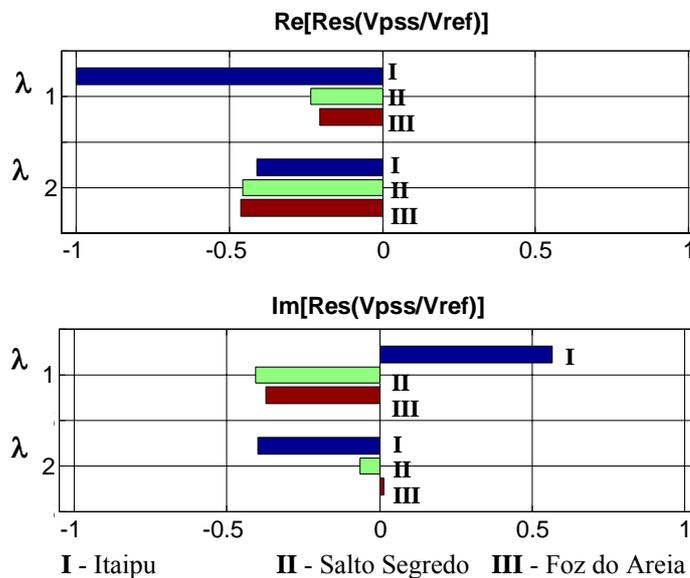


Figura 10 – Contribuição normalizada de cada ESP na variação da parte real e da parte imaginária dos pólos de interesse.

Analisando a informação da estimativa de variação da parte real dos pólos:

- Pode ser observado que o ESP instalado em Itaipu possui grande influência na variação da parte real dos dois pólos (λ_1 e λ_2);
- Os ESPs instalados em Salto Segredo e Foz do Areia têm atuação mais efetiva no pólo λ_2 ;
- Os três ESPs atuam de modo satisfatório, tornando mais negativa o valor da parte real do dois pólos (λ_1 e λ_2).

Analisando a informação da estimativa de variação da parte imaginária dos pólos:

- O aumento do ganho do ESP instalado em Itaipu causa aumento da parte imaginária do pólo λ_1 e redução da parte imaginária do pólo λ_2 ;
- O aumento do ganho do ESP instalado em Salto Segredo causa redução das partes imaginárias dos dois pólos, sendo o pólo λ_1 mais afetado;
- O ESP instalado em Foz do Areia causa redução da parte imaginária de λ_1 e praticamente nenhuma variação na parte imaginária de λ_2 .

A informação apresentada na Figura 10 pode ser utilizada para estimar os ganhos dos ESPs quando se deseja variações específicas na parte real de cada pólo. Isto é feito da seguinte forma: para uma determinada variação desejada de $\text{Re}[\lambda_1]$ e de $\text{Re}[\lambda_2]$, os ganhos dos dois ESPs (instalados em Itaipu e Salto Segredo) são estimados através da equação (II.55).

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \\ \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}[\Delta \lambda_1] \\ \text{Re}[\Delta \lambda_2] \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

Na Tabela 3 são apresentadas as estimativas lineares dos ganhos dos ESPs para causar variações especificadas nas partes reais dos dois pólos. O valor da parte real a ser atingido foi escolhido tomando como referência os valores que forneceriam amortecimento de 0 %, 5 % e 10 % ignorando-se alterações nas partes imaginárias dos pólos. Por exemplo, no Caso 1 (Tabela 3), o valor estimado de $\text{Re}[\lambda_1]$ foi adotado como sendo zero, por ser este o valor para o qual o amortecimento de λ_1 é 0 %, supondo que $\text{Im}[\lambda_1]$ permaneça no seu valor inicial ($\text{Im}[\lambda_1] = 5,9138$). No Caso 2 (Tabela 3), o valor de $\text{Re}[\lambda_1]$ foi adotado como sendo $-0,2961$ por ser este o valor para o qual o amortecimento de λ_1 é 5 %, supondo que $\text{Im}[\lambda_1]$ permanece constante. E assim por diante.

Os erros apresentados na Tabela 3 refletem as discrepâncias entre o quanto a parte real do pólo deveria variar e quanto realmente variou. Assim, os valores percentuais representam insuficiência (negativos) ou excesso (positivos) de variação da parte real do pólo. Um valor de, por exemplo, $-7,4$ %, indica que com os ganhos estimados, a parte real do pólo efetivamente variou 92,6 % do total estimado.

Tabela 3 – Estimativas dos ganhos dos ESPs para variações especificadas da parte real dos pólos λ_1 e λ_2 .

	Valor Especificado	Valor Obtido	Erro ¹	ξ_{Obtido} (%)	Ganhos Estimados para os ESPs (pu/pu)
Caso 1					
Re[λ_1]	0,0000	+ 0,0114	- 7,4 %	- 0,19 %	KItaipu = 1,06 KS.Segredo = 4,08
Im[λ_1]	-	± 5,8606	-		
Re[λ_2]	0,0000	+ 0,0205	- 11,8 %	- 0,45 %	
Im[λ_2]	-	± 4,5999	-		
Caso 2					
Re[λ_1]	- 0,2961	- 0,3030	+ 1,5 %	5,13 %	KItaipu = 4,01 KS.Segredo = 8,14
Im[λ_1]	-	± 5,8946	-		
Re[λ_2]	- 0,2325	- 0,1384	- 23,1 %	3,07 %	
Im[λ_2]	-	± 4,5068	-		
Caso 3					
Re[λ_1]	- 0,5944	- 0,6322	+ 5,1 %	10,69 %	KItaipu = 6,98 KS.Segredo = 12,24
Im[λ_1]	-	± 5,8780	-		
Re[λ_2]	- 0,4667	- 0,2714	- 30,5 %	6,12 %	
Im[λ_2]	-	± 4,4263	-		

¹ Erro = [(Variação Obtida – Variação Estimada) / Variação Estimada] x 100] %

Nos três casos apresentados na Tabela 3 os demais pólos do sistema têm fator de amortecimento maiores que 18,5 %. Nas figuras a seguir são mostrados os diagramas do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores descritos na Tabela 3.

A Figura 11 apresenta o diagrama do lugar das raízes referentes ao Caso 1 descrito na Tabela 3. O objetivo é posicionar os dois pólos no eixo imaginário, onde $\zeta(\lambda_1) = \zeta(\lambda_2) = 0$ %.

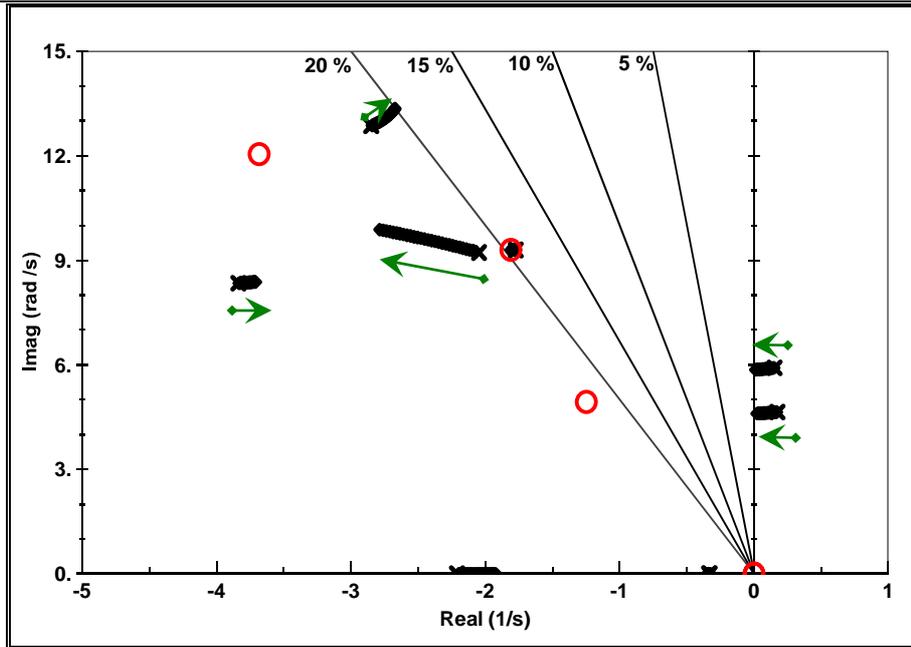


Figura 11 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no Caso 1 (Tabela 3).

A Figura 12 mostra detalhe da Figura 11. São marcadas as posições iniciais dos pólos, as posições finais especificadas (cruz vermelha) e as efetivas (último losango preto), obtidas quando as malhas dos ESPs são fechadas com os ganhos estimados para o Caso 1 (Tabela 3).

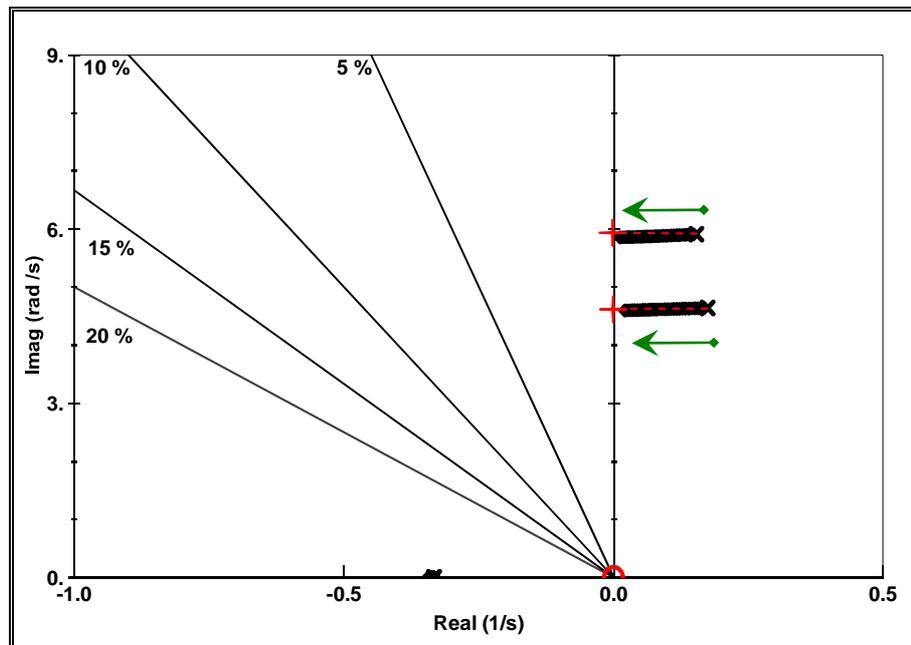


Figura 12 – Diagrama do lugar das raízes (detalhe da Figura 11).

A Figura 13 apresenta o diagrama do lugar das raízes referentes ao Caso 2 descrito na Tabela 3. O objetivo é posicionar os dois pólos sobre a reta de fator de amortecimento igual a 5 %, ou onde $\zeta(\lambda_1) = \zeta(\lambda_2) = 5\%$. A Figura 14 mostra detalhe da Figura 13.

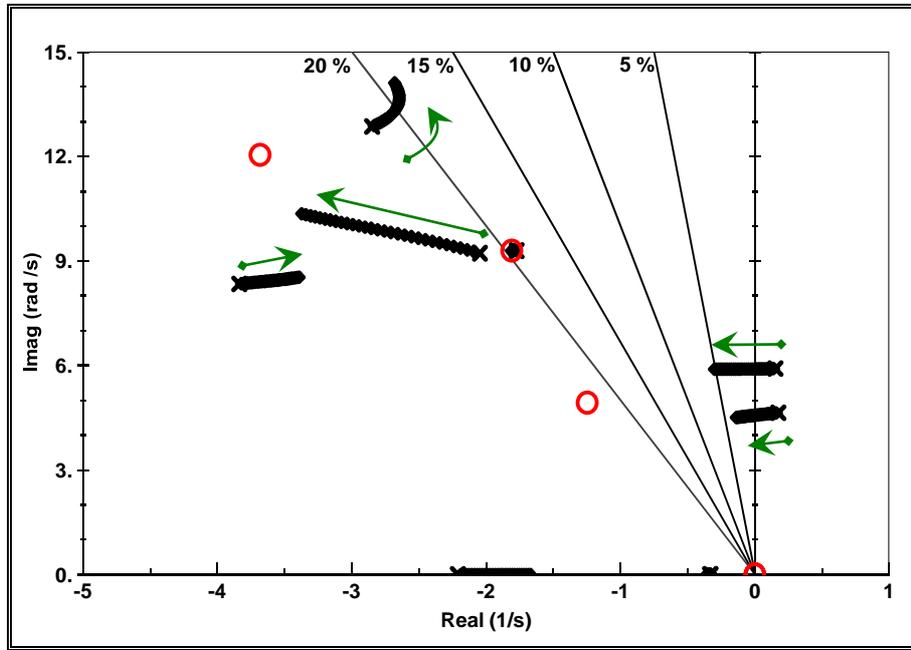


Figura 13 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no Caso 2 (Tabela 3).

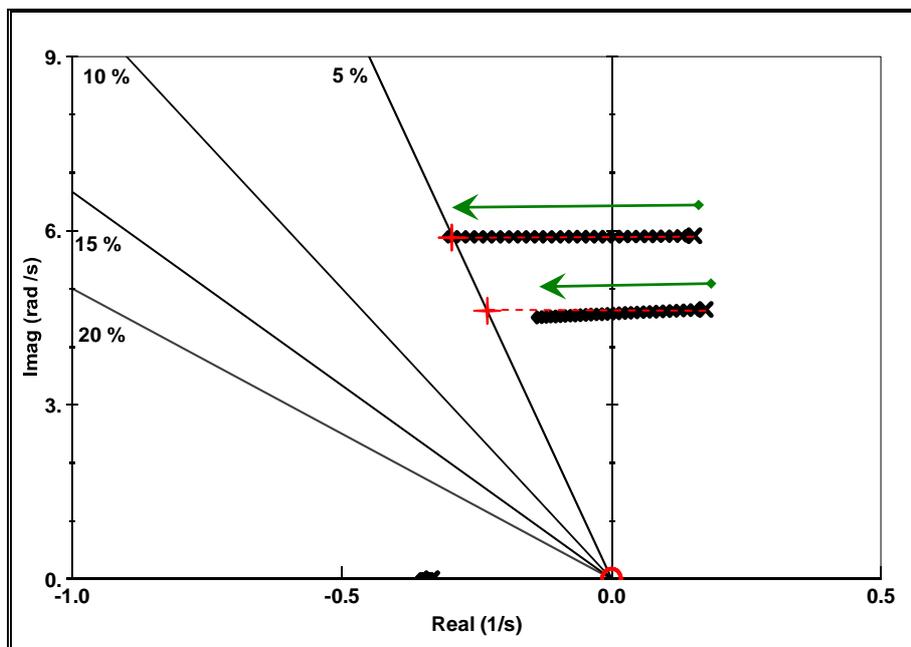


Figura 14 – Diagrama do lugar das raízes (detalhe da Figura 13).

A Figura 15 apresenta o diagrama do lugar das raízes referentes ao Caso 3 descrito na Tabela 3. O objetivo é posicionar os dois pólos sobre a reta de fator de amortecimento igual a 10 %, ou onde $\zeta(\lambda_1) = \zeta(\lambda_2) = 10\%$. A Figura 16 mostra detalhe da Figura 15.

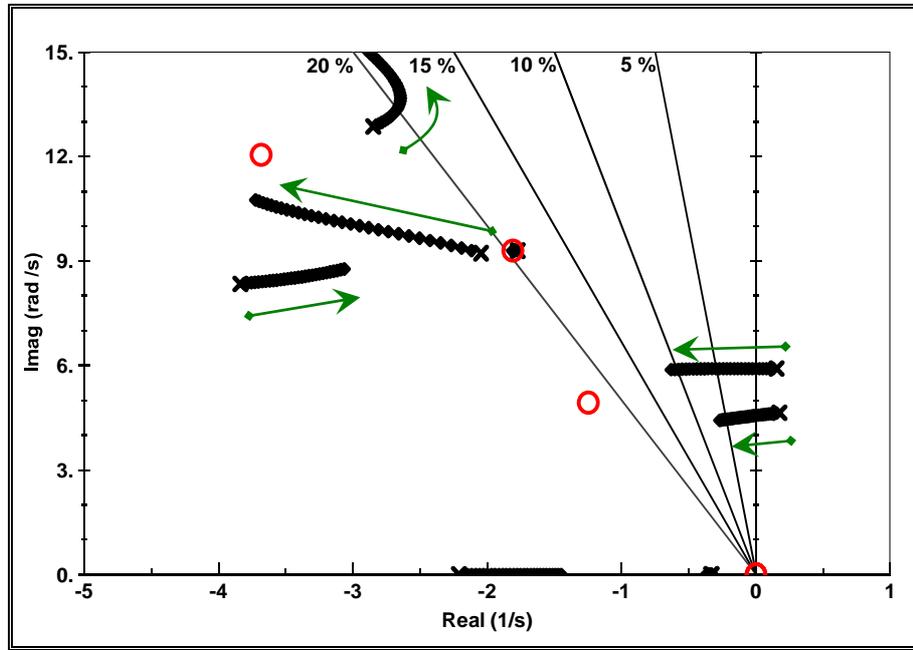


Figura 15 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no Caso 3 (Tabela 3).

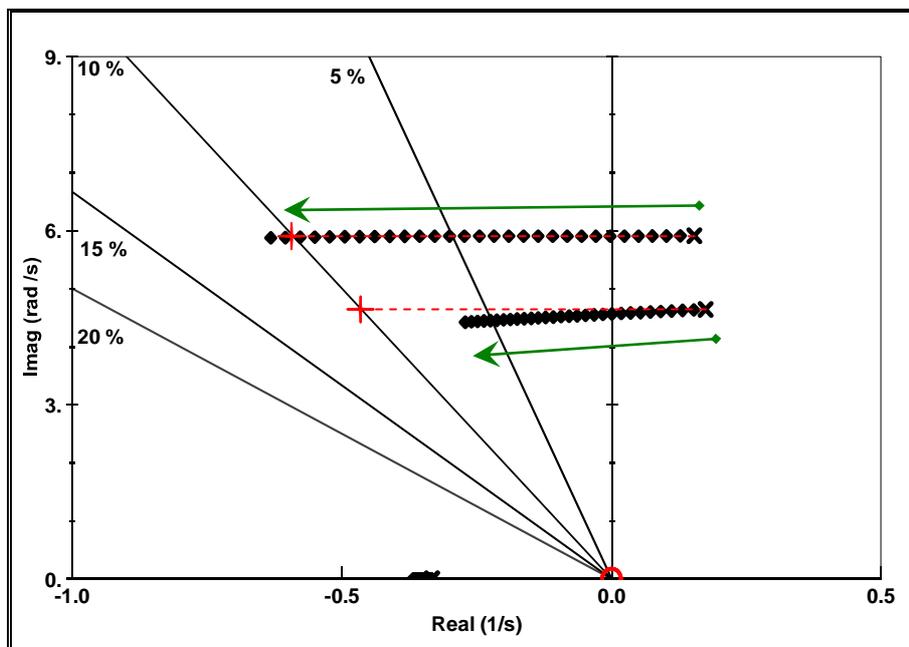


Figura 16 – Diagrama do lugar das raízes (detalhe da Figura 15).

Como pode ser observado na Tabela 3 e nas figuras anteriores, a simples estimativa dos ganhos não é o bastante para a solução eficiente e de forma coordenada do problema de estabilização.

Os resultados desta seção mostram que quanto mais afastada da posição inicial for a estimativa, maior o erro final. Este resultado já poderia ser antecipado devido à característica linear da informação fornecida pelo resíduo.

Por outro lado, nada impede de se realizar estimativas pequenas de forma sucessiva. Assim sendo, a informação dos resíduos seria utilizada seguidamente, de maneira muito mais eficiente, explorando o seu bom desempenho para os casos de pequenas estimativas.

A utilização sucessiva da informação de sensibilidade matricial é explorada utilizando o método de Newton-Raphson nas seções que seguem.

II.3.2 Posicionamento Parcial Simultâneo de Múltiplos Pólos Através do Método de Newton-Raphson Utilizando Resíduos de Funções de Transferência

Na Seção II.2.3 foi apresentado um algoritmo (reescrito a seguir) para posicionamento parcial de pólos utilizando a parte real do resíduo da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$. Este algoritmo é utilizado com o objetivo de estabilizar o sistema. Os pólos com amortecimento negativo são posicionados no semiplano complexo esquerdo através da alteração dos ganhos dos ESPs instalados nas máquinas de Itaipu e Salto Segredo.

O algoritmo calcula os ganhos dos ESPs tal que a parte real dos pólos de interesse tenham os valores desejados. Neste caso, a parte imaginária do pólo não é controlada, podendo variar livremente.

início

- Cálculo dos pólos e dos resíduos da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ associados aos pólos;
- Cálculo do vetor de ganhos $\underline{K}^{i+1} = \underline{K}^i + \underline{\Delta K}$, utilizando (II.56);
- Cálculo do novo pólo λ e do novo resíduo R associado;
- Enquanto a variação $(\text{Re}[\lambda(\underline{K}^{i+1})] - \underline{\sigma}_d)$ for maior que a tolerância, incrementar o contador ($i=i+1$) e retornar ao início.

fim

O método de Newton-Raphson é aplicado para que valores desejados da parte real dos pólos λ_1 e λ_2 sejam alcançados. Em cada iteração, as variações nos ganhos dos ESPs são obtidas através de (II.56). Quando as variações nas partes reais dos pólos forem menores que uma determinada tolerância (por exemplo, $\text{tol} = 1 \times 10^{-6}$) o processo iterativo é considerado convergido.

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \\ \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}[\Delta \lambda_1] \\ \text{Re}[\Delta \lambda_2] \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

O valor da parte real a ser atingido foi escolhido tomando como referência, como já havia sido feito anteriormente, os valores que forneceria um determinado amortecimento desejado (por exemplo, 10%) ignorando-se alterações nas partes imaginárias dos pólos (já que a parte imaginária do pólo não tem sua variação controlada).

Para aqueles casos onde os valores desejados são relativamente afastados dos valores iniciais, um cuidado extra é tomado. Nesses casos, são realizados posicionamentos sucessivos dos pólos com variações menores da posição até que se obtenha o valor final desejado.

A decisão de utilizar posicionamentos intermediários garante boas condições iniciais para o método de Newton-Raphson. Este procedimento foi utilizado na solução

de dois exemplos apresentados na Tabela 4: Caso 5 e no Caso 6. Na primeira solução, tomou-se como variação desejada um valor igual a metade do total estipulado. Em seguida, a partir da solução intermediária, calculou-se os ganhos para o posicionamento no valor final desejado.

A Tabela 4 apresenta, para cada um dos três exemplos testados, o número de iterações necessárias para a convergência do método. Nos casos onde houve posicionamento intermediário, o número de iterações deste posicionamento também é mostrado.

Tabela 4 – Ganhos dos ESPs para que as variações desejadas na parte real de λ_1 e λ_2 sejam atingidas.

	Valor Especificado	Valor Obtido	Erro	$\xi_{\text{Obtido}} (\%)$	Ganhos dos ESPs (pu/pu)
Caso 4 (7 iterações)					
Re[λ_1]	-0,5956	-0,5956	0	10,3 %	$K_{\text{Itaipu}} = 5,16$ $K_{\text{S.Segredo}} = 51,40$
Im[λ_1]	-	$\pm 5,7661$	-		
Re[λ_2]	-0,4633	-0,4633	0	10,1 %	
Im[λ_2]	-	$\pm 4,5814$	-		
Caso 5 (13 iterações - 6 + 7 ¹)					
Re[λ_1]	-0,5956	-0,5956	0	10,4 %	$K_{\text{Itaipu}} = 4,79$ $K_{\text{S.Segredo}} = 90,58$
Im[λ_1]	-	$\pm 5,7212$	-		
Re[λ_2]	-0,5101	-0,5101	0	10,9 %	
Im[λ_2]	-	$\pm 4,6637$	-		
Caso 6 (11 iterações - 5 + 6 ¹)					
Re[λ_1]	-1,2728	-1,2728	0	22,0 %	$K_{\text{Itaipu}} = 13,95$ $K_{\text{S.Segredo}} = 29,22$
Im[λ_1]	-	$\pm 5,5924$	-		
Re[λ_2]	-0,5807	-0,5807	0	13,5 %	
Im[λ_2]	-	$\pm 4,2713$	-		

¹ O método de Newton-Raphson foi aplicado duas vezes consecutivas.

Na Figura 17, na Figura 18 e na Figura 19 são mostrados os diagramas do lugar das raízes quando os ganhos dos ESPs são variados proporcionalmente e de forma simultânea desde zero até os valores indicados na Tabela 4.

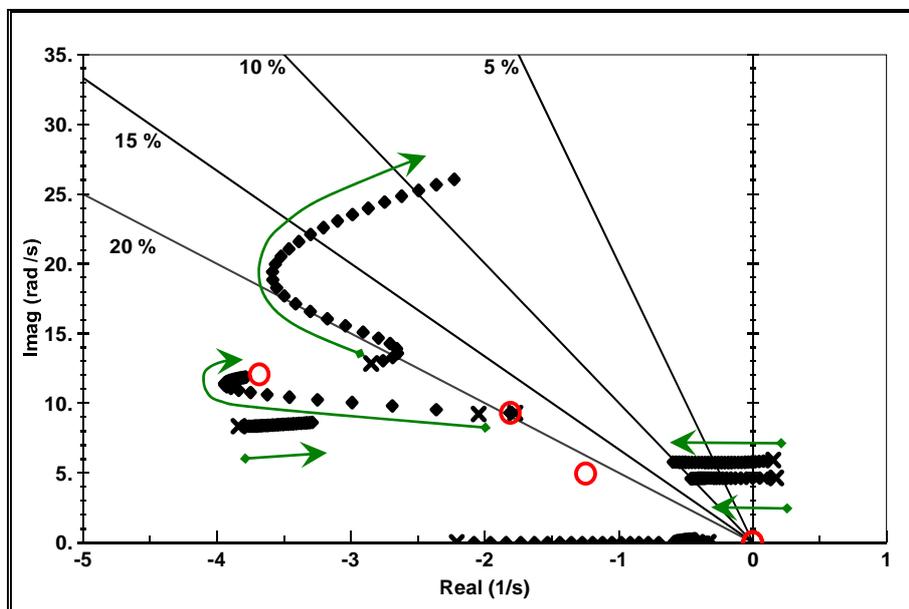


Figura 17 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no Caso 4 (Tabela 4).

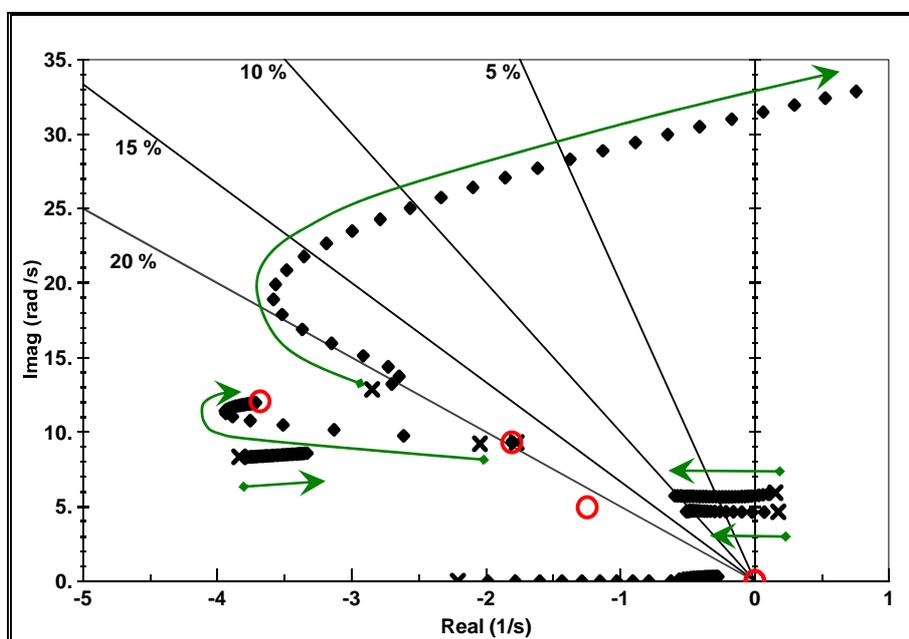


Figura 18 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no Caso 5 (Tabela 4).

Na Figura 17 e na Figura 18 são mostradas como o fator de amortecimento de um terceiro pólo piora quando os dois pólos críticos são posicionados nos locais especificados. Como o posicionamento de pólos aqui realizado é parcial, nada pode ser garantido sobre a localização dos demais pólos do sistema.

No Caso 4 (Tabela 4), onde o valor do ganho do ESP instalado em Salto Segredo é igual a 51,4 pu/pu, um outro pólo tem fator de amortecimento igual a 8,5 % (Figura 17), reflexo do valor de ganho indevidamente alto. No Caso 5 (Tabela 4) o ganho exigido para o posicionamento dos pólos críticos nos pontos especificados é alto. Isto provoca o efeito adverso de um outro pólo do sistema (que não é controlado) possuir fator de amortecimento negativo (Figura 18), tornando o sistema instável.

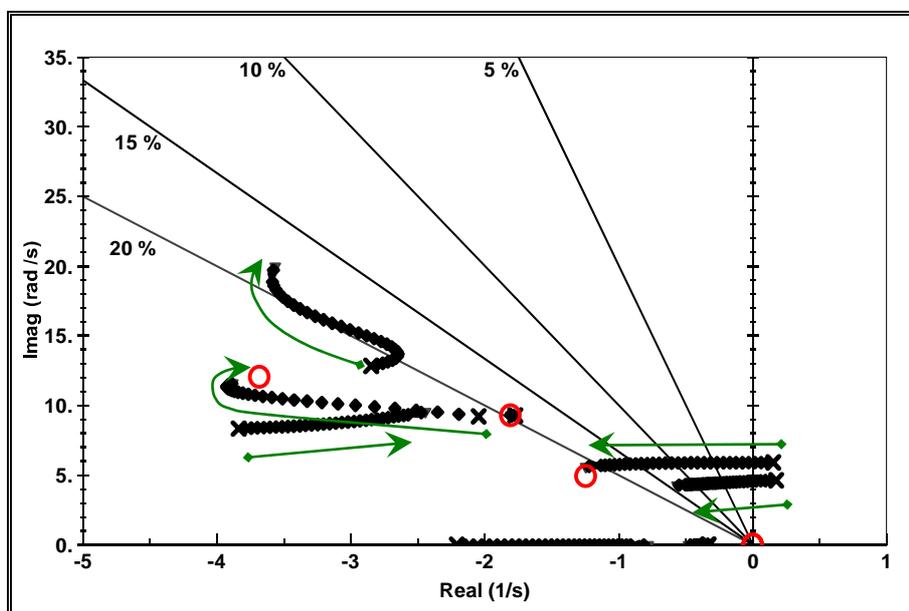


Figura 19 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no Caso 6 (vide Tabela 4).

Ao estipularmos para os pólos críticos deste sistema valores finais com fatores de amortecimento diferentes, de forma que o ganho máximo fosse 30 pu/pu (caso 6), o desempenho é melhor, como observado na Figura 19. Na Figura 20 é apresentado o diagrama do lugar das raízes obtido quando os ganhos dos ESPs são variados de zero até 20 pu/pu. Neste caso nenhum pólo é posicionado em pontos pré-determinados e o fator de amortecimento mínimo do sistema é 17 %. Portanto, a variação equânime dos ganhos, sem qualquer preocupação com posicionamento de pólos, resultou no melhor

desempenho do sistema teste (resultados comparáveis foram obtidos no caso 6, ilustrado na Figura 19).

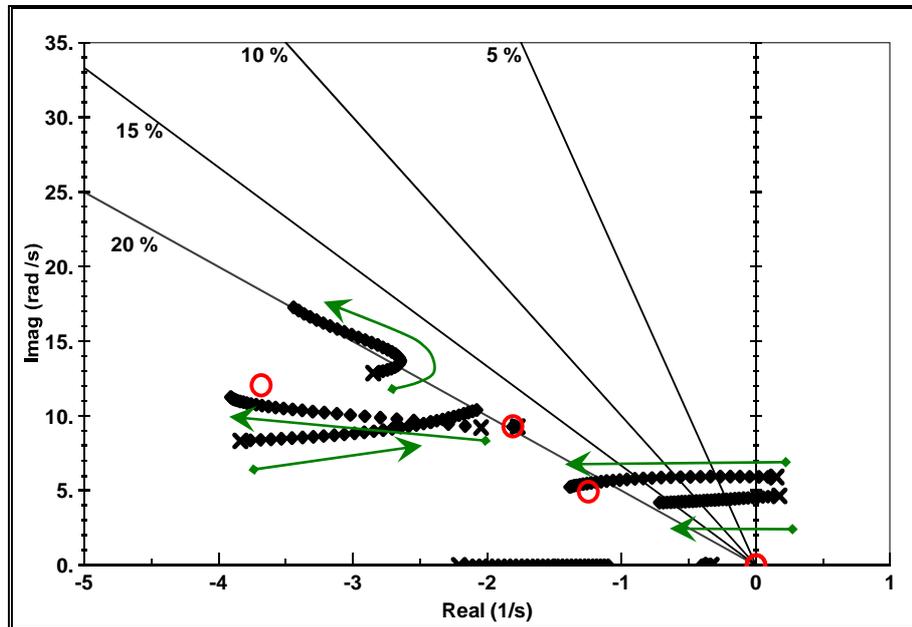


Figura 20 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até 20 pu/pu.

O posicionamento descuidado de um determinado número de pólos em pontos específicos do plano complexo pode requerer valores muito altos para os ganhos dos ESPs e levar a soluções instáveis.

Como pode ser observado na Tabela 4, casos 4 e 5, para posicionar os dois modos em pontos onde ambos têm praticamente o mesmo amortecimento (por exemplo, $\xi(\lambda_1) = \xi(\lambda_2) \cong 10\%$) podem ser necessários ganhos elevados para os ESPs. Se forem especificados valores mais adequados para a parte real dos modos, contemplando diferentes fatores de amortecimento (por exemplo, $\xi(\lambda_1) = 22,0\%$ e $\xi(\lambda_2) = 13,5\%$) os ganhos dos ESPs necessários para o posicionamento têm valores razoáveis. Ou seja, a restrição de fator de amortecimento igual para os dois pólos críticos neste problema exigiu valores exageradamente altos para os ganhos dos ESPs. Sabe-se, na prática, que ganhos de ESPs com esta estrutura devem ter valores sempre menores que 30 pu/pu, sendo o valor máximo típico em torno de 20 pu/pu [Paiva 1999].

Não se sabe a priori qual deve ser a posição mais adequada para os pólos críticos, de forma que todos os pólos do sistema tenham fatores de amortecimento

desejáveis. Portanto, a utilização de posicionamento parcial de múltiplos pólos no ajuste coordenado de ESPs, deve levar em consideração a grande importância da especificação adequada de onde os pólos devem ser posicionados. Além disso, devem ser levados em consideração os benefícios de utilizar fatores de amortecimento diferentes.

O posicionamento deve, portanto, levar em conta a possibilidade de um determinado pólo ser muito mais suscetível a variações nos ganhos dos ESPs do sistema do que outro.

Para a situação descrita anteriormente, o pólo mais sensível à variação dos ganhos dos ESPs deve ser posicionado de forma que seu fator de amortecimento seja maior que o fator de amortecimento dos outros pólos. Uma confirmação disso foi o melhor resultado obtido para o posicionamento especificado no Caso 6 (onde $\xi(\lambda_1) = 22,0\%$ e $\xi(\lambda_2) = 13,5\%$). Esta questão será tratada na Seção II.4.

II.3.3 Posicionamento Simultâneo de Pólos para Sistemas sem Solução Única

O processo de estabilização pode ser tornar mais fácil com a instalação de um terceiro ESP no sistema, no gerador de Foz do Areia. Para efetuar a coordenação do esforço de controle de cada ESP, o algoritmo apresentado na Seção II.2.3 é ligeiramente modificado.

Para variações especificadas na parte real de cada pólo, os ganhos dos ESPs devem ser estimados como mostrado em (II.57) utilizando o conceito de matriz inversa generalizada (ou pseudo-inversa) da matriz de resíduos (retangular). Nesta situação existem três ESPs para efetuarem o posicionamento de dois pólos. Desta forma, a cada passo do novo algoritmo é garantido que o vetor de variação dos ganhos dos ESPs tenha norma mínima ($\min\|\underline{\Delta K}\|$).

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \\ \Delta K_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & R \left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) & R \left(\frac{\Delta V_{PSS3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_1 \right) \\ \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & R \left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) & R \left(\frac{\Delta V_{PSS3}}{\Delta V_{REF3}}, \lambda_2 \right) \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

A informação de sensibilidade (II.13) é utilizada sucessivamente para o posicionamento de dois modos críticos através da variação dos ganhos de três ESPs (instalados em Itaipu, Salto Segredo e Foz do Areia).

Na Tabela 5 são apresentados os ganhos obtidos para dois exemplos. O objetivo é posicionar os dois pólos sobre a reta de fator de amortecimento igual a, respectivamente, 15 % (Caso 7) e 20 % (Caso 8). Como a parte imaginária não é controlada, sua variação é livre. Os ganhos calculados foram todos inferiores a 20 pu/pu devido à utilização de um terceiro ESP no procedimento de estabilização.

Tabela 5 – Ganhos dos ESPs para que as variações desejadas na parte real de λ_1 e λ_2 sejam atingidas.

	Valor Especificado	Valor Obtido	Erro	ξ_{Obtido} (%)	Ganhos dos ESPs (pu/pu)
Caso 7 (9 iterações – 5 + 4 ¹)					
Re[λ_1]	-0,8949	-0,8949	0	15,9 %	K _{Itaipu} = 8,10
Im[λ_1]	-	±5,5525	-		
Re[λ_2]	-0,6992	-0,6992	0	15,9 %	K _{S.Segredo} = 11,85
Im[λ_2]	-	±4,3361	-		
Caso 8 (13 iterações – 5 + 4 + 4 ¹)					
Re[λ_1]	-1,2040	-1,2040	0	22,0 %	K _{Itaipu} = 10,39
Im[λ_1]	-	±5,3350	-		
Re[λ_2]	-0,9407	-0,9407	0	21,4 %	K _{Foz do Areia} = 16,39
Im[λ_2]	-	±4,2885	-		

¹ O algoritmo foi utilizado duas ou três vezes consecutivas.

Na Figura 21 e na Figura 22 são mostrados os diagramas do lugar das raízes quando os ganhos dos ESPs são variados proporcionalmente e de forma simultânea desde zero até os valores indicados na Tabela 5. Pode ser observado um terceiro modo cujo fator de amortecimento tem pequeno decréscimo enquanto os fatores de amortecimento dos modos que estão sendo posicionados aumentam.

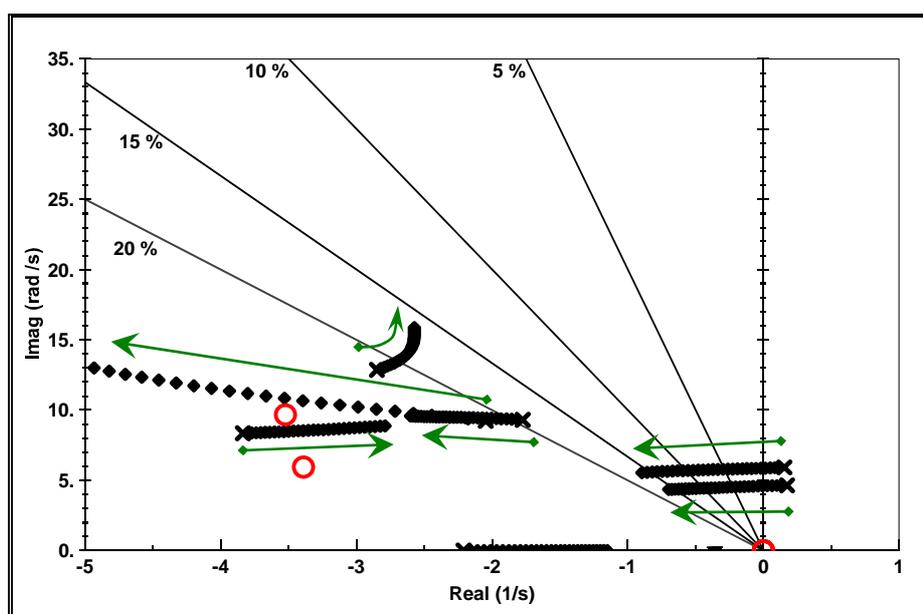


Figura 21 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no Caso 7 (vide Tabela 5).

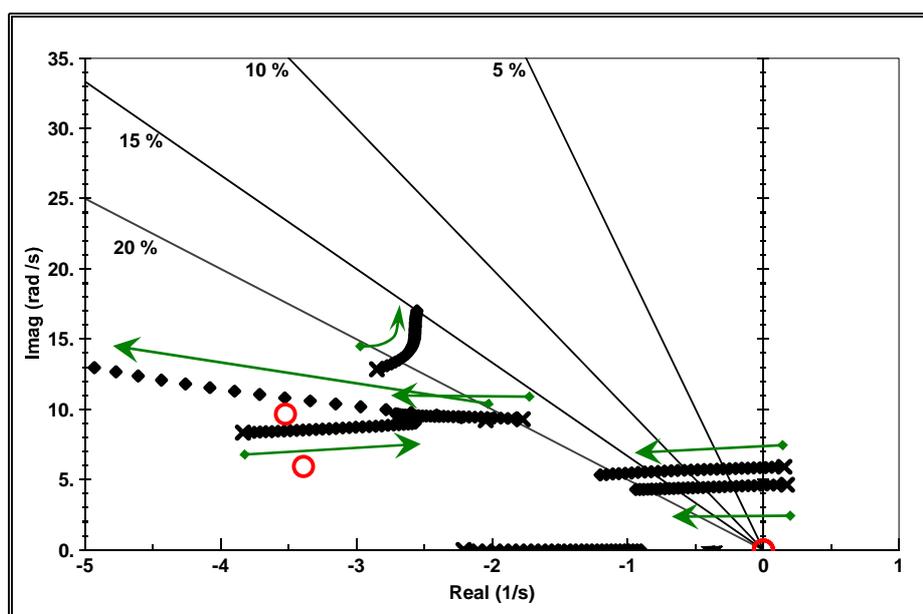


Figura 22 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores estimados no caso 8 (vide Tabela 5).

A Figura 23 mostra o diagrama do lugar das raízes obtidos quando os ganhos dos ESPs são variados de zero até 15 pu/pu. Mais uma vez a estratégia de posicionamento em valores onde o fator de amortecimento dos modos de interesse é igual (Caso 7 e Caso 8, Tabela 5 e Figura 21) não se mostra a mais adequada.

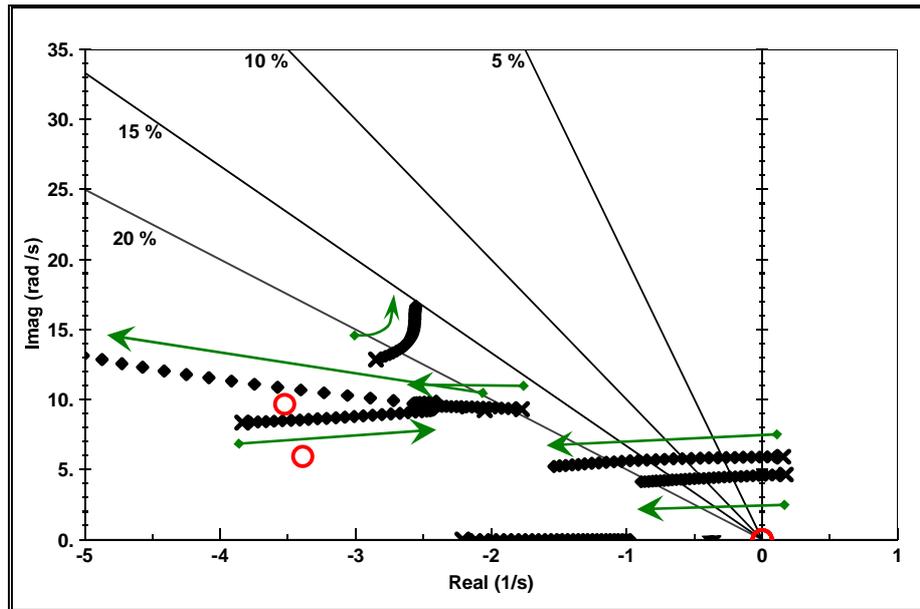


Figura 23 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até 15 pu/pu.

II.4 Metodologia de Posicionamento com Variação Automática de Ganho

Nesta seção é apresentado um avanço na metodologia de posicionamento dos pólos do sistema mostrada na Seção II.2. Um dos maiores problemas da utilização de posicionamento de pólos é exatamente a definição de onde estes pólos devem ser posicionados, como já abordado na Seção II.3.

Resultados com pouca viabilidade podem ser produzidos no caso de existirem limitadores ao posicionamento (muitas vezes inerentes ao próprio sistema). Nem sempre é possível a obtenção de soluções onde os pólos são posicionados em pontos adequados e os parâmetros dos controladores são viáveis.

A análise apresentada na Seção II.3 mostra que o posicionamento pode exigir valores elevados de ganhos. Por outro lado, alterações nas posições finais dos pólos podem resolver a questão. O problema, portanto, pode ser bem resolvido se for conhecido a priori qual o melhor local para posicionar os pólos do sistema. Desta forma cria-se um dilema: como saber qual a melhor solução de um problema antes de resolvê-lo?

O posicionamento dos pólos críticos do sistema deve obedecer a critérios que levem em consideração a natureza de cada pólo e o seu comportamento perante o aumento do ganho dos controladores. O posicionamento deve considerar a possibilidade de um determinado pólo ser muito mais suscetível a variações nos ganhos de um ou mais controladores do que de outros.

Na Seção II.4.1 o problema de posicionamento, apresentado inicialmente na Seção II.2.3, é reformulado. Na Seção II.4.2 é avaliada a possibilidade de análise em múltiplos pontos de operação. Por fim, é apresentado o algoritmo com avaliação automática de variação de ganho (Seção II.4.3).

II.4.1 Reformulação do Problema de Posicionamento

O problema de posicionamento apresentado na Seção II.2.3 estabelecia como objetivo o posicionamento da parte real dos pólos (II.58).

$$f(K) = \text{Re}[\lambda(K)] - \sigma_d \quad (\text{II.58})$$

Para calcular o incremento de ganho a cada iteração do algoritmo de Newton-Raphson, utiliza-se a relação descrita em (II.59) e (II.60).

$$\Delta \text{Re}[\lambda] = \frac{d \text{Re}[\lambda]}{dK} \Delta K \quad (\text{II.59})$$

$$\frac{d \text{Re}[\lambda]}{dK} = \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \right] \quad (\text{II.60})$$

Outra maneira de modelar o problema é apresentada em (II.61), onde λ é o pólo e λ_d o seu valor desejado.

$$f(K) = \lambda(K) - \lambda_d \quad (\text{II.61})$$

Neste caso, o objetivo é alterar o ganho do ESP de forma que a posição do pólo seja a especificada, utilizando para isto as equações (II.62) e (II.63).

$$\Delta \lambda = \frac{d\lambda}{dK} \Delta K \quad (\text{II.62})$$

$$\frac{d\lambda}{dK} = R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \quad (\text{II.63})$$

Desta forma, o sistema a ser resolvido a cada iteração para o cálculo da variação de ganho ΔK é complexo, possuindo portanto parte real e parte imaginária. Como a compensação de fase é considerada constante, o ganho K é real e o sistema apresentado em (II.64) não tem solução exata.

$$\begin{bmatrix} \text{Re}[\Delta\lambda] \\ \text{Im}[\Delta\lambda] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \\ \text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \end{bmatrix} \Delta K \quad (\text{II.64})$$

Isto significa dizer que não é possível, com apenas um ESP, garantir que o pólo λ terá exatamente o valor desejado λ_d . Uma forma de tratar este problema é utilizar o conceito de matriz inversa generalizada, apresentado na Seção II.2.4.

O mesmo problema de especificação da posição do pólo pode ser modelado de forma ligeiramente diferente. Reescrevendo a equação (II.62), onde λ_0 é o valor inicial do pólo λ , temos:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{d\lambda}{dK} \Delta K. \quad (\text{II.65})$$

Ou ainda,

$$\sigma + j\omega = \sigma_0 + j\omega_0 + \text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K + \text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K. \quad (\text{II.66})$$

Expandindo a equação (II.66) em parte real e parte imaginária, temos (II.67).

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 + \text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K \\ \omega = \omega_0 + \text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

Escrevendo (II.67) de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \\ 0 & 1 & -\text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ \omega \\ \Delta K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.68})$$

Além de calcular o valor de K tal que a condição $f(K) = 0$ (II.61) seja satisfeita, pode ser especificada ainda a condição de fator de amortecimento desejado ξ_d para o modo λ_d . Desta forma, temos a nova condição dada pela equação (II.69).

$$\xi_d = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (\text{II.69})$$

Reescrevendo (II.69):

$$\sigma + \frac{\xi_d}{\sqrt{1 - \xi_d^2}} \omega = 0. \quad (\text{II.70})$$

Temos em (II.70) a relação necessária entre as partes real e imaginária de λ para que o fator de amortecimento tenha o valor desejado ξ_d .

Acrescentando ao sistema descrito em (II.67) a equação (II.70), temos (II.71).

$$\begin{cases} \sigma - \text{Re} \left[\frac{d\lambda}{dK} \right] \Delta K = \sigma_0 \\ \omega - \text{Im} \left[\frac{d\lambda}{dK} \right] \Delta K = \omega_0 \\ \sigma + \frac{\xi_d}{\sqrt{1 - \xi_d^2}} \omega = 0 \end{cases} \quad (\text{II.71})$$

Escrevendo (II.71) de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{Re} \left[\frac{d\lambda}{dK} \right] \\ 0 & 1 & -\text{Im} \left[\frac{d\lambda}{dK} \right] \\ 1 & \frac{\xi_d}{\sqrt{1 - \xi_d^2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ \omega \\ \Delta K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \omega_0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.72})$$

Finalmente, substituindo a equação (II.63) em (II.72), temos o sistema apresentado em (II.73).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\operatorname{Re}\left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda\right)\right] \\ 0 & 1 & -\operatorname{Im}\left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda\right)\right] \\ 1 & \frac{\xi_d}{\sqrt{1-\xi_d^2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ \omega \\ \Delta K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \omega_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.73})$$

O cálculo da variação do ganho ΔK a cada iteração é feito utilizando (II.73), a partir da posição inicial do pólo e do valor desejado para o fator de amortecimento (ξ_d). A convergência ocorre quando o incremento de ganho ΔK causa uma variação no fator de amortecimento menor que uma certa tolerância especificada.

A inclusão da equação com o fator de amortecimento desejado torna mais prática a análise do problema. Normalmente, deseja-se atender um determinado critério de fator mínimo de amortecimento, variando o mínimo possível a frequência do modo de oscilação.

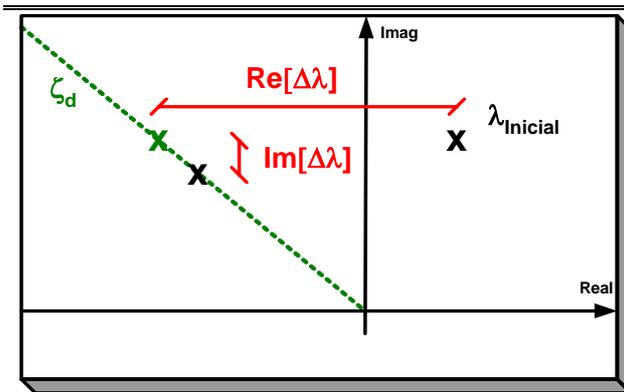
A seguir, é apresentado o algoritmo básico para o posicionamento de um pólo, através da variação do ganho de um ESP, sobre a reta de fator de amortecimento especificado. Existindo solução, será encontrado o ganho que imponha o fator de amortecimento ξ_d ao pólo crítico.

início

- Cálculo do pólo λ e do resíduo R da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ associado a λ ;
- Cálculo de $K^{i+1} = K^i + \Delta K$, utilizando (II.73);
- Cálculo do novo pólo λ e do novo resíduo R associado;
- Enquanto a variação $(\xi(K^{i+1}) - \xi_d)$ for maior que a tolerância, incrementar o contador ($i = i + 1$) e retornar ao início.

fim

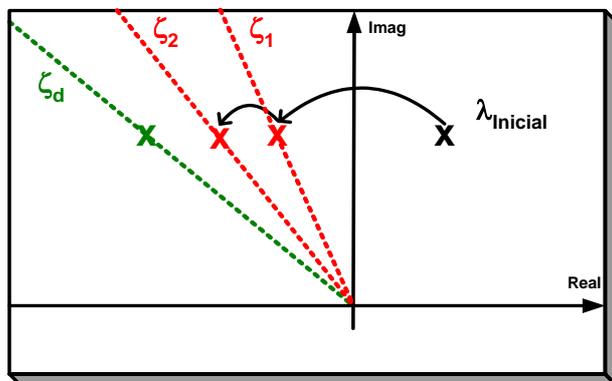
A Figura 24 ilustra o algoritmo.



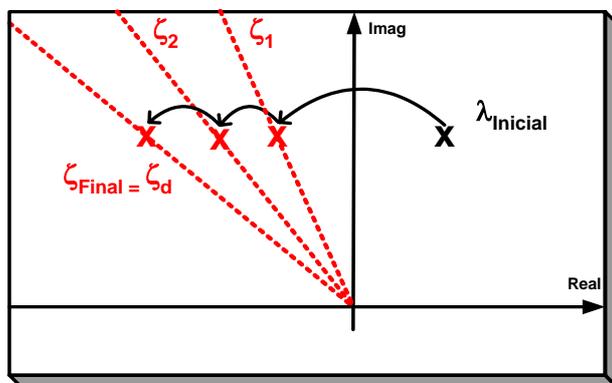
O algoritmo descrito anteriormente encontrará (caso exista) solução na reta $\zeta(K) = \zeta_d$. O ideal é que não haja grandes variações da parte imaginária, porém é possível que a frequência aumente ou diminua.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{Re}\left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda\right)\right] \\ 0 & 1 & -\text{Im}\left[R\left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda\right)\right] \\ 1 & \frac{\xi_d}{\sqrt{1-\xi_d^2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ \omega \\ \Delta K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \omega_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

O cálculo da variação ΔK é feita utilizando o resíduo da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ associado ao pólo.



Com o novo ganho $(K+\Delta K)$ o pólo tem sua nova posição calculada, assim como o novo resíduo associado. O processo é repetido enquanto o erro $(\zeta(K) - \zeta_d)$ for maior que uma determinada tolerância



Havendo solução, a posição final efetiva terá o valor desejado de fator de amortecimento (considerando uma tolerância especificada).

Figura 24 – Posicionamento utilizando resíduo de função de transferência.

O algoritmo não se altera para o caso onde existam mais ESPs e/ou pólos. Para o caso onde dois ESPs são utilizados para posicionar dois pólos, o sistema que deve ser resolvido para a obtenção do vetor de variação dos ganhos dos ESPs ($\underline{\Delta K}$) é mostrado em (II.74).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 - \left[\operatorname{Re} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \operatorname{Re} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \sigma_1^0 \\ \omega_1 - \left[\operatorname{Im} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \operatorname{Im} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \omega_1^0 \\ \sigma_1 + \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} \omega_1 = 0 \\ \sigma_2 - \left[\operatorname{Re} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \operatorname{Re} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \sigma_2^0 \\ \omega_2 - \left[\operatorname{Im} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \operatorname{Im} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \omega_2^0 \\ \sigma_2 + \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} \omega_2 = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.74})$$

Na forma matricial, temos:

$$\left[\begin{array}{cccc|cc} 1 & 0 & 0 & 0 & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \right] \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \right] \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \right] \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \right] \\ \hline 1 & \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} & 0 & 0 \end{array} \right] \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \omega_1 \\ \sigma_2 \\ \omega_2 \\ \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1^0 \\ \omega_1^0 \\ \sigma_2^0 \\ \omega_2^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.75})$$

Reescrevendo (II.75):

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \right] \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & -\operatorname{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \right] \\
 0 & 0 & 1 & 0 & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \right] \\
 0 & 0 & 0 & 1 & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & -\operatorname{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \right] \\
 \hline
 1 & 0 & \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \sigma_1 \\
 \sigma_2 \\
 \omega_1 \\
 \omega_2 \\
 \underline{\Delta K}_1 \\
 \underline{\Delta K}_2
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sigma_1^0 \\
 \sigma_2^0 \\
 \omega_1^0 \\
 \omega_2^0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (\text{II.76})$$

A forma geral do sistema (II.76) é dada em (II.77), para m pólos a serem posicionados pela variação dos ganhos de n ESPs. A matriz de resíduos das funções de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ de cada ESP associadas aos pólos λ é dada por R .

$$\begin{bmatrix}
 \mathbf{I}_{(2^*m) \times (2^*m)} & \begin{bmatrix} \operatorname{Re}[R]_{m \times n} \\ \operatorname{Im}[R]_{m \times n} \end{bmatrix} \\
 \hline
 \mathbf{I}_{m \times m} \quad \vdots \quad \operatorname{diag}(\xi_{id})_{m \times m} & \begin{bmatrix} 0_{m \times n} \\ \underline{\Delta K}_n \\ \underline{0}_m \end{bmatrix}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \operatorname{Re}[\lambda_m] \\
 \operatorname{Im}[\lambda_m] \\
 \underline{\Delta K}_n \\
 \underline{0}_m
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \operatorname{Re}[\lambda_m^0] \\
 \operatorname{Im}[\lambda_m^0] \\
 \underline{0}_m
 \end{bmatrix}
 \quad (\text{II.77})$$

Onde,

$$\operatorname{diag}(\xi_{id})_{m \times m} =
 \begin{bmatrix}
 \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} & & \ddots & 0 \\
 \vdots & & \ddots & & \vdots \\
 0 & \ddots & & \frac{\xi_{(m-1)d}}{\sqrt{1-\xi_{(m-1)d}^2}} & 0 \\
 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\xi_{md}}{\sqrt{1-\xi_{md}^2}}
 \end{bmatrix}
 \quad (\text{II.78})$$

O cálculo do vetor de variação dos ganhos dos ESPs ($\underline{\Delta K}$) é feito utilizando matriz inversa generalizada sempre que a matriz do sistema (II.77) não for quadrada.

Esta matriz tem $(3m)$ linhas e $(2m+n)$ colunas. Assim, para que o posicionamento seja realizado de forma a atender o critério de amortecimento sem erro na solução, o número de ESPs deve ser igual ou maior ao número de pólos, ou seja, $n \geq m$.

Caso o número de ESPs seja diferente do número de pólos, faz-se uso da matriz inversa generalizada para o cálculo do vetor de variação de ganhos em (II.77). Desta forma, o vetor $\underline{\Delta K}$ terá norma mínima no caso de sistemas sub-determinados, onde há um número infinito de soluções. No caso de sistemas sobre-determinados, onde não há solução exata, a norma do vetor de erro será a menor possível.

II.4.2 Análise de Múltiplos Pontos de Operação

O algoritmo descrito na Seção II.4.1 pode ser usado também na avaliação de múltiplos cenários. O objetivo desta análise é ajustar os ganhos dos ESPs do sistema de forma que os pólos críticos, em todos os pontos de operação, possuam fator de amortecimento o mais próximo possível do adequado.

Para o caso onde m pólos do sistema são posicionados por n ESPs em q pontos de operação distintos, o cálculo do vetor de variação dos ganhos $\underline{\Delta K}$ é feito solucionando o sistema (II.79).

$$\begin{bmatrix}
 \mathbf{I}_{(2*m) \times (2*m)} & \begin{matrix} \text{Re}[R]_{mxn} \\ \text{Im}[R]_{mxn} \end{matrix} \\
 \hline
 \mathbf{I}_{mxm} & \begin{matrix} \text{diag}(\xi_{id})_{mxm} \\ \mathbf{0}_{mxn} \end{matrix} \\
 \hline
 \vdots & \\
 \hline
 \mathbf{I}_{(2*m) \times (2*m)} & \begin{matrix} \text{Re}[R]_{mxn} \\ \text{Im}[R]_{mxn} \end{matrix} \\
 \hline
 \mathbf{I}_{mxm} & \begin{matrix} \text{diag}(\xi_{id})_{mxm} \\ \mathbf{0}_{mxn} \end{matrix}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \begin{matrix} \text{Re}[\lambda_m] \\ \text{Im}[\lambda_m] \end{matrix}_{\text{Caso 1}} \\
 \vdots \\
 \begin{matrix} \text{Re}[\lambda_m] \\ \text{Im}[\lambda_m] \end{matrix}_{\text{Caso q}} \\
 \underline{\Delta K}_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \begin{matrix} \text{Re}[\lambda_m^0] \\ \text{Im}[\lambda_m^0] \end{matrix} \\
 \mathbf{0}_m \\
 \vdots \\
 \begin{matrix} \text{Re}[\lambda_m^0] \\ \text{Im}[\lambda_m^0] \end{matrix} \\
 \mathbf{0}_m
 \end{bmatrix}
 \quad (\text{II.79})$$

Onde,

$$diag(\xi_{id})_{m \times m} = \begin{bmatrix} \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} & & \ddots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \ddots & & \frac{\xi_{(m-1)d}}{\sqrt{1-\xi_{(m-1)d}^2}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\xi_{md}}{\sqrt{1-\xi_{md}^2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.80})$$

Generalizando o sistema (II.79), temos (II.81).

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{I}_{(2^*m') \times (2^*m')} & \begin{bmatrix} \text{Re}[R]_{m' \times n} \\ \text{Im}[R]_{m' \times n} \end{bmatrix} \\ \hline \mathbf{I}_{m' \times m'} \quad \vdots \quad diag(\xi_{id})_{m' \times m'} & \begin{bmatrix} 0_{m' \times n} \\ \Delta K_n \\ \underline{0}_{m'} \end{bmatrix} \end{array} \right] = \begin{bmatrix} \text{Re}[\lambda_{m'}^0] \\ \text{Im}[\lambda_{m'}^0] \\ \underline{0}_{m'} \end{bmatrix} \quad (\text{II.81})$$

Onde,

$$m' = m \cdot q \quad (\text{II.82})$$

A matriz do sistema (II.81) tem $(3m')$ linhas e $(2m'+n)$ colunas. Assim, para que o posicionamento seja realizado de forma a atender o critério de amortecimento sem erro na solução, o número de ESPs deve ser igual ou maior ao número de pólos multiplicado pelo número de pontos de operação, ou seja, $n \geq m' = m \cdot q$.

Por exemplo, para garantir que o fator de amortecimento de um determinado pólo seja igual ao especificado em cinco pontos de operação distintos, são necessários ao menos cinco ESPs.

Nos casos onde, em (II.81), $n \neq m \cdot q$ faz-se uso da matriz inversa generalizada para o cálculo do vetor de variação de ganhos $\underline{\Delta K}$.

A seguir, temos o algoritmo para posicionamento dos pólos.

início

- Cálculo dos pólos λ e dos resíduos R das funções de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ de cada ESP associadas a cada λ , para todos os pontos de operação;
- Cálculo de $\underline{K}^{i+1} = \underline{K}^i + \underline{\Delta K}$, utilizando (II.81);
- Cálculo dos novos pólos e dos novos resíduos associados;
- Enquanto $\max(\xi(\underline{K}^{i+1}) - \xi_d)$ for maior que a tolerância, incrementar o contador ($i = i + 1$) e retornar ao início.

fim

II.4.3 Algoritmo de Variação Automática de Ganho

Os algoritmos apresentados até aqui têm como objetivo o posicionamento dos pólos de interesse de forma que seus fatores de amortecimento sejam iguais aos especificados. Como já apontado, o desconhecimento do melhor local para posicionamento pode levar ao projeto de controladores inviáveis (ganhos extremamente elevados).

Nesta seção é apresentada, como forma mais eficiente de coordenação, um procedimento de posicionamento com variação automática de ganho. É levada em consideração a sensibilidade de cada pólo a variação do ganho de cada controlador.

Ao invés de se especificar o local desejado para cada um dos pólos críticos e em seguida efetuar o posicionamento destes pólos, os ganhos dos controladores são alterados sucessivamente de forma automática e adequada. O procedimento se baseia no fato de que alterações em cada controlador têm influência distinta no deslocamento de cada um dos pólos. A influência de cada controlador em cada pólo é avaliada a partir da informação de sensibilidade modal, contida nos resíduos.

Inicialmente, para uma variação específica nos ganhos dos ESPs (por exemplo, $\Delta K_1 = \Delta K_2 = \dots = \Delta K_n = I$), estima-se a variação de posição dos pólos do sistema utilizando (II.83).

$$\underline{\Delta\lambda} = \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \underline{\lambda} \right) \right] [\underline{\Delta K}] \quad (\text{II.83})$$

A estimativa de posição dos pólos calculada desta forma leva em consideração as diferentes influências dos ESPs nos modos. Esta estimativa é utilizada como posição objetivo pelo algoritmo de posicionamento parcial de múltiplos pólos.

Utilizando a estimativa feita anteriormente, são obtidos os novos ganhos dos ESPs. A partir daí uma nova variação de todos os ganhos é feita, em seguida é estimada uma nova posição e assim por diante. Este processo, do tipo estimativa-correção, é análogo ao realizado por um método de continuação [Seydel 1988]. O procedimento deve ser realizado de maneira sucessiva até que os modos de interesse tenham todos um fator de amortecimento mínimo ou até que os ganhos atinjam o valor máximo.

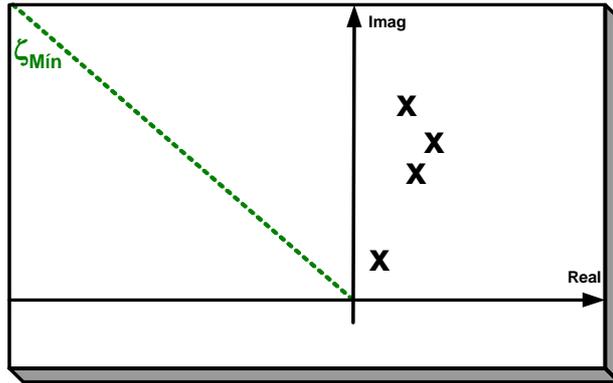
A seguir, é apresentado o algoritmo simplificado do procedimento de posicionamento com variação automática de ganho:

Enquanto [$\text{Min}(\xi) > \xi_{\text{Min}}$] ou [$\text{Máx}(K) < K_{\text{Máx}}$]

- Calcula pólos e resíduos da função de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$;
- Estima posição final dos pólos utilizando a matriz de resíduos e estipulando uma variação de ganhos $\underline{\Delta K}$, calculando $\underline{\Delta\lambda}$ através de (II.83) e fazendo: $\underline{\lambda}^{\text{Novo}} = \underline{\lambda} + \underline{\Delta\lambda}$;
- Algoritmo de posicionamento parcial de múltiplos pólos utilizando como objetivo as posições estimadas no passo anterior \Rightarrow obtenção do vetor de ganhos dos ESPs (K) e da nova posição dos pólos.

fim

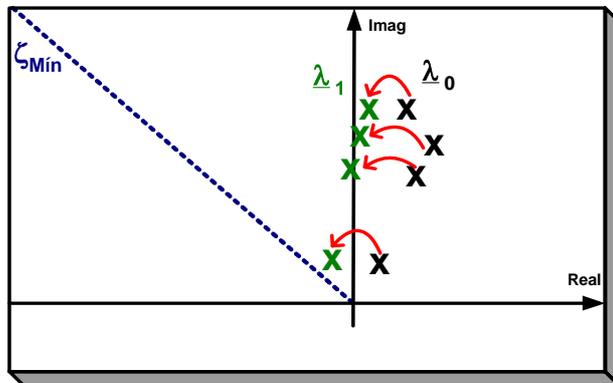
A Figura 25 ilustra o algoritmo.



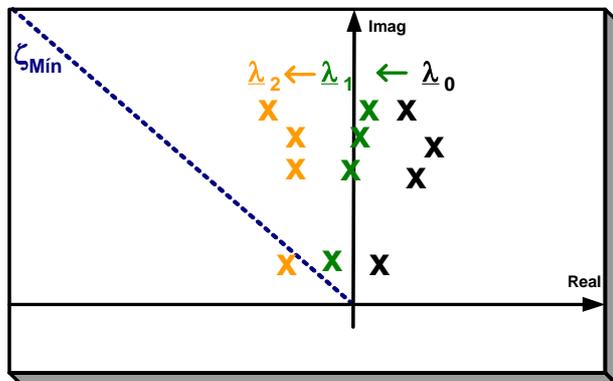
O objetivo é posicionar os pólos de forma que o fator de amortecimento seja ao menos ζ_{Min} . Posicionar todos os pólos em $\zeta = \zeta_{Min}$ pode requisitar valores elevados de ganho (como mostrado na Seção II.3.2).

$$\underline{\Delta\lambda} = \left[R \left(\frac{\Delta V_{ESP}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \right] [\underline{\Delta K}]$$

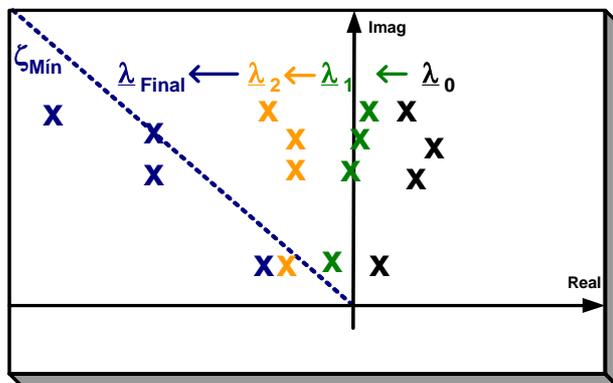
A posição objetivo para posicionamento será dada pela estimativa de $\underline{\Delta\lambda}$ para, por exemplo, $\underline{\Delta K} = \underline{1}$.



O processo de posicionamento é feito utilizando o algoritmo da Seção II.4.1. A posição final estará a esquerda da anterior.



Nova estimativa de posição via variação de ganho é feita. Em seguida, novo posicionamento tendo como objetivo a posição estimada.



Desta forma, o avanço dos pólos acontece de maneira natural até que todos tenham $\zeta \geq \zeta_{Min}$ ou que os ganhos atinjam seu valor máximo.

Figura 25 – Posicionamento utilizando resíduo de função de transferência.

A utilização do procedimento descrito anteriormente exige que sejam estipulados o mínimo fator de amortecimento a ser obtido e o valor máximo para os ganhos dos ESPs. Além destes, é necessária ainda a determinação de alguns parâmetros:

➤ Valor inicial dos ganhos

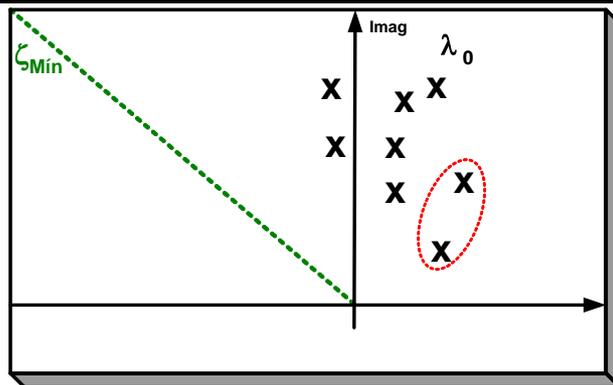
Um valor inicial muito pequeno acarreta num maior número de estimativas e posicionamentos para que se obtenha o fator mínimo de amortecimento para todos os pólos.

➤ A variação a ser feita nos ganhos

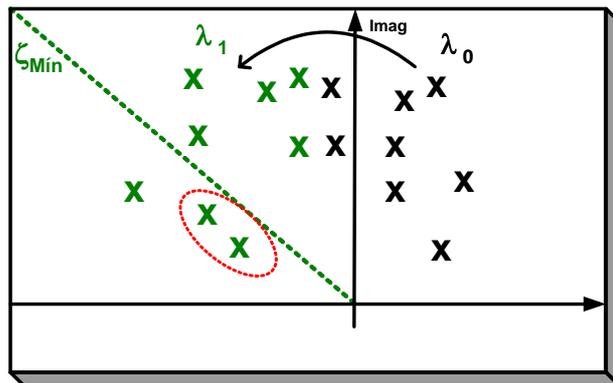
Este valor determina o quão distante da posição inicial estará a estimativa para posicionamento. Para valores elevados, as estimativas estarão mais afastadas das posições iniciais e o número de posicionamentos tende a ser menor. Por outro lado, a etapa de posicionamento é dificultada pelo fato da estimativa estar muito afastada do valor inicial. Uma solução de consenso seria alterar o valor da variação ao longo do processo: valores maiores no início e menores a medida que o menor fator de amortecimento do sistema esteja próximo do valor final desejado.

➤ Quantos e quais os pólos a serem monitorados/posicionados

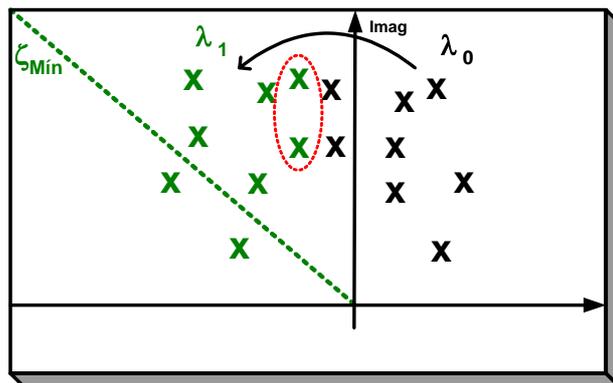
A seleção dos pólos de interesse é feita após a etapa de posicionamento: verifica-se quais os n pólos com menor fator de amortecimento em cada ponto de operação. É dado prosseguimento ao processo caso o menor fator de amortecimento seja maior que o mínimo estipulado. Após cada variação de ganho os novos pólos são calculados através de métodos de solução parcial (por exemplo, utilizando o método de Rayleigh [Golub 1989]). A solução completa do problema de autovalores é realizada após um determinado número de incremento dos ganhos, de forma a assegurar o monitoramento dos modos com menor fator de amortecimento (Figura 26).



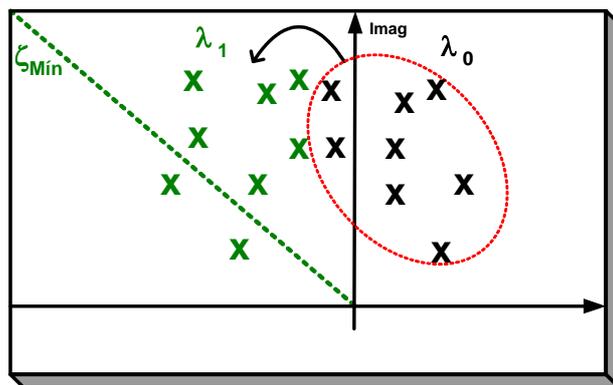
É determinado que os dois pólos com menor fator de amortecimento serão monitorados.



Após variação dos ganhos, os pólos que eram monitorados já têm o fator de amortecimento adequado, entretanto outros pólos ainda têm posicionamento inadequado. Isto só pode ser identificado calculando-se todos os pólos.



Após nova verificação são determinados os novos pólos a serem monitorados.



Caso todos os pólos fossem monitorados desde o início, o problema descrito acima não aconteceria, mas o sistema a ser resolvido na etapa de posicionamento ficaria muito maior.

Figura 26 – Escolha de quantos pólos serão monitorados.

É importante notar que quanto maior o número de pólos a serem posicionados, maior será o sistema a ser resolvido na etapa de posicionamento. Por outro lado, se

poucos pólos são monitorados será necessário um número maior de cálculo de todos os pólos para se certificar que os aqueles escolhidos são efetivamente os mais críticos.

Outro fato a ser levado em consideração é o tratamento dado a pólos que já tem fator de amortecimento acima do mínimo. Se, por exemplo, são monitorados dez pólos e dois têm fator de amortecimento acima de 30 %, não é necessário posicioná-los de forma a aumentar o fator de amortecimento. Pode ser utilizada, para este caso, como estimativa de posicionamento a própria posição atual (o que tende a deixar pólo na mesma posição). Outra estratégia que pode ser adotada é deixar de monitorar os modos com fator de amortecimento maior que, por exemplo, 30 %.

O algoritmo apresentado nesta seção baseia-se fundamentalmente nos resíduos para determinar como os pólos serão movidos de forma a aumentar o amortecimento das oscilações. O esforço de controle é dividido entre os controladores instalados no sistema, de forma que aqueles com maior capacidade de amortecer as oscilações têm maiores ganhos.

Os fatores citados anteriormente influenciam a resposta final do processo por serem determinantes no cálculo dos resíduos. Por exemplo, para diferentes valores de ganhos iniciais, diferentes resíduos serão obtidos e conseqüentemente diferentes ganhos serão ajustados. A diferença depende do sistema e é definida pela forma como os resíduos variam de um ponto de operação para outro.

O algoritmo foi implementado em ambiente Matlab. O fluxo de potência é obtido utilizando o ANAREDE [CEPEL 2002b]. A partir do ponto de operação definido e com os dados para estudo da dinâmica, o PacDyn [CEPEL 2002a] é utilizado para montar a matriz jacobiana do sistema (Figura 27).

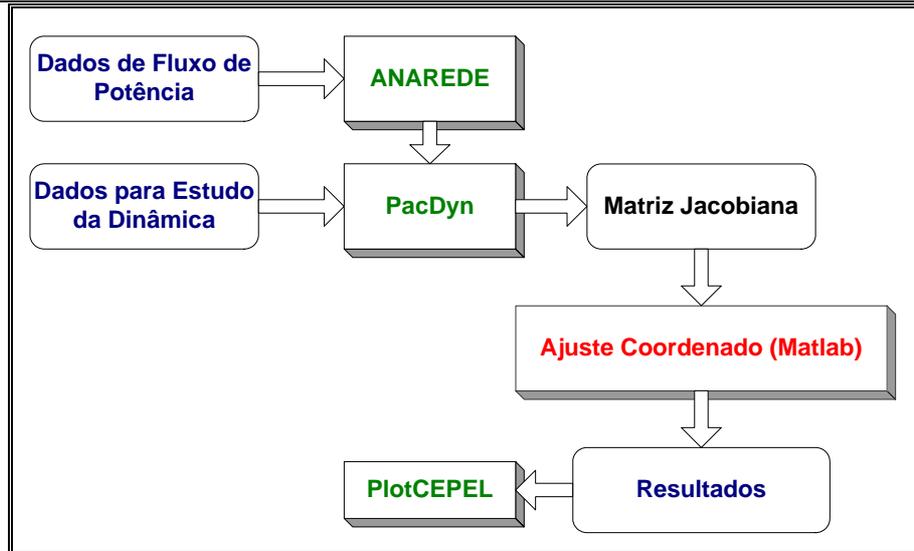


Figura 27 – Esquema básico de execução.

A metodologia convencional para estudo do problema de estabilidade frente pequenas perturbações utiliza a formulação no espaço de estados. O sistema de equações não lineares, algébricas e dinâmicas, é linearizado em torno de um ponto de operação.

Seja o modelo do sistema elétrico de potência dado por (II.84).

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= f(\underline{x}, \underline{r}) \\ \underline{0} &= g(\underline{x}, \underline{r}) \end{aligned} \quad (\text{II.84})$$

Onde \underline{x} é o vetor de estados e \underline{r} o vetor de variáveis algébricas.

Linearizando em torno do ponto $(\underline{x}_0, \underline{r}_0)$, obtido através da solução do problema de fluxo de potência, temos (II.85).

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta \dot{x}} \\ \underline{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Delta x} \\ \underline{\Delta r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.85})$$

A matriz de estados do sistema (A) é obtida através da eliminação do vetor de variáveis algébricas $\underline{\Delta r}$ (II.86). Os autovalores de A fornecem as informações sobre a estabilidade do sistema.

$$\begin{aligned}\underline{\Delta \dot{x}} &= (J_1 - J_2 J_3^{-1} J_4) \underline{\Delta x} = A \underline{\Delta x} \\ A &= (J_1 - J_2 J_3^{-1} J_4)\end{aligned}\quad (\text{II.86})$$

A formulação convencional no espaço de estados é mostrada em (II.87), onde \underline{u} é o vetor das variáveis de controle, \underline{b} é o vetor de entradas e \underline{c} o vetor de saídas.

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}} &= A \underline{\Delta x} + \underline{b} \underline{u} \\ y &= \underline{c}^t \underline{x}\end{aligned}\quad (\text{II.87})$$

O problema desta formulação é que a matriz A não é esparsa. Tornando alto o custo computacional da análise de sistemas de grande porte.

O PacDyn utiliza outra metodologia, onde o sistema de equações utilizado é aumentado [Martins 1986, Martins 1989]. O sistema aumentado é dado por (II.88).

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{\underline{x}} \\ \underline{0} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{r} \end{bmatrix} + \underline{b}_a \underline{u} \\ y &= \begin{bmatrix} \underline{c}_x^t & \underline{c}_r^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{r} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{II.88})$$

Onde \underline{b}_a é o vetor aumentado de entradas, \underline{c}_a (formado por \underline{c}_x e \underline{c}_r) é o vetor aumentado de saídas e \underline{x}_a é o vetor aumentado de estados. A matriz de estados aumentada (formada por J_1 , J_2 , J_3 e J_4) é altamente esparsa, tornando viável a análise de sistemas de grande porte.

O programa lê a matriz jacobiana formada pelo PacDyn e efetua todo o processamento em Matlab. Os pólos do sistema calculados durante o processo de ajuste são exportados para visualização utilizando o programa PlotCEPEL [CEPEL 2002d].

Apesar da formulação aumentada, a esparcidade do sistema não é explorada no cálculo da solução completa do problema de autovalores, feito utilizando método QR [Golub 1989], e nem para o cálculo da matriz inversa generalizada. No caso destas funções, o Matlab trata as matrizes como cheias, o que causa grande perda de eficiência computacional.

Nas seções que seguem o procedimento de posicionamento com variação automática de ganho é avaliado para vários cenários de operação em dois sistemas além do Sistema Teste I, utilizado na Seção II.3.1.

II.5 Análise do Sistema Teste I

Nesta seção o sistema apresentado em [Martins 1989] e descrito no Apêndice I é avaliado para duas configurações e em 5 pontos de operação distintos. O sistema é instável em todos os casos e são apresentadas soluções utilizando-se 2 ou 3 ESPs.

II.5.1 Sistema Teste I – Configuração A

A configuração A do sistema teste I, mostrada na Figura 28, é a mesma de [Martins 1989]. Os RATs têm ganho baixo e o sudeste é representado por gerador e carga equivalentes. Todas as cargas são representadas por impedâncias constantes.

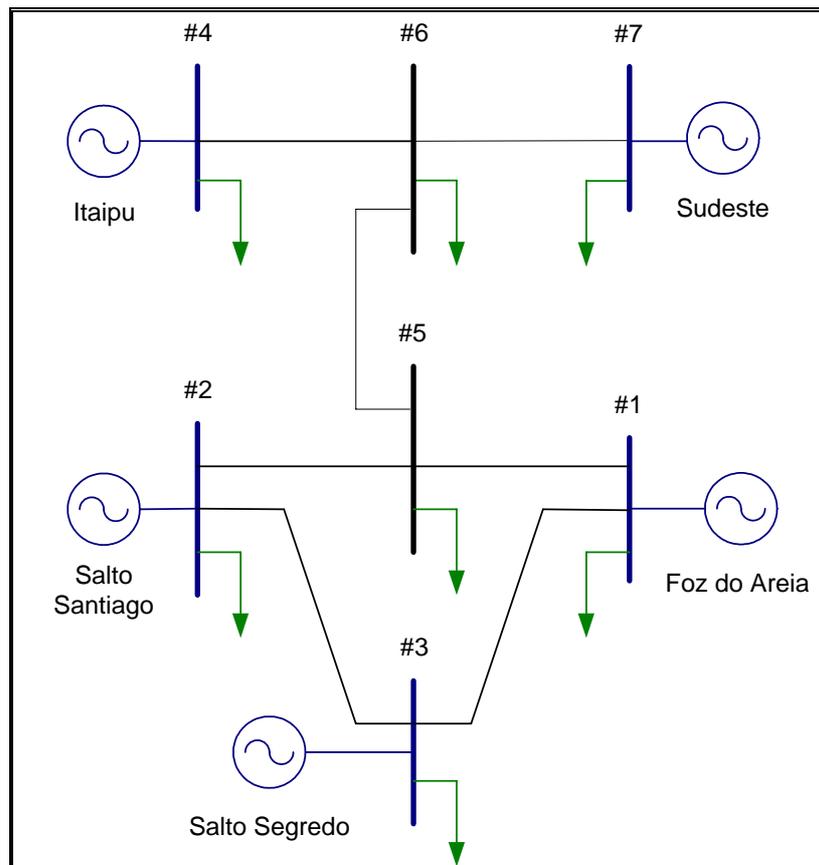


Figura 28 – Sistema teste I – configuração A.

Esta configuração foi utilizada em [Boukarim 2000] para comparar, em cinco cenários distintos, o desempenho de controladores projetados a partir de diferentes técnicas.

O melhor resultado obtido em [Boukarim 2000], dentre as alternativas avaliadas, foi um ajuste utilizando LMI (*Linear Matrix Inequality*). Desta forma, para os diferentes cenários avaliados, dois controladores instalados em Itaipu e Salto Segredo garantem que o menor fator de amortecimento do sistema é maior que 10 %.

Os cinco pontos de operação utilizados em [Boukarim 2000] são usados também nesta seção. A Tabela 6 e a Figura 29 descrevem as características de cada um. A Tabela 7 mostra os modos de oscilação eletromecânica de interesse para cada cenário.

Tabela 6 – Características dos pontos de operação analisados.

Ponto de Operação	Reatância (pu)		Modos de Oscilação Eletromecânica de Interesse			
	X_{5-6}	X_{6-7}		Freq. (Hz)	ξ (%)	Natureza
1	0,39	0,57	λ_1	0,94	3,8	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,86	- 11,9	Sudeste x (Sul + Itaipu)
2	0,50	0,57	λ_1	0,92	3,5	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,86	- 12,1	Sudeste x (Sul + Itaipu)
3	0,80	0,57	λ_1	0,88	2,8	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,85	- 12,7	Sudeste x (Sul + Itaipu)
4	0,39	0,63	λ_1	0,93	4,0	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,84	- 13,7	Sudeste x (Sul + Itaipu)
5	0,39	0,70	λ_1	0,93	4,2	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,80	- 16,6	Sudeste x (Sul + Itaipu)

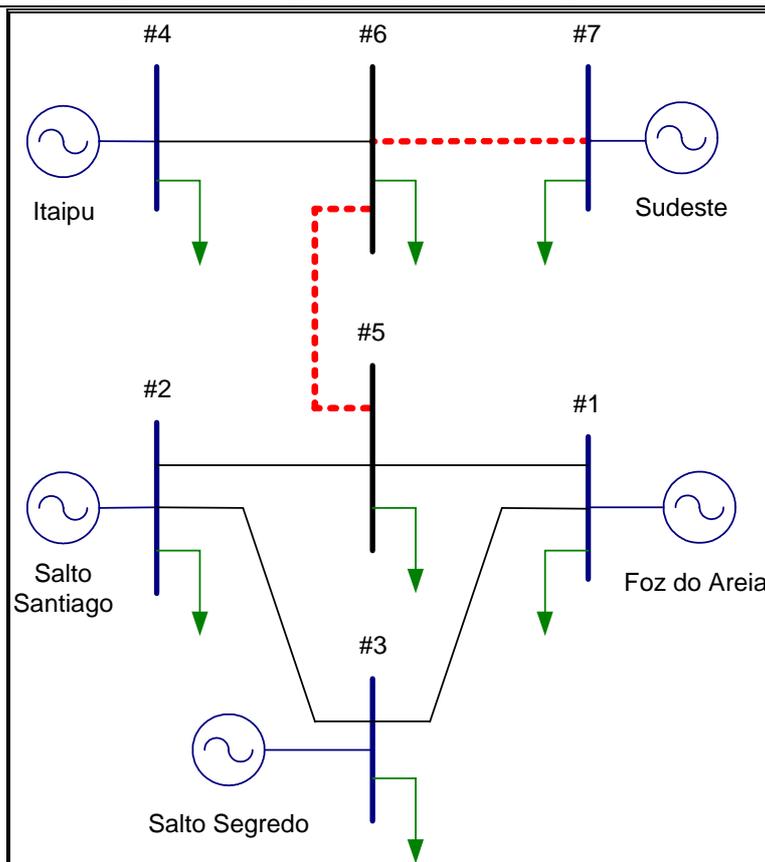


Figura 29 – Circuitos alterados nos casos analisados.

Tabela 7 – Modos de oscilação eletromecânica de interesse.

	Ponto de Operação	Real (1/s)	Imag. (rad/s)	Freq. (Hz)	ξ (%)	Natureza
λ_1	1	-0,22564	$\pm 5,877$	0,93535	3,84	Itaipu x (Sul + Sudeste)
	2	-0,20228	$\pm 5,772$	0,91865	3,50	
	3	-0,15283	$\pm 5,5108$	0,87706	2,77	
	4	-0,23528	$\pm 5,8544$	0,93175	4,02	
	5	-0,24344	$\pm 5,8185$	0,92604	4,18	
λ_2	1	+0,64645	$\pm 5,3919$	0,85815	-11,90	Sudeste x (Sul + Itaipu)
	2	+0,65605	$\pm 5,3780$	0,85593	-12,11	
	3	+0,68259	$\pm 5,3471$	0,85102	-12,66	
	4	+0,72501	$\pm 5,2482$	0,83527	-13,68	
	5	+0,84124	$\pm 5,0011$	0,79595	-16,59	

As peculiaridades deste sistema (RATs com ganhos baixos e simplificações) tornam necessária a utilização de ESPs com ganhos altos. Em [Boukarim 2000] a melhor solução encontrada utiliza dois ESPs com ganhos de até 109 pu/pu (Tabela 8) projetados utilizando LMI. O menor fator de amortecimento para os cinco pontos de operação é 10,1 % (Tabela 9). A Figura 30 mostra o mapa de pólos de malha aberta e os zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2 \times 2}$ para os geradores de Itaipu e Salto Segredo.

Tabela 8 – Parâmetros relativos ao ajuste dos ESPs projetados utilizando LMI.

Gerador	Ajuste de Fase	Ganho (pu/pu)
Itaipu	$\left(\frac{3s}{1+3s}\right)\left(\frac{1+0,52195s+0,04878s^2}{1+0,03422s+0,00036s^2}\right)$	57,0
Salto Segredo	$\left(\frac{3s}{1+3s}\right)\left(\frac{1+0,16866s+0,01493s^2}{1+0,06495s+0,00026s^2}\right)$	108,7

Tabela 9 – Ganhos dos 2 ESPs para estabilização do sistema (LMI).

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento			Ganhos dos ESPs (pu/pu)
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação	
Sem ESPs	0,7960	- 16,59	5	$K_{Itaipu} = 57,0$ $K_{S. Segredo} = 108,7$
Com ESPs	0,8611	10,1	5	

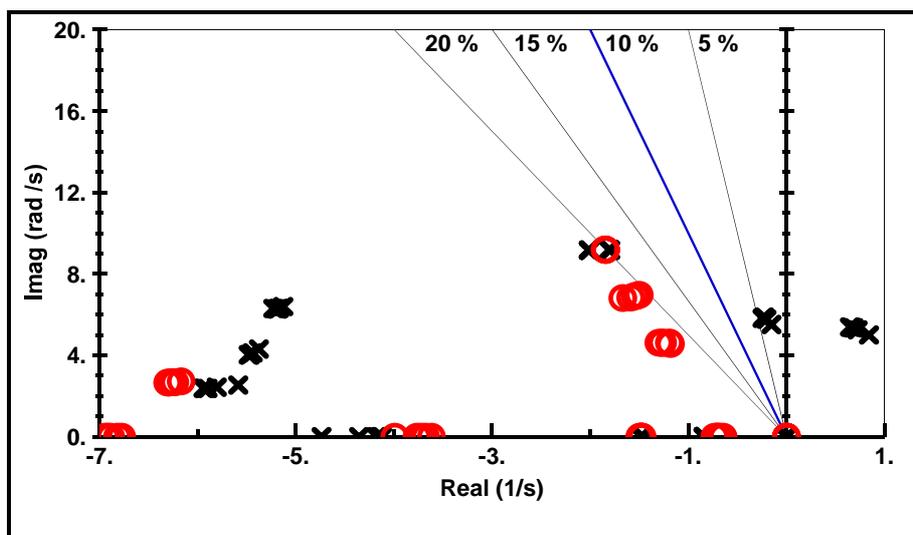


Figura 30 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2 \times 2}$ para os geradores de Itaipu e Salto Segredo em cinco cenários.

O ajuste coordenado, conforme a metodologia descrita na Seção II.4, foi realizado utilizando o mesmo ajuste de fase descrito na Tabela 8. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados no procedimento. Os ganhos obtidos garantem o desempenho mostrado na Tabela 11.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Varição de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
10,1 %	90 pu/pu	3	30	10 pu/pu	8

Tabela 11 – Ganhos de 2 ESPs para estabilização do sistema.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento			Ganhos dos ESPs (pu/pu)
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação	
Sem ESPs	0,7960	- 16,59	5	$K_{\text{Itaipu}} = 63,8$
Com ESPs	0,8758	10,1	5	$K_{\text{S. Segredo}} = 86,7$

A Figura 31 mostra os ganhos obtidos nos dois ajustes. A juste coordenado dos ganhos apresenta ganho máximo menor (Figura 31) e ganho médio menor (Figura 32), para o mesmo fator de amortecimento mínimo.

Ambos os ajustes aqui comparados são, na realidade, coordenados. Entretanto por uma questão simplesmente de facilitar a escrita do texto em tabelas e figuras, o chamado ‘ajuste coordenado’ refere-se ao método proposto nesta tese, descrito na Seção II.4.

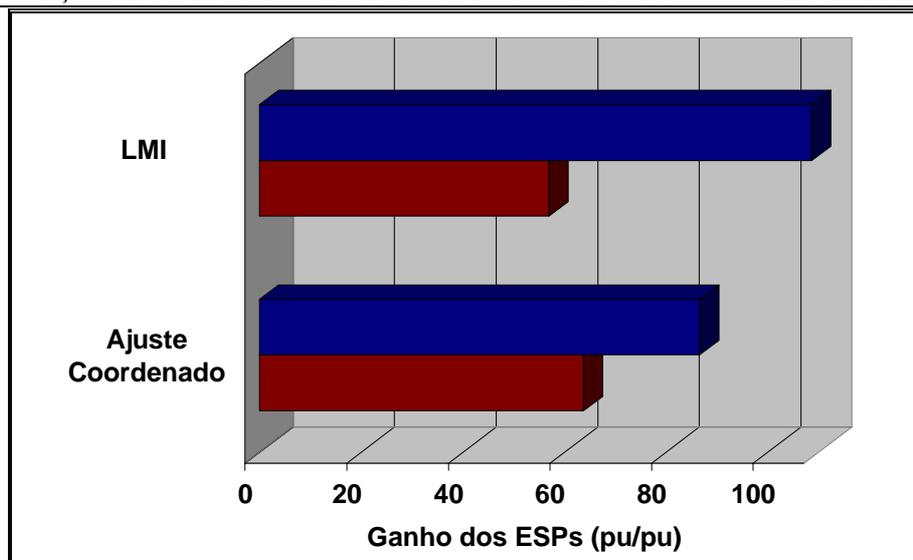


Figura 31 – Ganhos dos ESPs para dois ajustes.

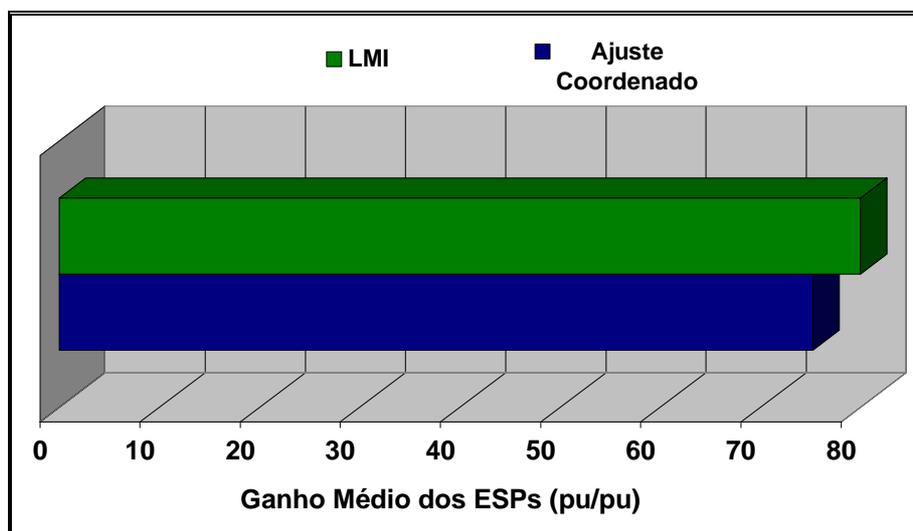


Figura 32 – Ganho médio dos ESPs para os dois ajustes.

A Figura 33 mostra os zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2 \times 2}$ para os geradores de Itaipu e Salto Segredo, os pólos do sistema sem controles e os pólos para os dois ajustes: LMI [Boukarim 2000] e ajuste coordenado dos ganhos.

Os pólos com parte imaginária entre 4 rad/s e 8 rad/s têm praticamente a mesma posição. Por outro lado, os pólos com parte imaginária entre 16 rad/s e 20 rad/s têm menor fator de amortecimento no ajuste LMI, isto é causado pelo valor 25 % maior de ganho no ESP de Salto Segredo.

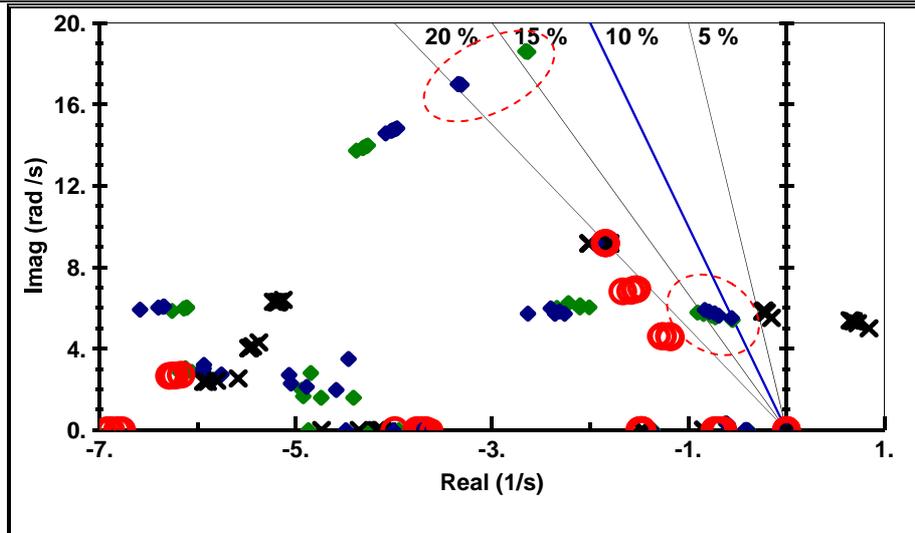


Figura 33 – Zeros (o), pólos em malha aberta (x), ajuste coordenado dos ganhos (azul) e ajuste via LMI (verde).

A Figura 34 mostra o diagrama do lugar das raízes para a variação simultânea dos ganhos desde zero até os valores finais: $K_{Itaipu} = 63,8$ e $K_{S. Segredo} = 86,7$ (Tabela 11).

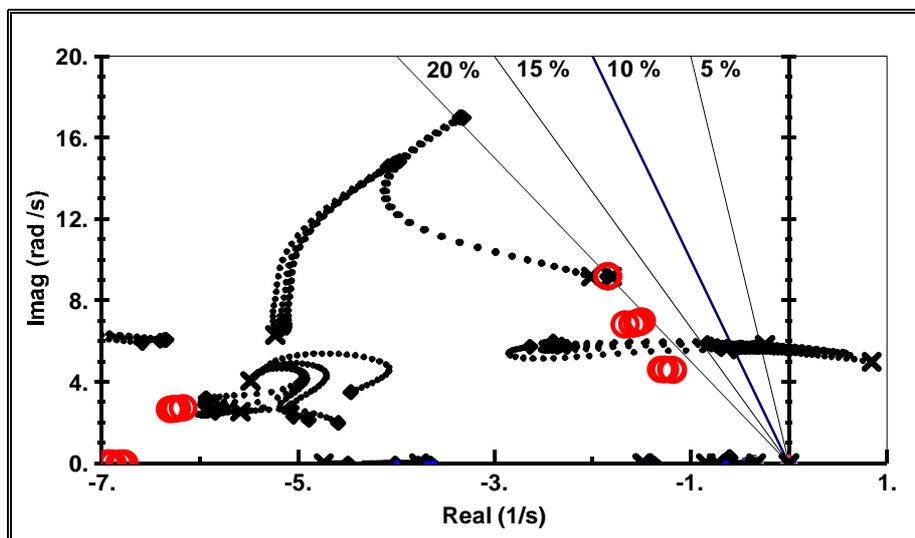


Figura 34 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores mostrados na Tabela 11.

II.5.2 Sistema Teste I – Configuração B

A configuração B do sistema teste I (Figura 35) é a mesma utilizada na Seção II.3. Ela difere da configuração A pela utilização de excitatrizes estáticas com alto ganho ($K_a = 100$ pu/pu) e da representação do Sudeste por uma barra infinita. Assim como na configuração A, todas as cargas são representadas por impedâncias constantes.

A Tabela 12 apresenta as características dos cinco pontos de operação analisados. Assim como na configuração A, na configuração B o sistema é instável para todos os cenários.

A Figura 35 mostra os circuitos que têm seus parâmetros alterados de acordo com o ponto de operação.

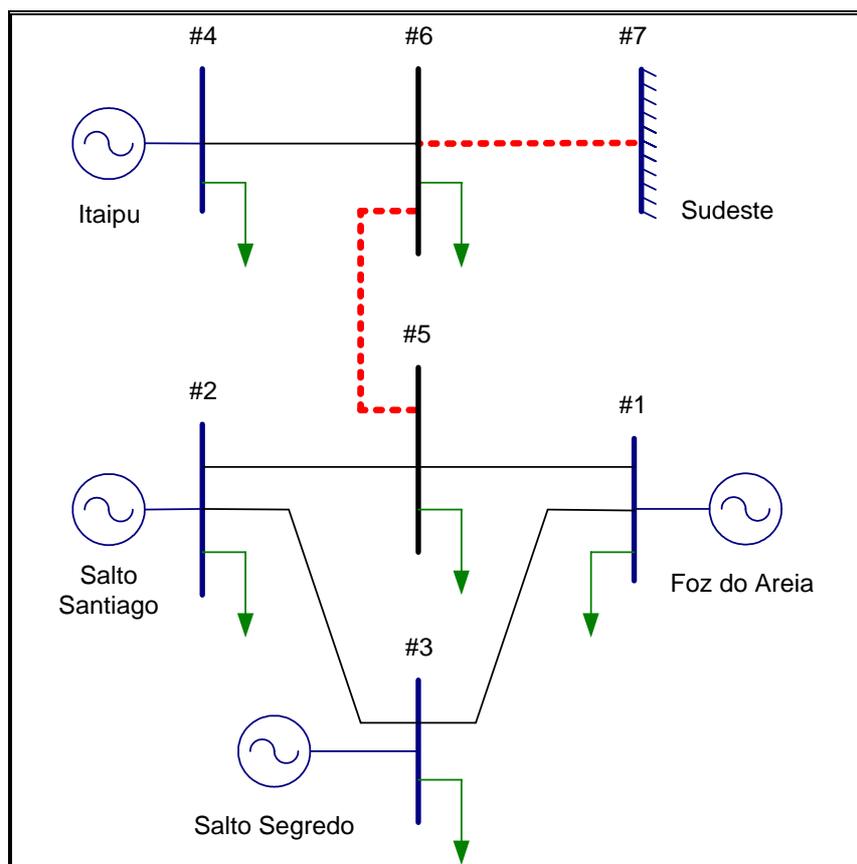


Figura 35 – Sistema teste I – configuração B.

Tabela 12 – Características dos pontos de operação analisados.

Ponto de Operação	Reatância (pu)		Modos de Oscilação Eletromecânica de Interesse			
	X_{5-6}	X_{6-7}		Freq. (Hz)	ξ (%)	Natureza
1	0,39	0,57	λ_1	0,94	- 2,59	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,74	- 3,75	Sudeste x (Sul + Itaipu)
2	0,50	0,57	λ_1	0,93	- 3,36	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,73	- 3,28	Sudeste x (Sul + Itaipu)
3	0,80	0,57	λ_1	0,91	- 5,13	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,71	- 2,20	Sudeste x (Sul + Itaipu)
4	0,39	0,63	λ_1	0,94	- 2,31	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,72	- 4,47	Sudeste x (Sul + Itaipu)
5	0,39	0,70	λ_1	0,94	- 1,96	Itaipu x (Sul + Sudeste)
			λ_2	0,68	- 5,51	Sudeste x (Sul + Itaipu)

Para a estabilização do sistema são utilizados dois ou três ESPs. Os parâmetros do ajuste de fase é dado na Tabela 13. Este ajuste de fase tem avanço máximo em 30 rad/s, frequência acima daquelas associadas a oscilações eletromecânicas.

Tabela 13 – Parâmetros relativos ao ajuste de fase dos ESPs.

Nº de blocos	Tw (s)	Tn (s)	Td (s)
2	3	0,100	0,010

A Tabela 14 apresenta os dados referentes aos modo de oscilação eletromecânica de interesse nos cinco pontos de operação.

Tabela 14 – Modos de oscilação eletromecânica de interesse.

	Ponto de Operação	Real (1/s)	Imag. (rad/s)	Freq. (Hz)	ξ (%)	Natureza
λ_1	1	+ 0,15309	\pm 5,9138	0,94121	- 2,59	Itaipu x (Sul + Sudeste)
	2	+ 0,19677	\pm 5,8563	0,93206	- 3,36	
	3	+ 0,29471	\pm 5,7320	0,91227	- 5,13	
	4	+ 0,13624	\pm 5,9048	0,93977	- 2,31	
	5	+ 0,11572	\pm 5,8890	0,93726	- 1,96	
λ_2	1	+ 0,17408	\pm 4,6435	0,73904	- 3,75	Sudeste x (Sul + Itaipu)
	2	+ 0,15109	\pm 4,5989	0,73194	- 3,28	
	3	+ 0,09817	\pm 4,4700	0,71142	- 2,20	
	4	+ 0,20129	\pm 4,5025	0,71660	- 4,47	
	5	+ 0,23569	\pm 4,2694	0,67949	- 5,51	

A primeira solução será obtida com a instalação de dois ESPs no sistema. A Figura 36 mostra o mapa de pólos e zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2 \times 2}$ para os geradores de Itaipu e Salto Segredo.

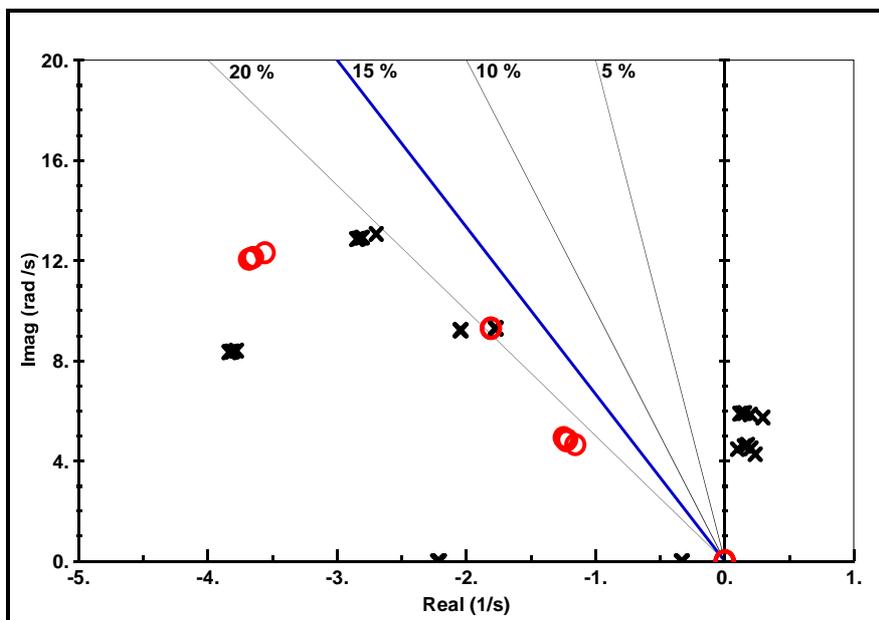


Figura 36 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{2 \times 2}$ para os geradores de Itaipu e Salto Segredo.

O ajuste coordenado dos ganhos foi feito utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Variação de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	20 pu/pu	4	5	2 pu/pu	11

A Tabela 16 mostra os valores de ganho obtidos e o modo com menor fator de amortecimento para o sistema em malha aberta e com os controladores.

Tabela 16 – Ganhos dos ESPs para estabilização do sistema.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento			Ganhos dos ESPs (pu/pu)
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação	
Sem ESPs	0,6795	- 5,5	5	$K_{\text{Itaipu}} = 20,0$ $K_{\text{S. Segredo}} = 16,3$
Com ESPs	0,6589	+ 15,1	3	

A Figura 37 e a Figura 38 mostram a evolução dos ganhos dos estabilizadores e do menor fator de amortecimento ao longo do ajuste coordenado.

Os dois gráficos apresentam as variações desde ganhos nulos (malha aberta). No ponto 1, o ganho dos ESPs é nulo. No ponto 2, os ganhos têm os valores iniciais especificados. Entre os pontos 2 e 13, ocorre a coordenação em si. (11 variações de ganho).

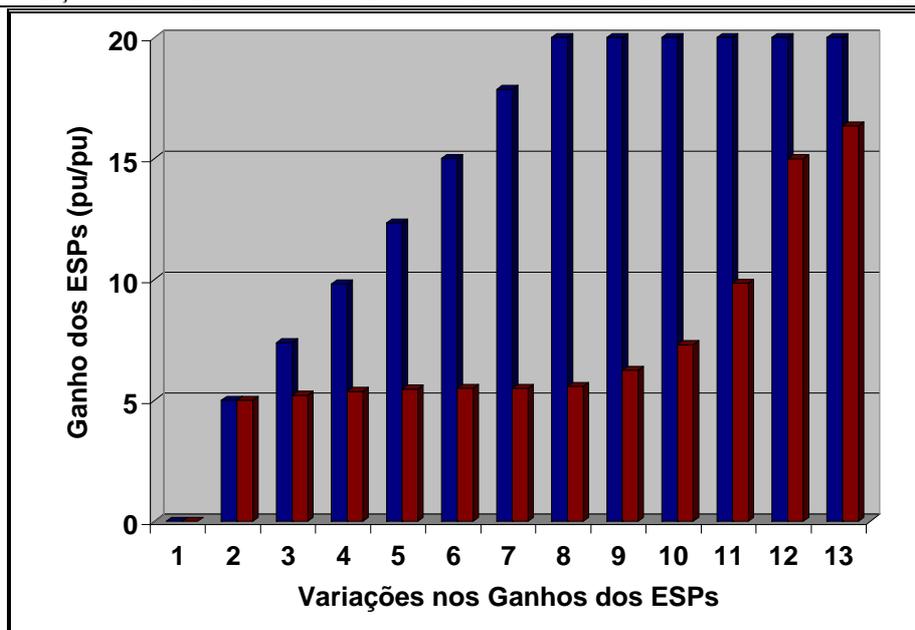


Figura 37 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

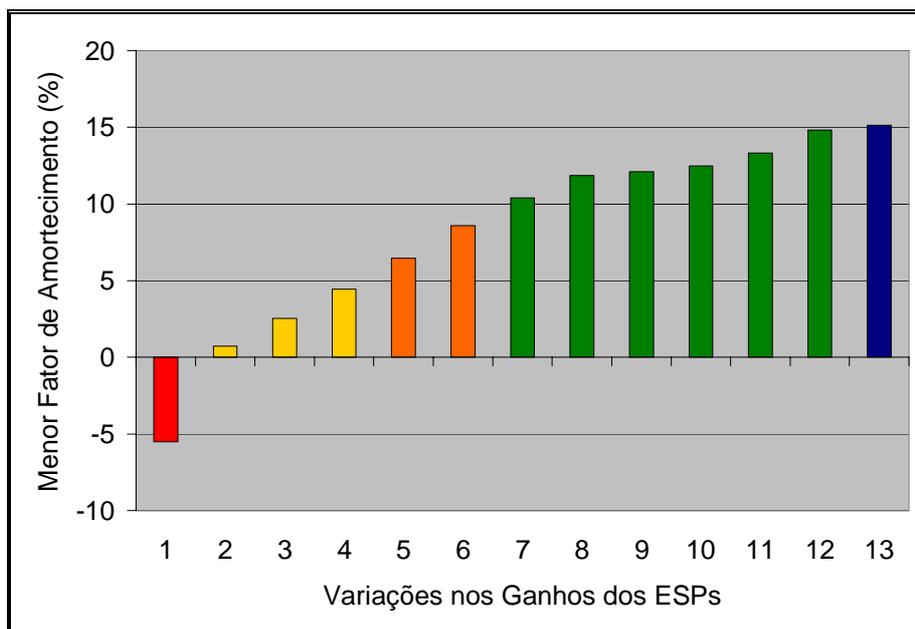


Figura 38 – Evolução do menor fator de amortecimento.

A Figura 39 mostra o diagrama do lugar das raízes para a variação simultânea dos ganhos dos ESPs de zero até os valores apresentados na Tabela 16.

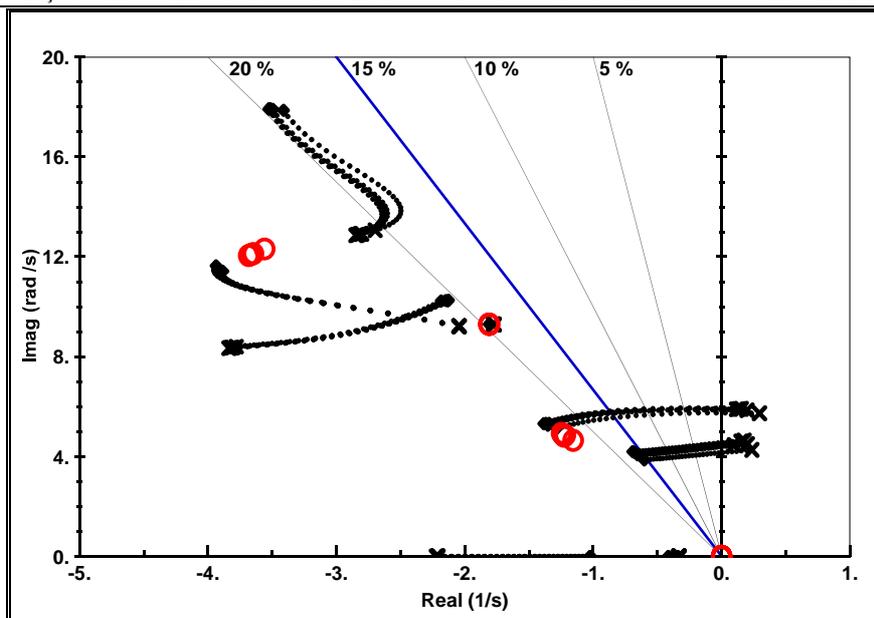


Figura 39 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos dois ESPs de zero (malha aberta) até os valores mostrados na Tabela 16.

A Figura 40 mostra em detalhe o deslocamento dos dois pólos críticos.

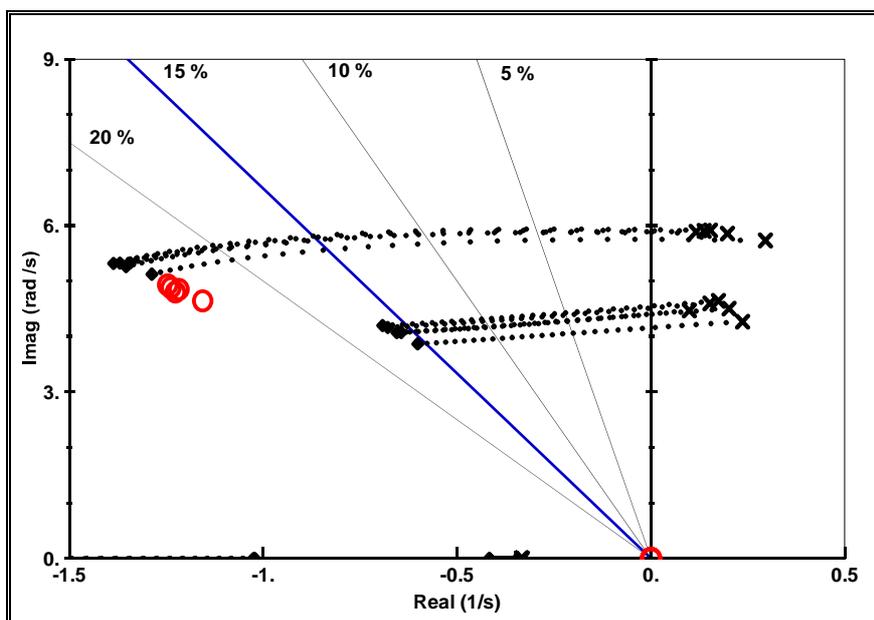


Figura 40 – Diagrama do lugar das raízes (detalhe da Figura 39).

A segunda opção de estabilização do sistema utiliza três ESPs, instalados em Itaipu, Salto Segredo e Foz do Areia. A Figura 41 mostra o mapa de pólos e zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{3 \times 3}$, referente a esses três geradores.

Avaliando a posição dos zeros observa-se a que não há (a priori) dificuldades para posicionar os modos críticos no semiplano esquerdo.

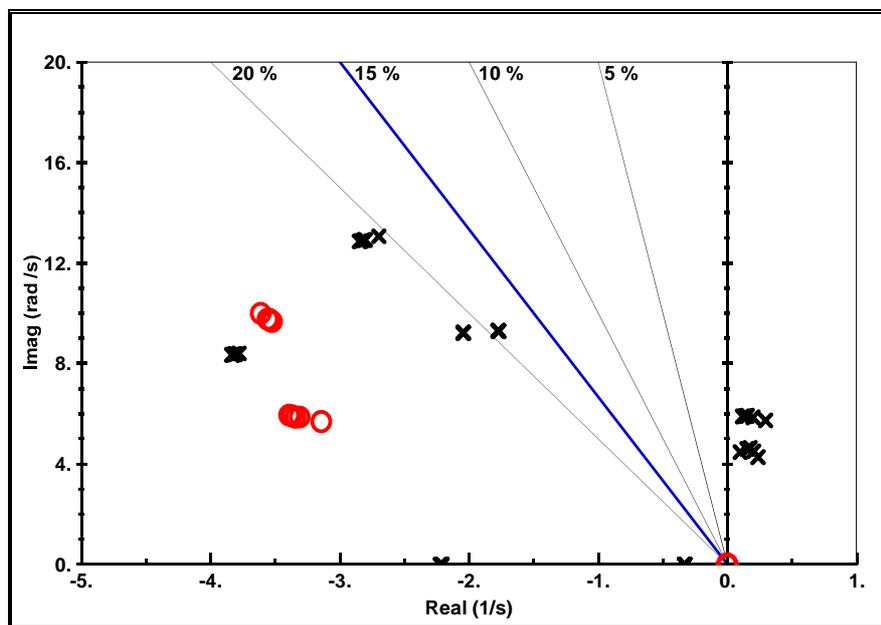


Figura 41 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{3 \times 3}$ para os geradores de Itaipu, Salto Segredo e Foz do Areia.

Os parâmetros utilizados no ajuste coordenado dos ganhos dos três ESPs são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Variação de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	20 pu/pu	4	5	2 pu/pu	4

A Figura 42 e a Figura 43 mostram a evolução dos ganhos dos estabilizadores e do menor fator de amortecimento ao longo do ajuste coordenado. Os dois gráficos apresentam as variações desde ganhos nulos (malha aberta).

No ponto 1, o ganho dos ESPs é nulo. No ponto 2, os ganhos têm os valores iniciais especificados. Entre os pontos 2 e 6, ocorre a coordenação em si. (4 variações de ganho).

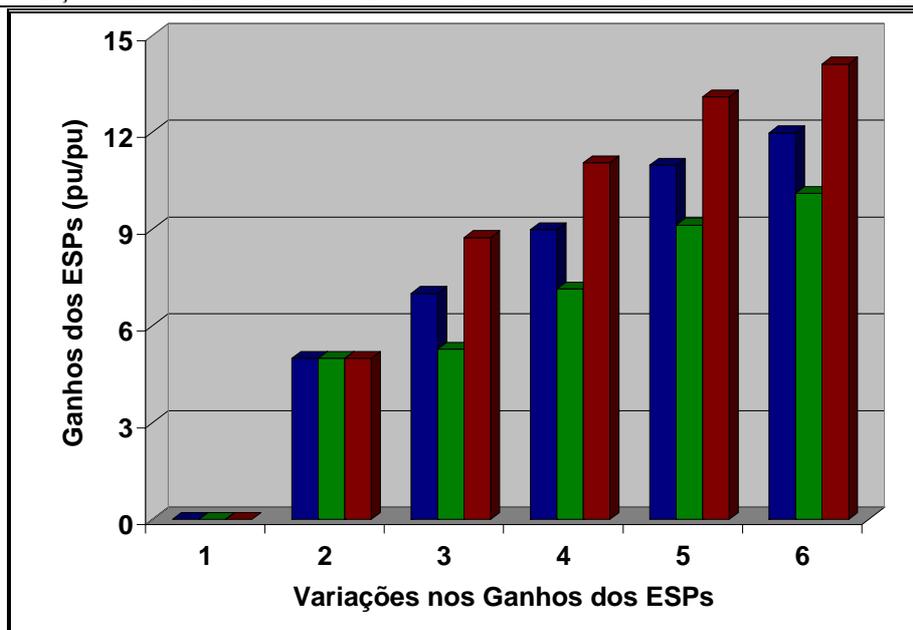


Figura 42 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

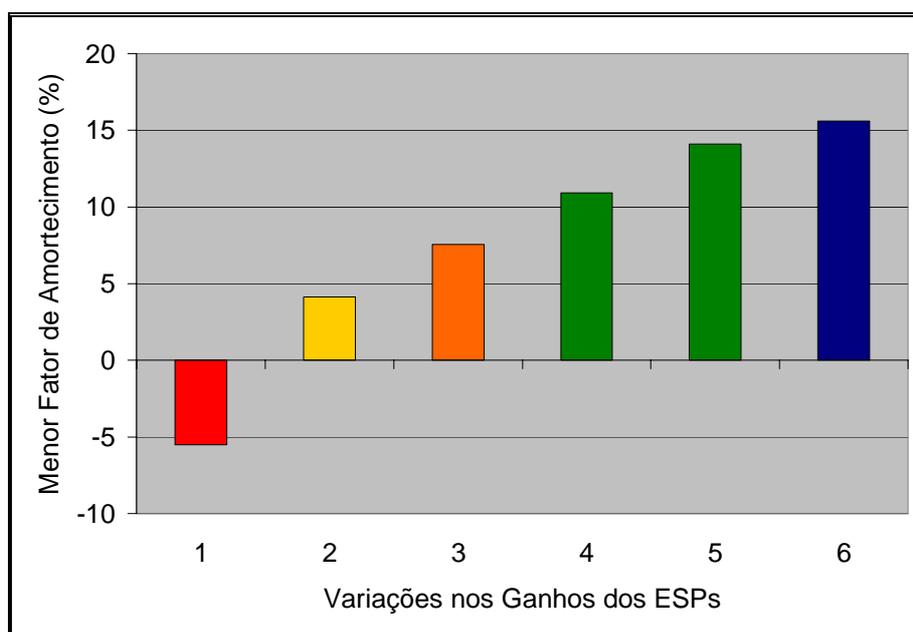


Figura 43 – Evolução do menor fator de amortecimento.

A Tabela 18 apresenta os ganhos fornecidos pelo ajuste e o modo de oscilação com menor fator de amortecimento para o sistema em malha aberta e com os controladores.

Tabela 18 – Ganhos dos 3 ESPs para estabilização do sistema.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento			Ganhos dos ESPs (pu/pu)
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação	
Sem ESPs	0,6795	- 5,5	5	$K_{Itaipu} = 12,0$ $K_{S. Segredo} = 10,1$ $K_{Foz do Areia} = 14,1$
Com ESPs	0,6303	+ 15,6	5	

O sistema torna-se estável em todos os pontos de operação utilizando-se dois ou três ESPs. Sendo que neste caso, o ajuste é facilitado: é necessário um número menor de variações dos ganhos. Além disso, os ganhos dos ESPs são menores, mostrando que o esforço de controle é dividido pelos equipamentos.

A Figura 44 mostra o diagrama do lugar das raízes para a variação simultânea dos ganhos dos ESPs de zero até os valores obtidos no ajuste coordenado.

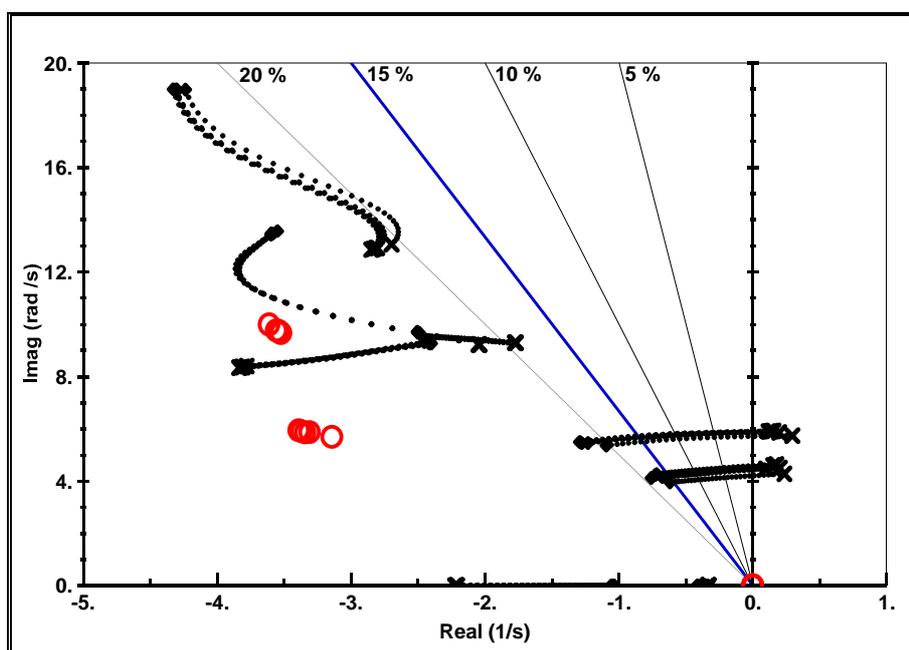


Figura 44 – Diagrama do lugar das raízes para variação simultânea dos ganhos dos três ESPs de zero (malha aberta) até os valores mostrados na Tabela 18.

A Figura 45 mostra em detalhe o deslocamento dos pólos críticos.

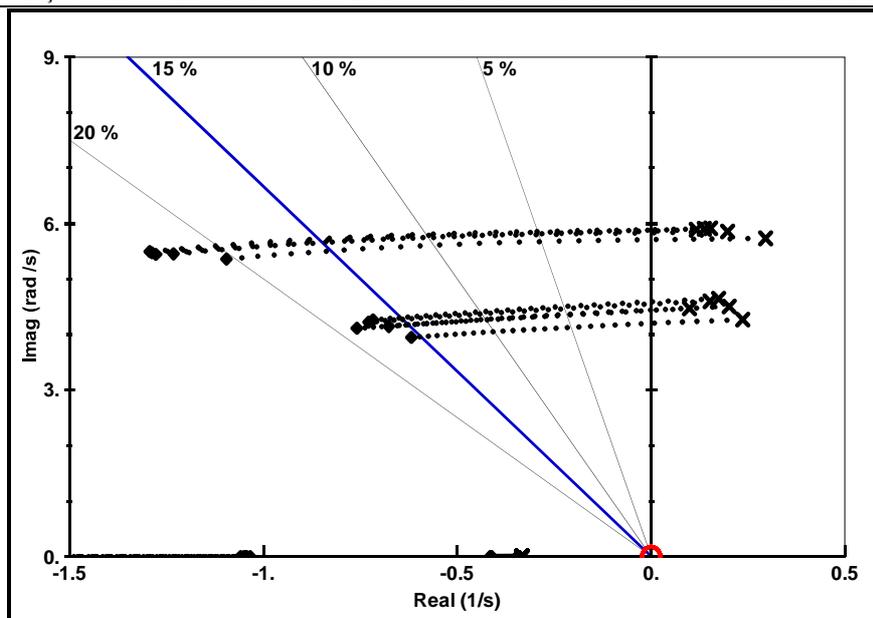


Figura 45 – Diagrama do lugar das raízes (detalhe da Figura 44).

II.5.3 Sistema Teste I – Considerações Finais

O sistema teste I, apesar de sua baixa ordem, tem grande valor qualitativo. Com um sistema de pequeno porte, foi possível desenvolver e observar, de forma cuidadosa, o desempenho do ajuste coordenado proposto nesta tese.

As duas configurações analisadas: original e modificada, permitiram avaliar como o ajuste coordenado de ganhos se processa. No caso da configuração A, utilizando o ajuste de fase apresentado em [Boukarim 2000], foram obtidos ganhos menores para os ESPs. Isto mostra os benefícios de uma eventual atuação complementar do procedimento proposto nesta tese.

Para a configuração B, foi avaliada a possibilidade de utilização de dois ou três ESPs. Nos dois casos, os ganhos foram coordenados de forma a garantir que o menor fator de amortecimento fosse ao menos 15 % em todos os cenários. O ajuste coordenado apresentado lida de forma simultânea com todos os pontos de operação.

II.6 Análise do Sistema Teste II

O segundo sistema teste (Figura 46) é uma configuração do sistema *New England* [Byerly 1978].

O sistema tem 10 geradores e 39 barras (Apêndice II). A máquina 39 é modelada como uma barra infinita. A barra onde o gerador 39 está instalado, é modelada como uma barra infinita.

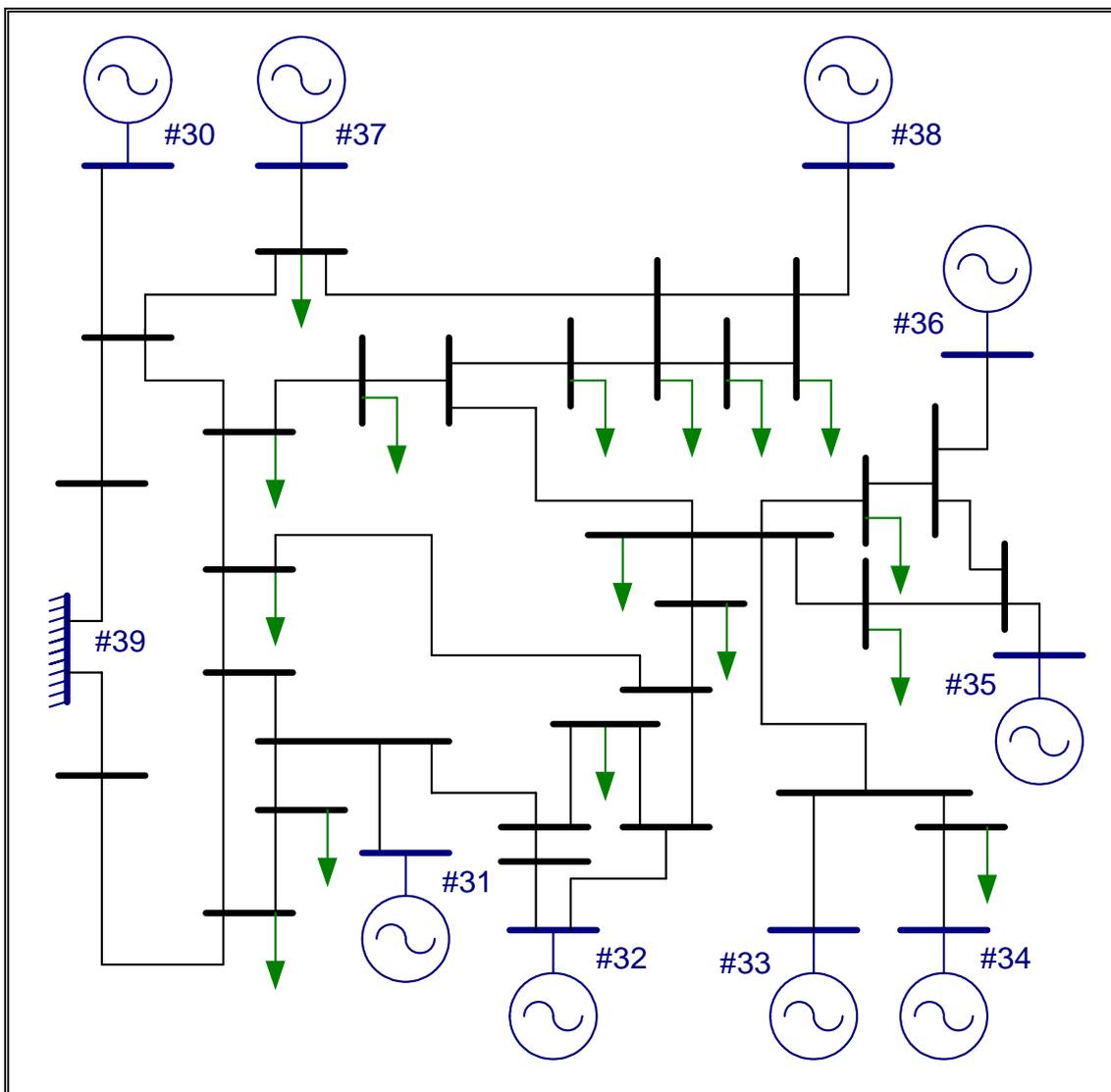


Figura 46 – Sistema teste II.

Serão analisados 14 pontos de operação distintos (Tabela 19). Estes pontos foram definidos em [Bonfim 2000a, Bonfim 2000b] e envolvem a alteração tanto da carga quanto da topologia do sistema.

Tabela 19 – Pontos de operação analisados.

Ponto de Operação	Característica
1	Caso base
2	Linhas 3-18 e 25-26 fora de serviço
3	Linhas 4-14 e 16-17 fora de serviço
4	Linha 6-11 fora de serviço
5	Aumento 360 MW na carga
6	Linhas 4-14, 16-17 e 25-26 fora de serviço
7	Linhas 4-14, 16-17, 25-26 e 1-39 fora de serviço
8	Linha 21-22 fora de serviço
9	Linha 9-39 fora de serviço
10	Redução de 30% na carga
11	Aumento de 15 % na carga
12	Aumento de 20% na carga
13	Redução de 20% na carga
14	Aumento de carga nas barras 16 e 21 e linha 21-22 fora de serviço

A Figura 47 mostra em vermelho os circuitos alterados nos diversos casos analisados.

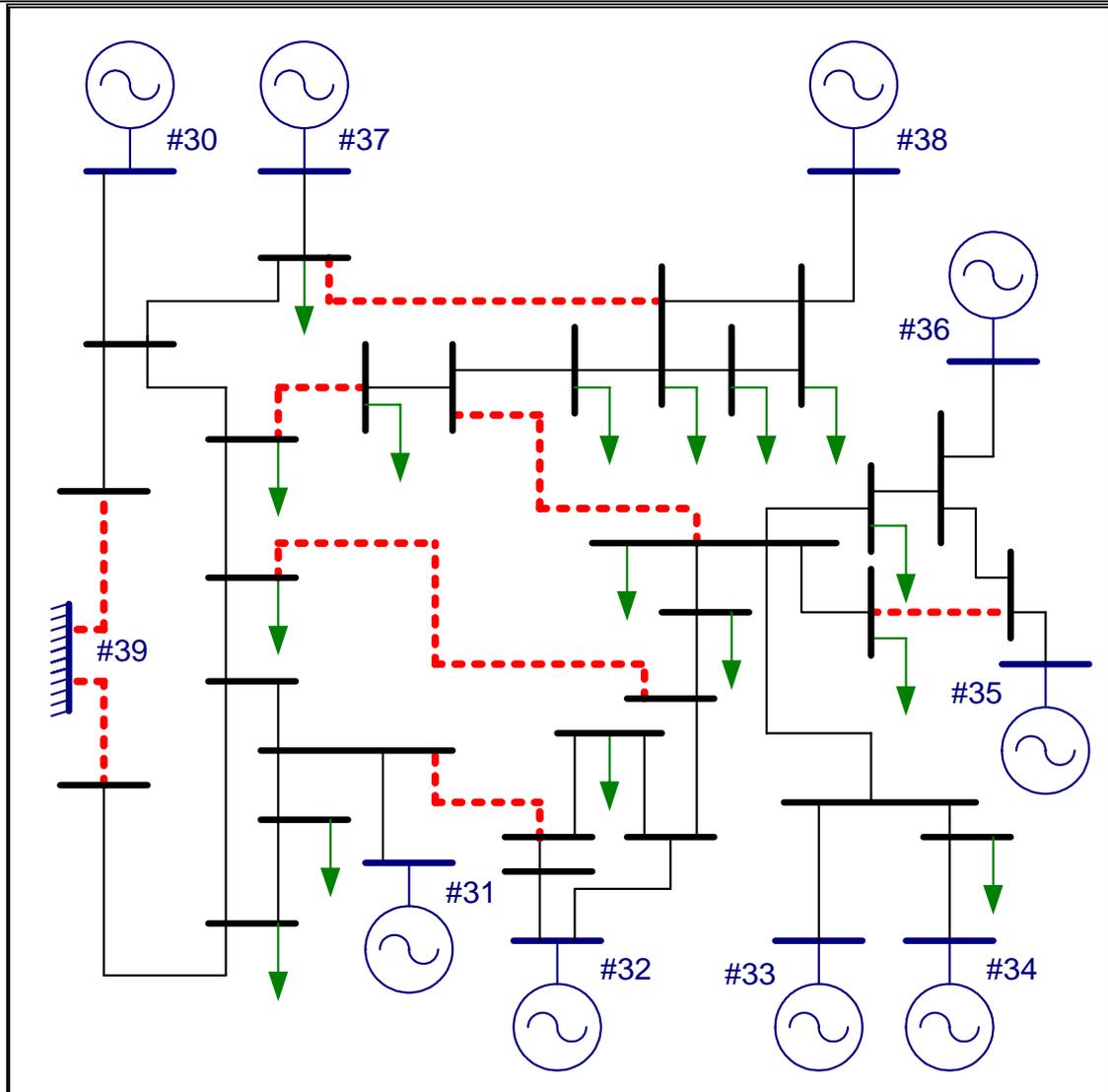


Figura 47 – Sistema teste II – Circuitos alterados nos casos analisados.

O sistema original tem sistemas de excitação com máquinas rotativas, de resposta lenta, ganhos baixos e que exigem valores elevados tanto para o ganho como para o avanço de fase dos ESPs. Portanto, serão avaliadas duas situações: sistema com reguladores automáticos de tensão originais (Seção II.6.1); e sistema com sistema de excitação estáticos, de resposta rápida e alto ganho (Seção II.6.2).

Em ambos os casos serão ajustados os estabilizadores instalados em 9 máquinas (30 a 38) de forma a obter desempenho adequado em todos os pontos de operação. Todas as cargas são representadas por impedâncias constantes.

II.6.1 Sistema Teste II – RATs Originais

A Figura 48 mostra o mapa de pólos do sistema em malha aberta e os zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{9 \times 9}$ para os 14 pontos de operação.

Como pode ser observado, a instalação de estabilizadores nas 9 máquinas elimina os zeros que poderiam prejudicar o posicionamento dos pólos no semiplano esquerdo. O objetivo é obter uma solução onde nenhum modo de oscilação possua fator de amortecimento menor que 15 %.

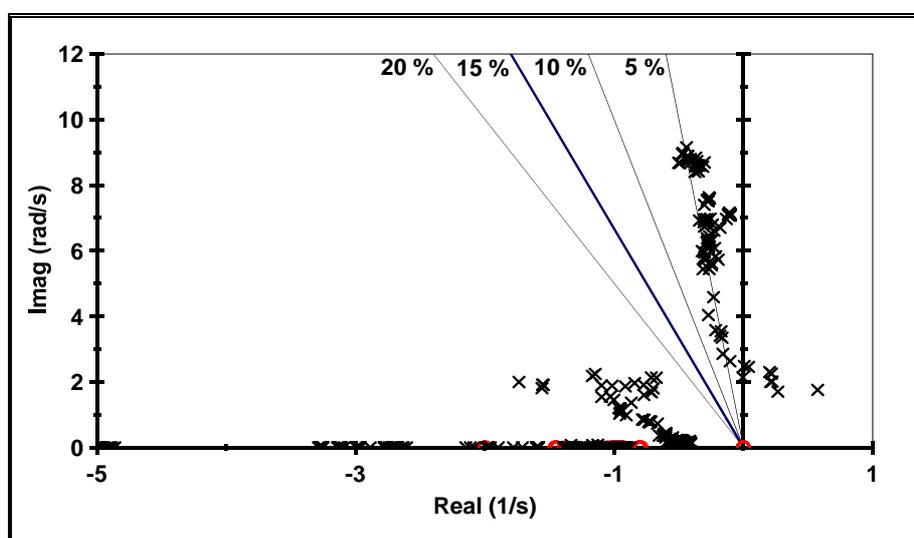


Figura 48 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{9 \times 9}$ para os 14 pontos de operação.

A análise da estabilização do sistema *New England* com RATs originais foi realizada utilizando algoritmo genético em [Bomfim 1997, Bomfim 1999, Taranto 1998a, Taranto 1998b, Bomfim 2000a, Bomfim 2000b]. A compensação de fase adotada aqui é mesma utilizada nestes trabalhos.

A utilização de sistemas de excitação com máquinas rotativas exige um grande esforço do controle adicional estabilizador. O ajuste de fase apresentado na Tabela 20 [Bomfim 1997, Bomfim 1999, Taranto 1998a, Bomfim 2000a, Bomfim 2000b] é feito com três blocos de avanço. Além disso, o valor dos ganhos dos ESPs deve ser elevado para que seja garantido que em todos os pontos de operação não haja nenhuma oscilação no sistema com amortecimento menor que 15 %.

Tabela 20 – Parâmetros relativos ao ajuste de fase dos ESPs.

Gerador	Nº de blocos	Tw (s)	Tn (s)	Td (s)
30	3	5	0,438	0,058
31	3	5	0,239	0,027
32	3	5	0,271	0,029
33	3	5	0,257	0,026
34	3	5	0,264	0,049
35	3	5	0,239	0,044
36	3	5	0,225	0,040
37	3	5	0,277	0,033
38	3	5	0,242	0,031

No ajuste utilizando algoritmo genético, os ganhos dos ESPs variam de 5 pu/pu a 97 pu/pu. Supondo o valor máximo admissível de ganho dos ESPs igual a 100 pu/pu (aproximadamente o maior valor obtido no ajuste via algoritmo genético), seria razoável acreditar que se todos os ganhos forem fixados nesse valor (100 pu/pu) o menor fator de amortecimento seria alto. Entretanto, como veremos adiante, isto não é verdade.

Como mostrado na Seção II.3.1, cada ESP tem uma determinada influência em cada um dos pólos. O deslocamento final do pólo é determinado pelo somatório das contribuições de todos os controles na variação da posição do pólo.

Assim sendo, a contribuição de um ESP para a redução da parte real de um determinado pólo, devido ao aumento do seu ganho, pode ser compensada pelo efeito adverso de um outro ESP no mesmo pólo.

A Figura 49 mostra qual o menor fator de amortecimento no sistema supondo que os ganhos de todos os ESPs são iguais. Variando os ganhos dos ESPs desde zero (malha aberta) até 100 pu/pu, pode ser verificado que apenas uma pequena faixa de valores permite que o sistema tenha o desempenho desejado. Ainda assim, os valores dos ganhos são elevados: no mínimo 53pu/pu.

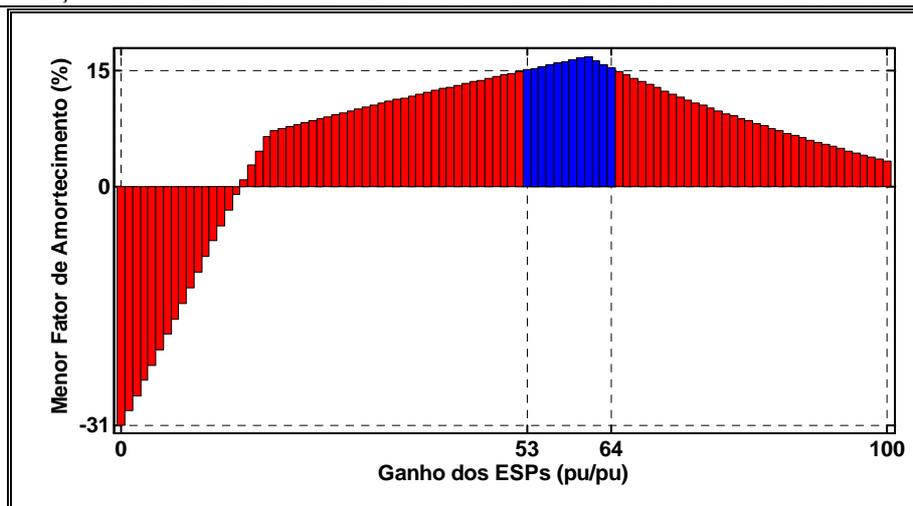


Figura 49 – Relação entre ganho nos ESPs e menor fator de amortecimento.

A Figura 49 mostra que se os ganhos de todos os ESPs for 53 pu/pu o menor fator de amortecimento é 15 %. O objetivo é coordenar os ganhos de forma que uma solução com ganhos menores seja obtida, se possível. O valor de 53 pu/pu, portanto, foi utilizado como valor máximo para o algoritmo de ajuste coordenado de ganhos (Tabela 21).

Tabela 21 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Variação de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	53 pu/pu	9	25	5 pu/pu	7

Como já mencionado anteriormente, o chamado ‘ajuste coordenado’ refere-se ao método proposto nesta tese, descrito na Seção II.4. Isto é feito simplesmente para facilitar a escrita do texto em tabelas e figuras. Já que o ajuste via algoritmo genético também é coordenado.

Após 7 variações, os ganhos foram ajustados de forma a não existirem oscilações com menos 15 % de amortecimento em nenhum dos 14 pontos de operação (Tabela 22).

Tabela 22 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação
Sem ESPs	0,2791	- 31,1	10
Com ESPs	1,1703	15,3	2

A Figura 50 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs. No ponto 1 o sistema está com a malha aberta. No ponto 2, os ganhos dos ESPs são aqueles estipulados para o início do processo de ajuste coordenado. Entre os pontos 2 e 9, é realizada a coordenação dos ganhos em si (7 variações de ganho).

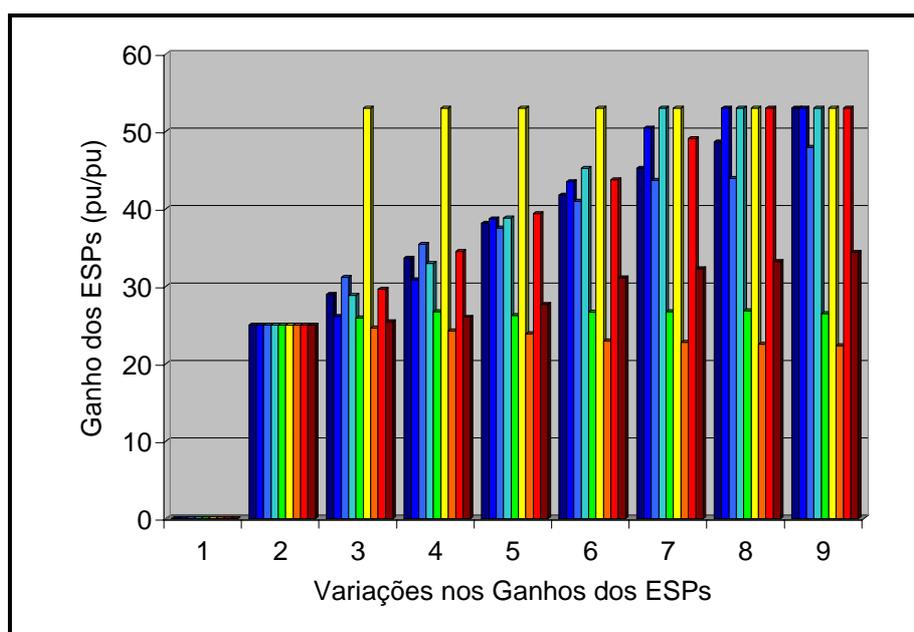


Figura 50 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

Na Figura 51 a forma como os ganhos dos ESPs evoluem é mostrada de forma individual para cada ESP, do ESP₁ ao ESP₉.



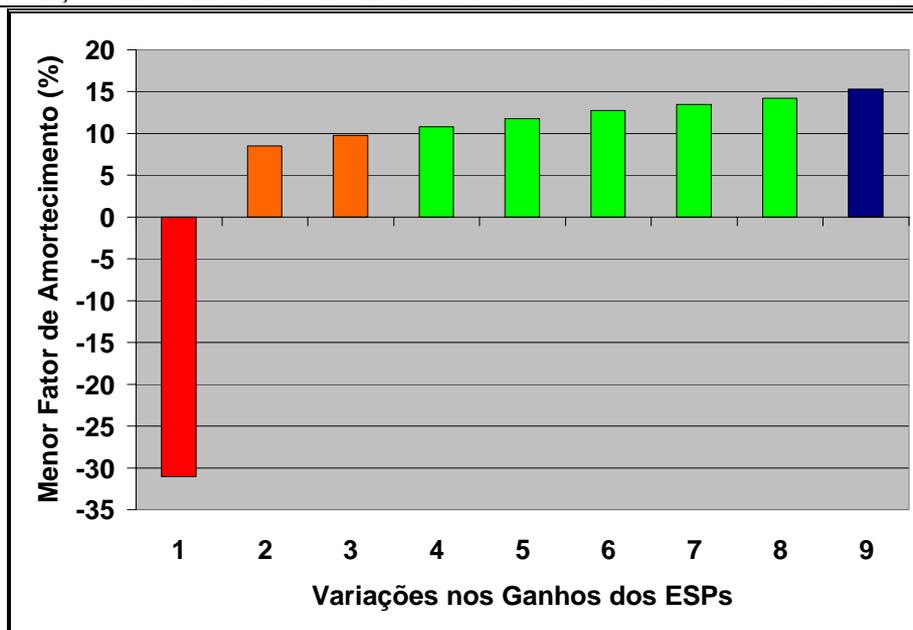


Figura 52 – Evolução do menor fator de amortecimento.

A Tabela 23 e a Figura 53 mostram, de forma comparativa, os ganhos necessários para que o sistema tenha o desempenho desejado em três análises: ajuste via algoritmo genético (ganhos de 5 a 97 pu/pu), ajustando todos os ganhos em 53 pu/pu e ajuste coordenado via o algoritmo proposto nesta tese (ganhos de 22 a 53 pu/pu).

Na Figura 53 os ganhos dos ESPs são apresentados em ordem crescente.

Tabela 23 – Ganhos dos ESPs em cada análise para obtenção de fator de amortecimento mínimo de 15 %.

ESP	Gerador	Ganho dos ESPs (pu/pu)		
		Algoritmo Genético	Ganhos Iguais	Ajuste Coordenado
1	30	97,3	53,0	53,0
2	31	65,0	53,0	53,0
3	32	79,2	53,0	48,0
4	33	38,0	53,0	53,0
5	34	4,8	53,0	26,5
6	35	96,7	53,0	53,0
7	36	39,3	53,0	22,3
8	37	74,5	53,0	53,0
9	38	33,7	53,0	34,4

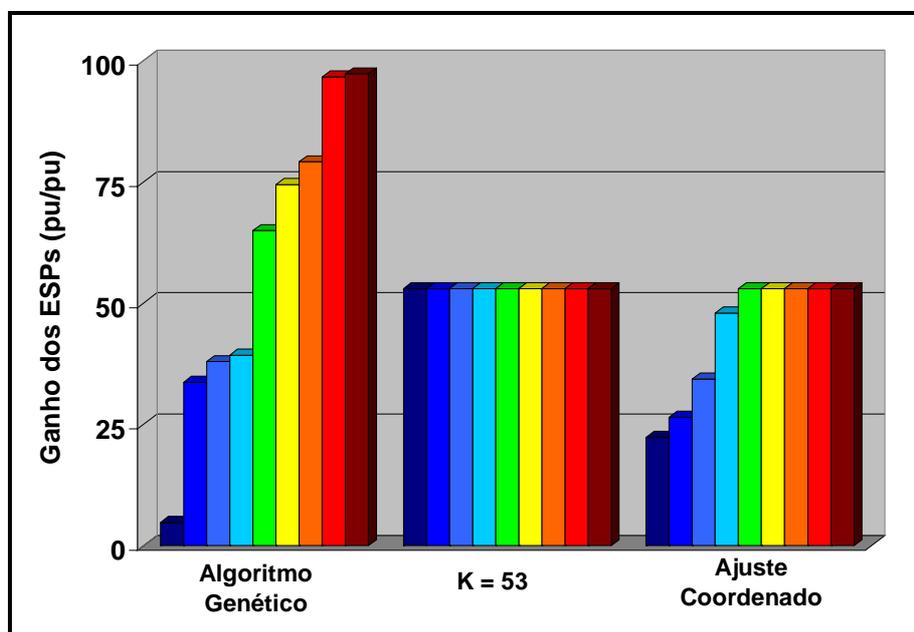


Figura 53 – Ganhos dos ESPs em cada análise para obtenção de fator de amortecimento mínimo de 15 %.

A Figura 54 mostra a comparação entre os ganhos médios obtidos em cada um dos três ajustes.

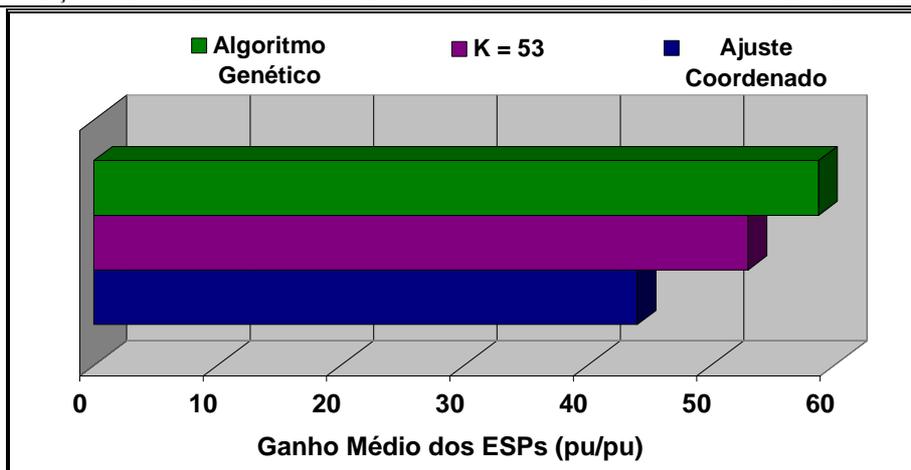


Figura 54 – Ganho médio dos ESPs para cada análise.

A Figura 55 mostra os pólos do sistema, para todos os 14 pontos de operação, em malha aberta e com todos os ganhos dos ESPs ajustados em 53 pu/pu.

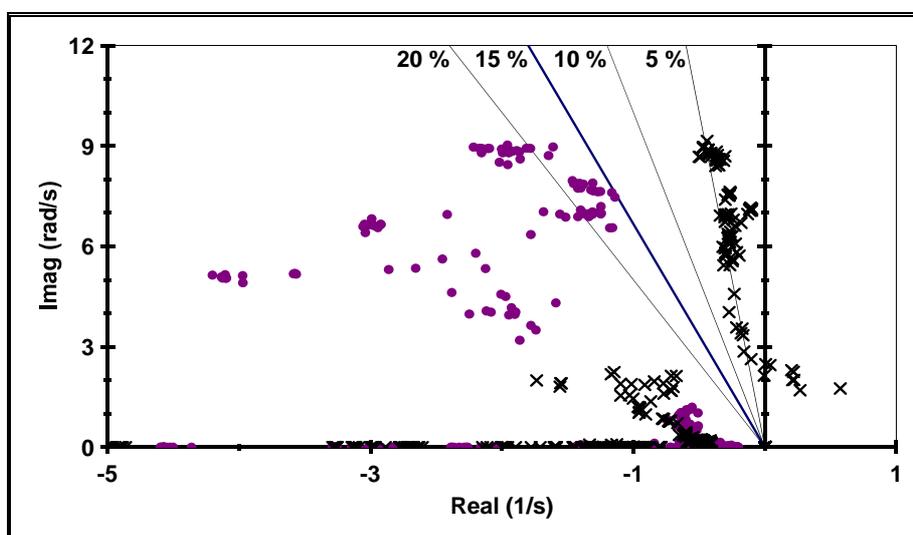


Figura 55 – Sistema com malha aberta (preto) e com ESPs com ganhos iguais a 53 pu/pu (roxo).

A Figura 56 e a Figura 57 apresentam os pólos do sistema, também para todos os pontos de operação, em malha aberta e ajustados via algoritmo genético e via o método proposto nesta tese.

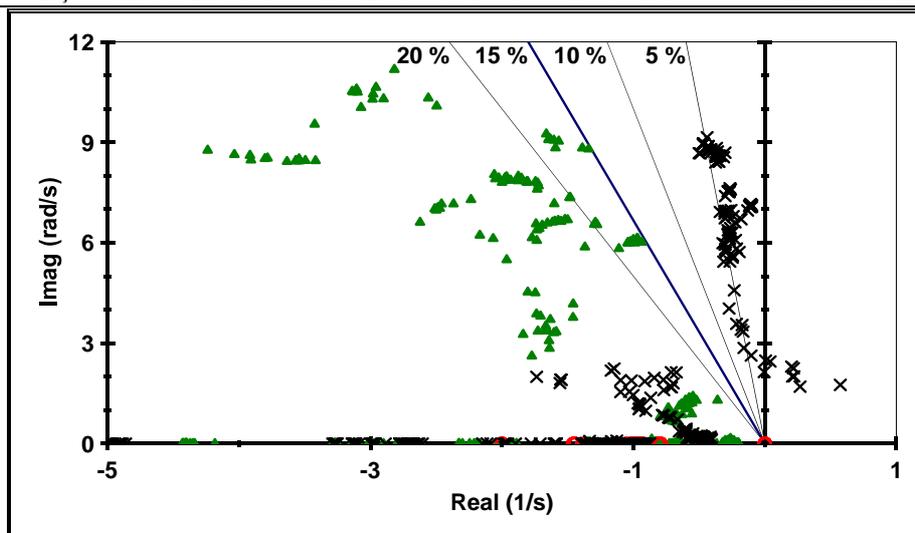


Figura 56 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste via algoritmo genético (verde).

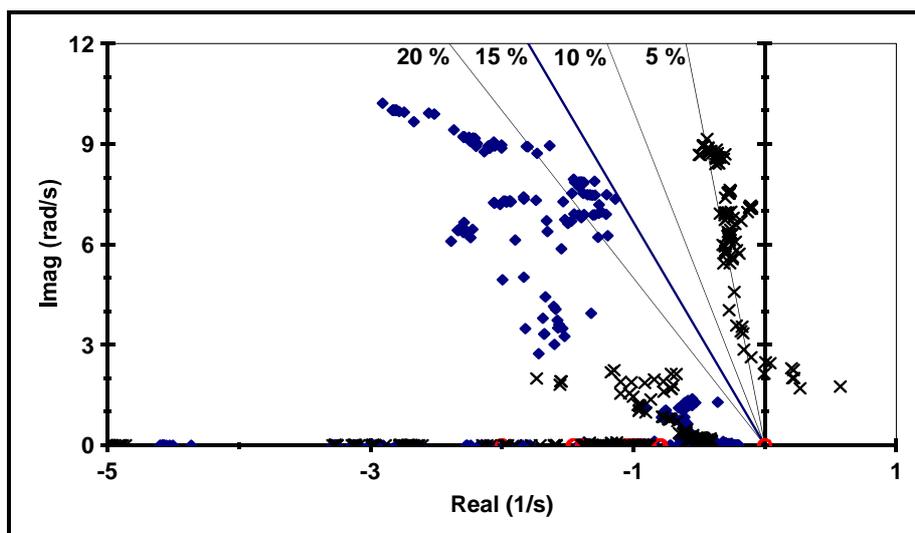


Figura 57 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado (azul).

A Figura 58 mostra os pólos dos 14 pontos de operação para os três ajustes. Na faixa de frequência observada, não há grandes diferenças entre um ou outro ajuste.

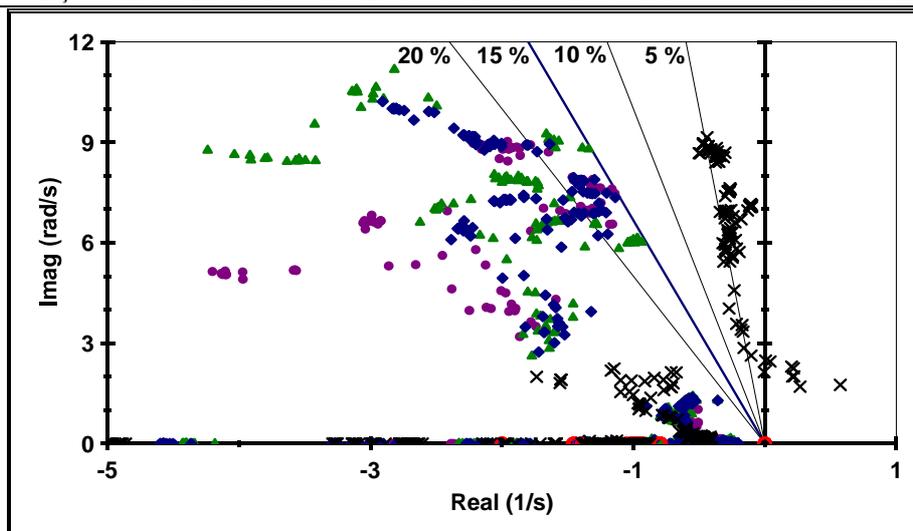


Figura 58 – Sistema com malha aberta (preto), com ajuste coordenado (azul), com ajuste via algoritmo genético (verde) e com ganhos iguais a 53 pu/pu (roxo).

Assim como a Figura 58, a Figura 59 também mostra os pólos referentes aos três ajustes, mas destacando os modos de oscilação associados aos sistemas de excitação. Os valores maiores de ganho obtidos no ajuste via algoritmo genético e no ajuste sem qualquer coordenação (todos os ESPs com ganho de 53 pu/pu), causam um deslocamento indesejado dos pólos associados aos sistemas de excitação.

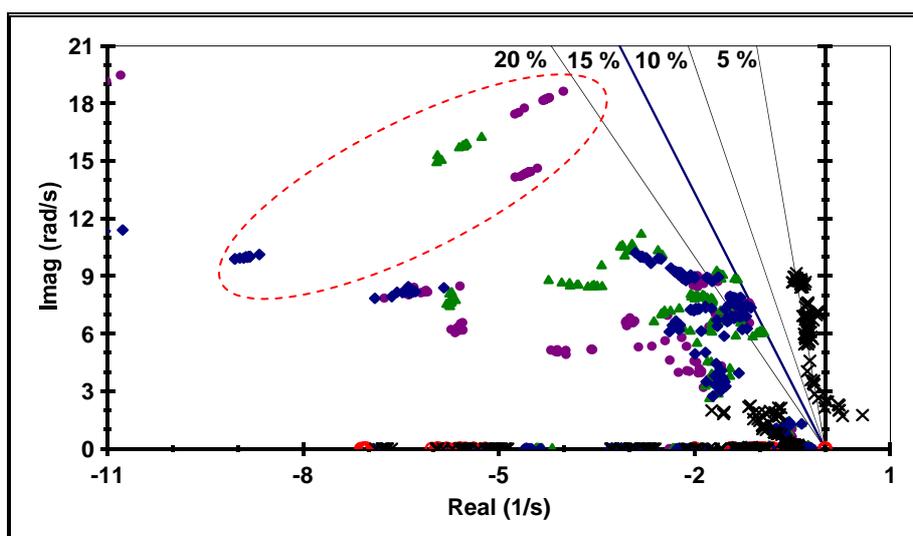


Figura 59 – Modos de oscilação associados a sistemas de excitação para os diferentes ajustes – Sistema com malha aberta (preto), com ajuste coordenado (azul), com ajuste via algoritmo genético (verde) e com ganhos iguais a 53 pu/pu (roxo).

Finalmente, a Figura 60 e a Figura 61 apresentam o comportamento da potência ativa terminal do maior gerador do sistema após distúrbio em degrau de 0,01 pu na referência do seu regulador de tensão. O ponto de operação escolhido foi o mais crítico (ponto número 10). Os ganhos dos ESPs são os obtidos via ajuste coordenado proposto nesta tese. Sem ESPs, o sistema é instável.

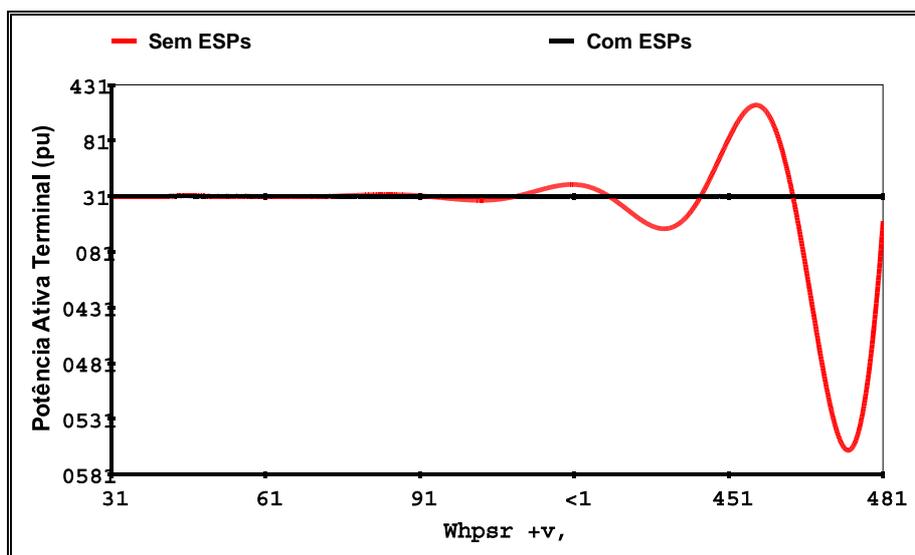


Figura 60– Variação de potência ativa terminal no gerador 38 após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão.

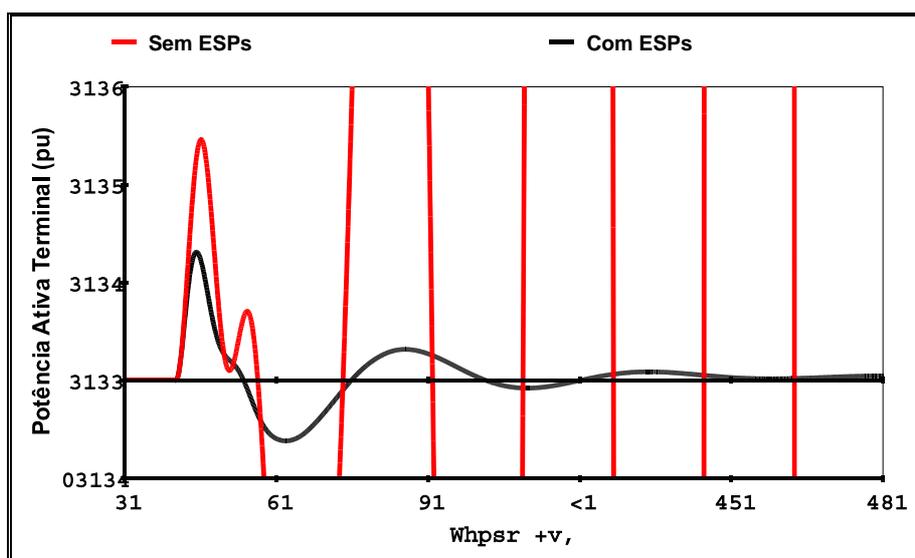


Figura 61 – Variação de potência ativa terminal no gerador 38 após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão (detalhe).

II.6.2 Sistema Teste II – RATs Com Alto Ganho

Na seção anterior, foi verificada a necessidade de valores altos para os ganhos e avanços de fase para os ESPs instalados no sistema *New England* original. Isto, para garantir que não exista nenhuma oscilação com fator de amortecimento menor que 15 % em 14 pontos de operação distintos. Nesta seção os reguladores automáticos de tensão (RAT) são alterados com a finalidade de eliminar este problema. Os novos RATs utilizam modelo de primeira ordem e têm alto ganho (Tabela 24). Esta é uma representação simplificada de sistemas de excitação estática.

Tabela 24 – Parâmetros relativos aos reguladores de tensão.

Ta (s)	Ka (pu/pu)
0,050	$\frac{T'_{d0}}{2Ta}$

A Figura 62 mostra o mapa de pólos do sistema em malha aberta e os zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{9 \times 9}$ para os 14 pontos de operação.

Diferentemente da configuração A, existem muitos pólos no semiplano direito do plano complexo. Ainda assim, a instalação de estabilizadores nas 9 máquinas elimina os zeros que poderiam prejudicar o posicionamento dos pólos no semiplano esquerdo. O objetivo, mais uma vez, é obter uma solução onde nenhum modo de oscilação possua fator de amortecimento menor que 15 %.

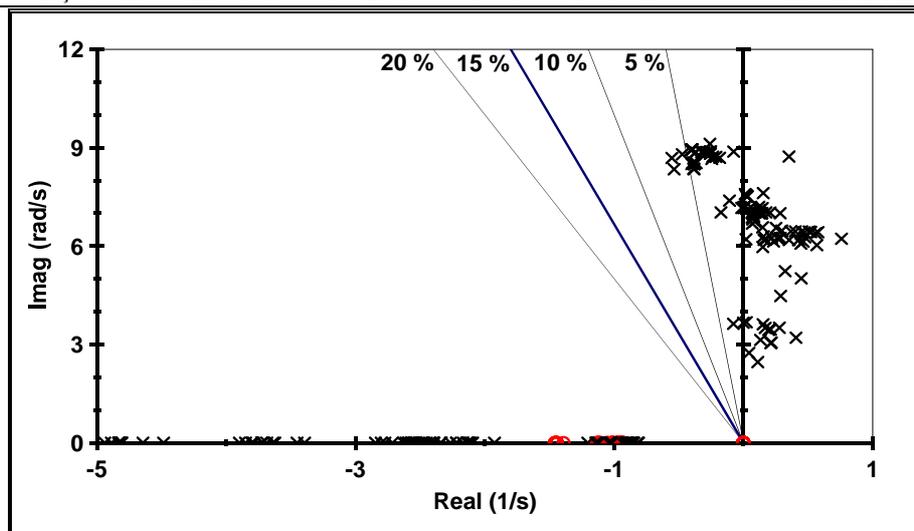


Figura 62 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{9 \times 9}$ para os 14 pontos de operação.

Utilizando sistemas estáticos de excitação, o ajuste de fase proveniente dos parâmetros típicos apresentados na Tabela 25 é suficiente. Como discutido na Seção II.3.2, um ESP típico utilizando como sinal de entrada a potência acelerante é aconselhável ter o ganho máximo de 20 pu/pu [Paiva 1999].

Tabela 25 – Parâmetros relativos ao ajuste de fase dos ESPs.

Nº de blocos	Tw (s)	Tn (s)	Td (s)
2	5	0,100	0,010

A Figura 63 mostra qual o menor fator de amortecimento no sistema supondo que os ganhos de todos os ESPs são iguais. Variando os ganhos dos ESPs desde zero (malha aberta) até 50 pu/pu, pode ser verificado que para ganhos a partir de 19 pu/pu o sistema apresenta o desempenho desejado. Neste caso, entretanto, os valores de ganho estão praticamente no máximo. Quanto maior o valor do ganho, maior propensão a problemas relacionados com a aquisição do sinal de controle e maior a possibilidade de problemas relacionados com dinâmicas não modeladas, por isso, um ajuste com todos os ganhos no máximo é indesejado.

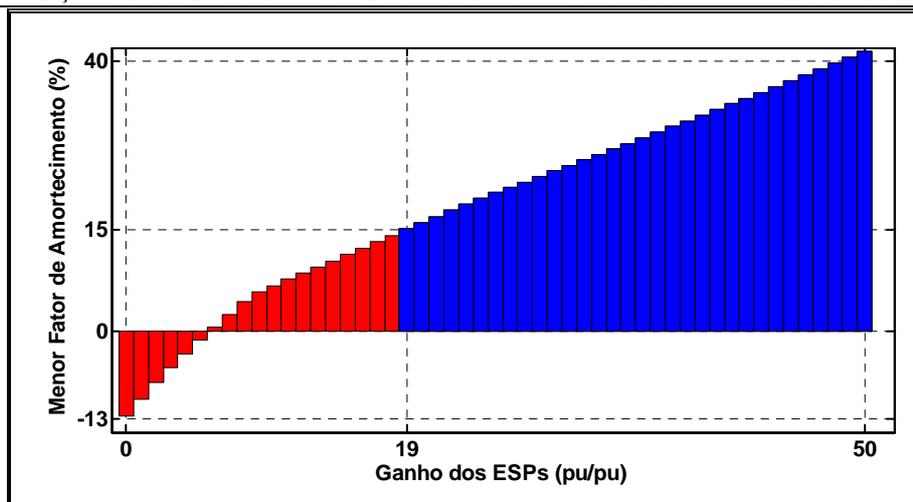


Figura 63 – Relação entre ganho nos ESPs e menor fator de amortecimento.

Dois ajustes foram realizados utilizando a metodologia proposta. No primeiro ajuste, o ganho máximo admitido é 20 pu/pu, no segundo o ajuste é feito supondo como valor máximo de ganho igual a 19 pu/pu.

A Tabela 26 e a Tabela 27 apresentam os dados relativos ao primeiro ajuste. Após 7 variações de ganho, é garantido para os 14 pontos de operação que nenhuma oscilação no sistema tem fator de amortecimento inferior a 15 %.

Tabela 26 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Variação de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	20	9	5	2 pu/pu	7

Tabela 27 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação
Sem ESPs	0,5098	- 12,6	10
Com ESPs	1,1922	15,0	10

A Figura 64 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs. No ponto 1 o sistema está sem controladores. No ponto 2, os ganhos dos ESPs são os iniciais do processo de ajuste coordenado. Entre os pontos 2 e 9, é mostrada a coordenação em si.

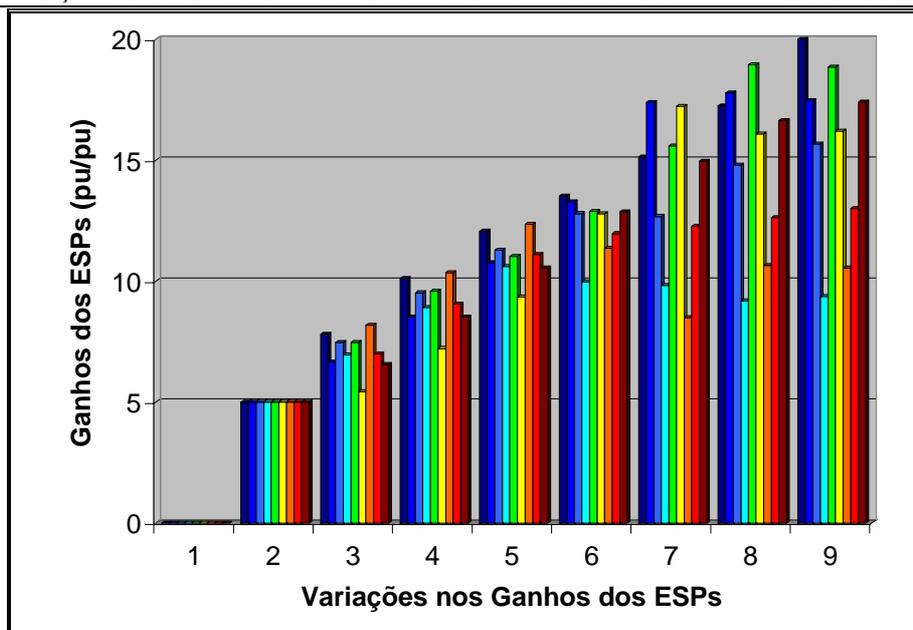


Figura 64 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

Na Figura 65 a forma como os ganhos dos ESPs evoluem é mostrada de forma individual para cada ESP, do ESP₁ ao ESP₉.

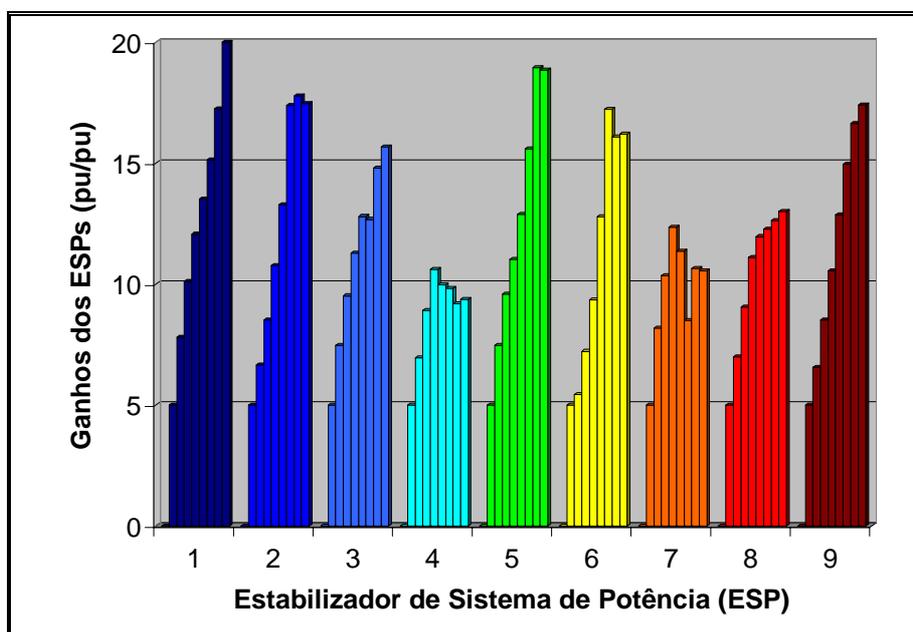


Figura 65 – Evolução do ganho de cada ESP.

Mais uma vez é possível verificar que a variação dos ganhos de alguns ESPs (ESP₂, ESP₄, ESP₅, ESP₆ e ESP₇) nem sempre é positiva.

A Figura 66 apresenta o menor fator de amortecimento em cada uma das etapas mosradas na Figura 64. Em malha aberta (ponto 1), há um modo de oscilação eletromecânica com fator de amortecimento de $-12,6\%$. No ponto 9, no fim do ajuste, o menor fator de amortecimento é $15,0\%$. Mesmo diminuindo o valor dos ganhos de alguns ESPs em determinados momentos o valor do menor fator de amortecimento cresce sempre.

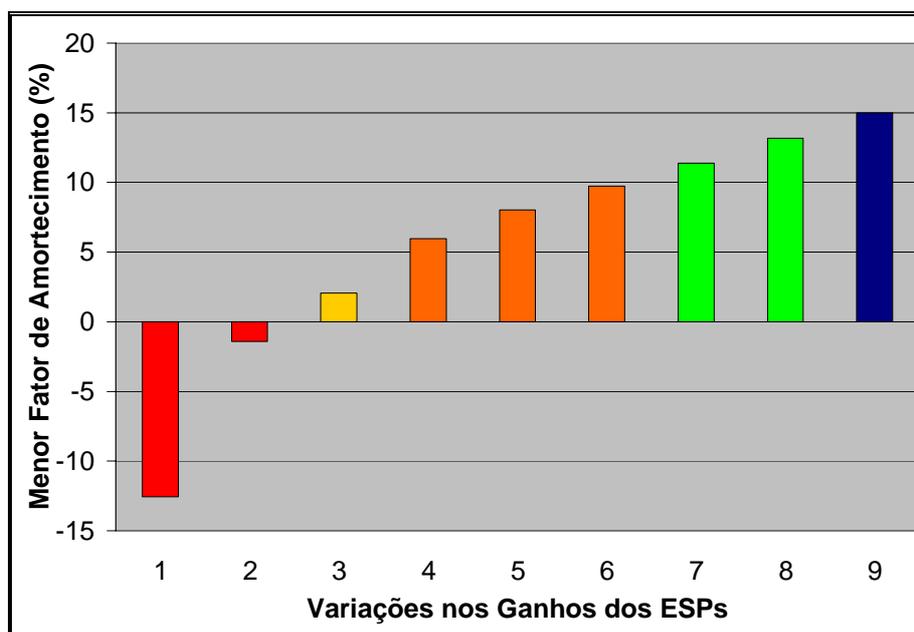


Figura 66 – Evolução do menor fator de amortecimento.

Como visto na Figura 63, se não há nenhuma coordenação e todos os ganhos forem ajustados em 19 pu/pu (praticamente o máximo), o menor fator de amortecimento é 15% . O objetivo de um segundo ajuste é obter um resultado equivalente com valores menores de ganho.

A Tabela 26 e a Tabela 27 apresentam os dados relativos ao segundo ajuste. Neste ajuste, o ganho máximo é 19 pu/pu. Após 7 variações de ganho, é garantido para os 14 pontos de operação que nenhuma oscilação no sistema tem fator de amortecimento inferior a 15% .

Tabela 28 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Variação de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	19	9	5	2 pu/pu	11

Tabela 29 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação
Sem ESPs	0,5098	- 12,6	10
Com ESPs	1,1922	15,0	10

A Figura 67 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs durante a coordenação dos ganhos.

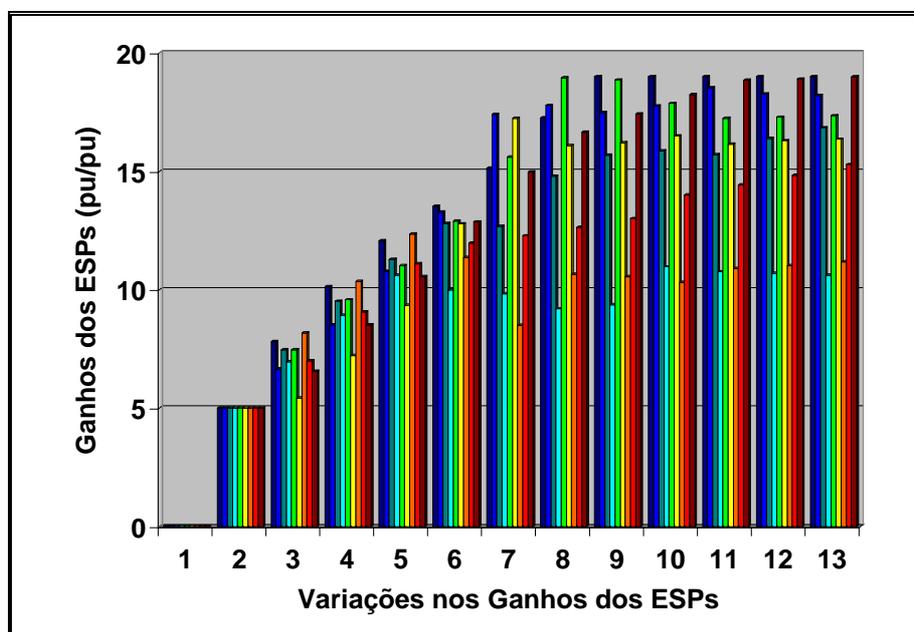


Figura 67 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

Na Figura 68 a forma como os ganhos dos ESPs evoluem é mostrada de forma individual para cada ESP, do ESP₁ ao ESP₉.

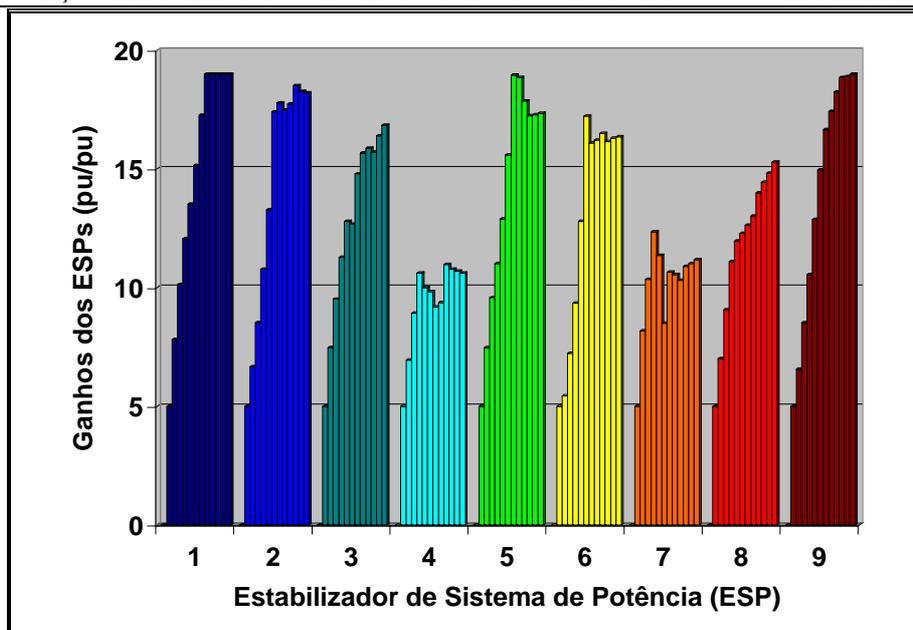


Figura 68 – Evolução do ganho de cada ESP.

A Figura 69 apresenta o menor fator de amortecimento em cada uma das etapas do processo mostradas na Figura 64. No ponto 9, no fim do ajuste, o menor fator de amortecimento é 15,0 %.

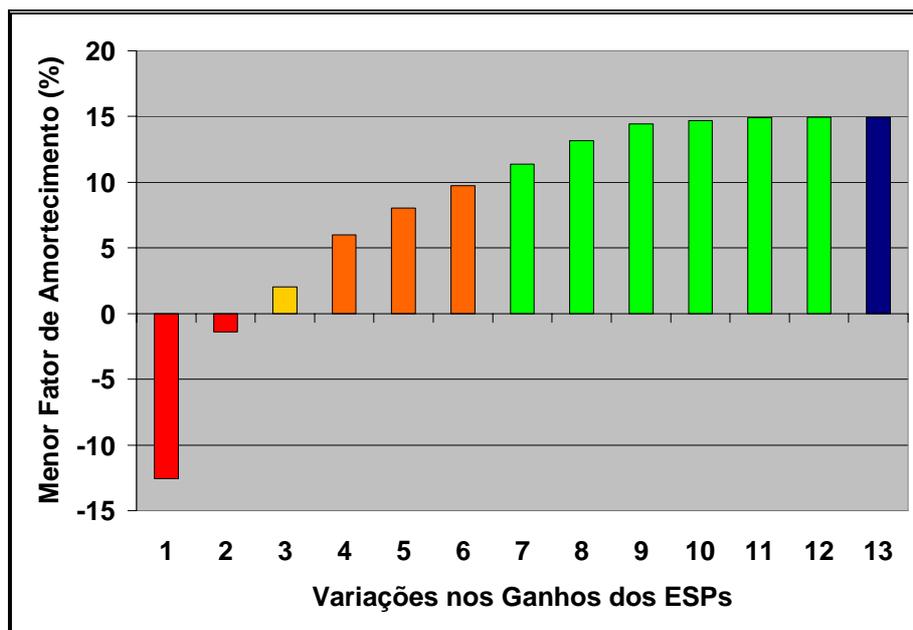


Figura 69 – Evolução do menor fator de amortecimento.

A Tabela 30 e a Figura 70 mostram, de forma comparativa, os ganhos necessários para que o sistema tenha o desempenho desejado em cada uma das análises. Na Figura 70 os ganhos estão em ordem crescente.

Tabela 30 – Ganhos dos ESPs em cada análise para obtenção de fator de amortecimento mínimo de 15 %.

ESP	Gerador	Ganho dos ESPs (pu/pu)		
		Ganhos Iguais	Ajuste Coordenado	
			$K_{Máx} = 19$	$K_{Máx} = 20$
1	30	19,0	19,0	20,0
2	31	19,0	18,2	17,5
3	32	19,0	16,8	15,7
4	33	19,0	10,6	9,4
5	34	19,0	17,3	18,9
6	35	19,0	16,4	16,2
7	36	19,0	11,2	10,6
8	37	19,0	15,3	13,0
9	38	19,0	19,0	17,4

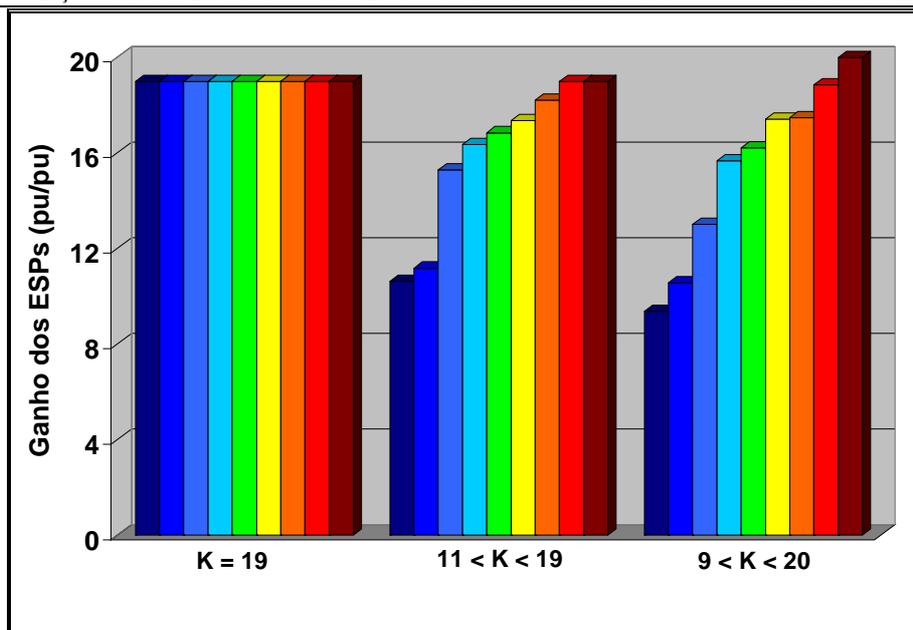


Figura 70 – Ganhos dos ESPs em cada análise para obtenção de fator de amortecimento mínimo de 15 %.

A Figura 71 mostra a comparação entre os ganhos médios obtidos em cada um dos três ajustes.

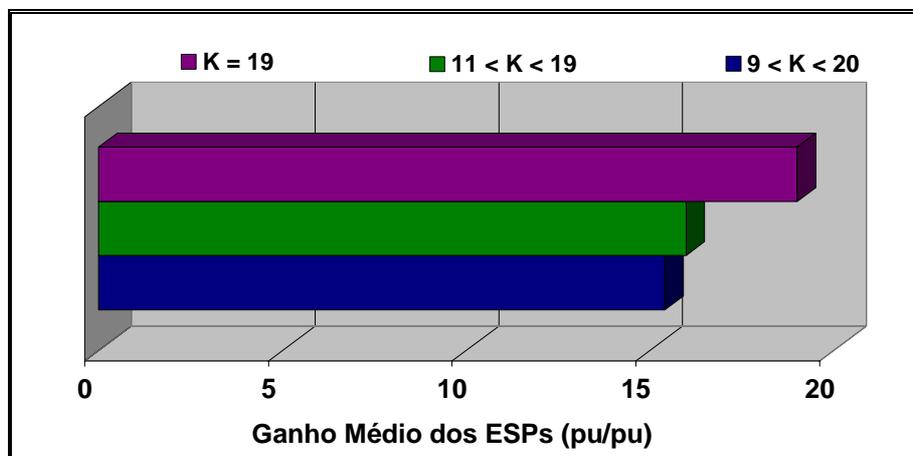


Figura 71 – Ganho médio dos ESPs para cada análise.

No ajuste com ganho máximo de 19 pu/pu, foram necessárias 4 variações de ganho a mais para obtenção do mesmo desempenho do ajuste com ganho máximo de 20 pu/pu. As variações de ganho nos dois casos são idênticas até que o ESP_1 atinge o limite de ganho (19 pu/pu). Com limite máximo de 20 pu/pu, seu ganho aumentaria até este valor e o desempenho desejado ($\zeta_{\text{Mínimo}} \geq 15\%$) seria alcançado. Com o limite em 19 pu/pu, o esforço de controle ESP_1 deve ser repartido pelos outros controladores.

A Figura 72 mostra os pólos do sistema, para todos os 14 pontos de operação, em malha aberta e com todos os ganhos dos ESPs ajustados em 19 pu/pu.

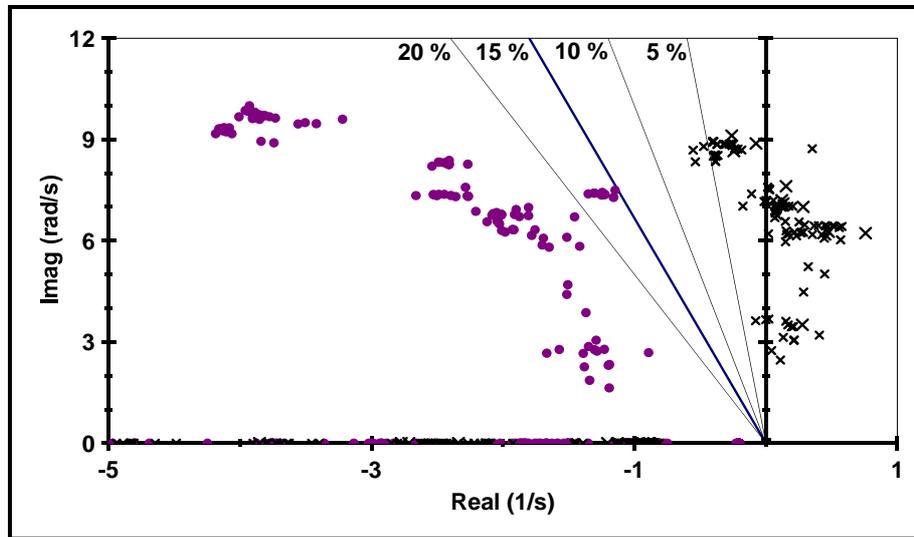


Figura 72 – Sistema com malha aberta (preto) e com ESPs com ganhos iguais a 19 pu/pu (roxo).

A Figura 73 mostra os pólos para os dois ajustes coordenados, além dos pólos em malha aberta.

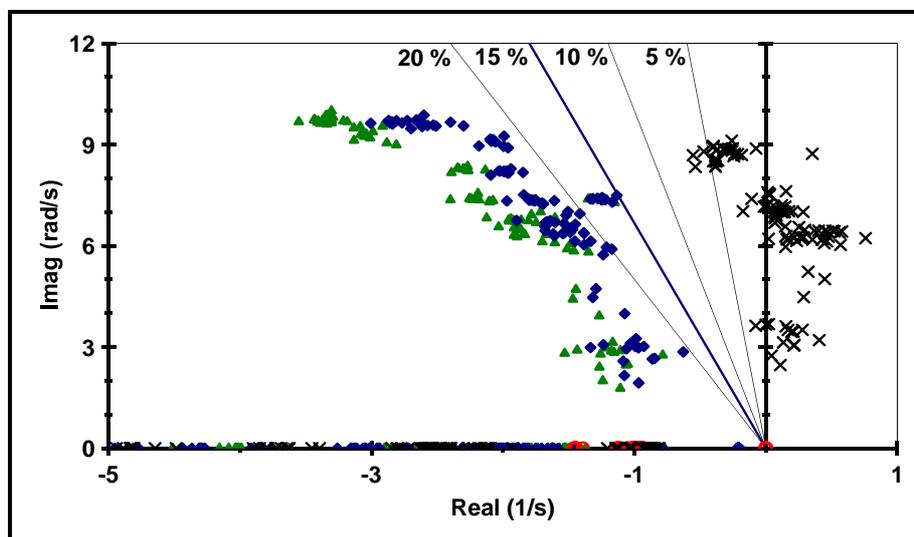


Figura 73 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado com ganho máximo de 19 pu/pu (verde) ou 20 pu/pu (azul).

A Figura 74 mostra os pólos dos 14 pontos de operação para os três ajustes.

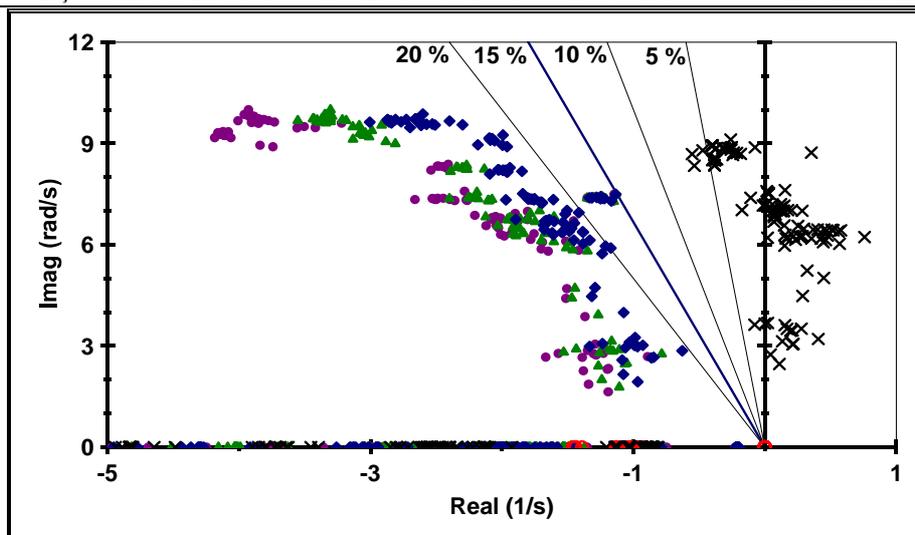


Figura 74 – Sistema com malha aberta (preto), com ajuste coordenado com ganho máximo de 20 pu/pu (azul) ou 19 pu/pu (verde) e com ganhos iguais a 19 pu/pu (roxo).

A Figura 75 e a Figura 76 apresentam o comportamento da potência ativa terminal do maior gerador do sistema após distúrbio em degrau de 0,01 pu na referência do seu regulador de tensão. O ponto de operação escolhido foi o mais crítico (ponto número 10). Os ganhos dos ESPs são os obtidos via ajuste coordenado com ganho máximo de 20 pu/pu (proporciona o menor ganho médio).

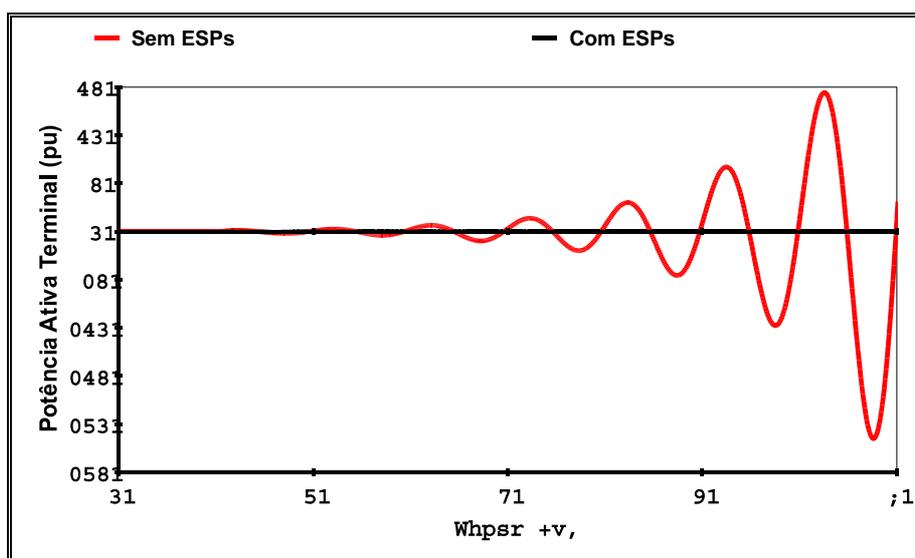


Figura 75 – Variação de potência ativa terminal no gerador 38 após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão.

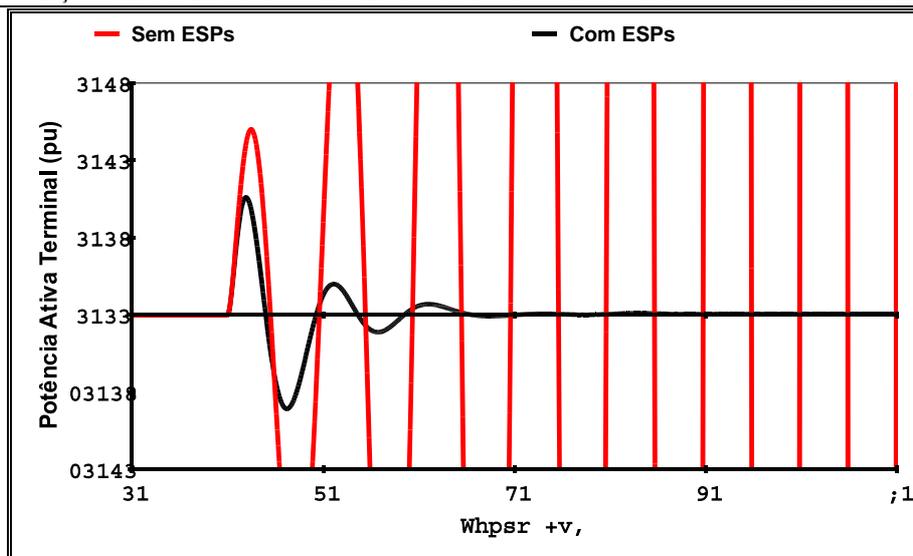


Figura 76 – Variação de potência ativa terminal no gerador 38 após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão (detalhe).

II.6.3 Sistema Teste II – Considerações Finais

A utilização do sistema *New England* permitiu avaliar a metodologia de ajuste coordenado proposta, num sistema de médio porte já conhecido e analisado em diversos outros trabalhos. Destacadamente, em [Taranto 1998, Bomfim 1999, Bomfim 2000a, Bomfim 2000b] um ajuste robusto é realizado via algoritmo genético, garantindo o desempenho adequado do sistema em 14 pontos de operação distintos.

Na Seção II.6.1 a configuração original do sistema é analisada. Nesta situação, os RATs utilizados são obsoletos e têm desempenho ruim. Isto cria a necessidade da utilização de ganhos elevados. Em [Bomfim 2000a] os ganhos variam de 5 a 97 pu/pu. Utilizando a mesma compensação de fase apresentada em [Bomfim 2000a], o ajuste coordenado proposto conseguiu valores bastante inferiores de ganho (de 22 a 53 pu/pu). Por ter ganho médio menor, esta solução não piora fator de amortecimento dos modos associados aos sistemas de excitação.

Como o ajuste via algoritmo genético não foi feito buscando ganhos menores, a comparação entre os dois ajustes não pretende destacar uma solução melhor, mas sim uma possível utilização conjunta das duas ferramentas. Uma vantagem de usar a

metodologia proposta é poder acompanhar de forma natural a evolução dos ganhos dos ESPs durante o processo de ajuste.

Na Seção II.6.2 os RATs originais são substituídos por outros de resposta mais eficiente e alto ganho. Isto possibilita a estabilização do sistema através da instalação de ESPs com parâmetros mais próximos de valores práticos. Sem nenhuma coordenação, para que o menor fator de amortecimento seja ao menos 15 %, é necessário que todos os ESPs tenham seus ganhos ajustados praticamente no valor máximo (19 pu/pu). Isto é altamente indesejado por causar problemas de aquisição do sinal para os estabilizadores e amplificar transitórios adversos de potência reativa e tensão terminal, além de possíveis problemas com fenômenos dinâmicos não modelados.

II.7 Análise do Sistema Teste III

O sistema teste III (Apêndice III) é uma configuração do sistema interligado Sul-Sudeste com 50 geradores [Martins 1990, CEPEL 2002a]. Outros 49 geradores pequenos foram modelados como impedâncias negativas. O caso base corresponde a situação de carga pesada de 1987, com valor alto de fluxo de potência do Sul para o Sudeste. A Tabela 31 apresenta alguns dados do sistema.

Tabela 31– Configuração Sul-Sudeste com 50 geradores.

Barras	Circuitos	Geradores
616	995	50

Foram modelados reguladores automáticos de tensão em todos os geradores do sistema com os parâmetros descritos na Tabela 32. Esta é uma representação simplificada, de primeira ordem, de excitatrizes estáticas com alto ganho.

Tabela 32 – Parâmetros relativos aos reguladores de tensão.

Ta (s)	Ka (pu/pu)
0,050	$\frac{T'_{d0}}{2Ta}$

Este sistema é instável, possuindo oscilações eletromecânicas sustentadas em seu caso base e crescentes nos outros pontos de operação. Diferentemente do que foi feito no sistema teste anterior (Seção II.6), não serão instalados estabilizadores em todas as máquinas.

O estudo apresentado aqui tem objetivo primordial mostrar a capacidade do método proposto em lidar com sistemas de grande porte em múltiplos cenários. Foi definido um critério de instalação de ESPs levando em consideração inicialmente o

tamanho da máquina. Assim, foram instalados ESPs em todas as máquinas com potência superior a 250 MVA (cerca de 50 % do total).

Em seguida foram instalados ESPs nas máquinas indicadas pelos resíduos associados aos modos de oscilação com fator de amortecimento inferior a 10 %. Desta forma chegou-se ao número de 36 ESPs instalados, ou seja, aproximadamente 70 % das máquinas têm estabilizadores. É importante notar que este número foi encontrado com o interesse maior de obter um problema de grande porte e com difícil solução para avaliar o método proposto. Sem dúvida, a instalação de mais estabilizadores ajudaria na obtenção da solução.

Mais uma vez, com a utilização de excitatrizes de alto ganho, os parâmetros típicos para o ajuste de fase do ESP são usados (Tabela 33). As cargas são representadas por impedâncias constantes.

Tabela 33 – Parâmetros relativos ao ajuste de fase dos ESPs.

Nº de blocos	Tw (s)	Tn (s)	Td (s)
2	3	0,100	0,010

O sistema será avaliado para o caso base na Seção II.7.1 e em 11 pontos de operação distintos na Seção II.7.2.

II.7.1 Estudo de 1 Ponto de Operação

Nesta seção será analisado o caso base da configuração do sistema interligado Sul-Sudeste – 50 Geradores.

A Figura 77 apresenta o mapa de pólos e zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$. A existência de alguns zeros entre as retas de fator de amortecimento de 10 % e 20 % indicam dificuldades para posicionamento em pontos muito além de 10 %.

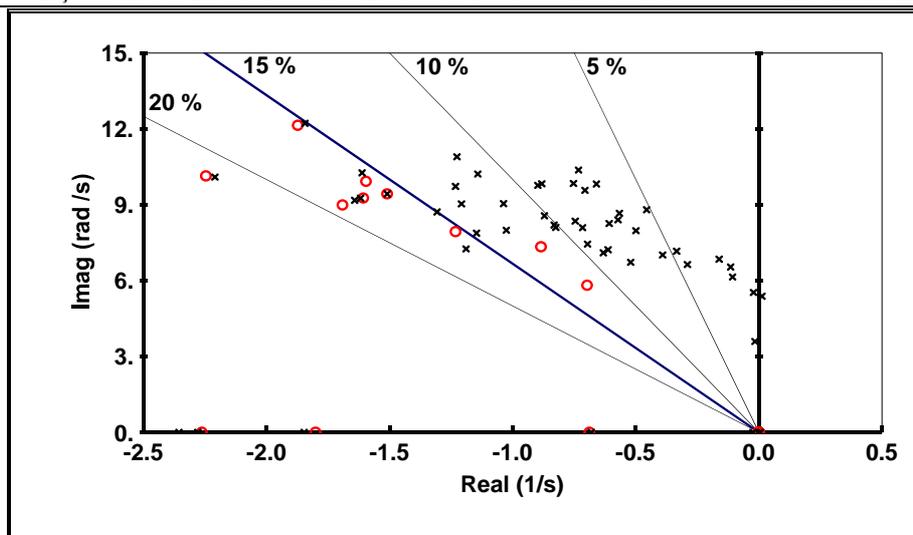


Figura 77 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$.

A Tabela 34 e a Tabela 35 apresentam os dados relativos ao ajuste coordenado. O valor máximo admitido de ganho é 20 pu/pu. Após 6 variações de ganho, é garantido que nenhuma oscilação no sistema tem fator de amortecimento inferior a 15 %.

Tabela 34 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados	Valores Iniciais de Ganhos	Variação de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	20 pu/pu	3	5	2 pu/pu	6

Tabela 35 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento	
	Freq. (Hz)	ξ (%)
Sem ESPs	0,8569	- 0,2
Com ESPs	1,1866	15,2

A Figura 78 apresenta o menor fator de amortecimento em cada uma das etapas. Em malha aberta (ponto 1), há um modo de oscilação eletromecânica com fator de amortecimento nulo. No ponto 8, no fim do ajuste, o menor fator de amortecimento é

15,2 %. A Figura 79 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs durante a coordenação dos ganhos. Na Figura 80 a mesma informação é mostrada de forma individual para cada ESP, do ESP₁ ao ESP₃₆.

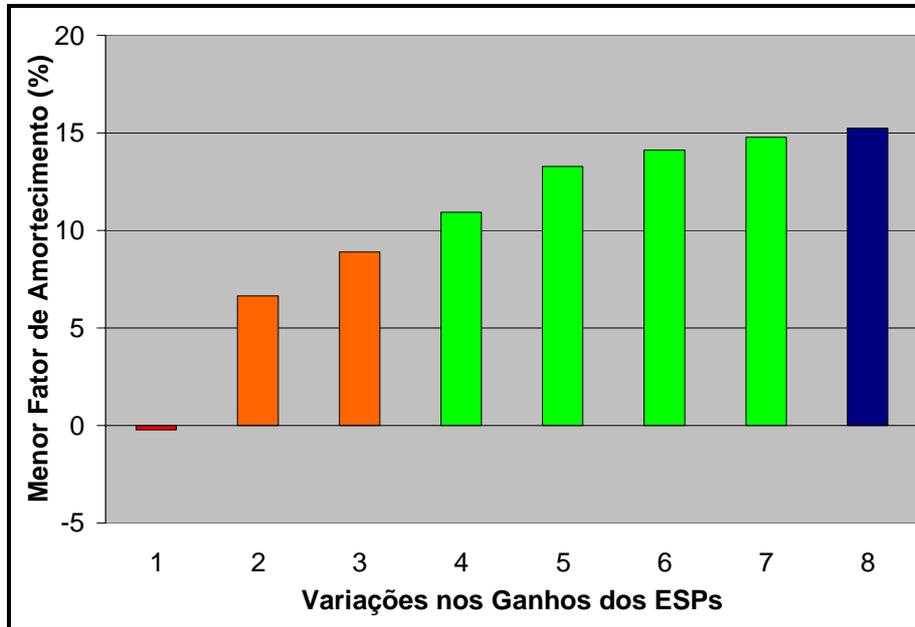


Figura 78 – Evolução do menor fator de amortecimento.

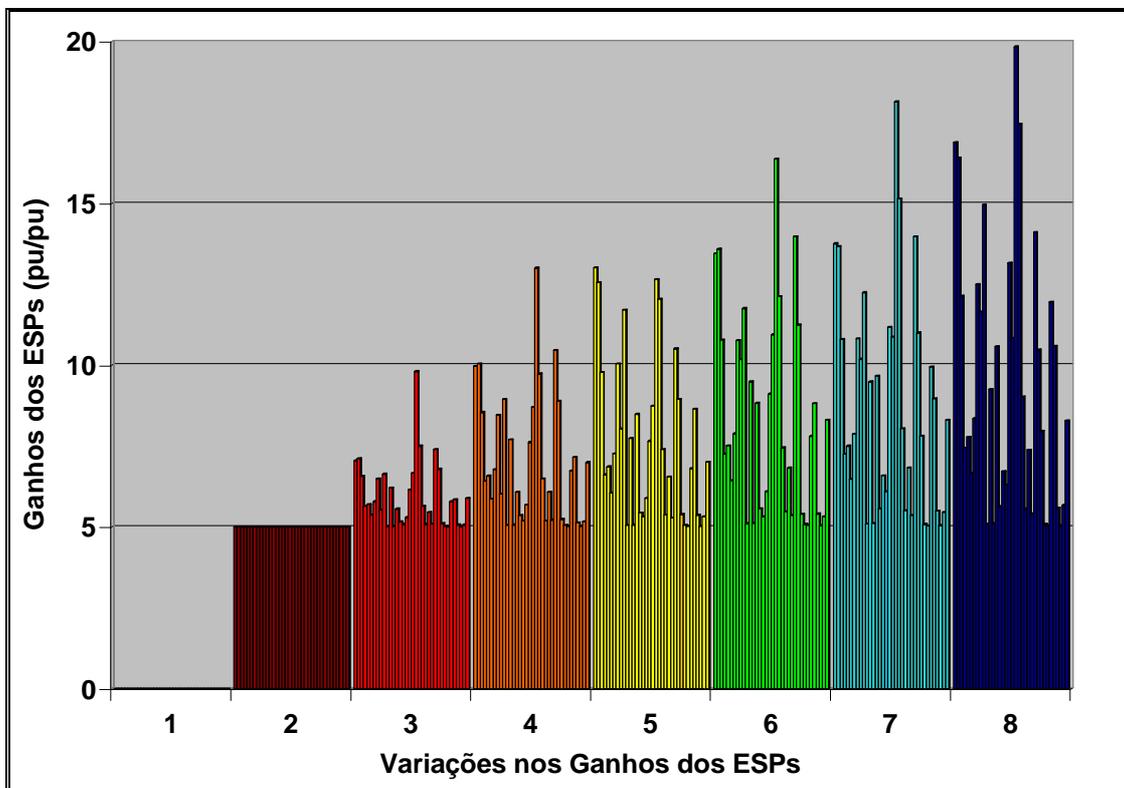


Figura 79 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

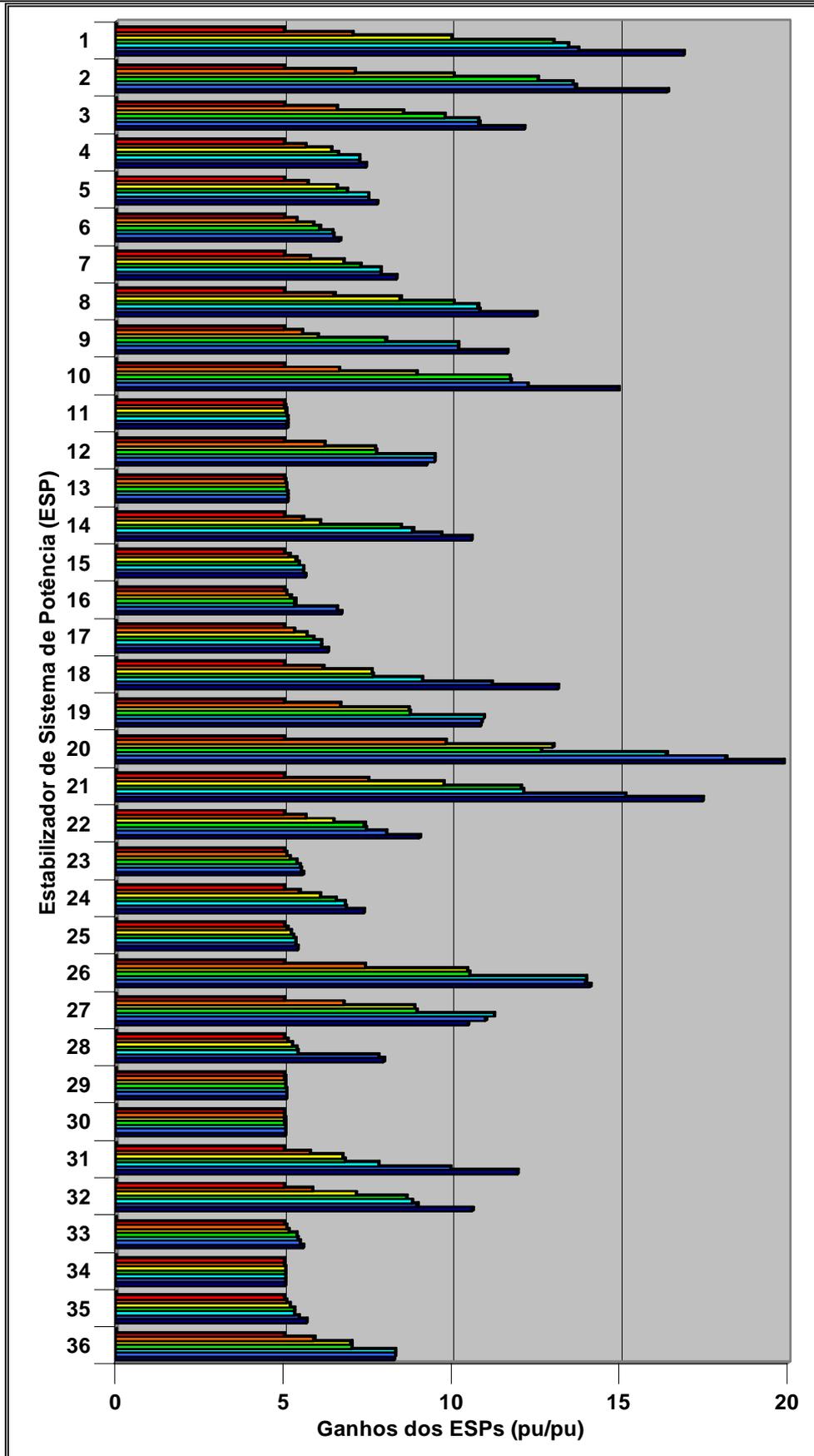


Figura 80 – Evolução do ganho de cada ESP.

Na Figura 80 é possível observar comportamentos distintos de variação de ganhos. Alguns ESPs tiveram o ganho praticamente inalterado, outros diminuíram e a maioria teve o ganho aumentado (uns consideravelmente mais que os outros).

A Figura 81 mostra os pólos do sistema em malha aberta e com os ganhos dos ESPs coordenados segundo o método proposto.

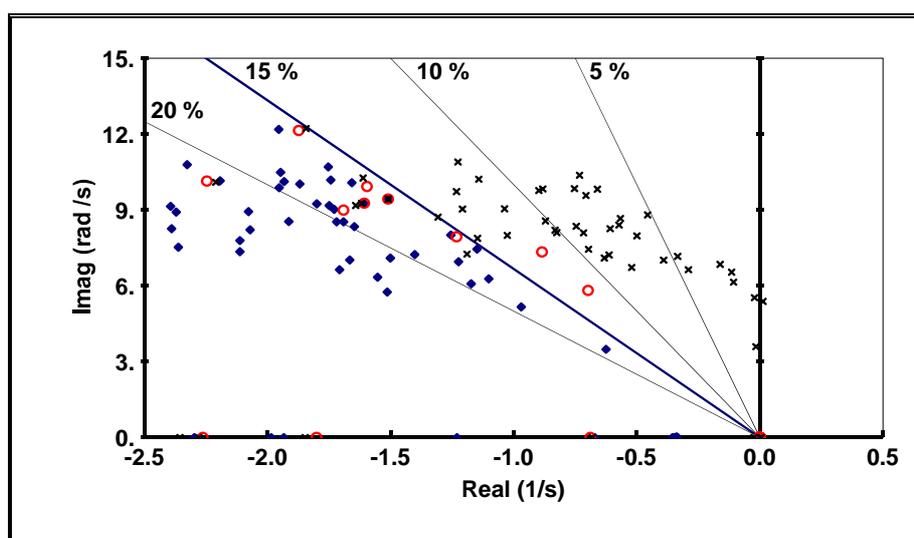


Figura 81 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado (azul).

A Figura 82 e a Figura 83 apresentam o comportamento da potência ativa terminal em Itaipu e Ilha Solteira após distúrbio em degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão de cada máquina.

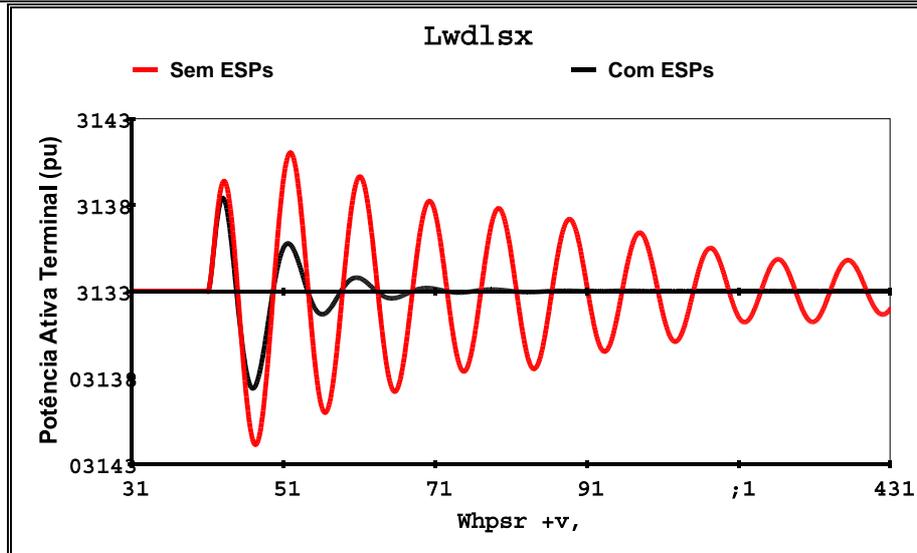


Figura 82 – Variação de potência ativa terminal em Itaipu após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão.

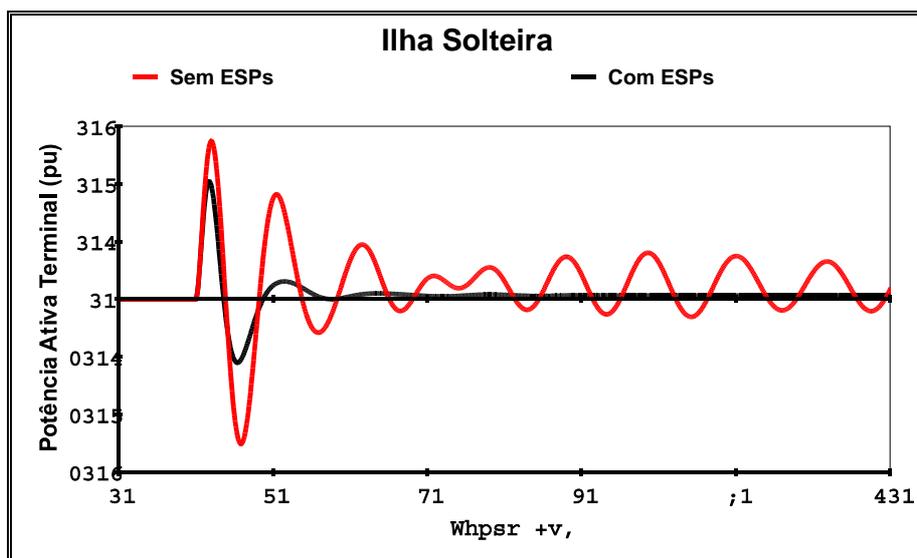


Figura 83 – Variação de potência ativa terminal em Ilha Solteira após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão.

O ajuste realizado nesta seção monitorou os três pólos com menor amortecimento. A cada variação de ganho é calculada uma solução completa do problema de autovalores utilizando o método QR. Desta forma, é garantido que os pólos monitorados são sempre os mais críticos.

Como discutido na Seção II.4.3, a questão de quantos os pólos a serem monitorados deve levar em consideração o fato de que quanto maior o número de pólos escolhidos, maior o sistema a ser resolvido na etapa de posicionamento. Como o

algoritmo implementado em Matlab utiliza matriz cheia no cálculo da matriz inversa generalizada, quanto maior o número de pólos maior o esforço computacional. A Tabela 36 apresenta os dados referentes ao tempo de processamento.

Tabela 36 – Tempo de processamento.

Processador	Memória RAM	Sistema Operacional	Tempo
Pentium III 1,13 GHz	256 MB	Windows 2000	9 minutos

II.7.2 Estudo de 11 Pontos de Operação

Nesta seção são apresentados os resultados da análise do sistema Sul-Sudeste – 50 Geradores para 11 pontos de operação distintos (Tabela 37).

Tabela 37 – Pontos de operação analisados.

Ponto de Operação	Característica
1	Caso base
2	Aumento de 5 % na carga
3	Redução de 5 % na carga
4	Aumento de 10 % na carga
5	Redução de 10 % na carga
6	Retirada de 5 circuitos da malha de 138 kV no Rio de Janeiro
7	Retirada de 5 circuitos da malha de 230 kV no Rio Grande do Sul
8	Retirada de 5 circuitos da malha de 345 kV em São Paulo
9	Retirada de 5 circuitos da malha de 500 kV no Sudeste
10	Retirada de 5 circuitos da malha de 440 kV em São Paulo
11	Retirada de 10 circuitos da malha de 440 kV em São Paulo

Os pontos de operação foram definidos de forma a proporcionarem modos de oscilação eletromecânica de mesma natureza com diferentes valores de um ponto de

operação para outro. Desta forma, foram realizadas 4 alterações de carregamento em todo o sistema e diversos desligamentos de circuitos.

Foi retirado um número elevado de circuitos (5 ou 10) da região Sul-Sudeste. A intenção não foi simular casos reais, mas produzir casos de estabilização difícil. Por isso, não foram verificadas eventuais violações de tensão ou fluxo em linhas nos casos de contingência.

A Figura 84 mostra o mapa de pólos e zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$ para todos os 11 pontos de operação.

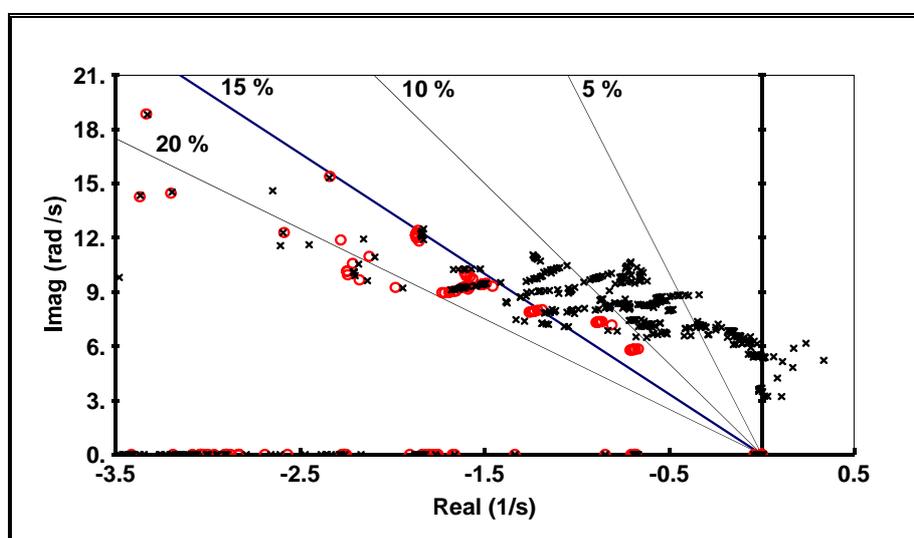


Figura 84 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$ para os 11 pontos de operação.

A Figura 85 mostra qual o menor fator de amortecimento no sistema supondo que os ganhos de todos os ESPs são iguais. Variando os ganhos dos ESPs desde zero (malha aberta) até 75 pu/pu, pode ser verificado que apenas uma pequena faixa de valores permite que o sistema tenha o desempenho desejado (de 19 pu/pu a 33 pu/pu). Deve-se notar, entretanto, que o valor de 19 pu/pu está muito próximo dos valores máximos utilizados na prática para o conjunto RAT-ESP utilizado. Como já discutido anteriormente, quanto maior o valor do ganho, maior propensão a problemas relacionados com a aquisição do sinal de controle e maior a possibilidade de problemas relacionados com dinâmicas não modeladas, por isso, um ajuste com todos os ganhos no máximo é indesejado.

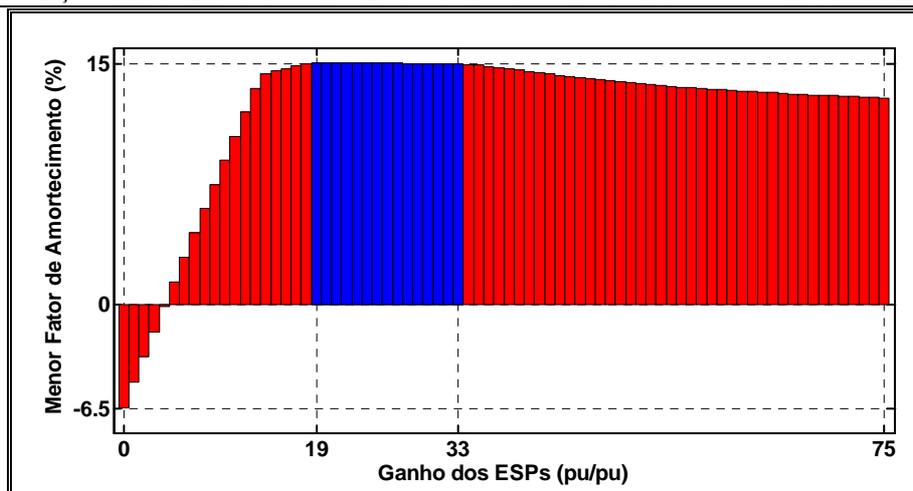


Figura 85 – Relação entre ganho nos ESPs e menor fator de amortecimento.

A Tabela 38 e a Tabela 39 apresentam os dados relativos ao ajuste coordenado. São monitorados 36 pólos (número igual ao de ESPs) para cada ponto de operação. O valor máximo admitido de ganho é 20 pu/pu. Após 7 variações de ganho, é garantido que nenhuma oscilação no sistema, para os 11 pontos de operação, tem fator de amortecimento inferior a 15 %.

Tabela 38 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Variação de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	20 pu/pu	36	5	2 pu/pu	7

Tabela 39 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação
Sem ESPs	0,8294	- 6,4	4
Com ESPs	1,2112	15,1	4

A Figura 86 apresenta o menor fator de amortecimento em cada uma das etapas do processo. Em malha aberta (ponto 1), há um modo de oscilação eletromecânica com fator de amortecimento igual a - 6,4 %. No ponto 9, no fim do ajuste, o menor fator de

amortecimento é 15,1 %. A Figura 87 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs durante a coordenação dos ganhos. Na Figura 88 a mesma informação é mostrada de forma individual para cada ESP, do ESP₁ ao ESP₃₆.

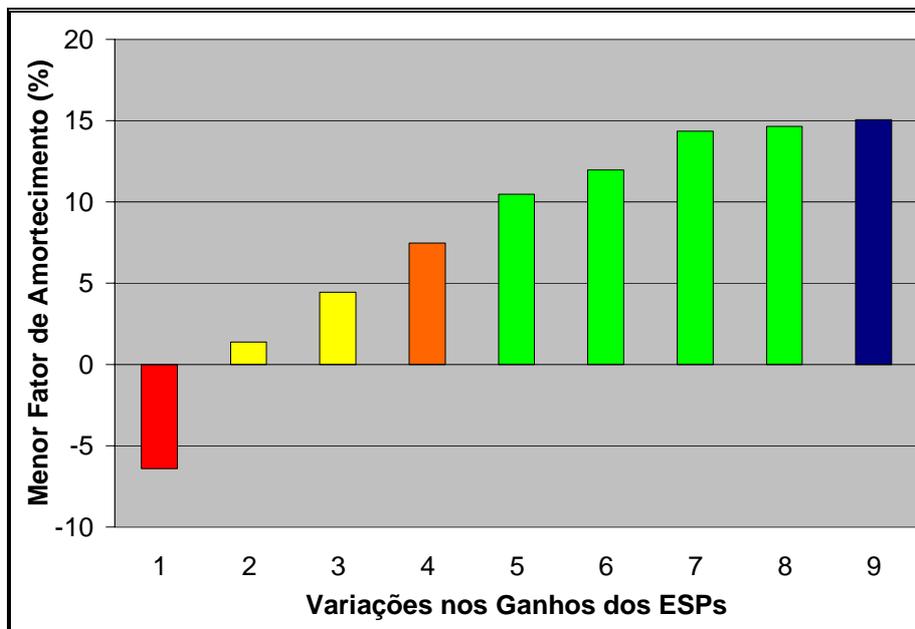


Figura 86 – Evolução do menor fator de amortecimento.

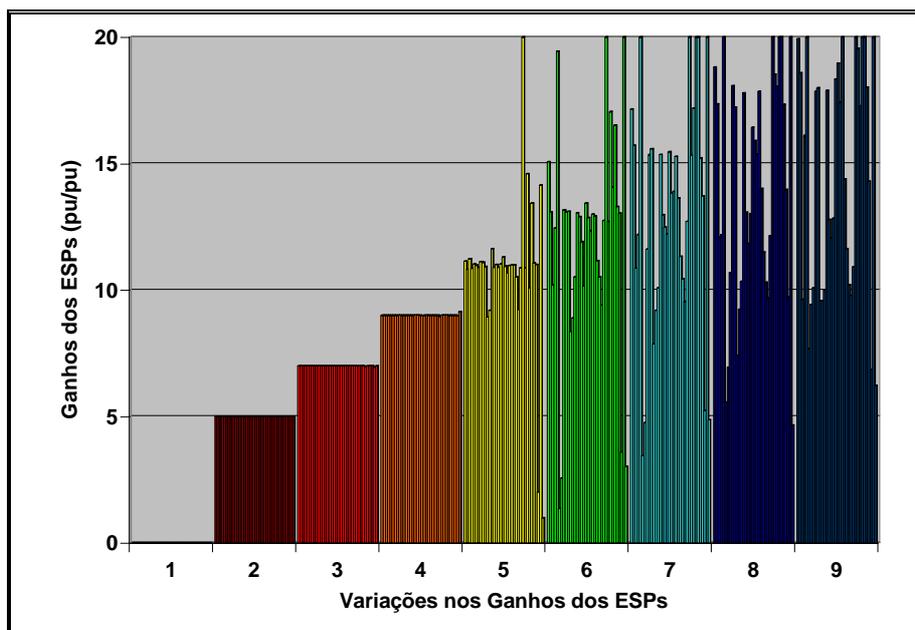


Figura 87 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

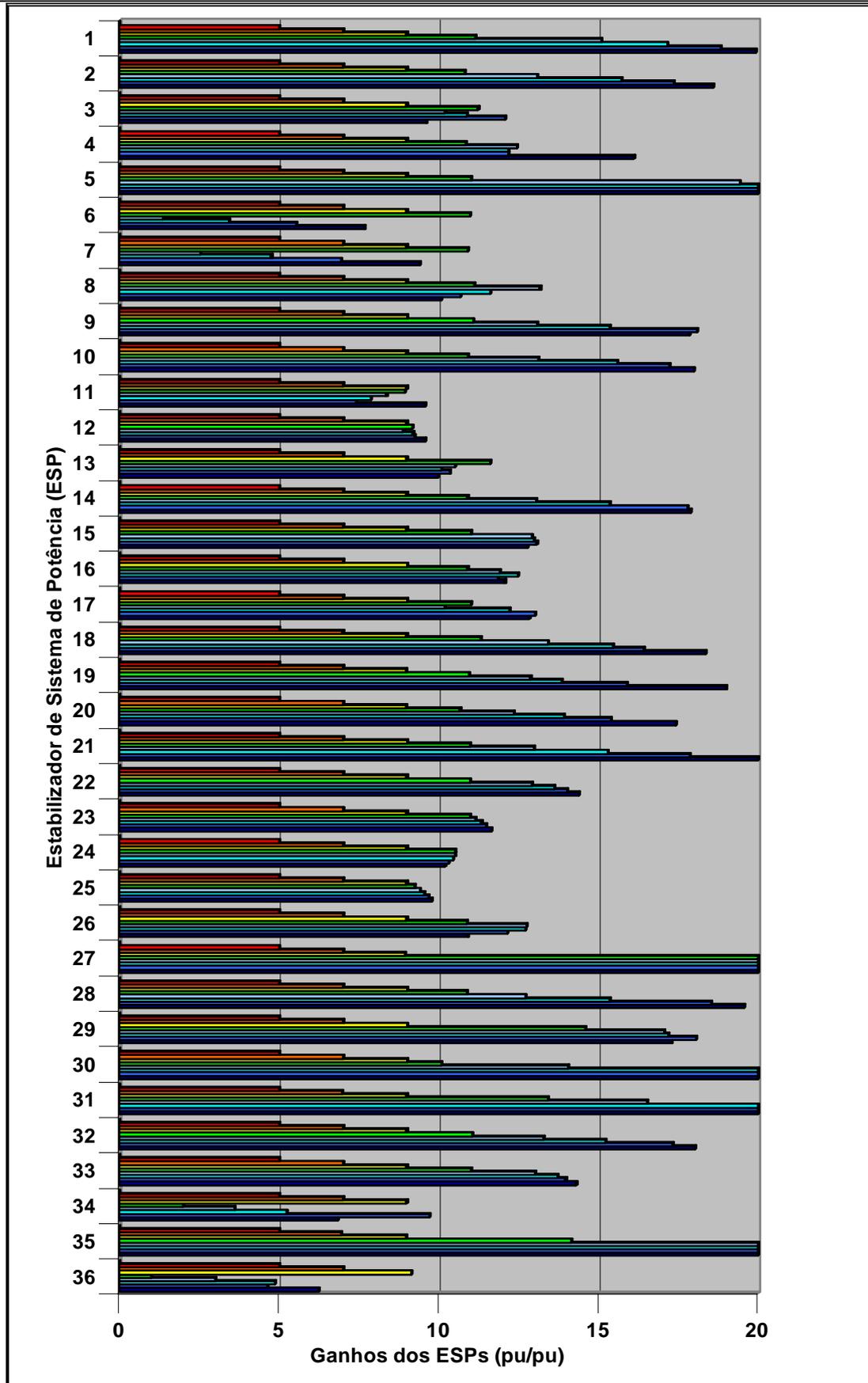


Figura 88 – Evolução do ganho de cada ESP.

A Tabela 40 apresenta os dados referentes ao tempo de processamento. O tempo elevado deve-se a necessidade de calcular a matriz inversa generalizada de uma matriz de ordem elevada (1188x828), além do cálculo dos pólos utilizando método QR. Estas operações, realizadas utilizando funções nativas do Matlab, não levaram em conta o alto grau de esparsidade da matriz (Figura 89).

Tabela 40 – Tempo de processamento para 36 pólos monitorados.

Processador	Memória RAM	Sistema Operacional	Tempo
Pentium III 1,13 GHz	256 MB	Windows 2000	24 horas e 33 minutos

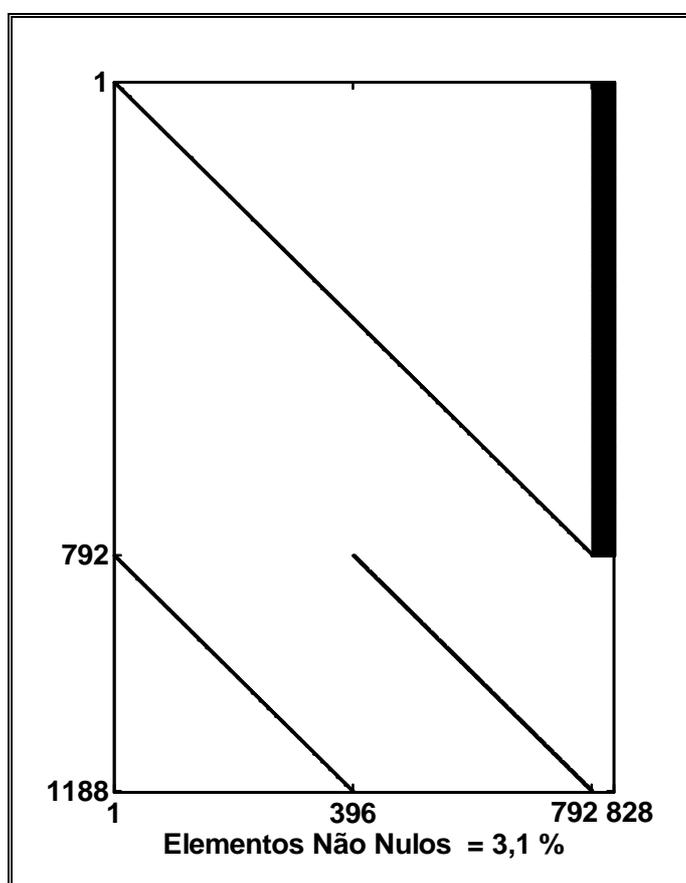


Figura 89 – Matriz utilizada no posicionamento para cálculo do vetor de ganhos ΔK .

O tempo pode ser reduzido caso o algoritmo utilize um número menor de pólos no posicionamento. A Tabela 41 e a Tabela 42 apresentam os dados relativos ao ajuste coordenado quando são monitorados 10 pólos por ponto de operação. É importante lembrar que após cada variação de ganho são verificados quais os pólos mais críticos, e estes monitorados. Desta forma, não há risco do algoritmo negligenciar pólos com fator

de amortecimento baixo. Como explicado na Seção II.4, os pólos monitorados são sempre os mais críticos após cada variação de ganho.

Como mostrado na Tabela 41, o valor máximo admitido de ganho é 20 pu/pu. Após 4 variações de ganho, é garantido que nenhuma oscilação no sistema, para os 11 pontos de operação, tem fator de amortecimento inferior a 15 %.

Tabela 41 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Varição de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	20 pu/pu	10	10	2 pu/pu	4

Tabela 42 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação
Sem ESPs	0,8294	- 6,4	4
Com ESPs	0,8150	15,1	4

A Figura 90 apresenta o menor fator de amortecimento em cada uma das etapas do processo. Em malha aberta (ponto 1), há um modo de oscilação eletromecânica com fator de amortecimento igual a - 6,4 %. No ponto 6, no fim do ajuste, o menor fator de amortecimento é 15,1 %. A Figura 91 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs durante a coordenação dos ganhos. Na Figura 92 a mesma informação é mostrada de forma individual para cada ESP, do ESP₁ ao ESP₃₆.

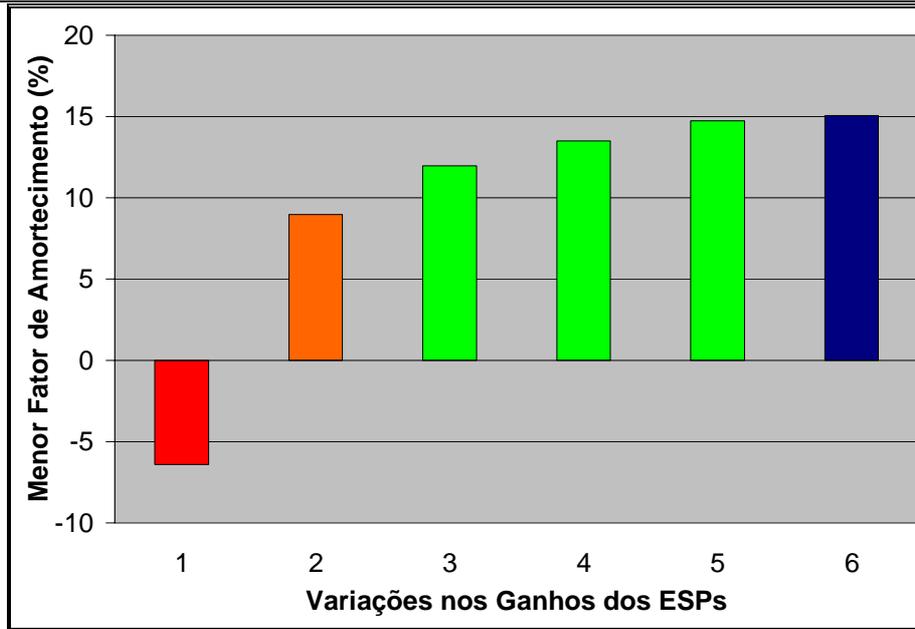


Figura 90 – Evolução do menor fator de amortecimento.

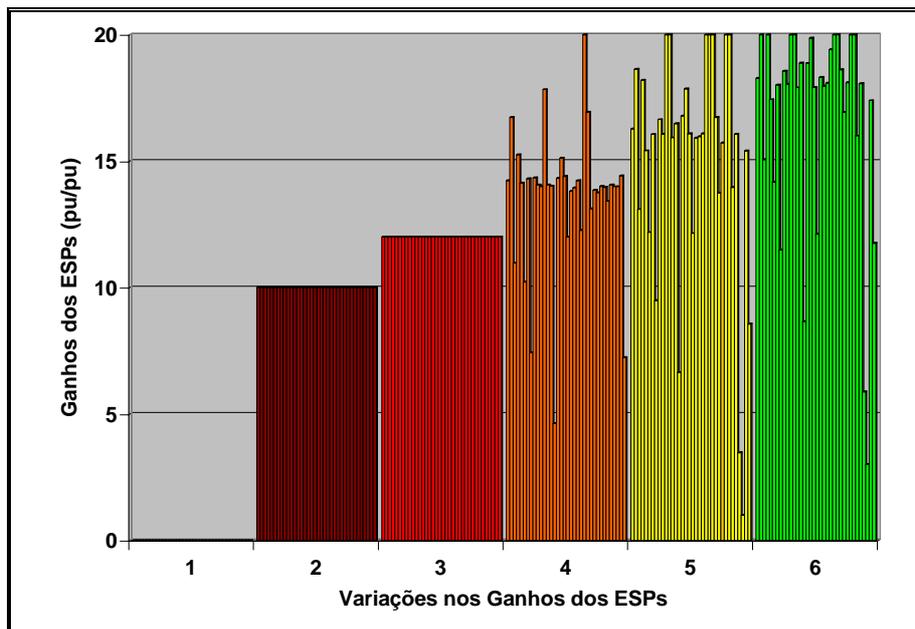


Figura 91 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

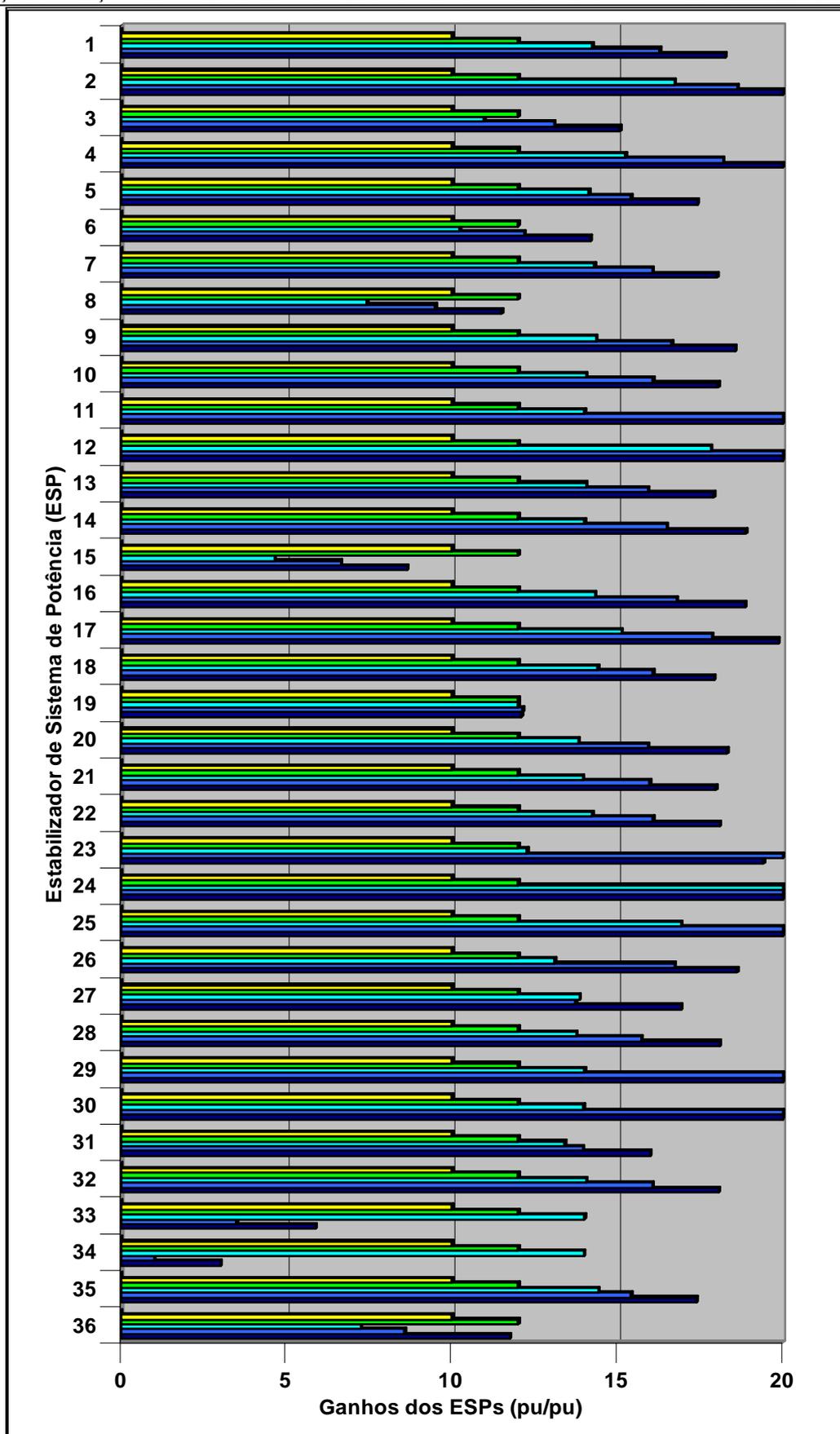


Figura 92 – Evolução do ganho de cada ESP.

A Tabela 43 apresenta os dados referentes ao tempo de processamento. É considerável a redução de tempo, mesmo não aproveitando a esparsidade da matriz (Figura 93).

Tabela 43 – Tempo de processamento para 10 pólos monitorados.

Processador	Memória RAM	Sistema Operacional	Tempo
Pentium III 1,13 GHz	256 MB	Windows 2000	5 horas e 5 minutos

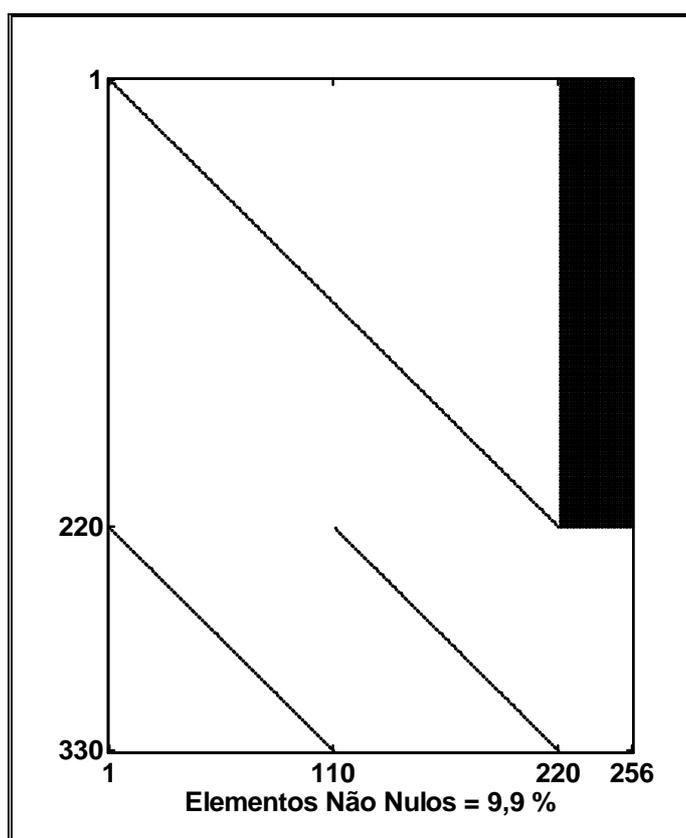


Figura 93 – Matriz utilizada no posicionamento para cálculo do vetor de ganhos $\underline{\Delta K}$.

Como discutido na Seção II.4.3, a resposta final pode variar dependendo das condições iniciais do processo. A seguir o ajuste é feito diminuindo o número de pólos monitorados (de 10 para 3) e tomando como valores iniciais dos ganhos, 90 % dos valores alcançados no ajuste do caso base (Tabela 44). Após 3 variações de ganho, é garantido que nenhuma oscilação no sistema tem fator de amortecimento inferior a 15 % (Tabela 45).

Tabela 44 – Parâmetros utilizados para o ajuste coordenado dos ganhos.

$\xi_{\text{Mínimo}}$	Ganho Máximo	Pólos Monitorados em Cada Pto. de Operação	Valores Iniciais de Ganhos	Varição de Ganho para Estimativa de Posicionamento	Número de Variações de Ganho
15 %	20 pu/pu	3	90 % dos ganhos do ajuste para o caso base	2 pu/pu	3

Tabela 45 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Ponto de Operação
Sem ESPs	0,8294	- 6,4	4
Com ESPs	0,8150	15,1	4

A Figura 94 apresenta o menor fator de amortecimento em cada uma das etapas do processo. No ponto 5, no fim do ajuste, o menor fator de amortecimento é 15,1 %. A Figura 95 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs durante a coordenação dos ganhos. Na Figura 96 a mesma informação é mostrada de forma individual para cada ESP, do ESP₁ ao ESP₃₆. Neste novo ajuste os ganhos variam de 10 pu/pu a 20 pu/pu, o ajuste anterior tinha ganhos entre 3 pu/pu e 20 pu/pu. Os ganhos obtidos neste terceiro ajuste são distintos daqueles obtidos anteriormente, entretanto, o desempenho final desejado é alcançado da mesma forma.

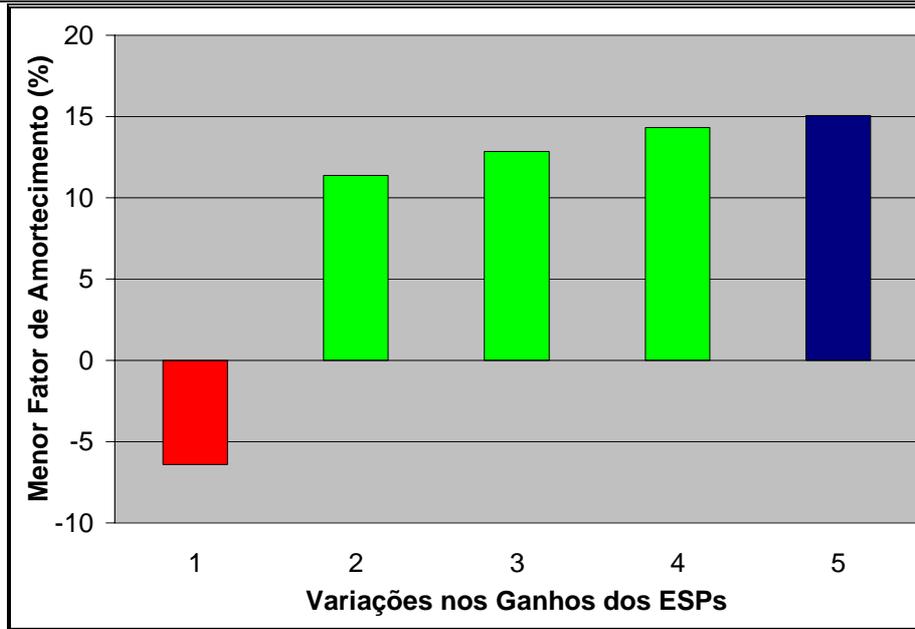


Figura 94 – Evolução do menor fator de amortecimento.

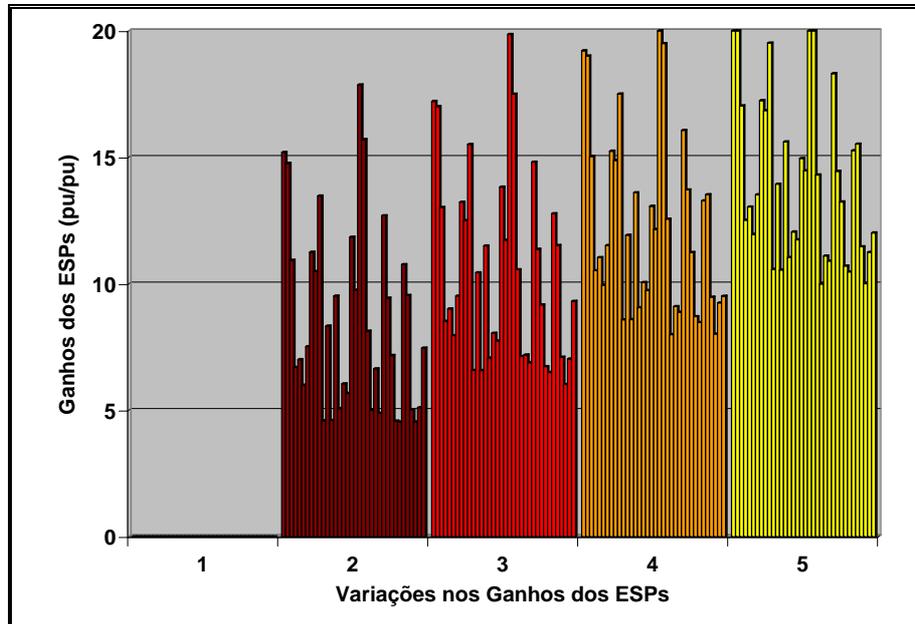


Figura 95 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

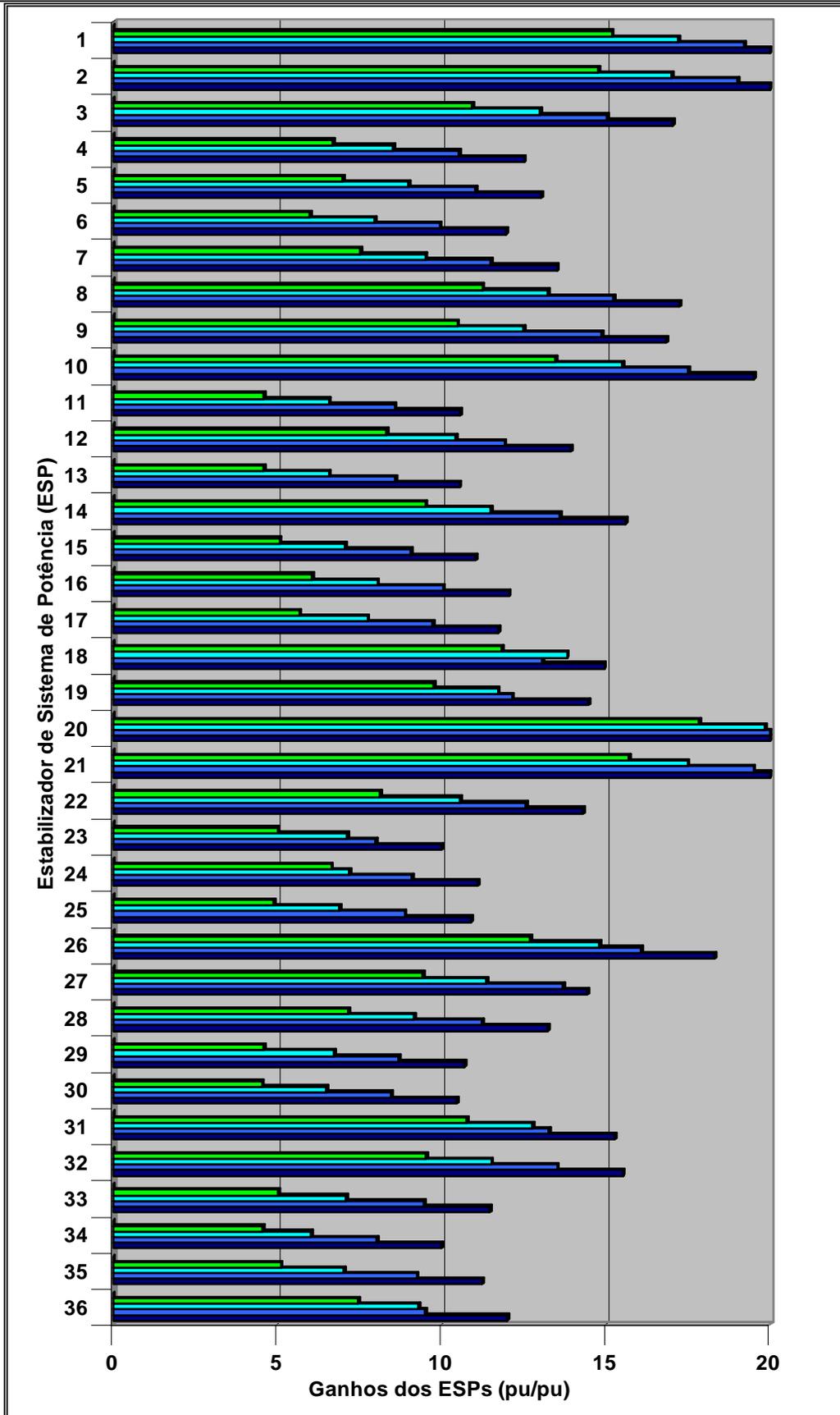


Figura 96 – Evolução do ganho de cada ESP.

A Tabela 46 apresenta os dados referentes ao tempo de processamento. Neste caso o tempo de processamento é bastante menor que no primeiro (cerca de 24 horas). Neste caso, com poucos pólos monitorados por ponto de operação, a matriz utilizada no cálculo dos ganhos não têm esparcidade acentuada (Figura 97).

Tabela 46 – Tempo de processamento para 3 pólos monitorados.

Processador	Memória RAM	Sistema Operacional	Tempo
Pentium III 1,13 GHz	256 MB	Windows 2000	2 horas e 9 minutos

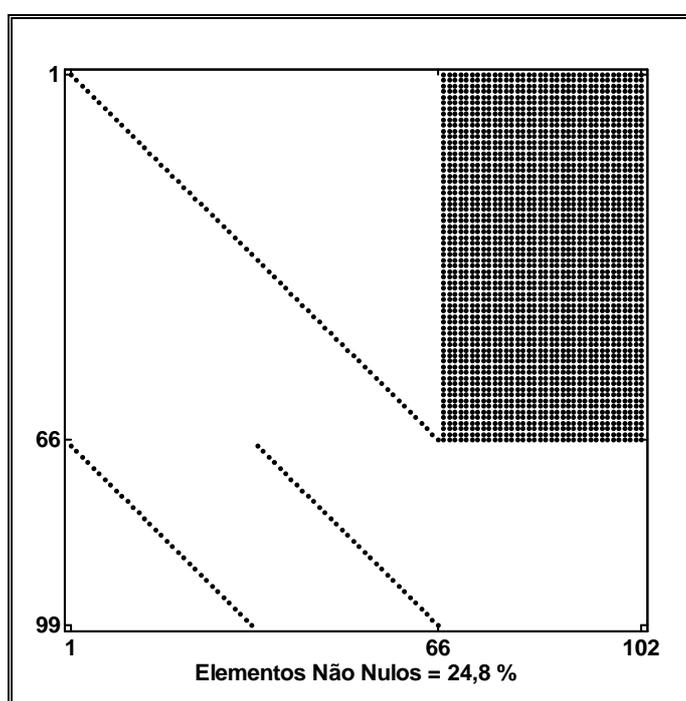


Figura 97 – Matriz utilizada no posicionamento para cálculo do vetor de ganhos ΔK .

A Figura 98 mostra, em ordem crescente, os ganhos obtidos em cada ajuste: todos os ganhos iguais a 19 pu/pu e ajuste coordenado monitorando 3, 10 ou 36 pólos por ponto de operação. A Figura 99 mostra o ganho médio de cada ajuste.

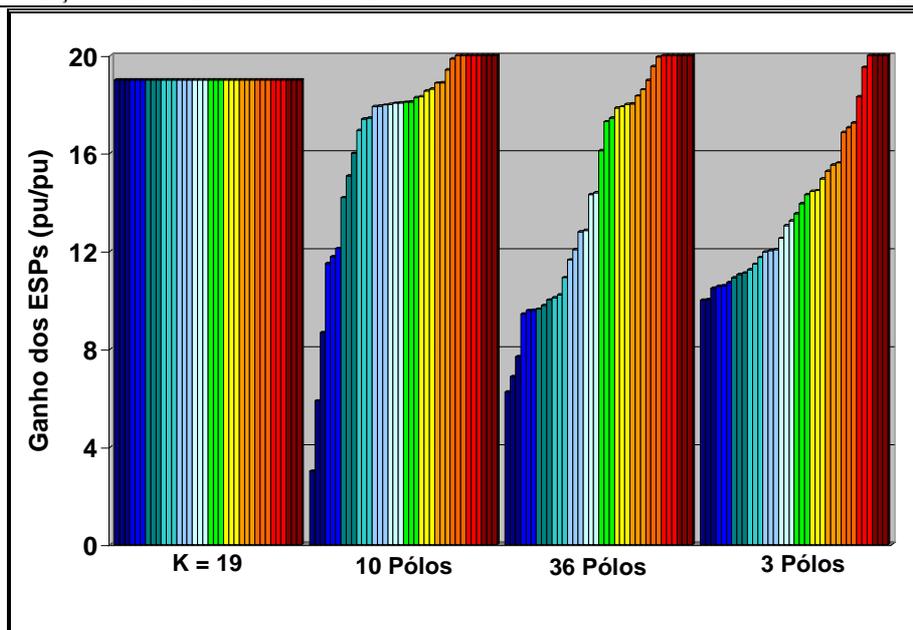


Figura 98 – Ganhos dos ESPs em cada análise para obtenção de fator de amortecimento mínimo de 15 %.

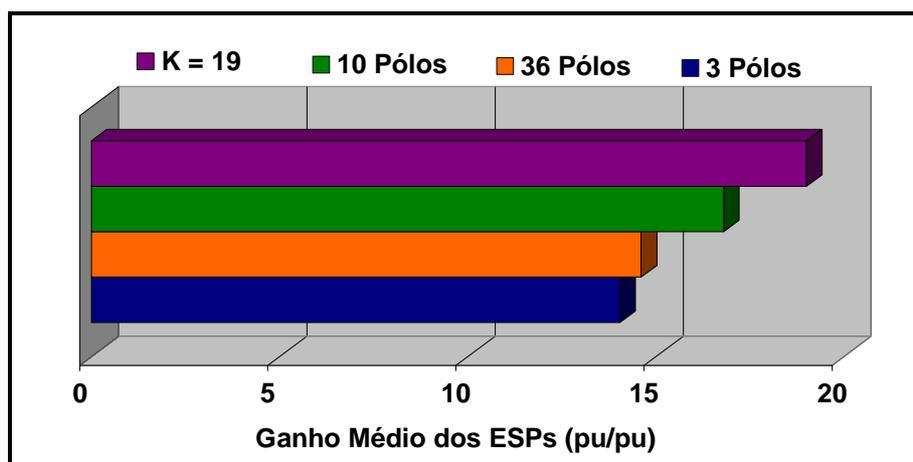


Figura 99 – Ganho médio dos ESPs para cada análise.

Nos três ajustes realizados os ganhos médios foram menores que a solução sem coordenação, com a vantagem de apenas alguns ESPs terem ganho alto (20 pu/pu).

A Figura 100 mostra o tempo de processamento utilizando Matlab, para cada ajuste.

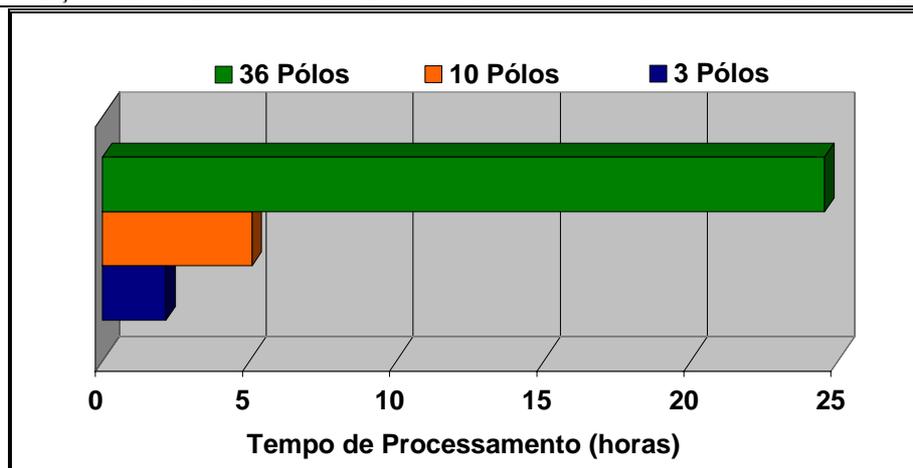


Figura 100 – Tempo de processamento em cada análise.

O objetivo do ajuste coordenado proposto não é encontrar a solução com o menor ganho médio. O esforço computacional para isso, envolvendo técnicas de otimização, é extremamente grande. Encontrar uma solução robusta, ou seja, que garanta o desempenho em múltiplos pontos de operação, com os ganhos tendo valores menores que o máximo, é suficiente.

Apesar da diferença entre os ganhos médios e o tempo de processamento, o desempenho dos quatro ajustes é similar, como pode ser visto nas figuras que seguem (Figura 101, Figura 102, Figura 103, Figura 104). Desta forma, três ajustes obtidos de forma coordenada conseguem o mesmo desempenho com um esforço menor de controle (ganhos menores).

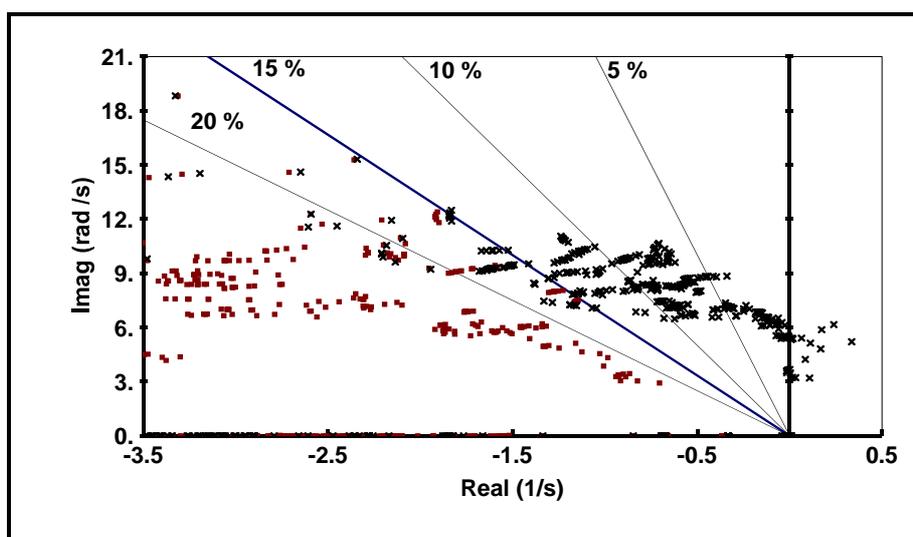


Figura 101 – Sistema com malha aberta (preto) e com todos os ganhos iguais a 19 pu/pu (marrom).

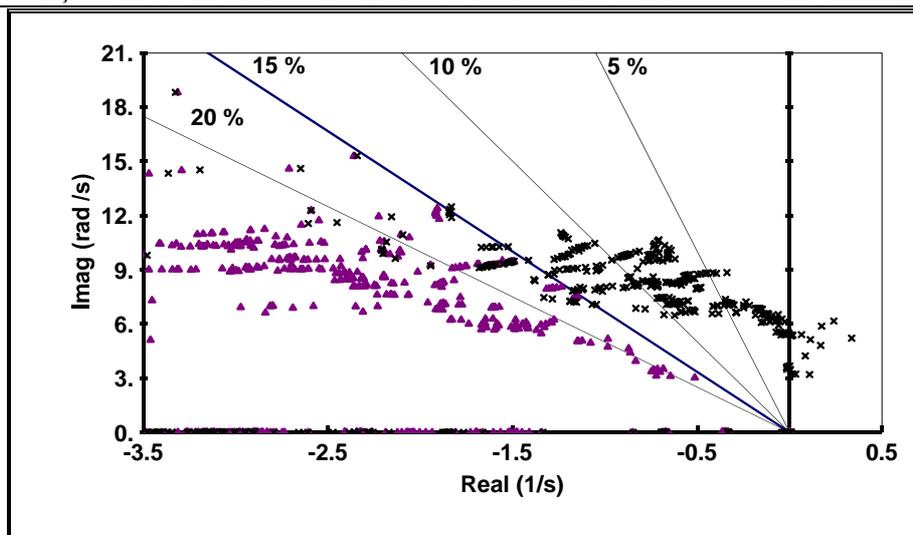


Figura 102 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 36 pólos em cada ponto de operação (roxo).

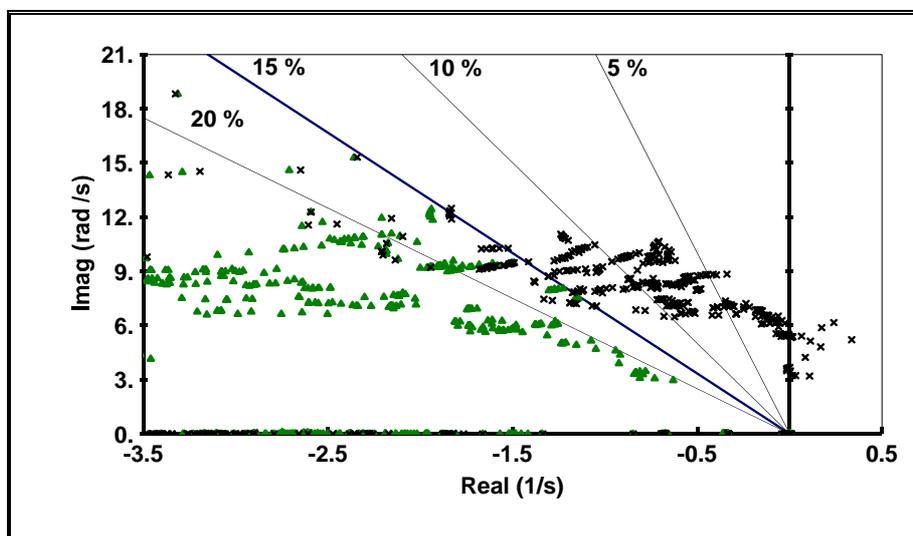


Figura 103 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 10 pólos em cada ponto de operação (verde).

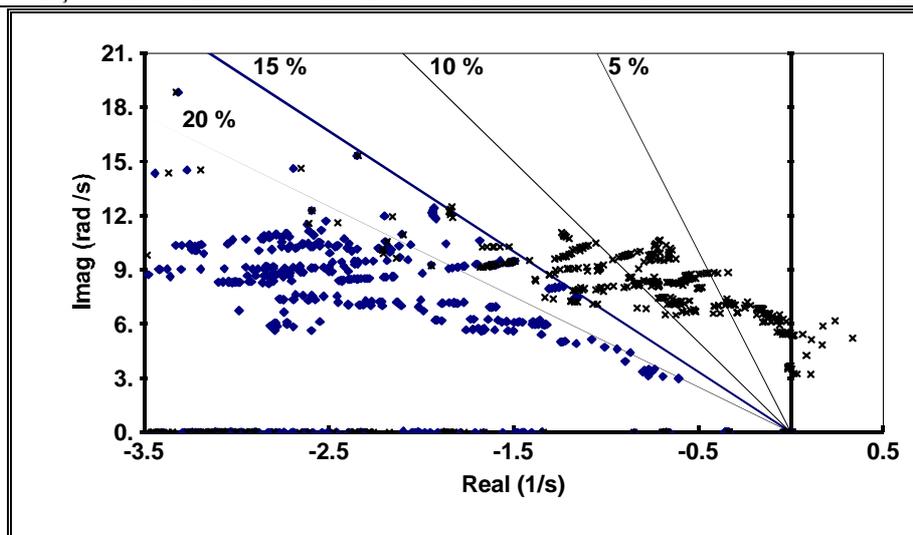


Figura 104 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 3 pólos em cada ponto de operação (azul).

A Figura 105 mostra os pólos de malha aberta, os pólos com ESPs (ajuste monitorando 3 pólos) e os zeros da função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$.

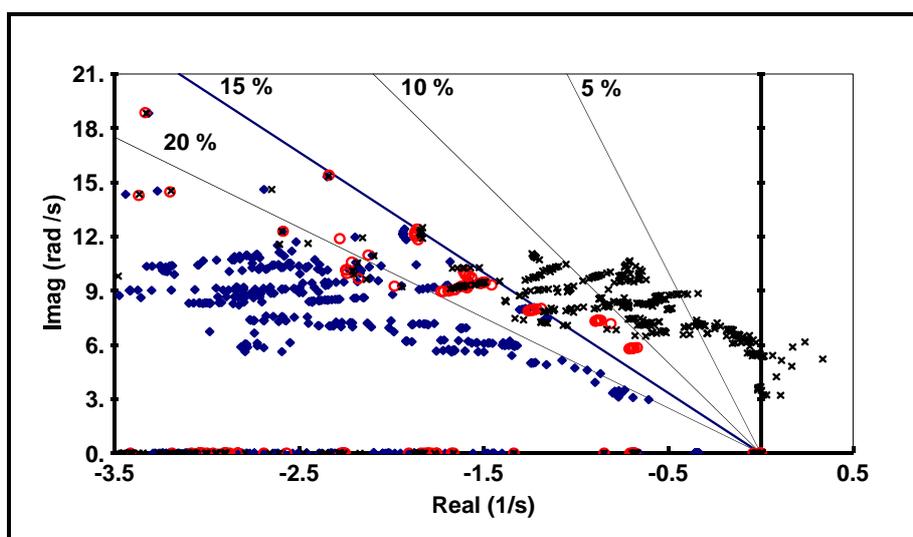


Figura 105 – Pólos do sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 3 pólos (azul) e os zeros (vermelho).

A Figura 106 e a Figura 107 apresentam o comportamento da potência ativa terminal em Itaipu e Ilha Solteira após distúrbio em degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão de cada máquina. O ponto de operação é o número 4 e o ajuste dos ESPs é o de menor ganho médio (ajuste monitorando 3 pólos por ponto de operação).

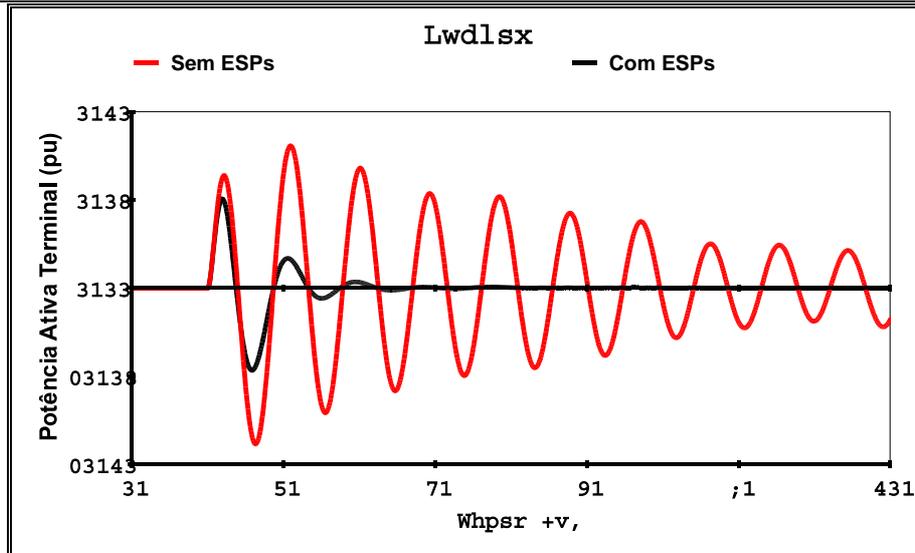


Figura 106 – Variação de potência ativa terminal em Itaipu após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão.

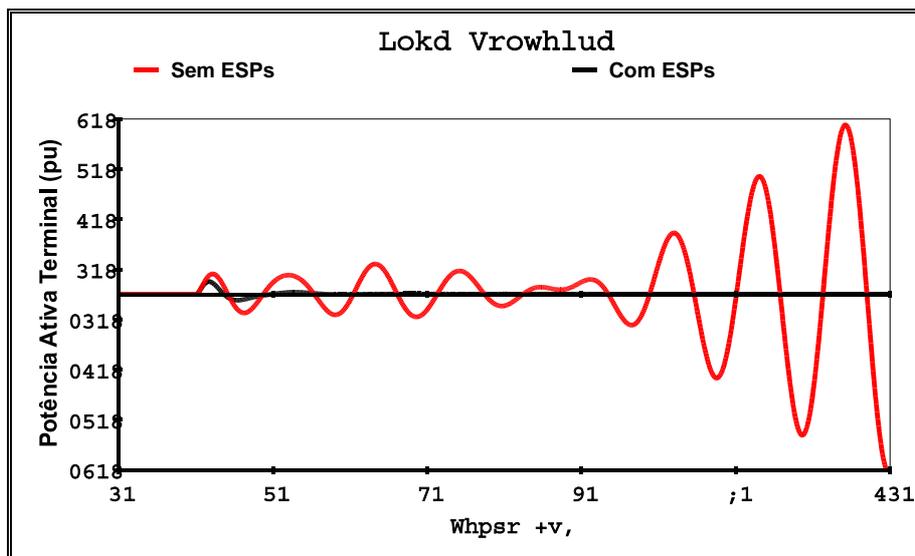


Figura 107 – Variação de potência ativa terminal em Ilha Solteira após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão.

II.8 Considerações Finais

A metodologia descrita neste capítulo mostrou-se eficiente na coordenação dos ganhos dos ESPs do sistema. Como vários cenários operativos são considerados simultaneamente, a solução obtida é robusta.

Os resultados obtidos mostram que a ordem de grandeza da duração de um estudo de coordenação para estudos de sistemas de grande porte pode diminuir de meses para semanas utilizando a metodologia proposta. No ajuste convencional, os ESPs são ajustados de forma seqüencial para cada ponto de operação. Por outro lado, no método proposto, todos os ESPs são ajustados simultaneamente levando em consideração vários pontos de operação.

O objetivo do ajuste coordenado proposto não é encontrar uma solução ótima. Encontrar uma solução robusta, ou seja, que garanta o desempenho em múltiplos pontos de operação, com os ganhos tendo valores menores que o máximo, é suficiente.

A solução final é obtida através de melhorias sucessivas de soluções anteriores, utilizando uma direção de avanço que leva em consideração a influência de cada controlador na variação da posição de cada um dos pólos. Esta direção é obtida através da informação de sensibilidade modal, contida nos resíduos da função de transferência da malha de controle associados aos pólos de interesse. O método proposto, portanto, extrai informações do sistema durante todo o processo.

O tempo de processamento para um sistema de grande porte em 11 pontos de operação distintos é da ordem de horas, utilizando o Matlab. É importante lembrar que este tempo será bastante reduzido quando o algoritmo for implementado explorando a esparcidade do problema.

Capítulo III

Sistema Sintético para Avaliação da Robustez de Estabilizadores de Sistemas de Potência

III.1 Considerações Gerais

A avaliação da robustez dos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) é normalmente feita levando-se em consideração diversos prováveis cenários do sistema onde o equipamento será instalado [Martins 1999]. A utilização de algumas metodologias de projeto robusto [Bazanella 1997, Boukarim 2000, CIGRE 2000] é limitada pela dimensão do problema analisado.

O objetivo deste capítulo é desenvolver uma metodologia para testar a robustez, quanto à estabilidade frente pequenas perturbações, do conjunto máquina-regulador automático de tensão (RAT)-estabilizador de sistema de potência (ESP). Este conjunto deve ser robusto em inúmeras condições operativas prováveis, e ainda frente ampla gama de modos de oscilação existentes em sistemas reais. Esta metodologia deverá ser de utilidade prática para o ajuste do sinal adicional estabilizador dos muitos geradores existentes em sistemas de grande porte. Isto implica na necessidade de teste de rápida execução para cada conjunto máquina-RAT-ESP e que reflita razoavelmente a realidade.

A análise de um sistema de grande porte já inclui, como etapa preliminar, uma série de testes via simulação digital. Estes testes são realizados com o intuito de identificar possíveis problemas relacionados com controladores. Estes problemas podem

ser provocados por falhas no projeto ou até mesmo na preparação dos arquivos para a análise. Não é raro, durante a manipulação de vários arquivos com milhares de linhas de dados, acontecer um erro que acarrete em problemas na análise. De qualquer maneira, é importante ter certeza que os dados iniciais estão corretos independentemente do motivo causador do erro.

Como exemplo de testes de validação de controladores frente pequenos sinais [CEPEL 2002a], temos:

- Teste de Gerador em Vazio: avalia a resposta do conjunto máquina-RAT

Neste teste o gerador é conectado a uma impedância infinita e a tensão do gerador é considerada como unitária. Todos os controles são desligados, exceto o RAT.

- Teste de Baixa Impedância: avalia a resposta do conjunto máquina-RAT-ESP-Regulador de Velocidade

As condições de operação do gerador são as mesmas do ponto de operação analisado. O gerador é ligado a uma barra infinita através de uma impedância baixa (0,15 pu na base da máquina)

- Teste de Alta Impedância: também avalia a resposta do conjunto máquina-RAT-ESP-Regulador de Velocidade

As condições de operação do gerador são as mesmas do ponto de operação analisado. O gerador é ligado a uma barra infinita através de uma impedância alta ($2.X'_d$)

- Teste do Regulador de Velocidade

As condições de operação do gerador são as mesmas do ponto de operação analisado. O gerador, no entanto, opera isolado sendo que a carga localizada na barra terminal, correspondendo ao sistema, tem sua parte ativa representada como potência constante e sua parte reativa

representado como impedância constante. é ligado a sua barra terminal.

O ESP é desligado neste teste.

Neste capítulo é apresentada uma metodologia que tem como objetivo possibilitar a avaliação da robustez do ESP. Isto é feito através da utilização de um sistema sintético de duas barras que permite verificar a performance do conjunto máquina-RAT-ESP. O sistema sintético aqui apresentado permite simular oscilações eletromecânicas de diferentes frequências, desde intraplanta até entre áreas. Com isso é possível estimar o desempenho dos controles em diferentes pontos de operação.

III.2 O Sistema Sintético

O sistema sintético (mostrado na Figura 108) consiste em uma máquina injetando potência aparente S com fator de potência $\cos\phi$ numa barra (Barra #1) onde existe uma carga variável instalada (P_{sh} e Q_{sh}). Esta máquina está ligada através de uma reatância variável (X_{12}) a uma barra infinita (Barra #2).

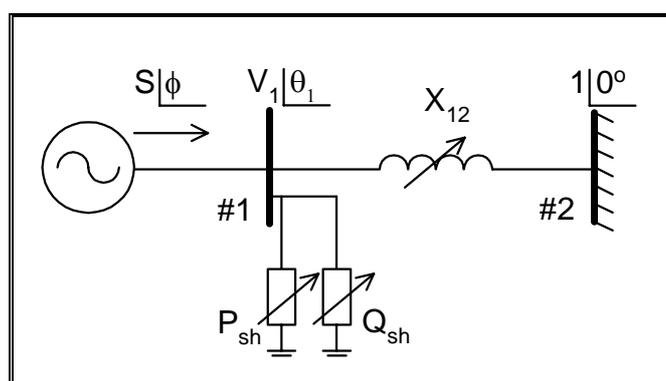


Figura 108 – Sistema sintético para avaliação da robustez de ESPs.

A variação da reatância X_{12} determina a frequência do modo de oscilação eletromecânica presente no sistema. Esta relação é de proporção inversa, de forma que quanto maior X_{12} , menor a frequência de oscilação.

A simples alteração da reatância X_{12} provoca mudança na potência fornecida pela máquina, já que o fluxo de potência na linha é alterado. Para que a potência fornecida seja constante mesmo alterando-se a reatância X_{12} , a diferença entre a potência gerada pela máquina e a potência efetivamente transmitida através da reatância é absorvida pela carga variável instalada na Barra #1 (P_{sh} e Q_{sh}). Assim, quando a reatância é muito grande, o fluxo de potência na linha é pequeno e a carga absorve praticamente toda a potência fornecida pela máquina. De maneira inversa, quando a reatância é muito pequena, praticamente toda a potência fornecida pela máquina é transmitida pela linha e absorvida pela barra infinita, tendendo a zero a carga instalada na Barra #1.

Ao manter a injeção de potência da máquina inalterada, pode ser avaliado o seu comportamento frente oscilações de diferentes frequências através da variação da reatância X_{12} . Tem-se assim, um sistema que sintetiza oscilações de diferentes frequências através da variação de um parâmetro independente (X_{12}) e outros parâmetros dependentes (θ_l , P_{sh} e Q_{sh}).

A avaliação da robustez do conjunto máquina-RAT-ESP é feita analisando como os pólos do sistema se comportam quando X_{12} varia. Casos em que valores prováveis de X_{12} apresentam modos de oscilação pouco amortecidos, ou até mesmo instáveis, indicam a necessidade de melhoria no ajuste do controle.

Seja, por exemplo, a situação onde os valores de X_{12} são altos. Neste caso, o sistema sintético pretende simular a presença de modos de oscilação entre áreas (modos de oscilação de frequência baixa). Considera-se desejável que o fator de amortecimento desses modos de baixa frequência sejam maiores que 10 %. Caso isso não esteja acontecendo, um ajuste do ESP poderia ser considerado.

A partir de um determinado despacho de potência, definido pelo módulo da potência aparente (S) e pelo fator de potência ($\cos\phi$), a reatância de ligação das barras (X_{12}) é variada. Assim, tem-se:

$$P_1 = S \cos \phi ; \quad (\text{III. 1})$$

$$Q_1 = S \sin \phi . \quad (\text{III. 2})$$

E ainda:

$$P_1 = P_{sh} + P_{12} ; \quad (\text{III. 3})$$

$$Q_1 = Q_{sh} + Q_{12} . \quad (\text{III. 4})$$

Onde [Monticelli 1983]:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2 \sin(\theta_{12})}{X_{12}} ; \quad (\text{III. 5})$$

$$Q_{12} = \frac{(V_1)^2 - V_1 V_2 \cos(\theta_{12})}{X_{12}}. \quad (\text{III. 6})$$

A carga variável deve ser calculada de maneira que a potência injetada pela máquina na Barra #1 seja constante para qualquer valor de X_{12} . Isto é mostrado a seguir nas equações de (III. 7) a (III. 10).

$$P_{sh} = P_1 - P_{12} \quad (\text{III. 7})$$

$$Q_{sh} = Q_1 - Q_{12} \quad (\text{III. 8})$$

Ou seja:

$$P_{sh} = S \cos \phi - \frac{V_1 V_2 \sin(\theta_{12})}{X_{12}}; \quad (\text{III. 9})$$

$$Q_{sh} = S \sin \phi - \frac{(V_1)^2 - V_1 V_2 \cos(\theta_{12})}{X_{12}}. \quad (\text{III. 10})$$

A variação da distância angular entre as barras ($\theta_{12} = \theta_1 - \theta'$) deve ser definida de forma que para valores pequenos de X_{12} a carga P_{sh} seja pequena e que o fluxo de potência P_{12} esteja próximo do máximo. Por outro lado, para valores muito elevados de X_{12} , a carga P_{sh} é máxima e o fluxo potência P_{12} na linha é mínimo e limitado pelo valor máximo de θ_{12} . A função escolhida (de forma empírica, baseada em observações) para refletir este comportamento de variação angular de uma barra quando a reatância de ligação com o restante do sistema aumenta, pode ser, por exemplo, a função logarítmica expressa em (III. 11).

$$\theta_{12} = a \ln(bX_{12}) \quad (\text{III. 11})$$

Os parâmetros a e b da equação (III. 11) são determinados a partir de valores mínimos e máximos da reatância X_{12} e da diferença angular θ_{12} (Figura 109).

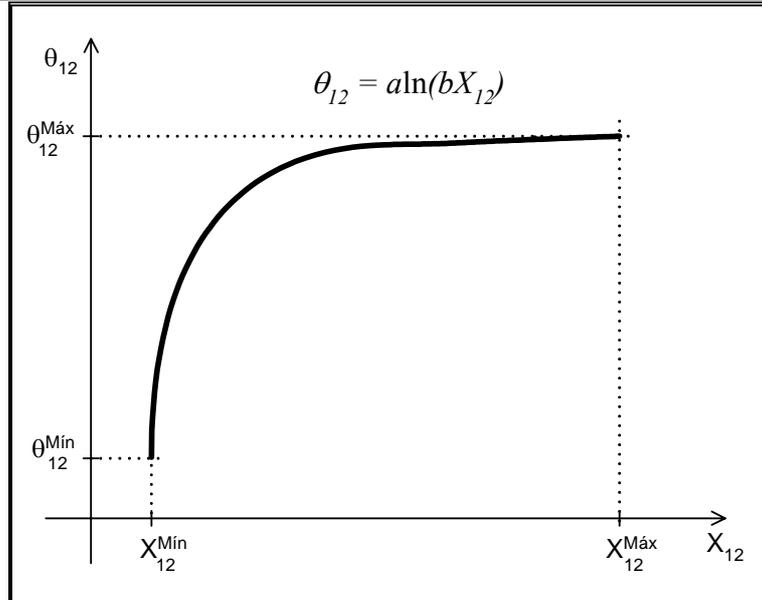


Figura 109 – Função de variação do ângulo $\theta_{12} = f(X_{12})$.

Desta forma, para os valores iniciais e finais especificados de X_{12} e θ_{12} , temos:

$$a = \frac{\theta_{12}^{\text{Max}} - \left[\arcsin(P_1 X_{12}^{\text{Min}}) \right]}{\ln\left(\frac{1}{X_{12}^{\text{Min}}}\right) - \ln\left(\frac{1}{X_{12}^{\text{Max}}}\right)}, \quad (\text{III. 12})$$

$$b = \frac{1}{X_{12}^{\text{Max}}} e^{\left(\frac{\theta_{12}^{\text{Max}}}{a}\right)}. \quad (\text{III. 13})$$

A Figura 110 mostra como variam a potência ativa na linha (P_{12}) e na carga (P_{sh}), o comportamento da potência reativa (não mostrado) é análogo.

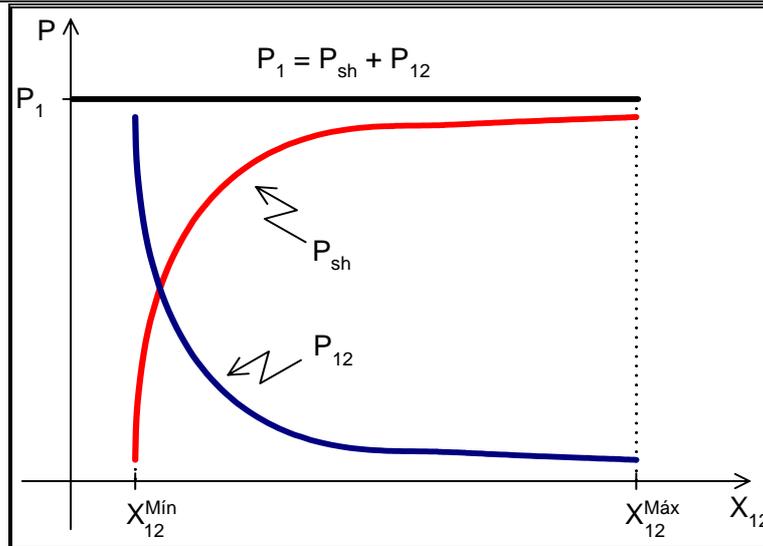


Figura 110 – Variação de potência na linha (P_{12}) e na carga (P_{sh}).

A Figura 111 mostra esquematicamente como se comporta o pólo associado ao modo de oscilação eletromecânica quando a reatância X_{12} é variada, na ausência e na presença de ESP. O objetivo da análise realizada com o sistema sintético é obter, com a instalação do ESP, a curva formada pelos pólos calculados para cada valor de reatância X_{12} dentro dos limites de fatores de amortecimento ξ_1 e ξ_2 . Desta forma, o ESP deve ser ajustado para que no espectro de frequência de interesse (0,15Hz a 2Hz) o modo de oscilação eletromecânica tenha o fator de amortecimento dentro de limites adequados.

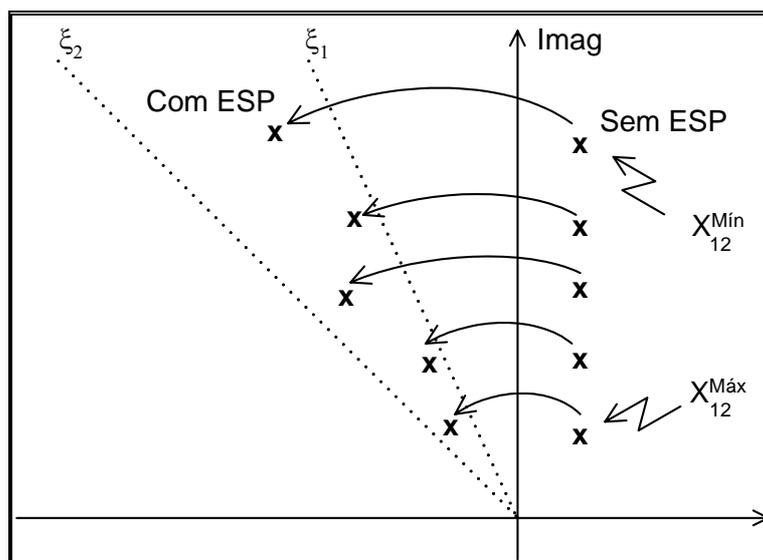


Figura 111 – Pólo de interesse para valores distintos de X_{12} .

III.3 Estudo da Usina de Xingó

Nesta seção é realizada a análise do comportamento de diferentes ESPs, utilizando o modelo e os parâmetros da máquina iguais aos dados reais da Usina de Xingó, pertencente à CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) e mostrados na Tabela 47. O Regulador Automático de Tensão (RAT) é modelado de forma simplificada como apresentado na Figura 112.

Tabela 47 – Dados da usina de Xingó.

MVA	H (s)	X_d (pu)	X_q (pu)	X'_d (pu)	X'_q (pu)	X''_d (pu)	X''_q (pu)
3120	4,5	0,89	0,66	0,36	0,36	0,29	0,29
R_a	X_l (pu)	T'_{do} (s)	T''_{do} (s)	T''_{qo} (s)			
0,0019	0,28	5,1	0,060	0,094			

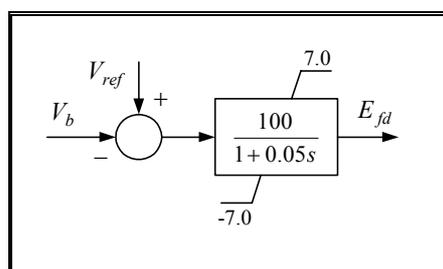
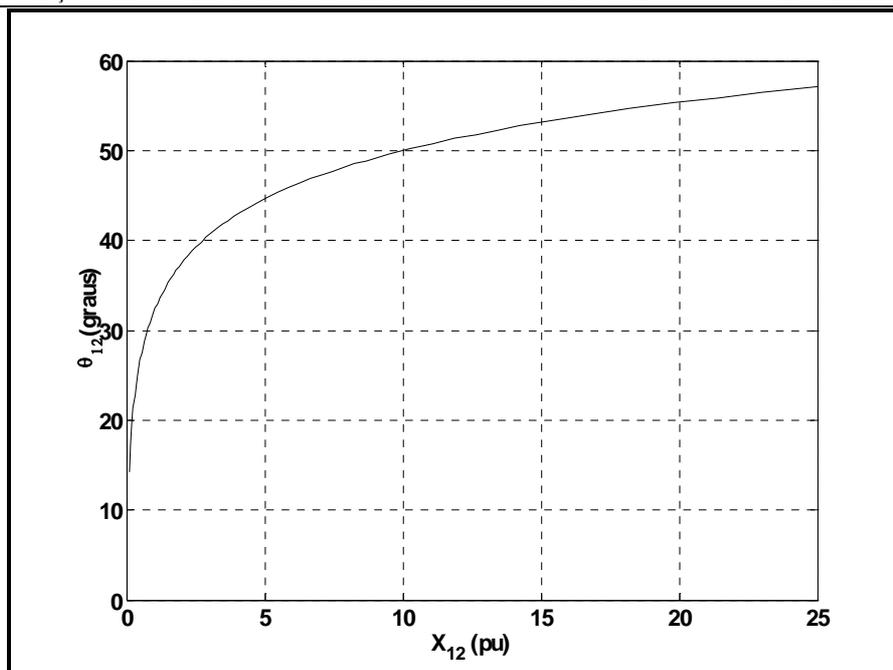


Figura 112 – Regulador automático de tensão.

Na Tabela 48 são descritas as características de geração da máquina, a variação da reatância X_{12} e a função de variação da distância angular θ_{12} (Figura 113).

Tabela 48 – Dados do sistema sintético.

Despacho da Usina de Xingó		Variação da Reatância X_{12}	Função de variação do ângulo $\theta_{12} = f(X_{12})$.	Modelo da Carga em Derivação	
Capacidade da Máquina	3120 MVA	0,1 pu – 25 pu	$\theta_{12} = 7,763 \ln(62,684 X_{12})$	P _{sh}	80 % P C ^{te} 20 % Z C ^{te}
Geração de Potência Ativa	2808 MW				Q _{sh}
Geração de Potência Reativa	1360 MVar				

Figura 113 – Função de variação do ângulo $\theta_{12} = f(X_{12})$.

Na Figura 114 é mostrada a trajetória dos dois pólos de interesse quando a reatância X_{12} varia de 0,1pu até 25pu. O modo de oscilação eletromecânico é pouco amortecido ou tem fator de amortecimento negativo em todo o espectro de frequência, exceto para valores pequenos de X_{12} , que corresponde a valores maiores de frequência de oscilação.

A Figura 115 apresenta o diagrama do lugar das raízes para dez valores distintos de X_{12} quando a malha de controle ($\Delta\omega/\Delta V_{REF}$) é fechada por um ganho K apenas (não há compensação de fase). As setas azuis são os resíduos da função de transferência ($\Delta\omega/\Delta V_{REF}$), que indicam o ângulo de partida do diagrama do lugar das raízes.

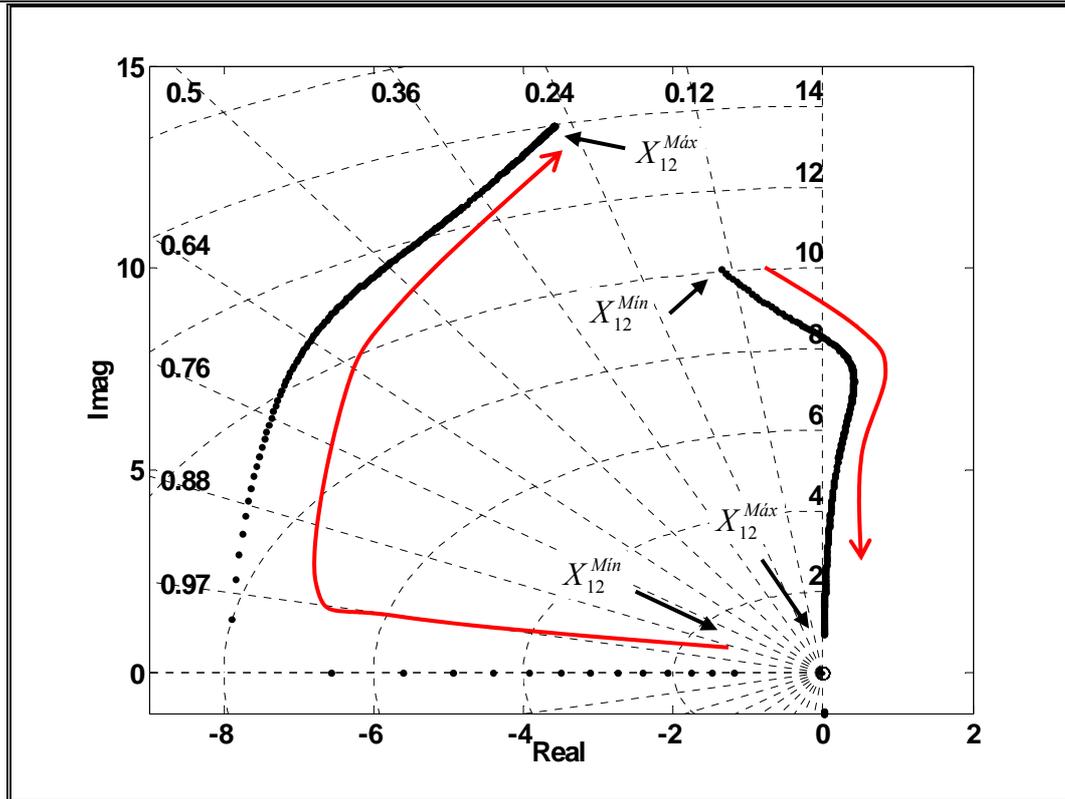


Figura 114 – Pólos de interesse para valores distintos de X_{12} (variação de 0,1 pu até 25 pu).

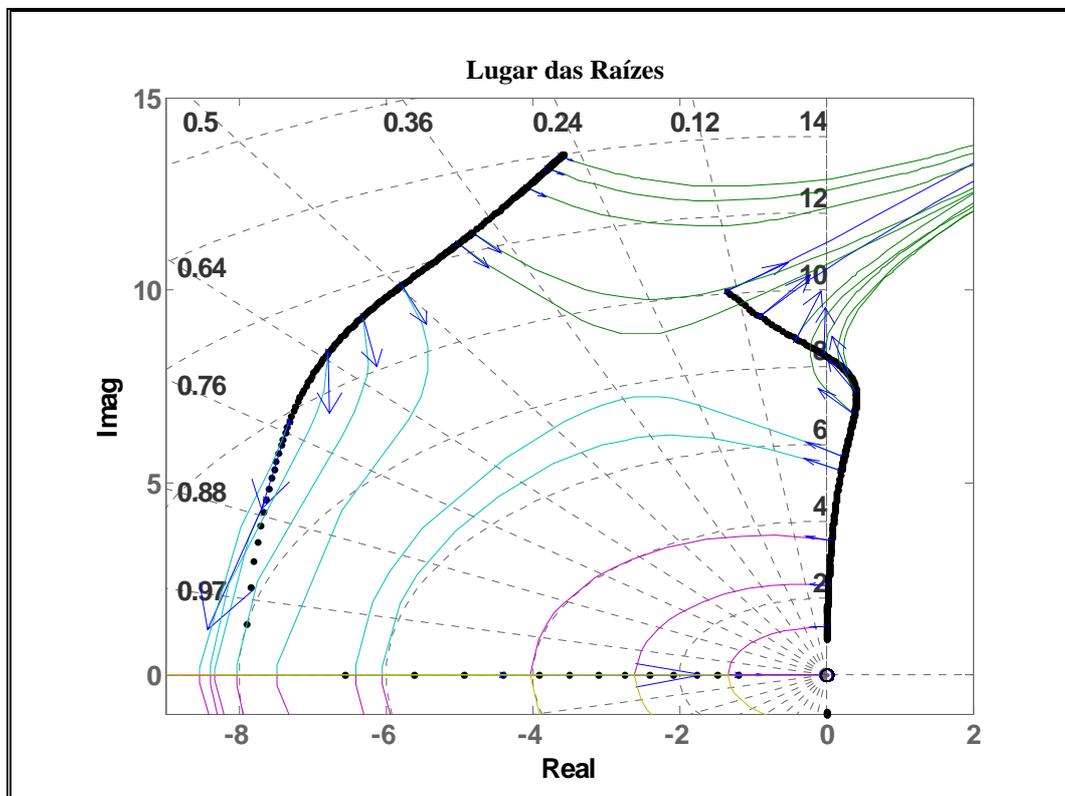


Figura 115 – Diagrama do lugar das raízes para dez valores de X_{12} (entre 0,1 pu e 25pu).

A Figura 116 mostra em detalhe o comportamento do pólo mais crítico. Pode ser notado que para valores altos de X_{12} (valores baixos de frequência) não existe necessidade de compensação de fase, já que o ângulo de partida do diagrama do lugar das raízes é praticamente 180° . Para frequências mais altas (valores menores de X_{12}), no entanto, é necessário o ajuste do ângulo de partida.

Concluindo, a avaliação da Figura 116 mostra a necessidade de compensação de fase em avanço para modos de frequência alta (local e intraplanta) enquanto para os modos de frequência mais baixa (entre áreas) o simples aumento do ganho da malha de controle é suficiente para que seja atingido o fator de amortecimento desejado.

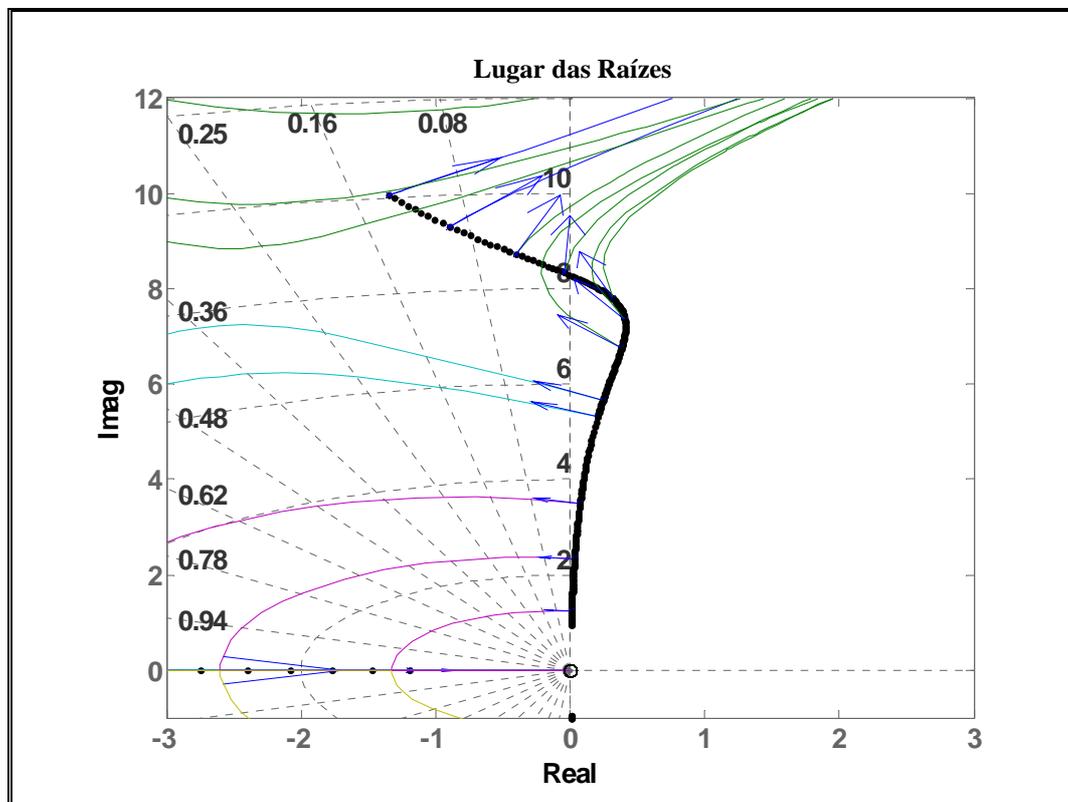


Figura 116 – Detalhe da Figura 115.

O primeiro estabilizador a ser aqui analisado com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema, o ESP_1 (Tabela 49), possui dois blocos de avanço que fornecem avanço máximo para a frequência de 7 rad/s, ou seja, frequência de centro $\omega_c = 7$ rad/s.

Tabela 49 – Parâmetros do ESP₁.

ESP ₁ (s)	Frequência de Avanço Máximo
$ESP_1(s) = (5) \cdot \left(\frac{1+0,300s}{1+0,075s} \right)^2 \cdot \left(\frac{3s}{1+3s} \right)$	$\omega_c = 7$ rad/s

Na Figura 117 são mostrados os ângulos de partida do diagrama do lugar das raízes (resíduos da função de transferência ($\Delta\omega/\Delta V_{REF}$)) para o sistema original (em vermelho) e com o ESP₁ instalado (em preto). É possível observar que a compensação de fase é próxima da ideal (ângulo de partida de 180°) apenas entre 6 rad/s e 9 rad/s.

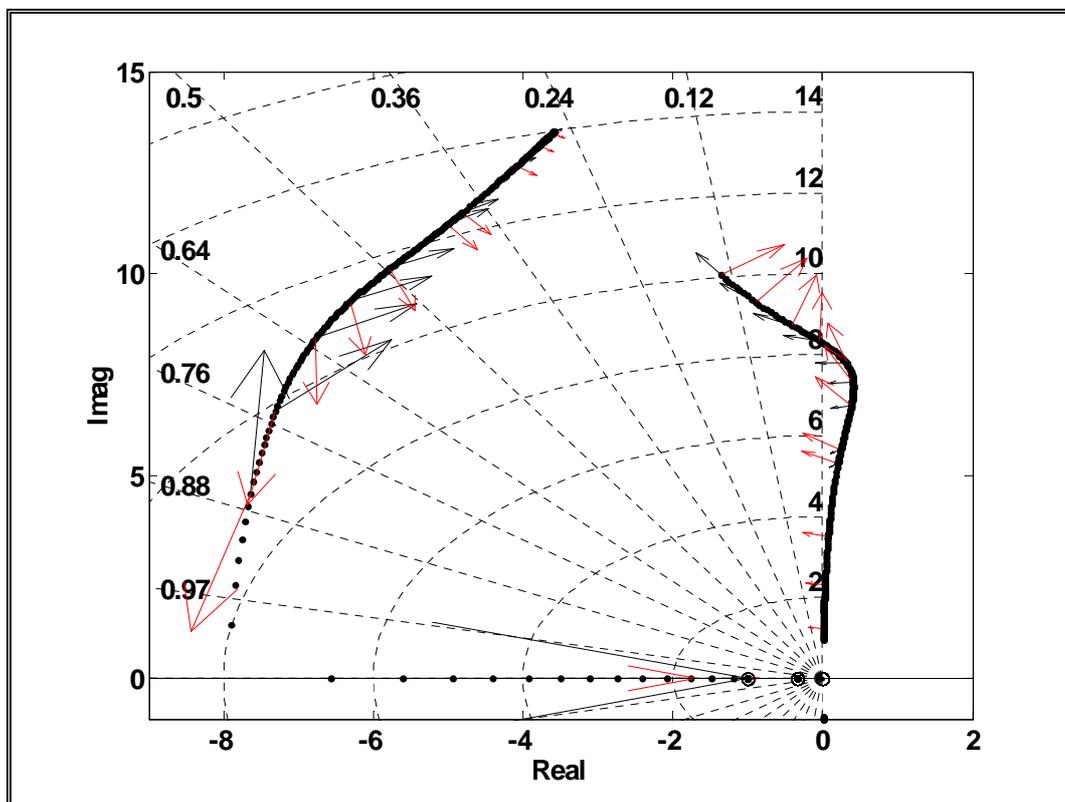


Figura 117 – Ângulo de partida do diagrama do lugar das raízes para o sistema original (vermelho) e com ESP₁ (preto).

A Figura 118 apresenta o diagrama do lugar das raízes do sistema com o ESP₁. As trajetórias mostram que o aumento do ganho de ESP₁ piora o fator de amortecimento dos modos com frequência na região entre 10 rad/s e 16 rad/s.

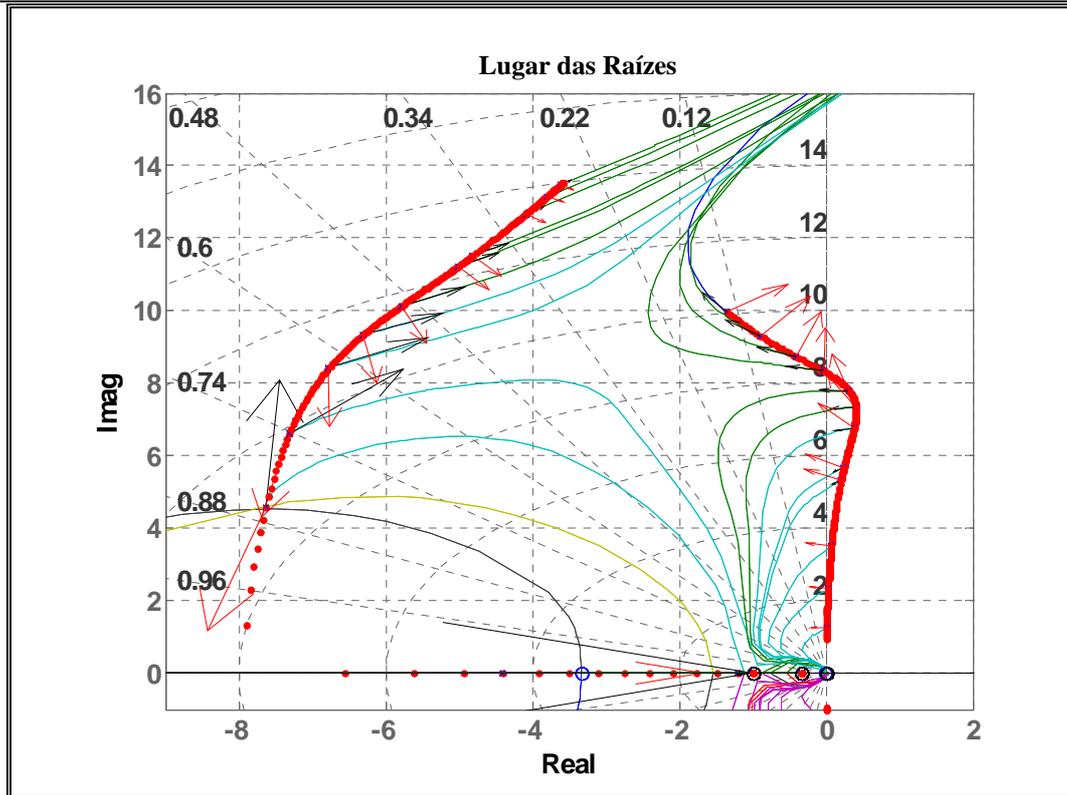


Figura 118 – Diagrama do lugar das raízes do sistema com a instalação do ESP₁.

A Figura 119 mostra o sistema original (em vermelho) e após a instalação do ESP₁ (em azul) com ganho igual a 5 pu/pu. Na faixa de frequência entre 4 rad/s e 6 rad/s o fator de amortecimento é aumentado. Por outro lado, em frequências baixas praticamente não se altera e em frequências altas o fator de amortecimento piora. Além disso, o modo de oscilação associado ao sistema de excitação (modo da excitatriz) tem o fator de amortecimento comprometido.

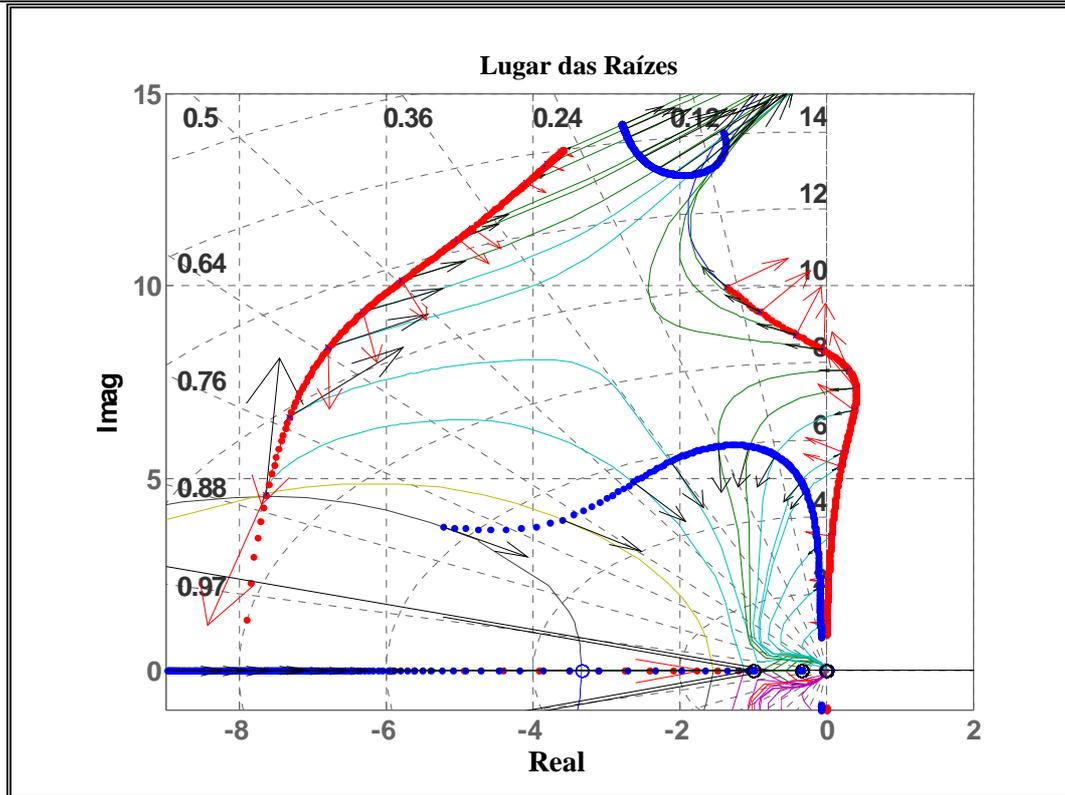


Figura 119 – Sistema original (vermelho) e com ESP₁ (azul) com ganho igual a 5pu/pu.

Avaliando a Figura 119, observa-se que o avanço de fase proporcionado pelo estabilizador deve ser maior para frequências mais altas para que o fator de amortecimento de modos de oscilação intraplanta e modos da excitatriz não sejam piorados com o aumento do ganho do ESP. Desta forma, é realizado um segundo projeto, ESP₂ (Tabela 50), utilizando-se dois blocos de avanço que fornecem avanço máximo para a frequência de 30 rad/s.

Tabela 50 – Parâmetros do ESP₂.

ESP ₂ (s)	Frequência de Avanço Máximo
$ESP_2(s) = (8) \cdot \left(\frac{1 + 0,100s}{1 + 0,010s} \right)^2 \cdot \left(\frac{3s}{1 + 3s} \right)$	$\omega_c = 30 \text{ rad/s}$

Na Figura 120 são mostrados os ângulos de partida do diagrama do lugar das raízes (resíduos da função de transferência ($\Delta\omega/\Delta V_{REF}$)) para o sistema original (em vermelho) e com o ESP₂ (em preto).

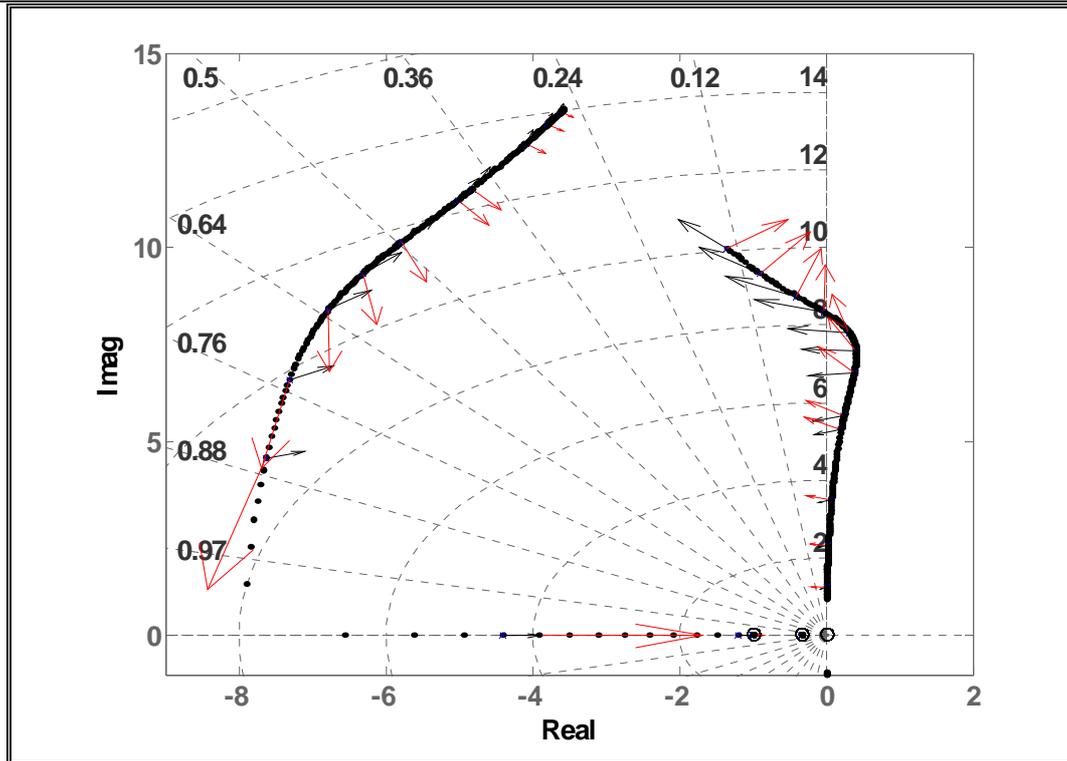


Figura 120 – Ângulo de partida do diagrama do lugar das raízes para o sistema original (vermelho) e com ESP_2 (preto).

A Figura 121 apresenta o diagrama do lugar das raízes do sistema com a instalação do ESP_2 . Diferentemente do que acontecia com o ESP_1 (Figura 118 e Figura 119), as trajetórias mostram que o aumento do ganho de ESP_2 melhora o fator de amortecimento dos modos em todo o espectro de frequência. Na faixa de frequência entre 1 rad/s e 4 rad/s , que engloba os modos de oscilação eletromecânica entre áreas, o avanço de fase é, no entanto, excessivo (Figura 121), causando afundamento da frequência quando há aumento de ganho.

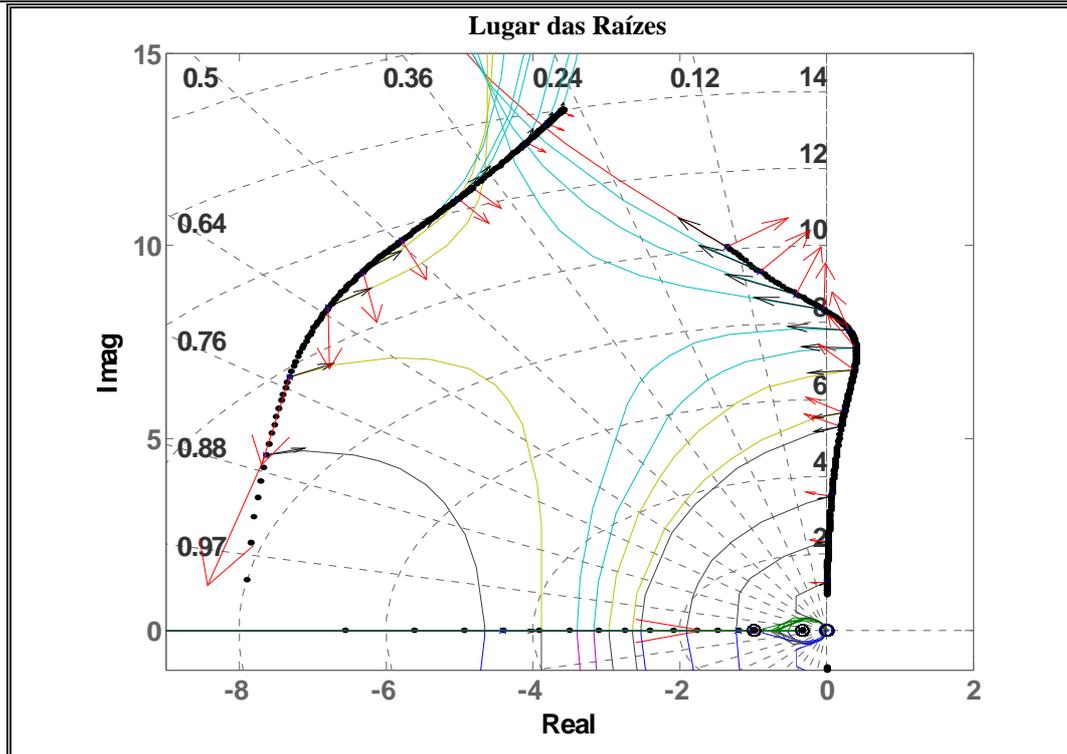


Figura 121 – Diagrama do lugar das raízes do sistema com a instalação do ESP₂.

A Figura 122 mostra o sistema original (em vermelho) e após a instalação do ESP₂ (em preto) com ganho igual a 8 pu/pu. Não há problemas com o modo da excitatriz e o fator de amortecimento é desejável exceto na faixa de frequência entre 1 rad/s e 6 rad/s, aproximadamente.

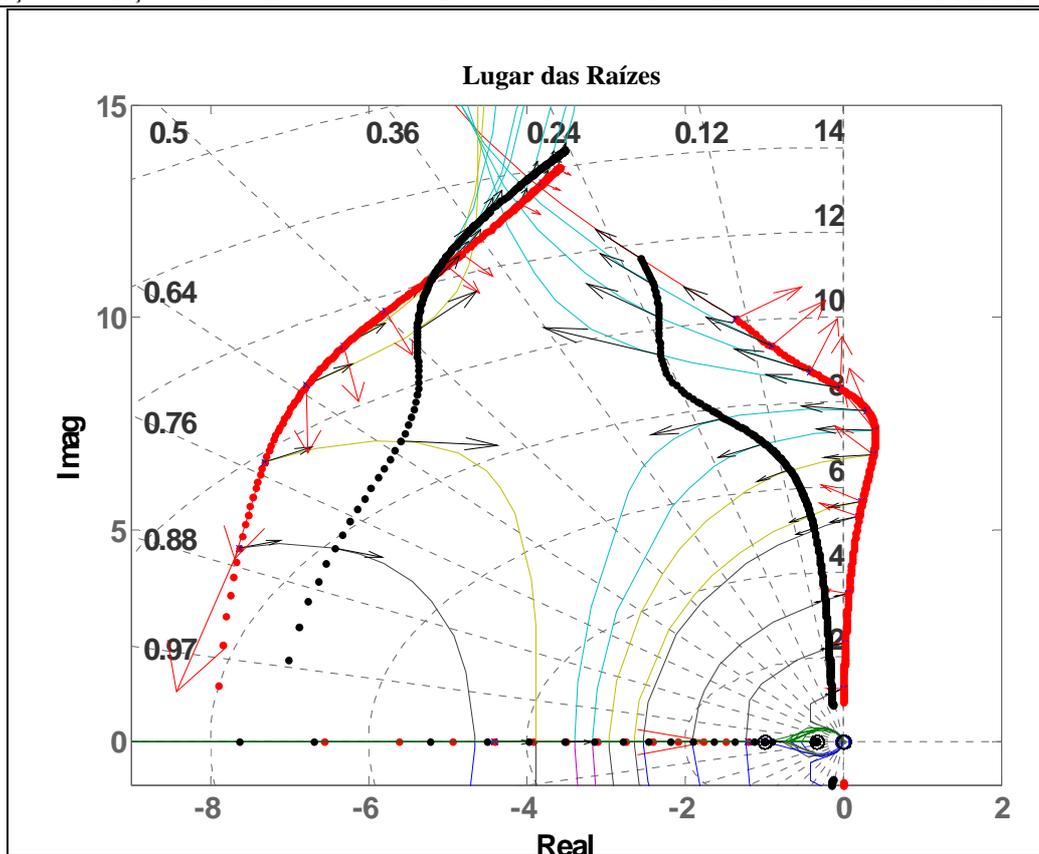


Figura 122 – Sistema original (vermelho) e com ESP₂ (preto) com ganho igual a 8pu/pu.

Avaliando a Figura 122, percebe-se que um ESP de desempenho ainda melhor pode ser obtido, caso o avanço de fase proporcionado por ele seja menor para frequências mais baixas (entre 1 rad/s e 4 rad/s).

Um novo projeto é realizado, ESP₃ (Tabela 51), utilizando-se dois blocos de avanço que fornecem avanço máximo para a frequência de 30 rad/s e um bloco de atraso que diminui a alteração do ângulo de partida para frequências mais baixas (a Figura 116 mostrou que o ângulo de partida sem compensação já é praticamente 180°).

Tabela 51 – Parâmetros do ESP₃.

ESP ₃ (s)	Frequência de Avanço Máximo
$ESP_3(s) = (30) \cdot \left(\frac{1+0,100s}{1+0,010s} \right)^2 \cdot \left(\frac{1+0,250s}{1+1,000s} \right) \cdot \left(\frac{3s}{1+3s} \right)$	$\omega_c = 30 \text{ rad/s}$

A Figura 123 apresenta os ângulos de partida do diagrama do lugar das raízes (resíduos da função de transferência ($\Delta\omega/\Delta V_{REF}$)) para o sistema original (em vermelho) e com o ESP₃ (em preto).

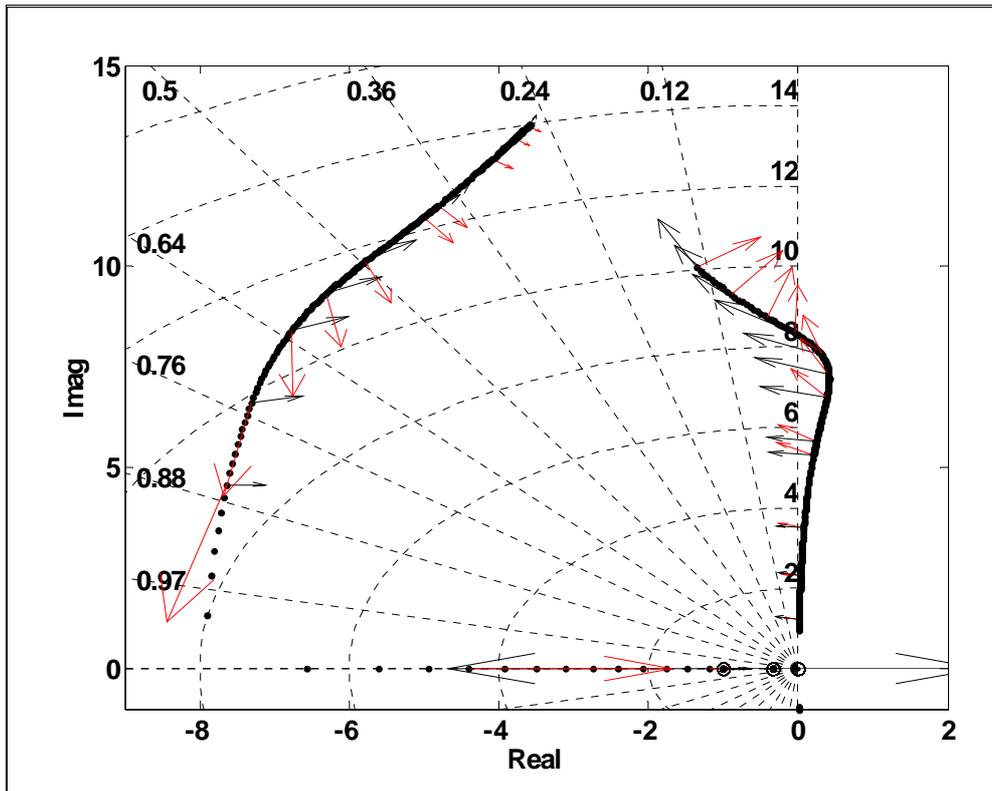


Figura 123 – Ângulo de partida do diagrama do lugar das raízes para o sistema original (vermelho) e com ESP₃ (preto).

A Figura 124 apresenta o diagrama do lugar das raízes do sistema com a instalação do ESP₃. O ângulo de partida é praticamente igual a 180° para frequências até 7 rad/s.

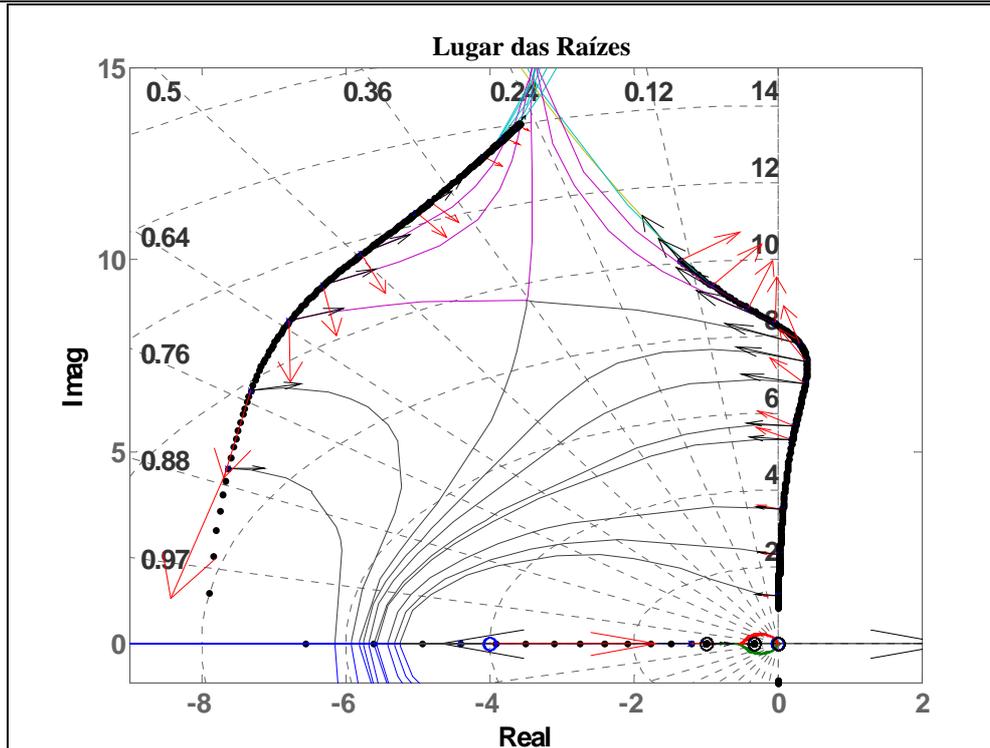


Figura 124 – Diagrama do lugar das raízes do sistema com a instalação do ESP₃.

A Figura 125 mostra o sistema original (em vermelho) e após a instalação do ESP₃ (em verde) com ganho igual a 30pu/pu. Este valor de ganho é elevado para a situação onde dois blocos de avanço são utilizados. No caso da existência de um terceiro bloco de atraso, o valor de 30 pu/pu é aceitável. Pode ser verificado que não existem problemas com o modo da excitatriz e o fator de amortecimento é desejável na faixa de frequência entre 1 rad/s e 14 rad/s.

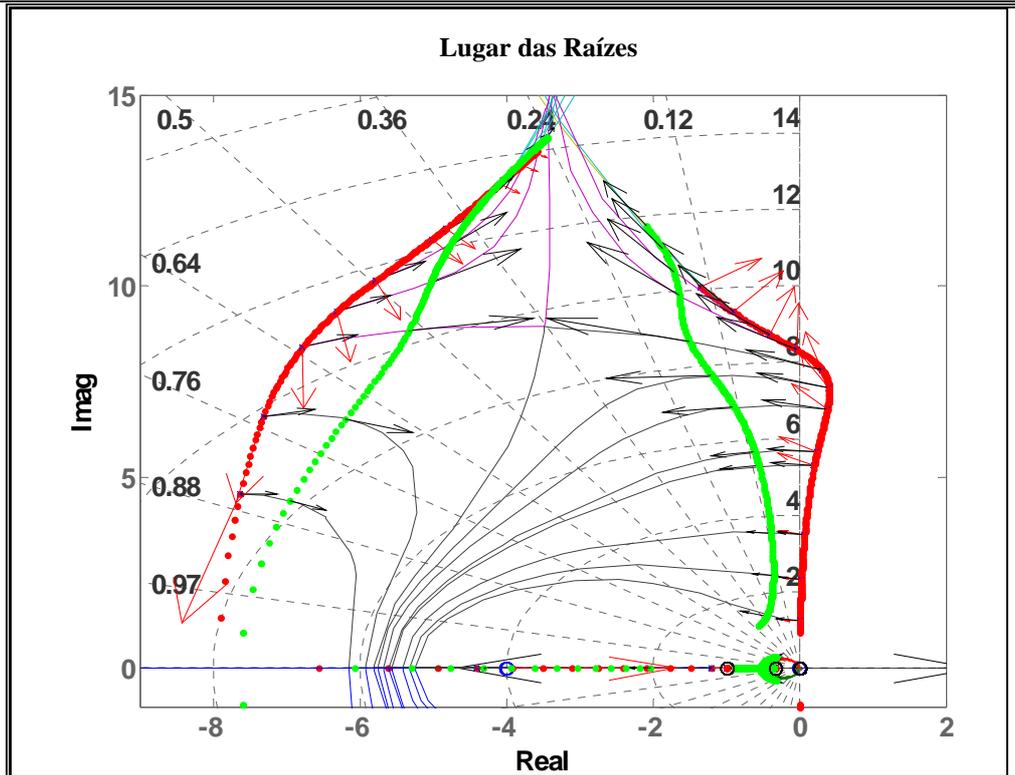


Figura 125 – Sistema original (vermelho) e com ESP₃ (verde) com ganho igual a 30pu/pu.

A avaliação da Figura 126 (comparação do desempenho dos três ESPs) permite avaliar qual o ESP que apresenta melhor desempenho em todo o espectro de frequência de interesse. O ESP₁ (azul) não fornece amortecimento adequado em todas as frequências, apresentando problemas relacionados ao modo da excitatriz. O ESP₂ (preto) elimina o problema com o modo da excitatriz, mas tem desempenho inadequado em baixas frequências. O ESP₃ (verde) oferece desempenho desejável para todas as frequências.

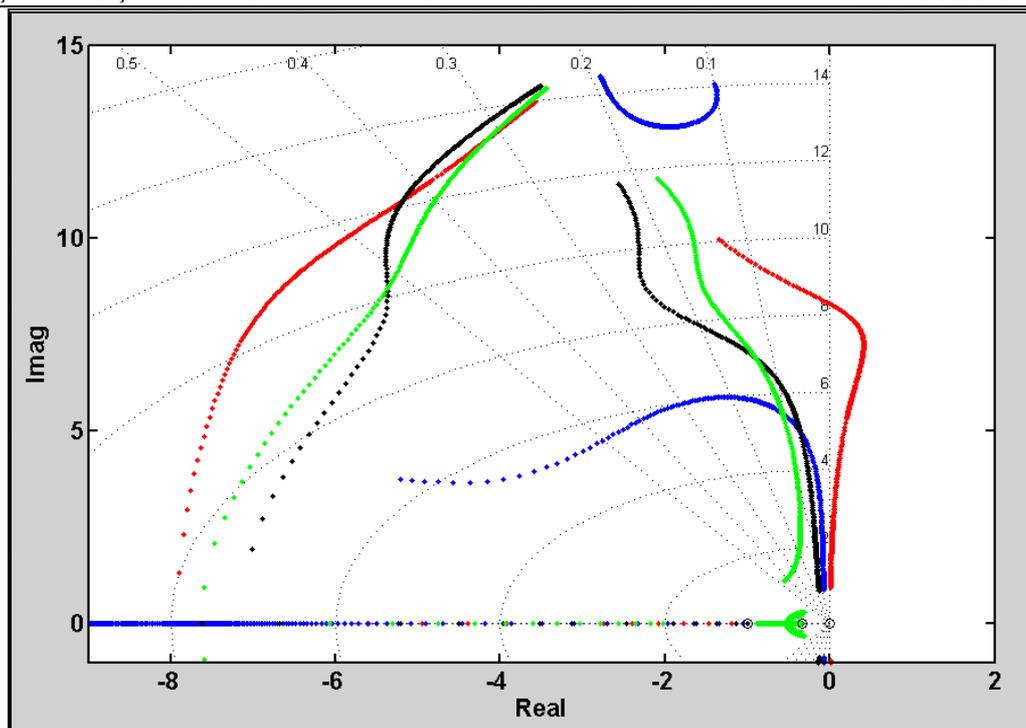


Figura 126 – Comparação do desempenho dos ESPs para o sistema sintético (Sem ESP: vermelho / ESP₁: azul / ESP₂: Preto / ESP₃:verde).

O ajuste ideal seria aquele que fornecesse o desempenho do ESP₂ em frequências altas e o desempenho do ESP₃ em baixas frequências.

Um quarto projeto é realizado, ESP₄ (Tabela 52), utilizando-se dois blocos de avanço distintos e um bloco de atraso. A frequência de centro (ω_c) do ESP é 30 rad/s.

Tabela 52 – Parâmetros do ESP₄.

ESP ₄ (s)	Frequência de Avanço Máximo
$ESP_4(s) = (35) \cdot \left(\frac{1 + 0,100s}{1 + 0,010s} \right) \cdot \left(\frac{1 + 0,150s}{1 + 0,015s} \right) \cdot \left(\frac{1 + 0,200s}{1 + 1,000s} \right) \cdot \left(\frac{3s}{1 + 3s} \right)$	$\omega_c = 30 \text{ rad/s}$

A Figura 127 mostra o comportamento do sistema sem ESP e com ESP₂, ESP₃ ou ESP₄. É possível observar que o ESP₄ tem comportamento próximo ao ESP₂ em frequências altas, e próximo ao ESP₃ em frequências baixas.

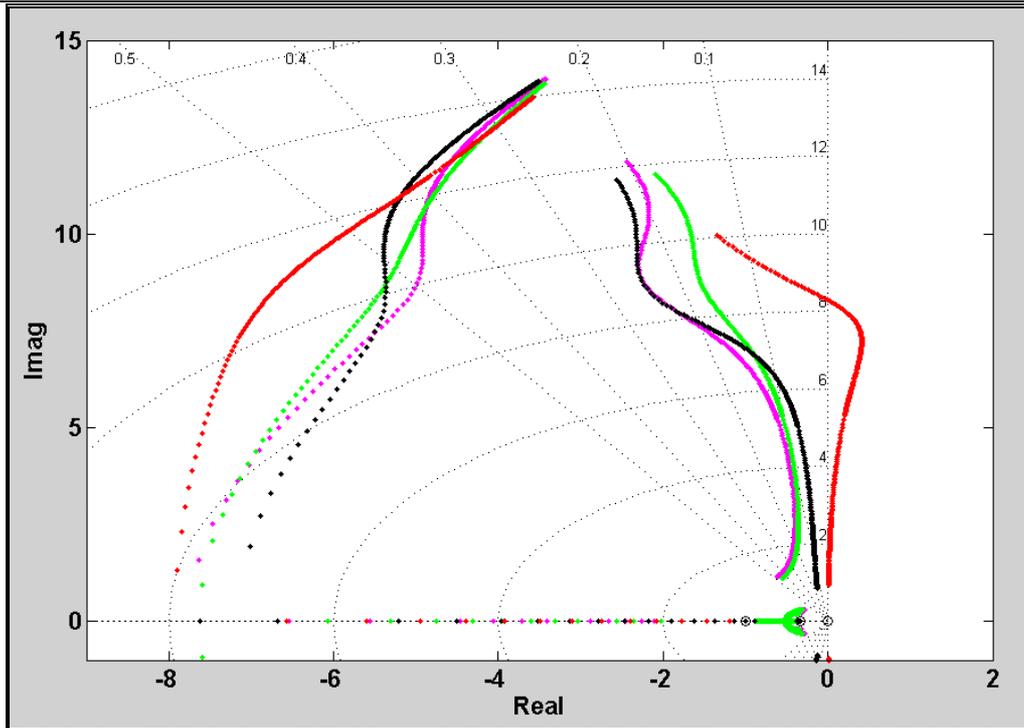


Figura 127 – Comparação do desempenho dos ESPs para o sistema sintético (Sem ESP: vermelho / ESP₂: Preto / ESP₃:verde / ESP₄: roxo).

Outros ajustes poderiam ser realizados com objetivo de verificar os benefícios da utilização de ESPs contendo blocos distintos de avanço e atraso. ESPs com blocos de avanço com zeros complexos [Soares 1985] também poderiam ser avaliados.

A Figura 128 e a Figura 129 mostram o Diagrama de Bode dos quatro ESPs avaliados.

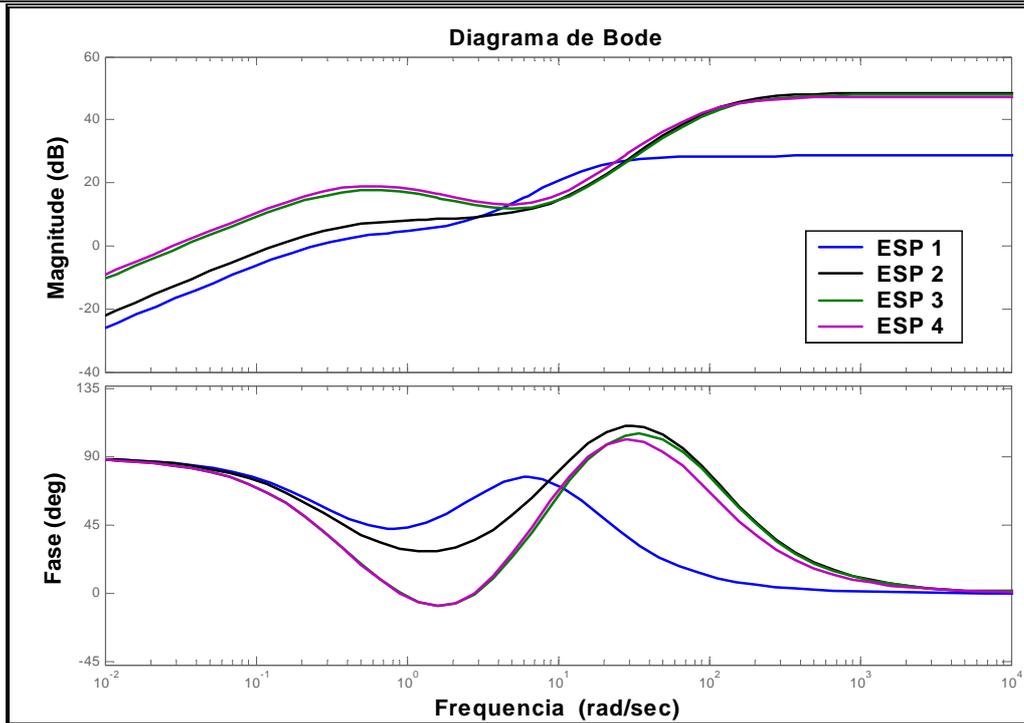


Figura 128 – Diagrama de Bode para os quatro ESPs.

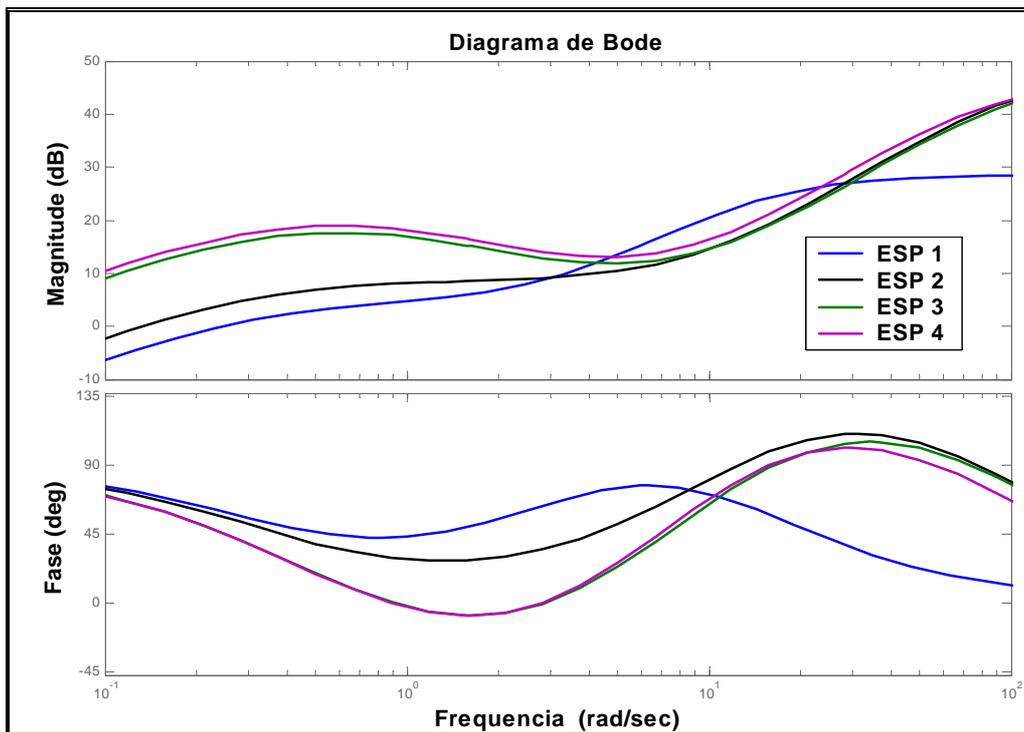


Figura 129 – Detalhe da Figura 128.

III.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um sistema sintético de duas barras que permite avaliar o comportamento do conjunto máquina-RAT-ESP frente modos de oscilação de diferentes frequências (desde intraplanta até entre áreas). Isto é feito através da variação da reatância de ligação da máquina com uma barra infinita e da variação da carga instalada na mesma barra onde a máquina sob teste está conectada.

Utilizando o sistema sintético, são produzidas curvas formadas pelas posições dos pólos para valores distintos da reatância de ligação com a barra infinita. Esta informação pode ser utilizada no projeto de novos ESPs e na avaliação da robustez dos existentes.

A metodologia aqui proposta, utilizando o sistema sintético para o teste de controladores, permite a avaliação da robustez do ESP. Quando incorporada a uma ferramenta comercial, será possível disponibilizar de forma automática ao engenheiro uma lista priorizada dos ESPs que apresentam desempenho insatisfatório.

É grande a utilidade de se conhecer ainda no início dos estudos de estabilização de um sistema de grande porte, quais controladores poderiam apresentar problemas. A avaliação automática do desempenho frente pequenos distúrbios de todas as máquinas do sistema através do sistema sintético é de utilidade para os estudos práticos de sistemas de grande porte.

Capítulo IV

Impactos Adversos Causados por Estabilizadores de Sistemas de Potência no Desempenho de Tensão e de Potência Reativa

IV.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são apresentados estudos mostrando os impactos adversos causados por estabilizadores no desempenho tanto da tensão quanto da potência reativa terminal frente perturbações na potência mecânica da unidade geradora.

Inicialmente, utilizando um sistema típico de segunda ordem, é mostrada a influência da posição dos zeros na resposta do sistema. Em seguida, utilizando dados reais de uma usina e de seus controles (regulador automático de tensão – RAT e estabilizador de sistema de potência – ESP), são avaliados os desempenhos de tensão e de potência reativa para diferentes tipos de ESPs.

São apresentadas simulações relativas a modelos linearizados em um ponto de operação e simulações dos modelos não lineares no domínio do tempo. Os resultados apresentados mostram fenômenos dinâmicos importantes que nunca foram completamente explorados na literatura.

IV.2 Avaliação de um Sistema de Segunda Ordem

Seja um sistema do tipo (IV.1), onde ω_n é a frequência natural não amortecida e ζ o fator de amortecimento [D’Azzo 1966, Kuo 1999].

$$G(s) = \frac{\omega_n^2(as + 1)}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (\text{IV. 1})$$

A Tabela 53 mostra, para o sistema $G(s)$, os pólos (raízes da equação característica) e o zero (raiz do numerador, valor para o qual $G(s)$ se torna nula).

Tabela 53 – Pólos e zero de $G(s)$.

$G(s) = \frac{\omega_n^2(as + 1)}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$	
Zero	$s_z = -\frac{1}{a}$
Pólos	$s_{p1}, s_{p2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$

Na Tabela 54 e na Figura 130 são apresentados os resultados referentes ao comportamento do sistema de segunda ordem quando o seu zero (s_z) tem posições distintas. Isto é feito variando-se o parâmetro a do numerador de $G(s)$.

São avaliadas três possibilidades sendo que em todas o par de pólos complexos é exatamente o mesmo (Tabela 54 e Figura 130). A frequência natural não amortecida ω_n é igual a 7 rad/s e o fator de amortecimento ζ é de 30 %.

Tabela 54 – Comportamento do sistema frente um degrau unitário.

	Caso		
	(a)	(b)	(c)
Posição do Zero	$-2,0 + j0$	$-0,5 + j0$	$-0,1 + j0$
Amplitude Máxima	3,05	10,00	47,50
Instante de Amplitude Máxima	0,24s	0,21s	0,18s
Tempo de Assentamento	1,84s	1,80s	1,80s
Valor Final	1,00	1,00	1,00

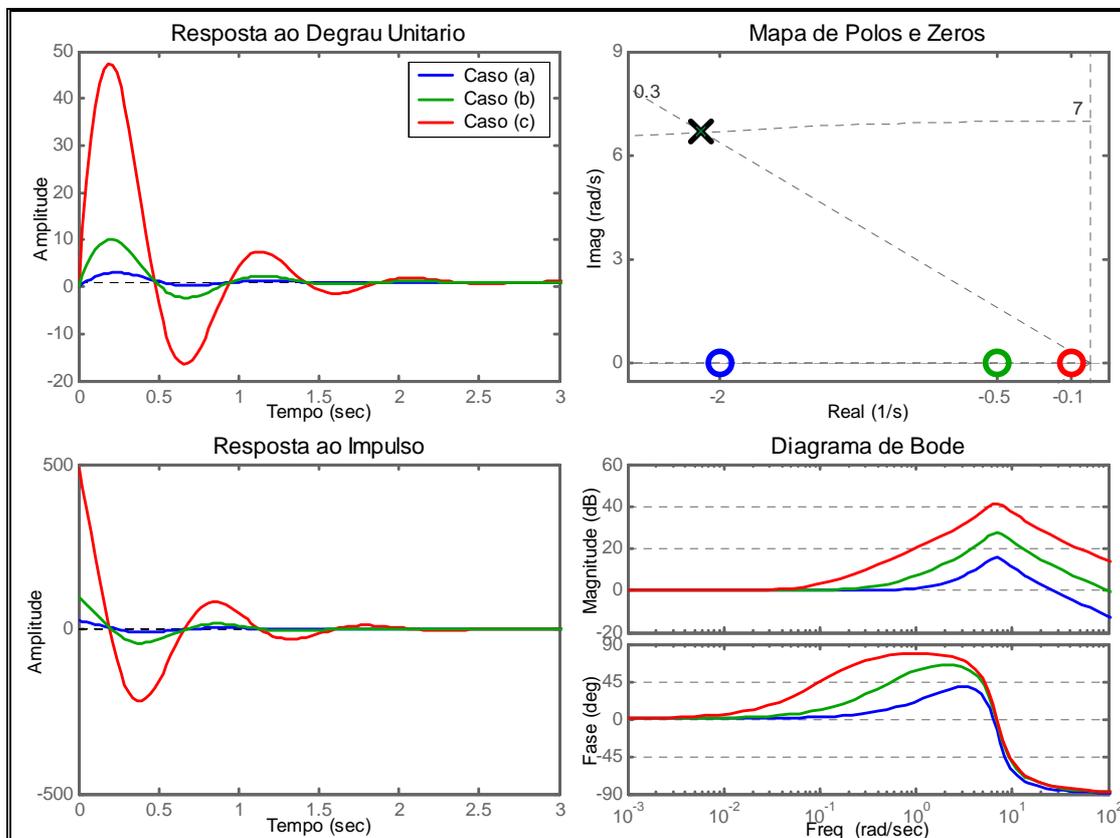


Figura 130 – Comportamento de um sistema de segunda ordem.

Analisando a Figura 130 e a Tabela 54, pode ser verificado que nas três situações o valor final é idêntico (igual a 1,00) e o tempo de assentamento é praticamente o mesmo (por volta de 1,8 s).

Apesar da posição distinta do zero não ter influência nestes dois índices de desempenho, nota-se uma diferença significativa na amplitude da resposta transitória dos casos (variando de 3,05 a 47,50).

Observa-se que quanto mais próximo da origem do plano complexo o zero estiver, maior o valor de pico da resposta do sistema ao degrau. Este resultado mostra claramente o impacto da posição do zero no desempenho transitório do sistema.

A avaliação cuidadosa de como estão posicionados os zeros de determinadas funções de transferência permite verificar e prevenir um eventual desempenho insatisfatório de um determinado controle. Na seção seguinte são analisados problemas associados ao desempenho de ESPs.

IV.3 Estudo de um Sistema Máquina Versus Barra Infinita

Na seção anterior foi mostrada a influência dos zeros no desempenho dinâmico de um sistema típico de segunda ordem. Nesta seção são analisadas situações similares observadas em SEPs.

Seja um sistema do tipo Máquina x Barra Infinita (Figura 131), onde são modelados o gerador, o Regulador Automático de Tensão (RAT) e o Estabilizador de Sistema de Potência (ESP). Os modelos e parâmetros utilizados neste estudo são aqueles utilizados nos estudos práticos de desempenho dinâmico reais da Usina de Xingó (Tabela 55), pertencente à CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco).

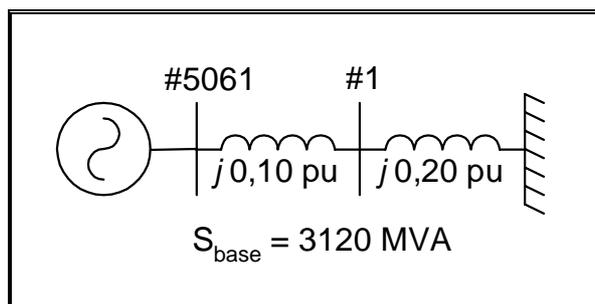


Figura 131 – Sistema Máquina x Barra Infinita

Tabela 55 – Dados da usina de Xingó.

MVA	H (s)	X_d (pu)	X_q (pu)	X'_d (pu)	X'_q (pu)	X''_d (pu)	X''_q (pu)
3120	4,5	0,89	0,66	0,36	0,36	0,29	0,29
R_a	X_l (pu)	T'_{do} (s)	T''_{do} (s)	T''_{qo} (s)			
0,0019	0,28	5,1	0,060	0,094			

Os dados do ponto de operação analisado estão na Tabela 56. A usina está fornecendo cerca de 90 % de sua capacidade máxima.

Tabela 56 – Dados do ponto de operação do sistema.

Dados de Barra				
Número da Barra	Tensão		Geração	
	Magnitude	Ângulo	MW	Mvar
5061	1,000 pu	15,66 °	2808	386,25
1	0,992 pu	10,46 °	–	–
Barra Infinita	1,000 pu	0,00 °	– 2808	386,25
Dados de Circuito				
Barra De	Barra Para	Nº de Circuitos	Impedância	
5061	1	1	j0,10 pu	
1	Barra Infinita	1	j0,20 pu	

Nas seções que seguem, são apresentadas análises do desempenho do sistema para estabilizadores distintos. Os ESPs avaliados diferem pelo sinal de entrada (velocidade do rotor, potência terminal ou integral de potência acelerante) e pela estrutura de filtro utilizado.

IV.3.1 Estabilizadores Derivados da Velocidade do Rotor ou da Potência Terminal

O comportamento de estabilizadores derivados da velocidade do rotor ou da potência terminal do gerador são comparados nesta seção. O ajuste destes ESPs é feito [Gomes 1998] de tal forma que o pólo associado ao modo de oscilação eletromecânico seja posicionado no mesmo ponto do plano complexo (Tabela 57). Este procedimento é feito para que seja estabelecida uma mesma base de comparação entre os dois ESPs.

Tabela 57 – Parâmetros dos ESPs.

Sinal de Entrada	ESP(s)	Modo Eletromecânico
Velocidade do Rotor	$ESP_{\Delta\omega}(s) = (8,17) \cdot \left(\frac{1+0,174s}{1+0,010s}\right)^2 \cdot \left(\frac{3s}{1+3s}\right)$	$\lambda = -1,065 \pm j7,02$ $\zeta = 15\%$
Potência Terminal	$ESP_{\Delta PT}(s) = (-0,26) \cdot \left(\frac{1+0,153s}{1+0,129s}\right) \cdot \left(\frac{3s}{1+3s}\right)$	$\lambda = -1,065 \pm j7,02$ $\zeta = 15\%$

A Figura 132 mostra os mapas de pólos e zeros das funções de transferência que relacionam as potências ativa e reativa terminal com a potência mecânica do gerador: $\Delta P_T/\Delta P_{MEC}$ e $\Delta Q_T/\Delta P_{MEC}$.

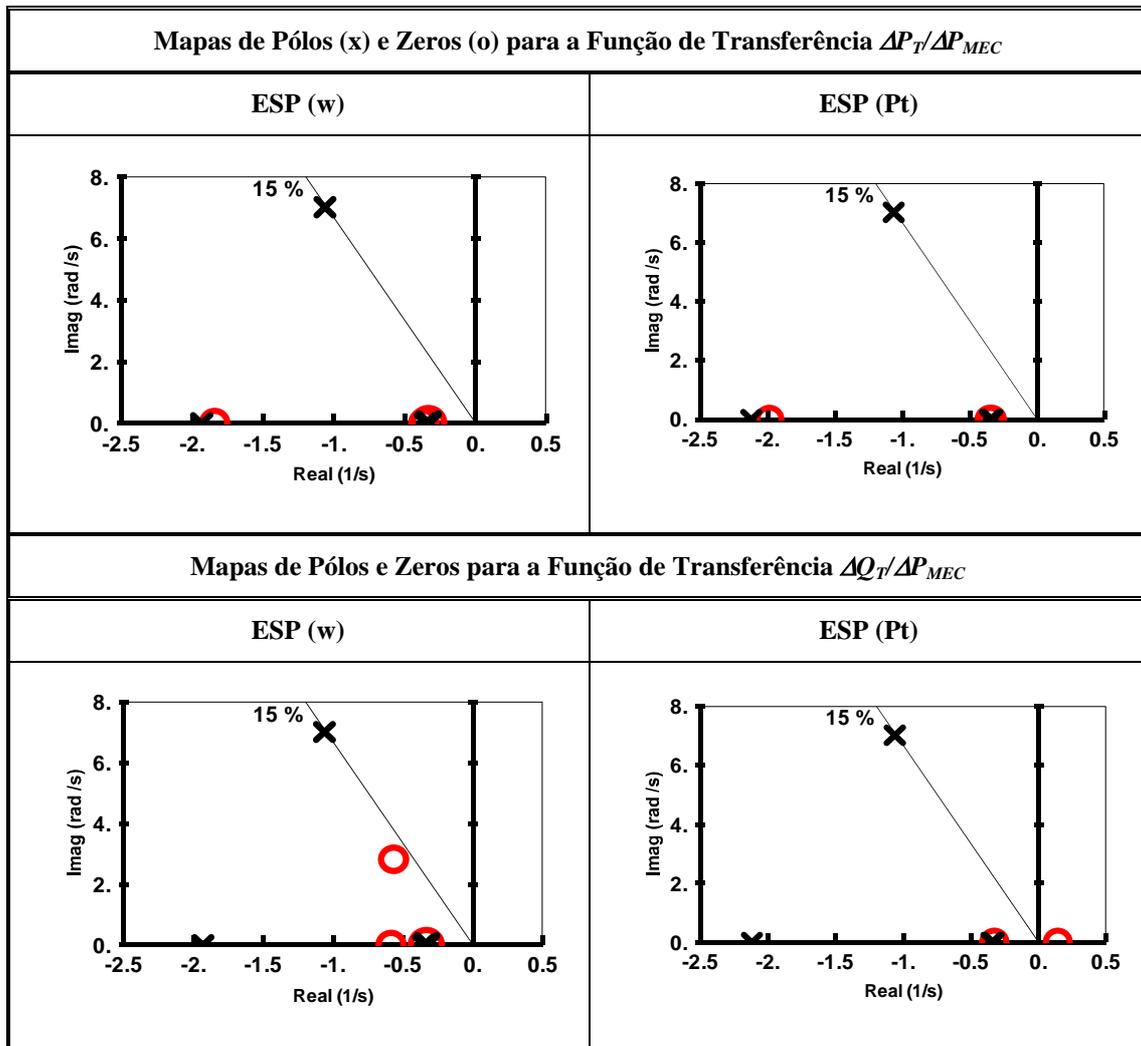


Figura 132 – Mapas de pólos e zeros.

Em todos os casos o modo de interesse está posicionado exatamente no mesmo ponto (Tabela 57). Os zeros da função de transferência $\Delta P_T/\Delta P_{MEC}$ também possuem praticamente os mesmos valores para os dois ESPs. Para a função de transferência $\Delta Q_T/\Delta P_{MEC}$, entretanto, os zeros possuem valores consideravelmente distintos para cada ESP.

É importante notar na Figura 132, para a função de transferência $\Delta Q_T/\Delta P_{MEC}$, a existência de um zero próximo a origem ($+0,14 + j0,0$) quando é utilizado o ESP derivado de potência terminal.

Como verificado na Seção IV.2 para um sistema de segunda ordem, quanto mais próximo da origem do plano complexo o zero real estiver, maior o valor de pico da resposta do sistema ao degrau. Desta forma, analisando-se os mapas de pólos e zeros referentes aos dois ESPs (Figura 132), antecipa-se que o desempenho do ESP derivado da potência terminal será inferior.

A Figura 133 compara o desempenho dos ESPs após a aplicação de um distúrbio em degrau na potência mecânica do gerador (degrau de 0,01 pu).

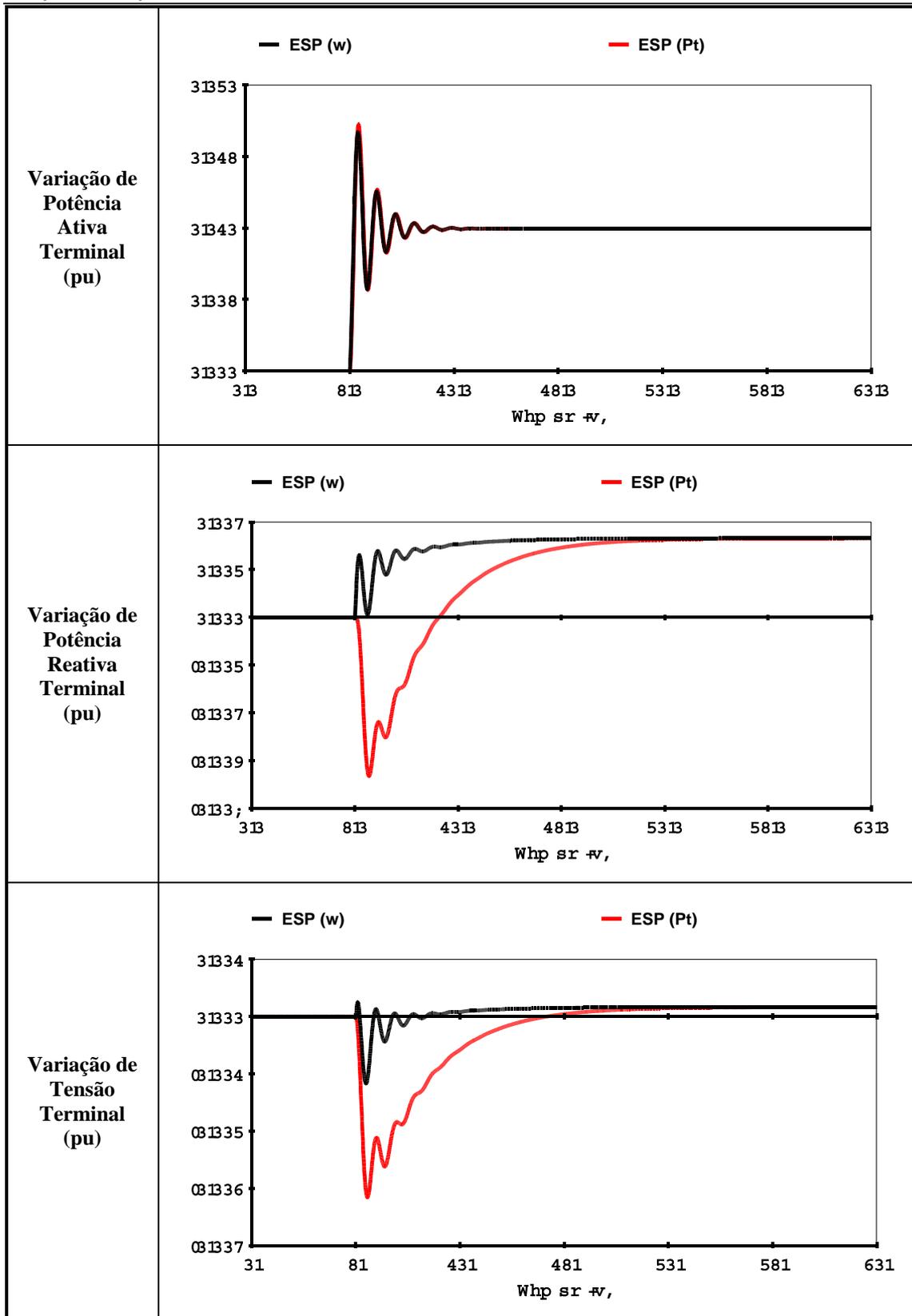


Figura 133 – Grandezas nos terminais da máquina após distúrbio em degrau na potência mecânica.

A Figura 133 mostra que as oscilações transitórias de potência ativa são idênticas, independentemente do tipo de sinal utilizado pelo ESP. Por outro lado, os transitórios de potência reativa nos terminais do gerador apresentam magnitude muito maior quando é utilizado o ESP derivado da potência terminal. Da mesma forma, a tensão terminal também apresenta pico de variação consideravelmente maior para o ESP derivado de potência terminal. Nota-se também que as duas últimas curvas (Figura 133) apresentam o pico transitório de sentido oposto ao valor final, característico de sistemas do tipo fase não-mínima (com zeros no semiplano direito do plano complexo).

A Figura 134 mostra a potência ativa terminal quando é aplicado um distúrbio em rampa decrescente na potência mecânica da máquina. A taxa de redução de potência utilizada foi 4 % por segundo (valor típico para este tipo de distúrbio e de gerador). As curvas são coincidentes para os dois casos.

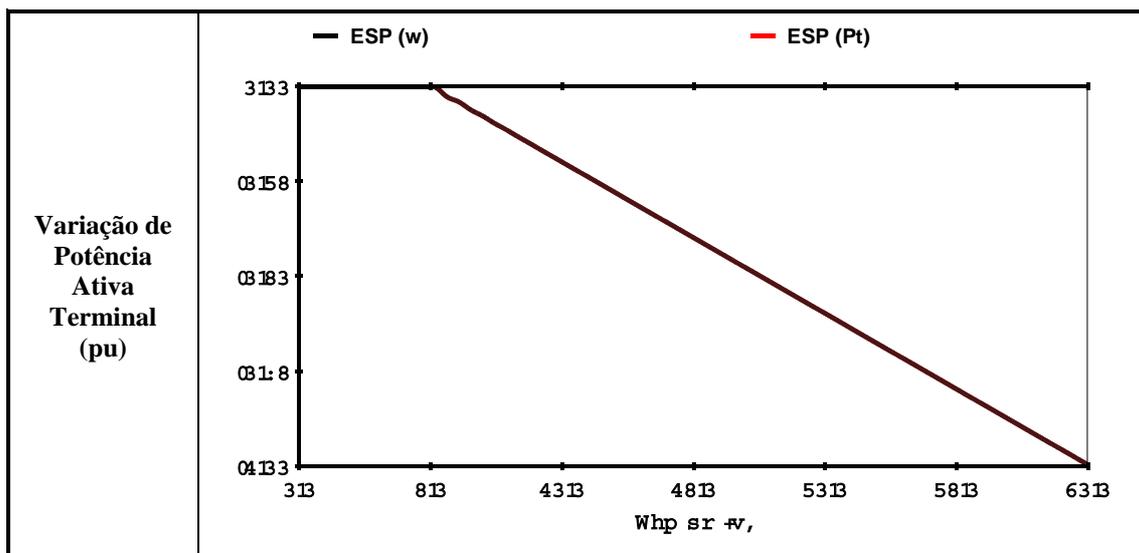


Figura 134 – Potência ativa terminal após distúrbio em rampa na potência mecânica.

A Figura 135 mostra a tensão de saída do ESP (sinal aplicado no regulador de tensão), a tensão terminal e a potência reativa na máquina.

O sinal de saída do ESP derivado de velocidade do rotor tem erro nulo após pequena oscilação inicial. Para o caso do ESP derivado de potência terminal, pode ser verificado que há erro em regime no sinal de saída do ESP. Isto causa variações excessivas e desnecessárias de tensão e de potência reativa.

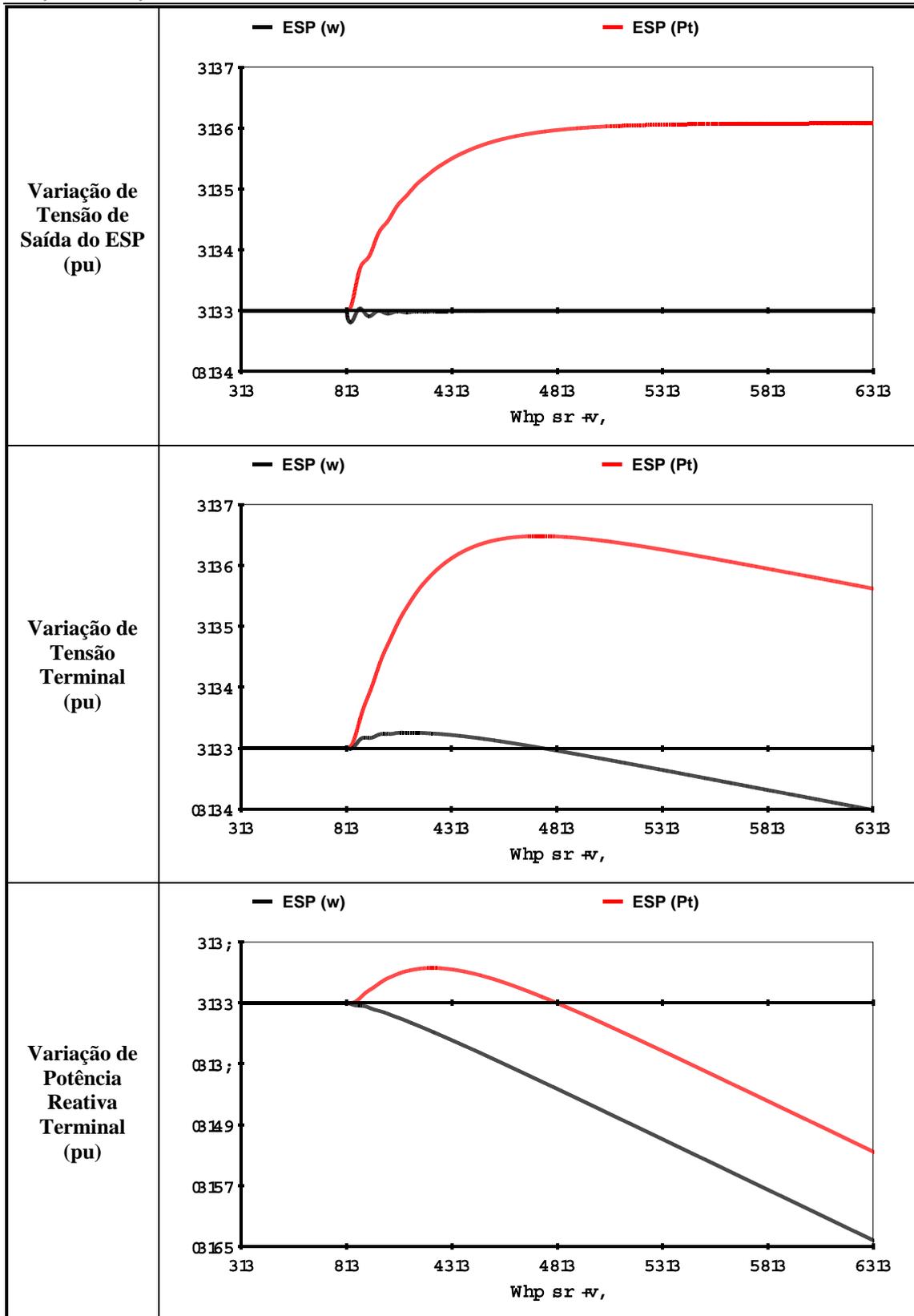


Figura 135 – Grandezas nos terminais da máquina após distúrbio em rampa na potência mecânica.

No Brasil, o uso de ESPs derivados de potência elétrica, apesar da sua simplicidade, foi praticamente abandonado devido a problemas de desempenho em baixas frequências. As grandes variações na tensão e na potência reativa nos terminais, mostradas na Figura 133 e na Figura 135, ocorriam com frequência após variações consideradas normais na geração de potência ativa.

Nos poucos casos onde o ESP derivado de potência elétrica ainda é utilizado, é necessária a utilização de um filtro do tipo *washout* duplo. Esta é uma solução paliativa ainda utilizada na prática nestas instalações.

Além disso, turbulências no canal de descarga de turbinas do tipo Francis (gerando torques pulsantes abaixo de $0,5\text{ Hz}$) causavam inaceitáveis oscilações sustentadas na tensão e na potência reativa terminal [Soares 1981]. Uma terceira desvantagem é o risco de saturação da saída do ESP quando o gerador está alterando sua geração seguindo a rampa de carga, o que leva a perda da ação de amortecimento das oscilações eletromecânicas.

O ESP derivado da velocidade do rotor, ao contrário do ESP derivado de potência elétrica, tem bom desempenho em baixas frequências. Por outro lado, apresenta problemas de geração e amplificação de ruídos, em frequências mais altas, instabilização do modo associado ao sistema de excitação e oscilações torcionais [Larsen 1981c].

Desta forma, a característica complementar dos sinais de velocidade do rotor e de potência elétrica indica que um ESP de melhor desempenho deveria utilizar os dois sinais, cada qual na faixa de frequência onde seu uso é mais eficaz.

Uma solução para isso é utilizar o esquema descrito na Figura 136 [De Mello 1978, Lee 1981, De Mello 1982, Soares 1985, Soares 1987]. Os sinais de velocidade e de potência terminal passam por filtros antes da função de compensação, de forma que a eventual ação adversa é eliminada ou bastante atenuada.

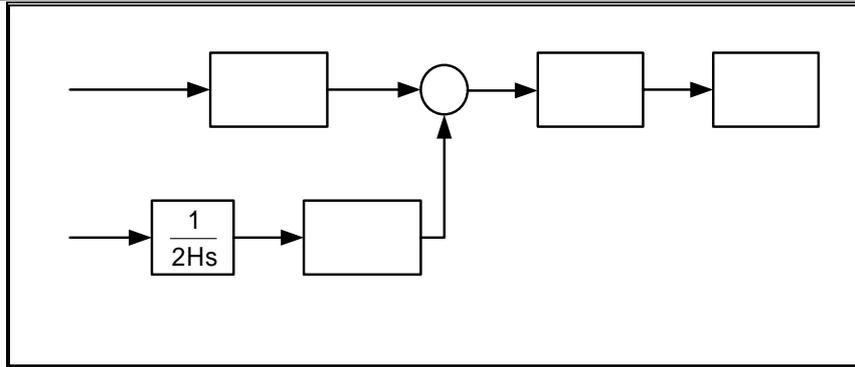


Figura 136 – Estabilizador de Sistema de Potência utilizando sinal de velocidade do rotor e potência elétrica.

Na Figura 137 o esquema da Figura 136 é reescrito e são indicados $\Delta\omega$ significados físicos dos sinais. O sinal resultante na entrada do compensador é a integral da potência acelerante, sintetizada a partir da velocidade do rotor, da potência terminal e da constante de inércia da máquina.

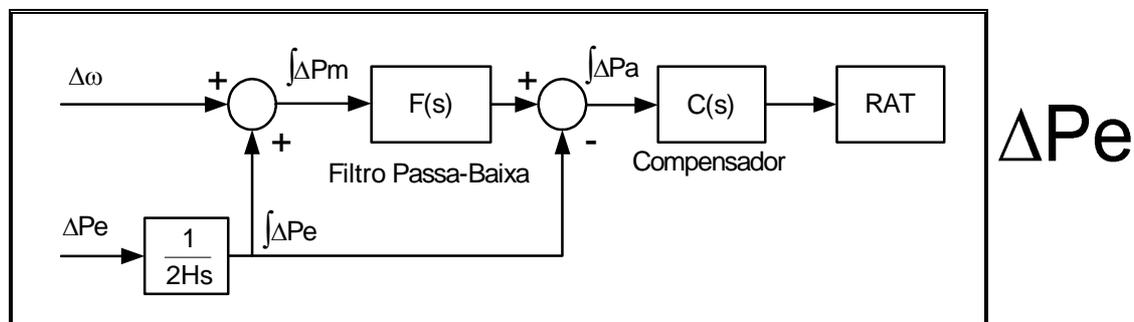


Figura 137 – Estabilizador de Sistema de Potência derivado da integral de potência acelerante.

IV.3.2 Estabilizador Derivado da Integral de Potência Acelerante

A estrutura de ESP mais utilizada atualmente tanto na América do Sul [Zeni 1992, Soares 1995, Soares 1997, Zeni 1999] quanto em outras partes do mundo [De Mello 1982, Czuba 1985, Kundur 1994, Murdoch 1998b, Gibbard 1999, CIGRE 2000] é aquela derivada da integral da potência acelerante, incorporando na malha de síntese deste sinal um filtro passa-baixa de quarta ordem com rastreador de rampa [Soares 1985, Paiva 1999]. Outras implementações existentes utilizam filtro de quinta ordem [Murdoch 1998a, Murdoch 1999, Bérubé 1999].

Um destes ESPs, apresentado na Figura 138, utiliza variáveis elétricas de fácil medição nos terminais do gerador [REIVAX 2002]. O sinal efetivo de entrada deste tipo de ESP é similar ao sinal filtrado de velocidade do rotor.

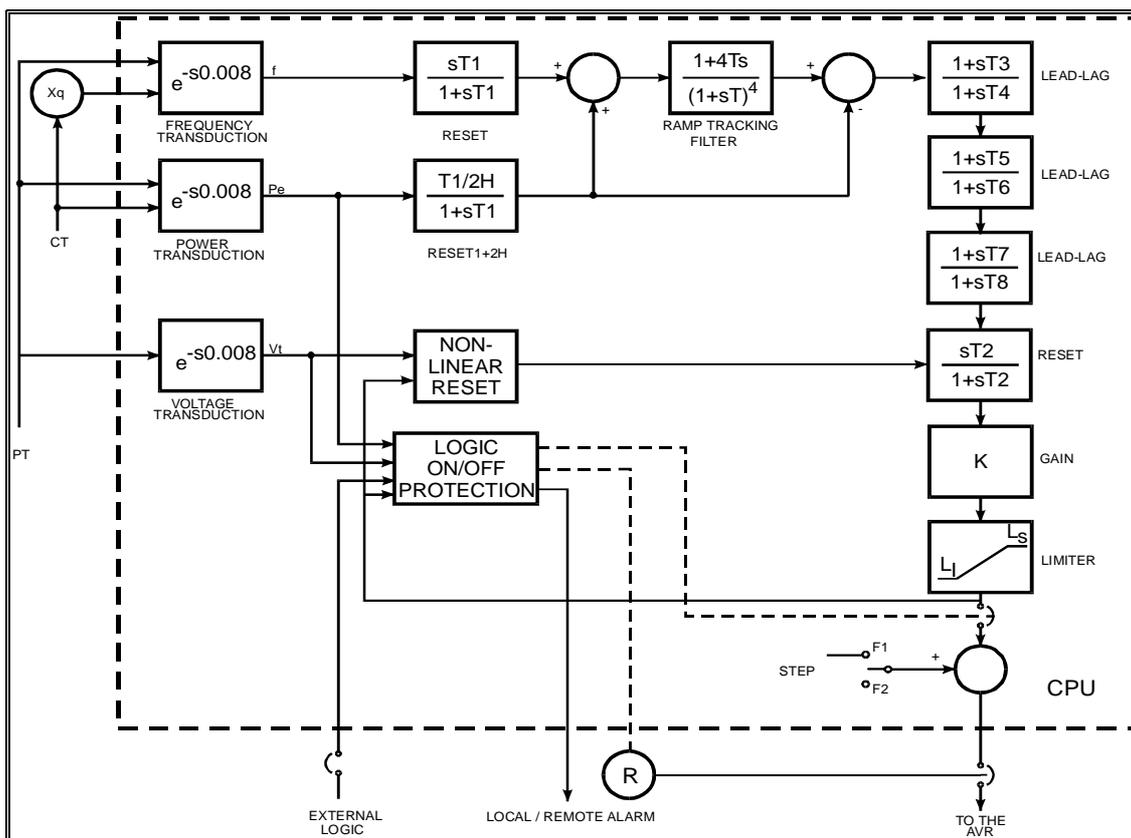


Figura 138 – Estabilizador de Sistema de Potência derivado da integral de potência acelerante.

O circuito de compensação dos ESPs colocados em funcionamento no Brasil normalmente utiliza dois blocos do tipo avanço-atraso, um bloco de *washout* e outros filtros. Com o surgimento de um modo eletromecânico de baixa frequência (0,17 Hz a 0,25 Hz) devido à interligação Norte-Sul (ocorrida em 1999), foi analisada a possibilidade de se obter um melhor ajuste de fase com a inclusão de um terceiro bloco do tipo avanço-atraso.

A maioria dos ESPs modernos utiliza microprocessadores. Assim sendo, a adição de outros blocos, ou até mesmo a utilização de canais em paralelo, eventualmente tornar-se-á apenas uma questão de reprogramação. O ESP descrito na Figura 138 tem três blocos do tipo avanço-atraso além de um *reset* não linear [Soares 1996, Zeni 2000], que reduz a constante de tempo de *washout* após variações de tensão associadas a grandes distúrbios.

Os valores usuais dos parâmetros desse ESP [Paiva 1999], quando adicionado a um sistema de excitação estático utilizando dois blocos do tipo avanço-atraso, são apresentados na Tabela 58. São apresentados também os parâmetros do ESP instalado nas máquinas da Usina de Xingó, que utiliza este tipo de ESP.

Tabela 58 – Valores para os parâmetros do ESP.

Compensador		
	Valores Típicos	Xingó
Ganho	$K = 15$ (5 a 20) pu/pu	$K = 15$ pu/pu
<i>Reset</i>	$T2 = 3$ s	$T2 = 3$ s
<i>Reset</i> (Proteção)	$T2 = 0,3$ s	$T2 = 0,3$ s
Avanço	$T3 = T5 = 0,1$ s	$T3 = 0,15$ s, $T5 = 0,20$ s
Atraso	$T4 = T6 = 0,03$ s	$T4 = T6 = 0,05$ s
Limitador	$L_S = -L_I = 5\%$	$L_S = -L_I = 10\%$
Síntese do Sinal de Integral de Potência Acelerante		
	Valores Típicos	Xingó
<i>Reset</i>	$T1 = 3$ s	$T1 = 3$ s
Filtro Rastreador	$T = 0,1$ s	$T = 0,1$ s
Inércia	$2H$ (depende da máquina)	$2H = 9,0$ s

A existência do filtro de quarta ordem rastreador de rampa é necessária para que o ESP funcione da forma mais eficiente possível: utilizando sinal de potência para frequências altas e sinal de velocidade do rotor para frequências baixas. Entretanto, o valor da frequência de corte do filtro deve ser estabelecido levando em consideração a máquina onde o equipamento será instalado.

A constante de tempo T do filtro rastreador determina a partir de qual frequência um sinal é bloqueado e o outro é liberado, ou seja, a partir de quando o ESP derivado de integral de potência acelerante deixa de funcionar como um ESP derivado de velocidade do rotor e passa a funcionar como um ESP derivado de potência terminal. Assim, a determinação da constante de tempo T do filtro deve ser feita com cuidado, a fim de evitar eventuais impactos adversos.

Para o valor típico $T = 0,1$ s temos na Figura 139 o diagrama de Bode para o filtro passa-baixa $F(s)$ e para o filtro passa-alta $(1-F(s))$.

A frequência de corte neste caso é 10 rad/s, por volta do valor de um modo local de oscilação eletromecânica. Portanto, para frequências até 10 rad/s, o sinal de potência terminal é atenuado. Para valores maiores, o sinal de velocidade do rotor é atenuado. Valores maiores para frequência de corte (constante de tempo menores) acentuam os problemas inerentes aos ESPs derivados de velocidade do rotor (oscilações torcionais, amplificação de ruídos, etc.).

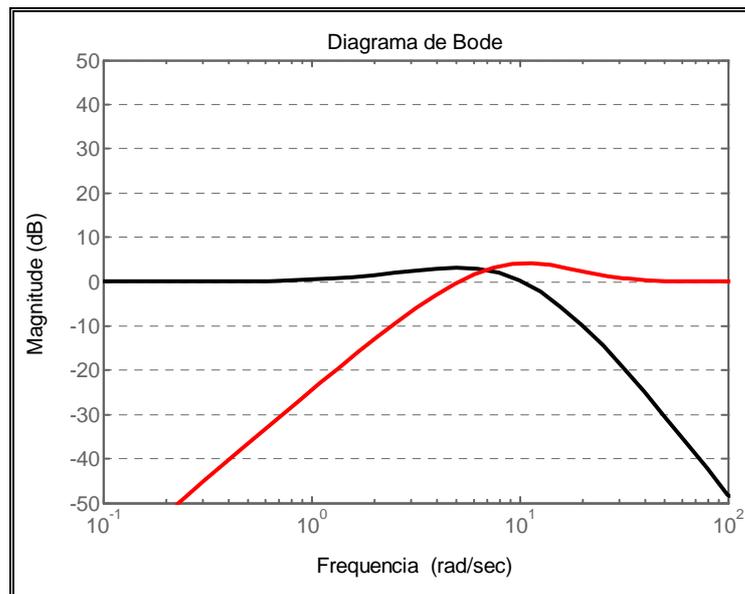


Figura 139 – Diagrama de Bode para o filtro passa-baixa $F(s)$ (preto) e passa-alta $(1-F(s))$ (vermelho).

A seguir são apresentados os estudos de avaliação do desempenho do ESP derivado da integral de potência acelerante utilizando dados reais da Usina de Xingó. São avaliados cinco casos distintos: quatro envolvendo alterações dos parâmetros do filtro passa-baixa de quarta ordem com rastreador de rampa, e um caso onde o filtro é curto-circuitado (equivalente a um ESP derivado de velocidade do rotor).

No caso onde o filtro é curto-circuitado ($F(s) = 1$), o sinal efetivo de entrada do compensador é a velocidade do rotor, como mostrado na Figura 140.

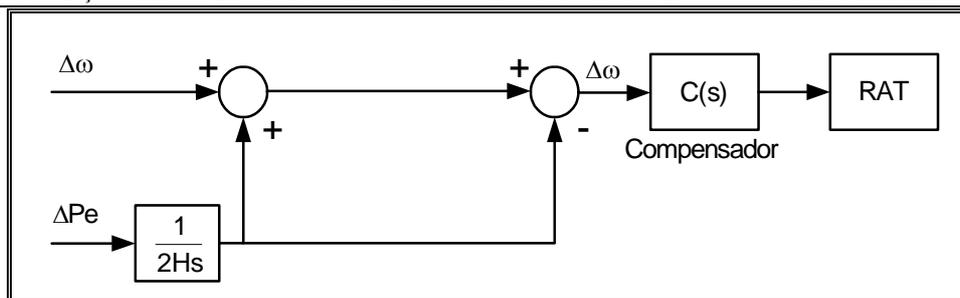


Figura 140 – Estabilizador de Sistema de Potência derivado da integral de potência acelerante com filtro $F(s) = I$.

A melhor solução em teoria é a utilização do ESP derivado de velocidade [Larsen 1981a]. No entanto, existem problemas práticos consideráveis relacionados a este tipo de equipamento. Os estudos que seguem mostram os resultados do filtro curto-circuitado, permitindo a comparação do ESP teórico ideal com os ESP de potência acelerante considerando a adoção de diferentes tipos de filtro. A Tabela 59 descreve os filtros considerados nas análises.

Tabela 59 – Parâmetros dos filtros analisados.

Filtro Passa-Baixa de Quarta Ordem com Rastreador de Rampa	
$F(s) = \frac{1+4Ts}{(1+Ts)^4}$	
Condições Analisadas	
Filtro Curto-Circuitado	$F(s) = 1$
Filtro com Constantes de Tempo Distintas	$T = 0,1 \text{ s} \Rightarrow F(s) = \frac{1+0,4s}{(1+0,1s)^4}$
	$T = 0,3 \text{ s} \Rightarrow F(s) = \frac{1+1,2s}{(1+0,3s)^4}$
	$T = 0,5 \text{ s} \Rightarrow F(s) = \frac{1+2s}{(1+0,5s)^4}$
Filtro com $T = 0,1 \text{ s}$, sem Rastreador de Rampa	$F(s) = \frac{1}{(1+0,1s)^4}$

Inicialmente será avaliada a influência da constante de tempo do filtro e posteriormente a influência do rastreador de rampa.

A Figura 141 apresenta os mapas de pólos e zeros da função de transferência que relaciona a variação de potência reativa terminal com a variação da potência mecânica do gerador: $\Delta Q_T/\Delta P_{MEC}$. Quatro situações são mostradas: ESP com filtro curto-circuitado e com filtro de diferentes constantes de tempo ($T = 0,1s$, $T = 0,3s$ e $T = 0,5s$). O pólo associado ao modo eletromecânico tem praticamente o mesmo valor em todos os casos, como pode ser visto na Tabela 60.

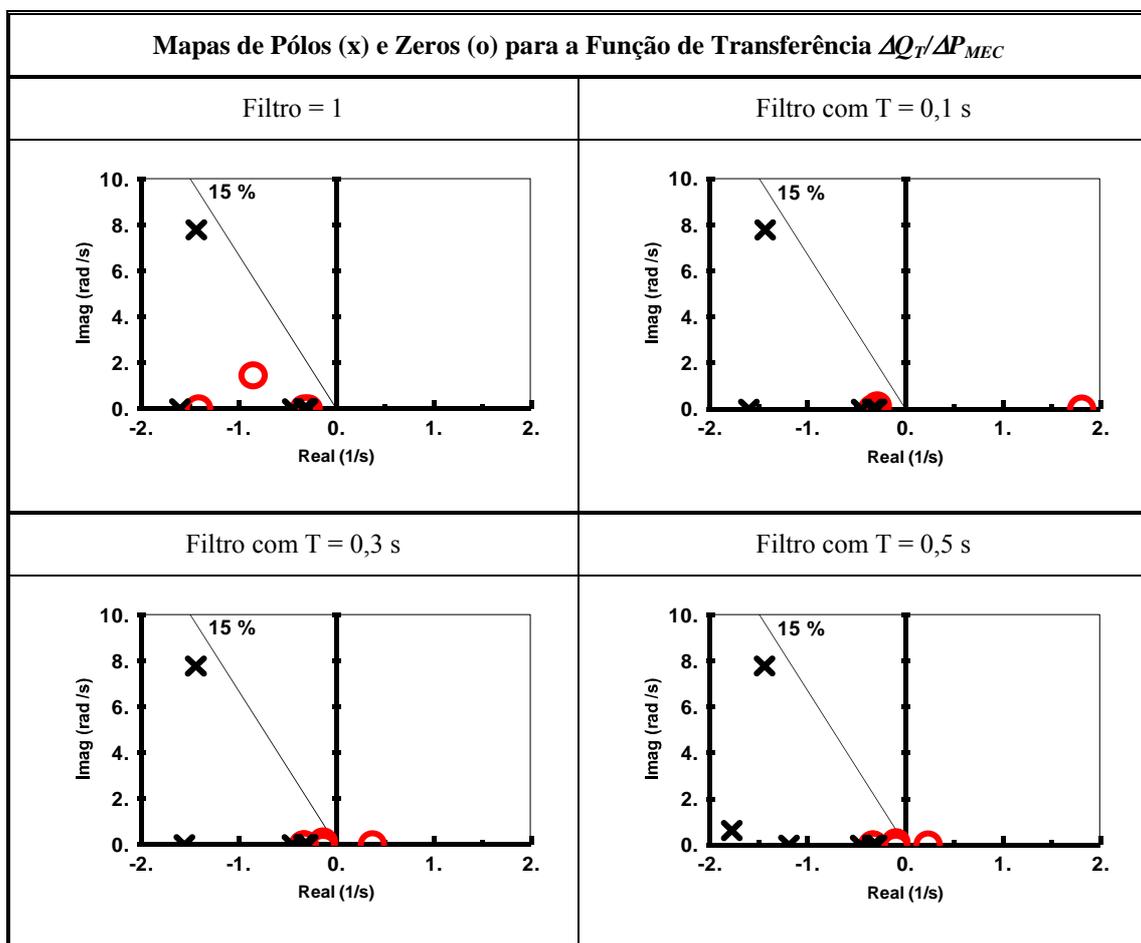


Figura 141 – Mapas de pólos e zeros para variações no filtro.

Tabela 60 – Pólo associado ao modo eletromecânico.

Filtro de Quarta Ordem	Modo Eletromecânico	
Filtro = 1	$\lambda = -1,4476 \pm j7,7748$	$\zeta = 18,30 \%$
Filtro com T = 0,1 s	$\lambda = -1,4386 \pm j7,7790$	$\zeta = 18,19 \%$
Filtro com T = 0,3 s	$\lambda = -1,4431 \pm j7,7704$	$\zeta = 18,26 \%$
Filtro com T = 0,5 s	$\lambda = -1,4437 \pm j7,7714$	$\zeta = 18,26 \%$

Com o filtro curto-circuitado pode-se notar que não existem zeros com parte real positiva, diferentemente dos outros casos. Quanto maior a constante de tempo, mais próximo da origem do plano complexo estará um zero real positivo (Tabela 61).

Tabela 61 – Posição do zero real positivo.

Filtro de Quarta Ordem	Zero Real Positivo
Filtro com T = 0,1 s	+ 1,81
Filtro com T = 0,3 s	+ 0,38
Filtro com T = 0,5 s	+ 0,24

A Figura 142 compara o desempenho de quatro condições de filtro para o ESP da Usina de Xingó. O distúrbio aplicado é um degrau de 0,01 pu na potência mecânica do gerador.

Pode ser observado que, para efeito prático, não há diferença entre os diferentes controladores na resposta de potência ativa terminal. Existem, por outro lado, diferenças significativas no desempenho quando são analisadas as oscilações de tensão e de potência reativa terminal. Quando a constante de tempo do filtro é maior que 0,1 s, ocorre um aumento na amplitude desses transitórios. Este desempenho é altamente indesejável.

Analisando os mapas de pólos e zeros mostrados na Figura 141, nota-se que próximo a origem do plano complexo, a existência de um zero real positivo e um par de

pólos complexos com parte real negativa. Quanto maior a constante de tempo do filtro, mais próximo da origem estes zeros se posicionam.

A relação entre o valor da constante de tempo do filtro e a proximidade dos zeros em relação a origem é expressa também na Figura 142. O pico da resposta transitória de potência reativa é inversamente proporcional à distância entre os zeros e a origem do plano complexo. Este resultado é, portanto, análogo ao apresentado no início deste capítulo, para um sistema típico de segunda ordem.

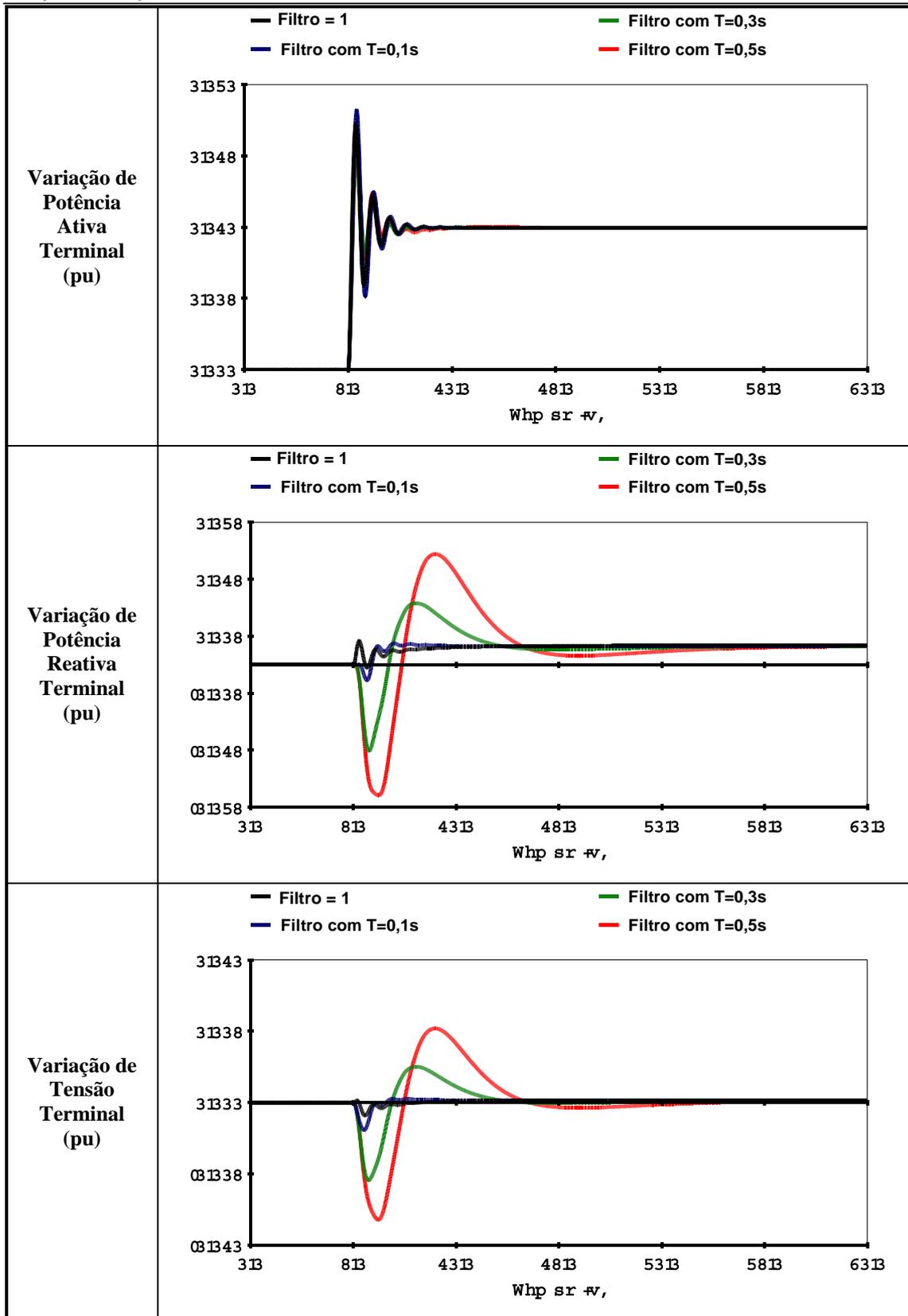


Figura 142 – Grandezas nos terminais da máquina após distúrbio em degrau na potência mecânica.

A seguir é analisada a influência do módulo rastreador de rampa no filtro de quarta ordem para três situações: filtro curto-circuitado, e filtro com ou sem rastreador de rampa.

A Figura 143 apresenta os mapas de pólos e zeros da função de transferência que relaciona a potência reativa terminal com a potência mecânica do gerador ($\Delta Q_T/\Delta P_{MEC}$) para os três ajustes.

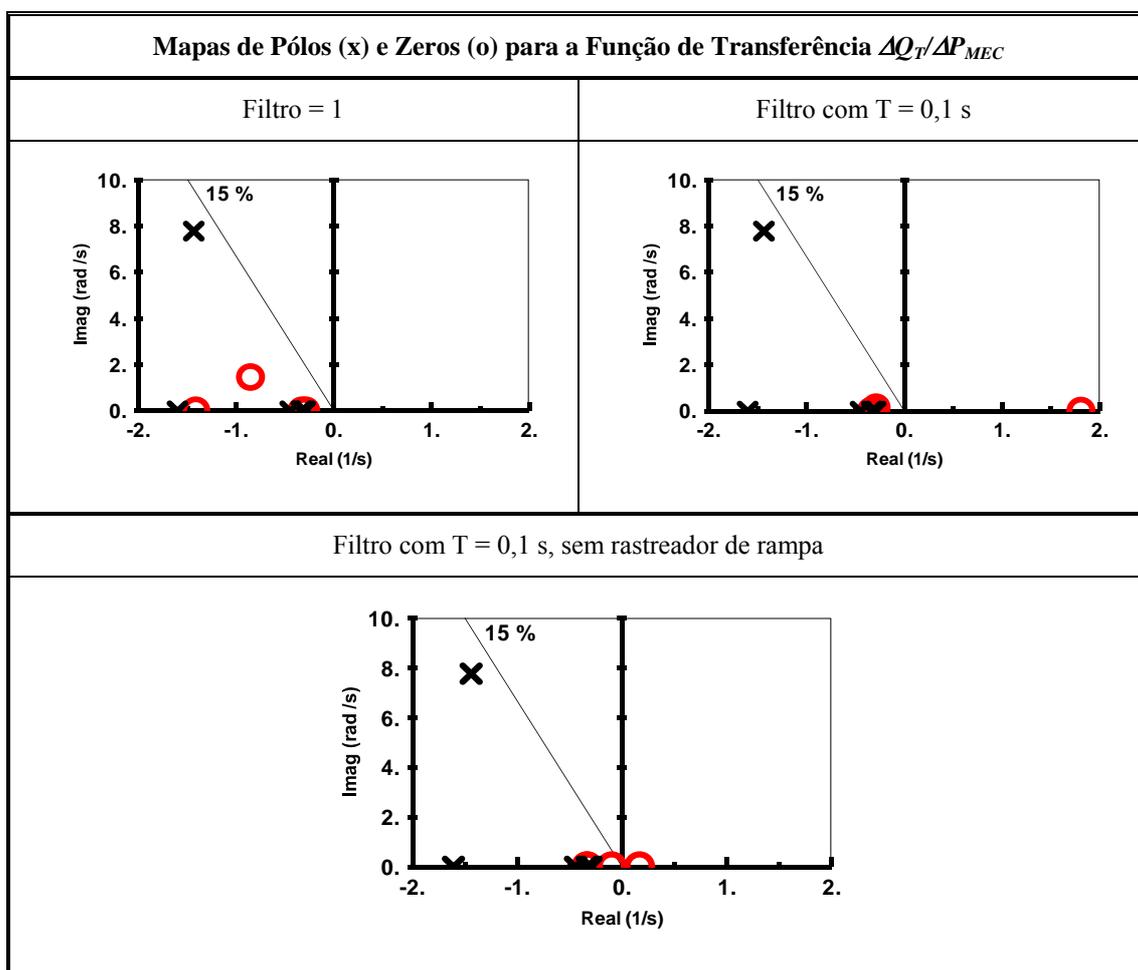


Figura 143 – Mapas de pólos e zeros.

O pólo associado ao modo eletromecânico tem praticamente o mesmo valor em todos os casos (Tabela 62).

Tabela 62 – Pólo associado ao modo eletromecânico.

Filtro	Modo Eletromecânico	
Filtro = 1	$\lambda = -1,4476 \pm j7,7748$	$\zeta = 18,30 \%$
Filtro com T = 0,1 s	$\lambda = -1,4386 \pm j7,7790$	$\zeta = 18,19 \%$
Filtro com T = 0,1 s, sem rastreador de rampa	$\lambda = -1,4411 \pm j7,7704$	$\zeta = 18,24 \%$

Analisando os mapas de pólos e zeros apresentado na Figura 143 verifica-se o efeito positivo do elemento rastreador de rampa do filtro de quarta ordem. Quando não há rastreador no filtro passa-baixa de quarta ordem, os zeros se posicionam muito mais próximos da origem do plano complexo (Tabela 63).

Tabela 63 – Posição do zero real positivo.

Filtro de Quarta Ordem	Zero Real Positivo
Filtro com T = 0,1 s	+ 1,81
Filtro com T = 0,1 s, sem rastreador de rampa	+ 0,17

A Figura 144 apresenta a comparação entre o desempenho dos três ESPs para um distúrbio em degrau de $0,01 pu$ na potência mecânica do gerador.

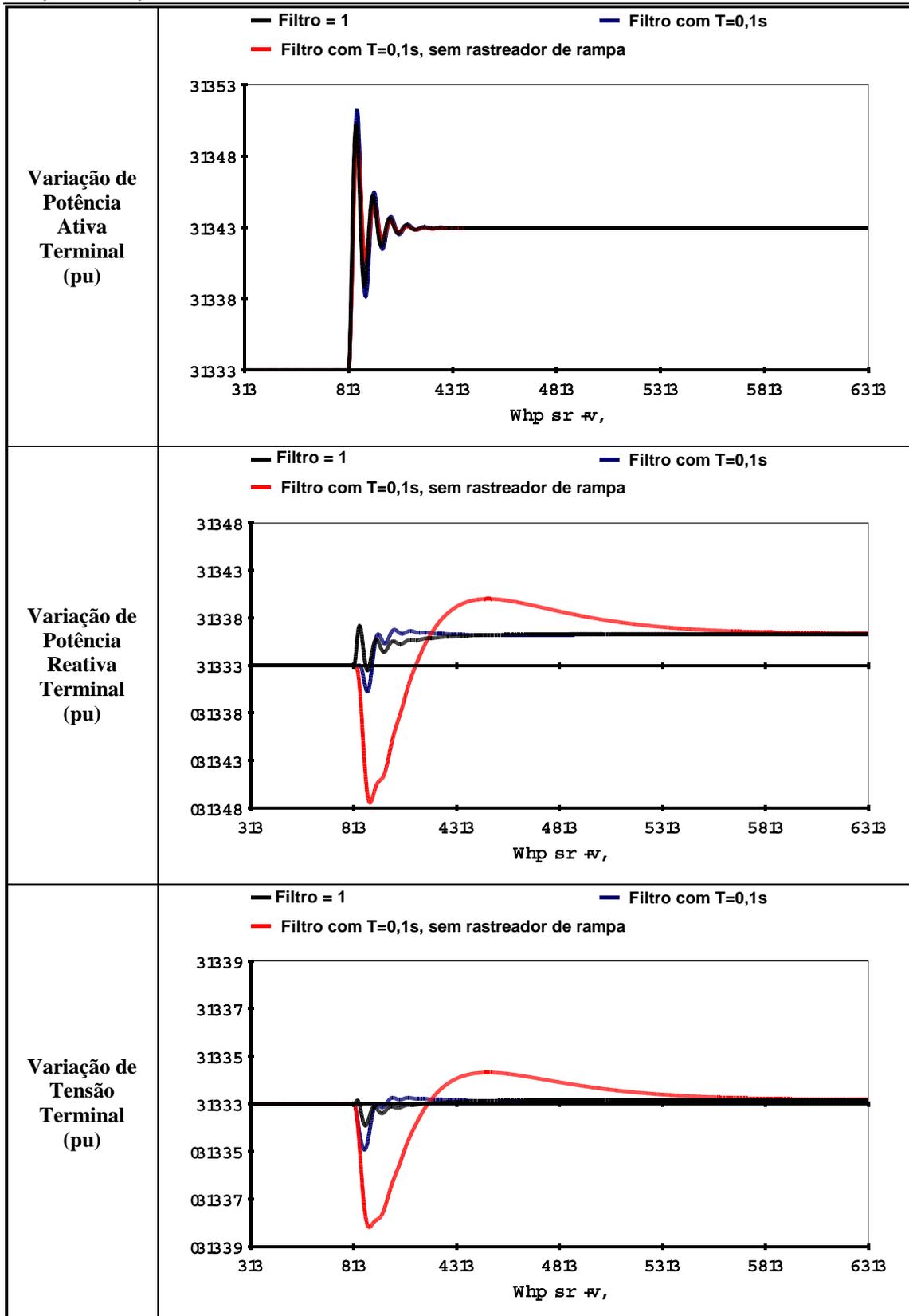


Figura 144 – Grandezas nos terminais da máquina após distúrbio em degrau na potência mecânica.

Mais uma vez, não há praticamente nenhuma diferença entre as respostas de potência ativa terminal. Quanto aos transitórios de tensão e de potência reativa terminal, entretanto, há um significativo aumento da magnitude das oscilações quando o rastreador de rampa é retirado do filtro.

A seguir é apresentada a comparação dos diversos tipos de filtro para um distúrbio em rampa na potência mecânica da máquina. A taxa de redução de potência utilizada foi 4% por segundo.

A Figura 145 mostra a potência ativa terminal da máquina. As curvas são coincidentes para todos os casos.

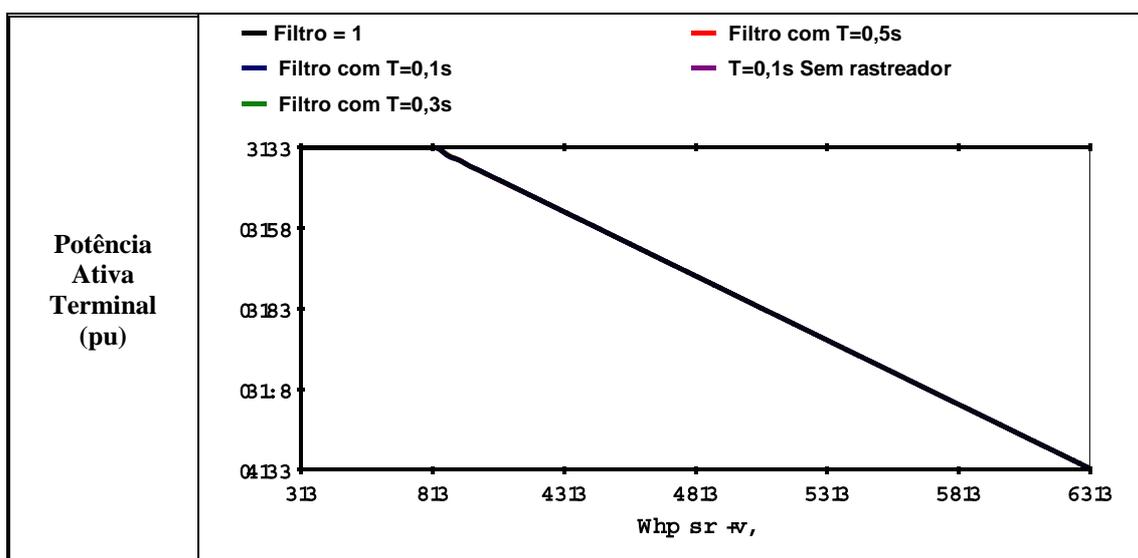


Figura 145 – Potência ativa terminal após distúrbio em rampa na potência mecânica.

Figura 146 mostra a tensão de saída do ESP, a tensão terminal da máquina e a potência reativa para cinco situações de filtro passa-baixa de quarta ordem com rastreador de rampa.

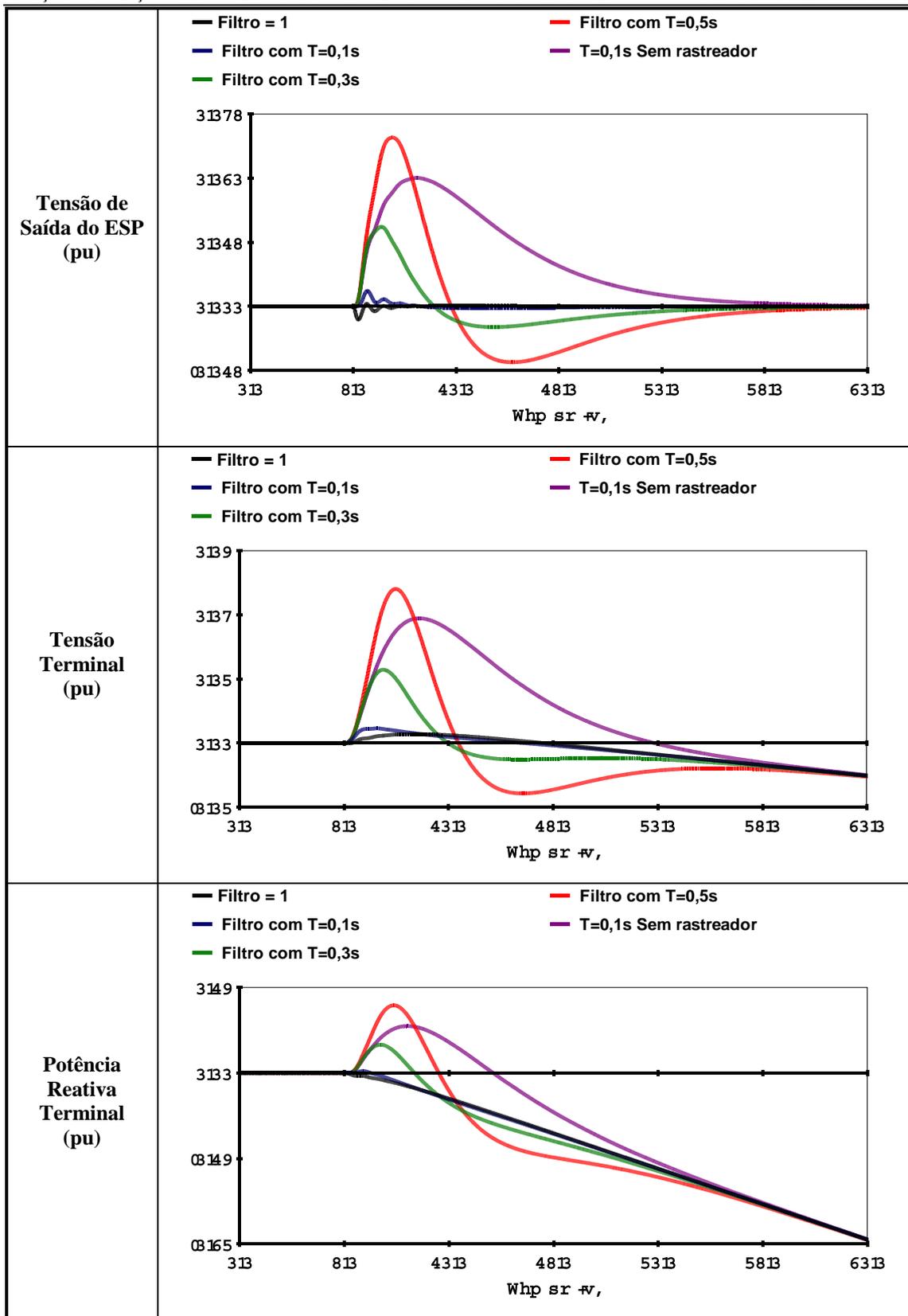


Figura 146 – Variação de grandezas nos terminais da máquina após distúrbio em rampa na potência mecânica.

Tanto o desempenho de tensão quanto o de potência reativa são bastante influenciados pelo valor da constante de tempo do filtro. Apesar de em todos os casos existir a capacidade de seguir a rampa sem erro, quanto maior a constante de tempo, maiores as oscilações de tensão e de potência reativa.

Analisando o sinal de saída do ESP, pode ser observado que para $T = 0,1$ s, as oscilações duram cerca de 3 s e sua amplitude máxima é equivalente àquela observada no caso de $F(s) = 1$ (ESP derivado de velocidade do rotor). Para valores maiores de T as oscilações têm amplitudes máximas de 5 a 10 vezes maiores e duram cerca de 20 segundos. Quando o rastreador de rampa é retirado, a oscilação tem amplitude máxima 8 vezes maior e dura cerca de 20 s. Desempenho análogo pode ser observado nas curvas de tensão e de potência reativa.

Conclui-se, portanto, que na presença do rastreador de rampa, o desempenho do ESP apresenta melhora significativa no desempenho: atuação rápida e sem efeitos adversos.

Estes resultados mostram o cuidado que deve ser tomado no ajuste dos parâmetros do ESP. Impactos adversos são causados quando o valor da constante de tempo do filtro de quarta ordem é igual ou superior a 0,3 s.

IV.4 Análise Não Linear do Estabilizador Derivado de Integral de Potência Acelerante

Nesta seção são apresentadas as simulações dos modelos não lineares no domínio do tempo para os diversos tipos de ESPs estudados na seção anterior.

As seis máquinas que compõem a Usina de Xingó são modeladas, juntamente com os seus reguladores de tensão e estabilizadores. No entanto, como todos os distúrbios apresentados nesta seção serão efetuados em todas as unidades simultaneamente, os resultados equivalem ao modelo de uma máquina equivalente para toda a usina.

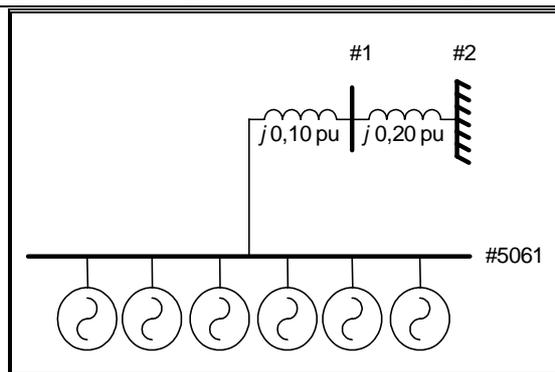


Figura 147 – Usina de Xingó.

Inicialmente são mostrados resultados para duas situações limite para o filtro de quarta ordem: filtro curto-circuitado e filtro aberto. No primeiro caso ($F(s) = 1$), o sinal efetivo de entrada do compensador é velocidade do rotor, como mostrado na Figura 148. No segundo caso ($F(s) = 0$), o sinal efetivo de entrada do compensador é potência terminal (Figura 149).

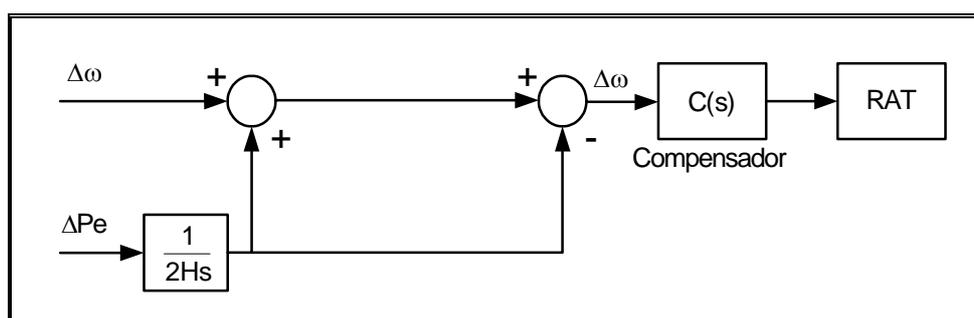


Figura 148 – Estabilizador de Sistema de Potência derivado da integral de potência acelerante com filtro $F(s) = 1$.

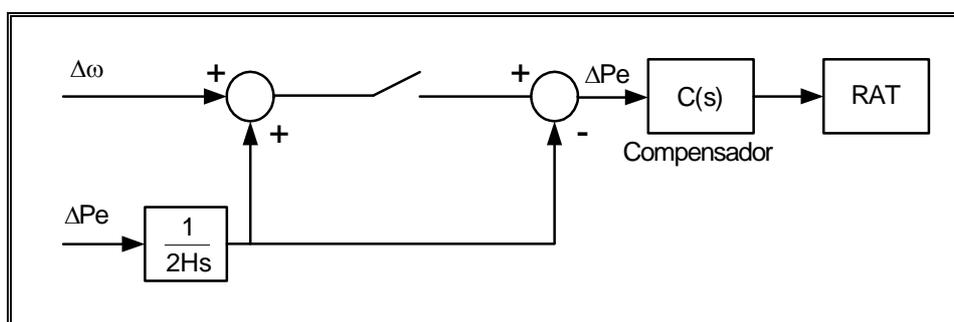


Figura 149 – Estabilizador de Sistema de Potência derivado da integral de potência acelerante com filtro $F(s) = 0$.

A Figura 150 mostra a potência gerada pela usina e a tensão na barra terminal após um distúrbio em degrau ($0,01 \text{ pu}$) na potência mecânica das máquinas.

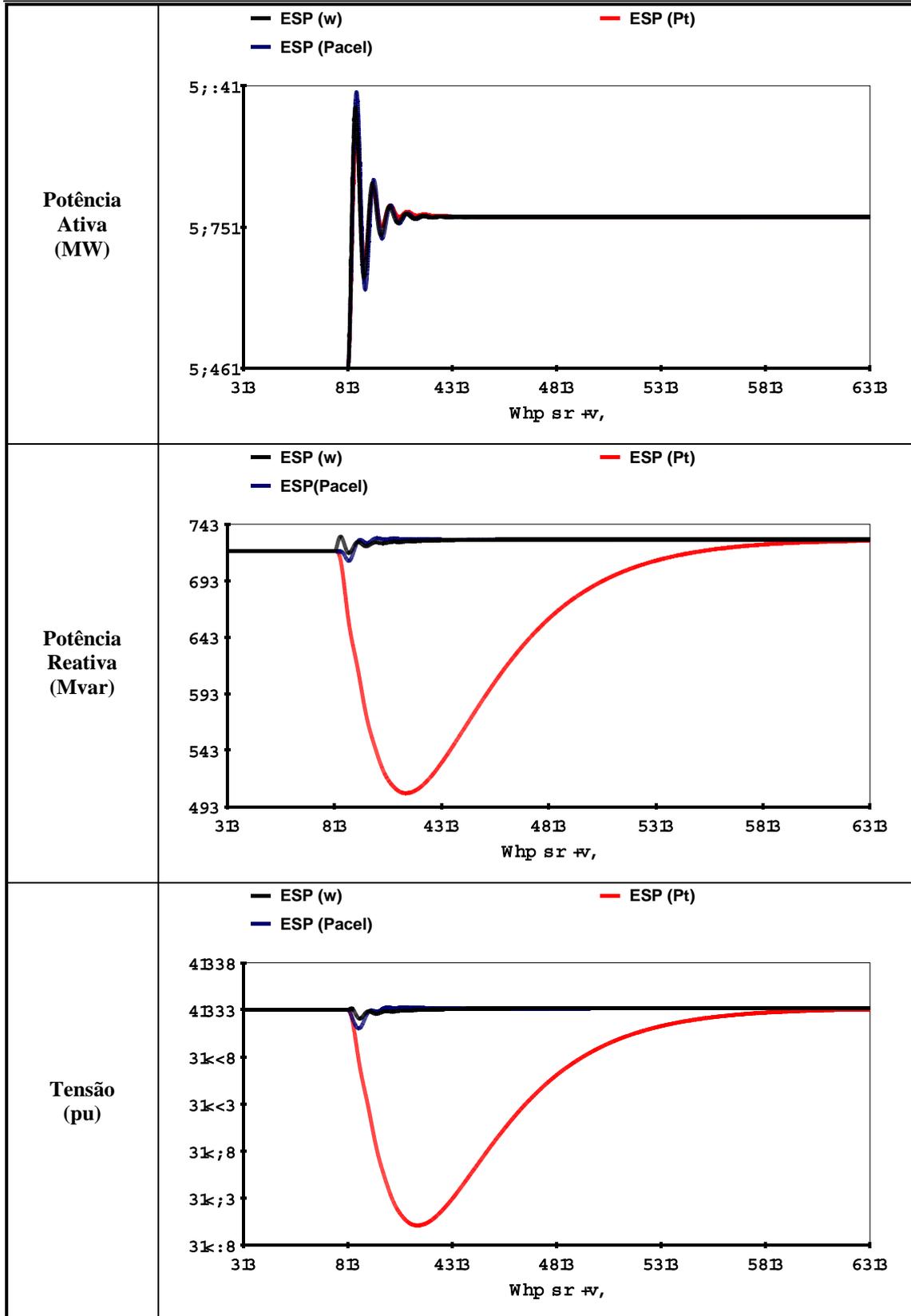


Figura 150 – Desempenho da usina após distúrbio em degrau na potência mecânica.

Como antecipado pela análise linear realizada nas seções anteriores, apesar do desempenho equivalente para potência ativa, as oscilações de potência reativa mostraram-se excessivas e prolongadas (cerca de 15 s), no caso de ESP derivado de potência terminal.

A seguir, a geração da usina é reduzida a zero através de rampa decrescente com taxa de 4 % por segundo. Como no ponto de operação inicial a usina está com 90 % da sua capacidade máxima, a geração de potência ativa é reduzida a zero em 22,5 s (Figura 151).

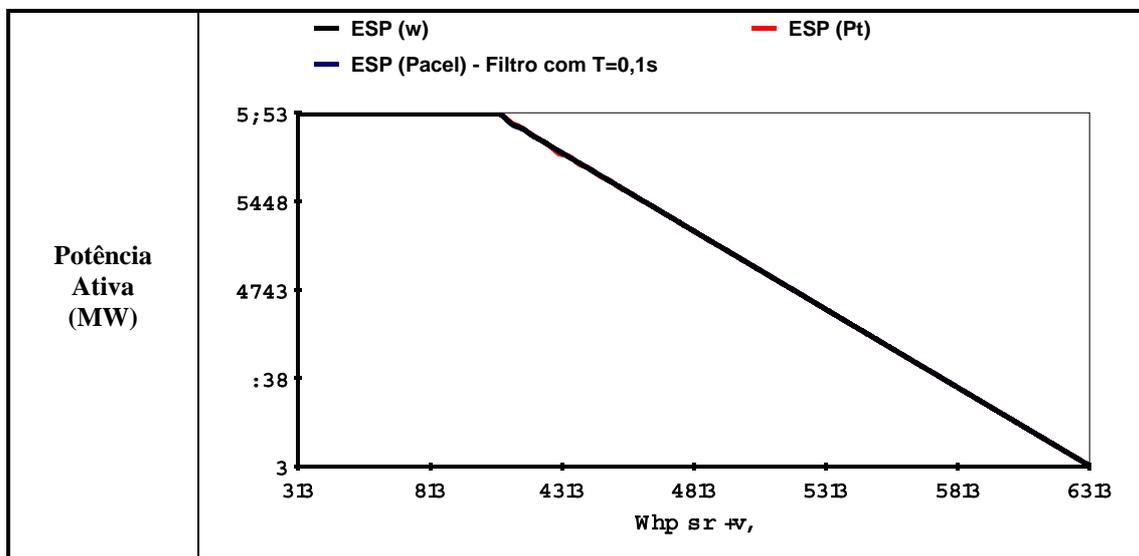


Figura 151 – Potência ativa após distúrbio em rampa na potência mecânica.

A Figura 155 mostra a tensão de saída de cada um dos ESPs, além da tensão na barra terminal e da potência reativa fornecida pela usina.

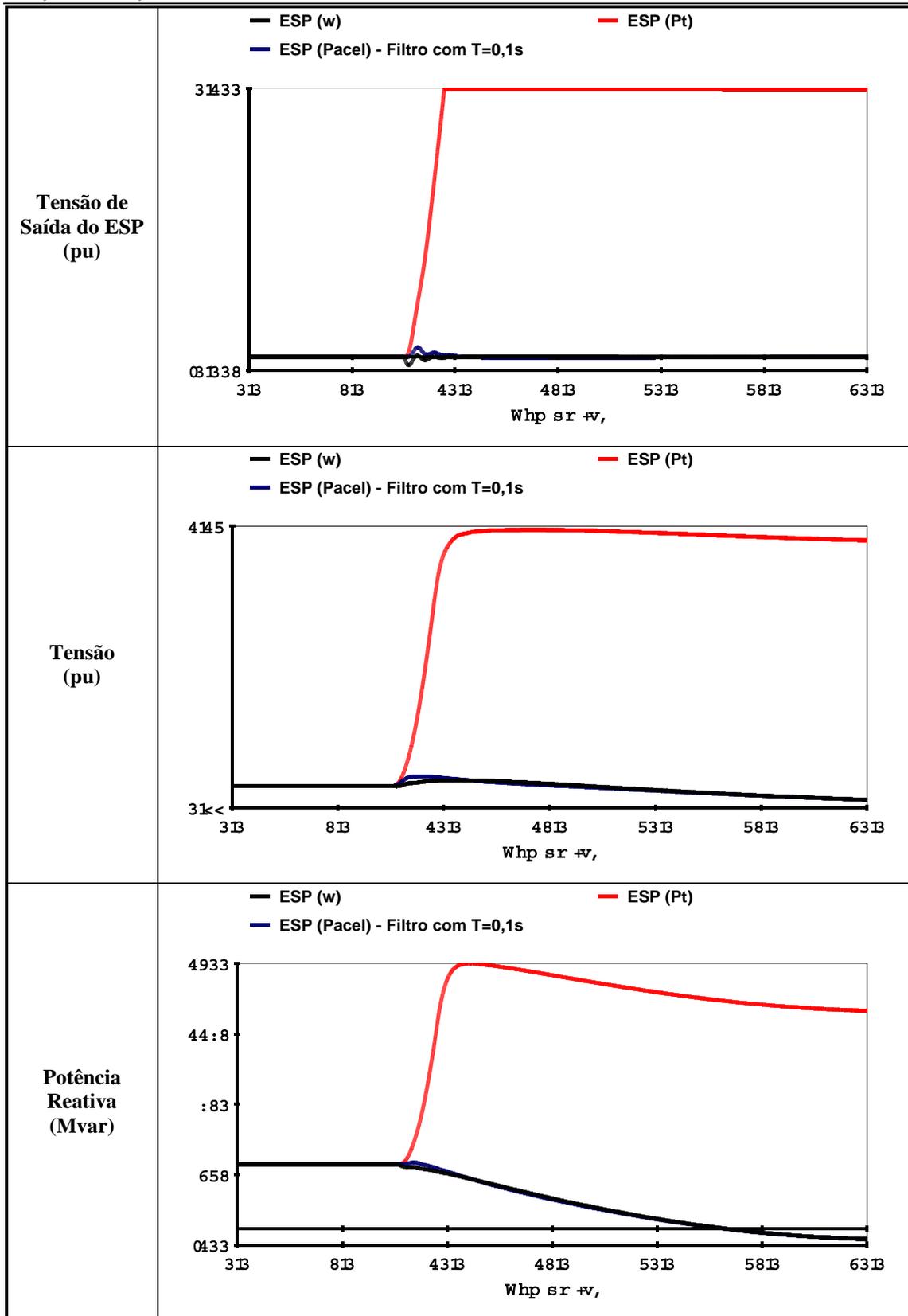


Figura 152 – Desempenho da usina após distúrbio em rampa na potência mecânica.

A Figura 152 mostra que o sinal de saída do ESP derivado de potência terminal aumenta e atinge o seu limite máximo pouco depois do início do decréscimo de geração (cerca de 2 s depois). Este desempenho é altamente indesejado ao causar grandes variações de tensão e de potência reativa. Além disso, ao atingir o limite (o sinal de saída satura) o ESP perde sua função de estabilização, podendo levar o sistema à instabilidade com oscilações sustentadas ou crescentes.

No caso do $ESP_{j_{pacel}}$ com filtro de quarta ordem e rastreador de rampa, o desempenho é equivalente ao do ESP derivado de velocidade do rotor.

A seguir são apresentadas as simulações para diferentes tipos de filtro de quarta ordem. A Figura 153 mostra o desempenho de potência e tensão para um distúrbio em degrau de $0,01 pu$ aplicado na potência mecânica.

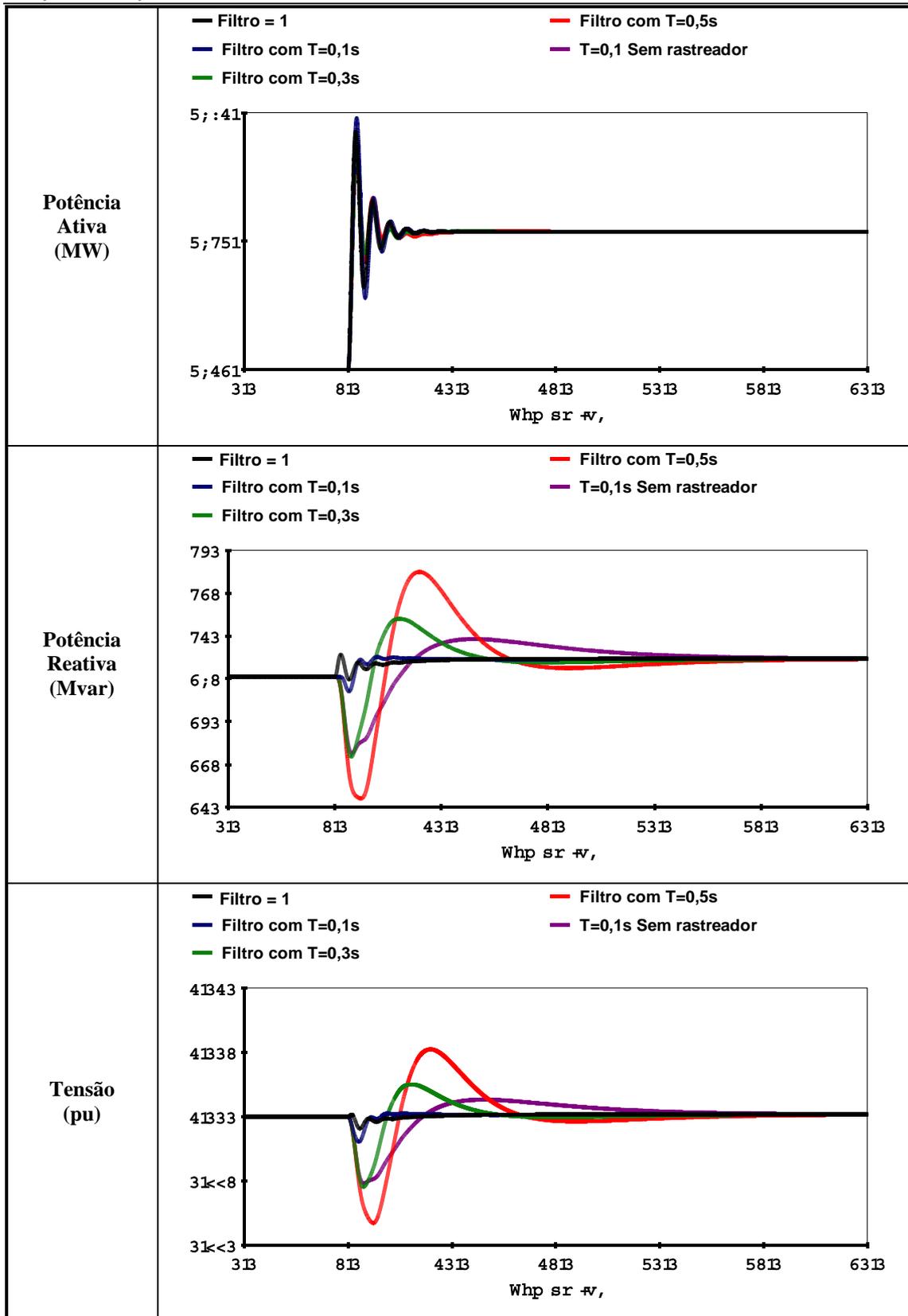
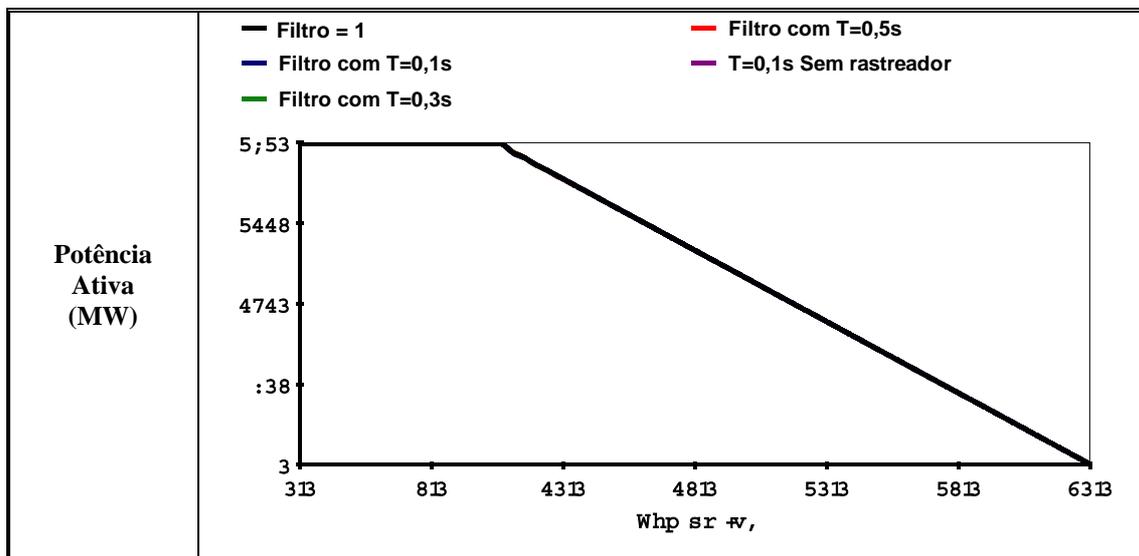


Figura 153 – Desempenho da usina após distúrbio em degrau na potência mecânica.

Apesar do desempenho igual da potência ativa, a variação de potência reativa mostra como o ajuste da constante de tempo do filtro pode evitar (ou causar) variações de até 140 Mvar em cerca de 3 s e oscilações por cerca de 10 s na usina (caso de $T = 0,5$ s). O ESP utilizando filtro com $T = 0,1$ s tem desempenho equivalente ao ESP derivado de velocidade do rotor. Este resultado havia sido antecipado pela avaliação da posição dos zeros realizada na seção anterior.

Analisando agora o desempenho frente um distúrbio em rampa, temos a Figura 154. O decréscimo de potência é realizado numa taxa de 4 % por segundo. Para todos os casos o desempenho é o mesmo.



Na Figura 155 são mostradas as respostas de tensão, potência reativa e da saída do ESP. Confirmando as conclusões obtidas na análise linear, ocorrem grandes variações de potência reativa e de tensão quando a constante de tempo do filtro é igual ou maior que 0,3 s.

Mesmo com $T = 0,1$ s, torna-se evidente a função do rastreador de rampa: resposta sem grandes variações de tensão ou potência reativa e seguindo a curva de variação de geração imediatamente após o início do distúrbio.

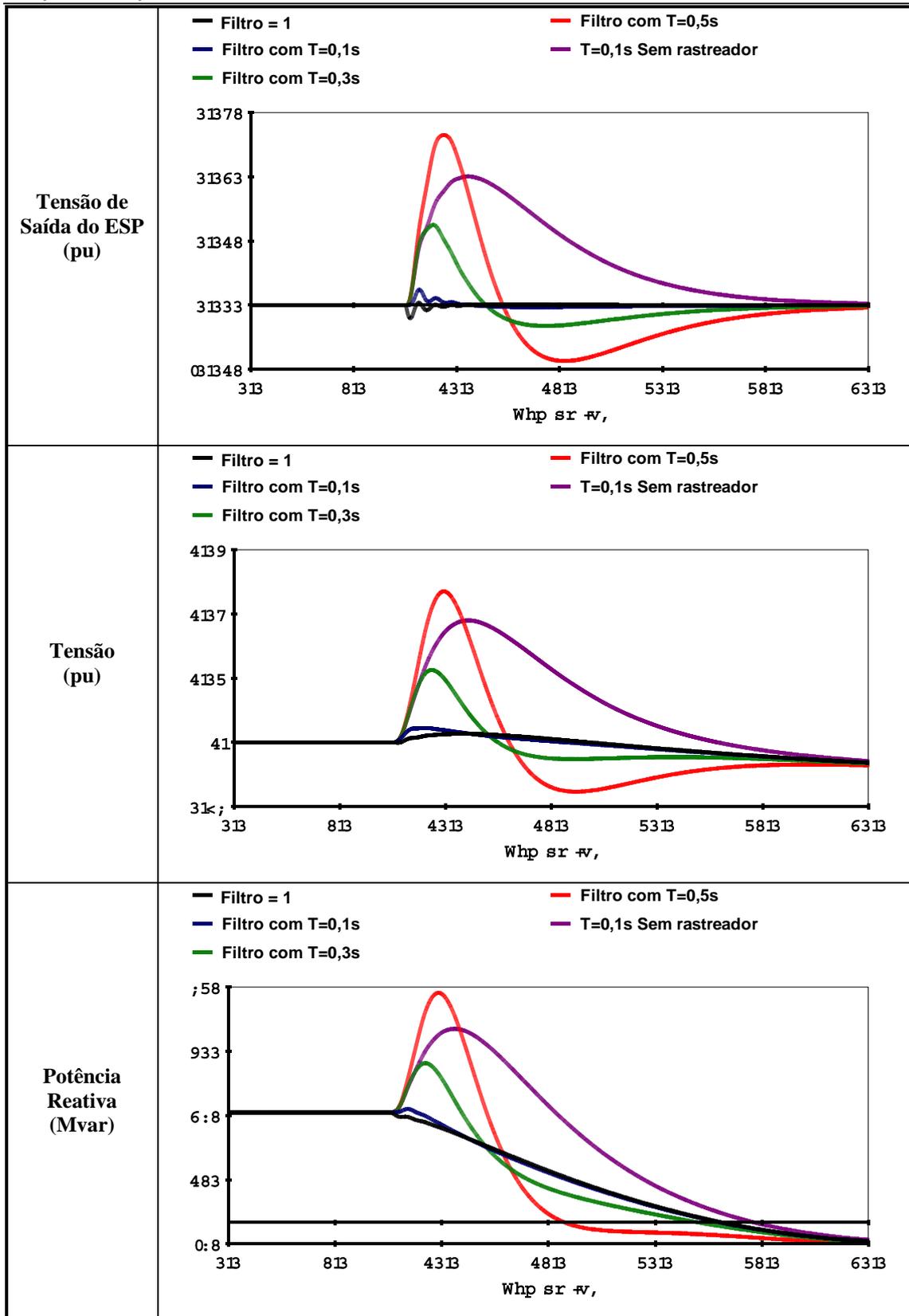


Figura 155 – Desempenho da usina após distúrbio em rampa na potência mecânica.

IV.5 Comparação dos Resultados de Simulação com Testes de Campo

Nesta seção é apresentada a comparação entre os testes realizados no campo [REIVAX 1995] e os resultados das simulações dos modelos linearizados. A Figura 156, Figura 157, Figura 158 e a Figura 159 mostram que os modelos utilizados refletem adequadamente o comportamento da máquina no campo.

No teste de campo, foi aplicado um degrau de 5 % (com duração de cinco segundos) na referência de tensão na unidade 6 da Usina de Xingó. A usina tinha 100 % de carregamento e o sistema elétrico estava com carregamento leve. A simulação considerou a usina como uma máquina equivalente com 90 % de carregamento ligada através de uma reatância de 30 % a uma barra infinita. Foi aplicado um degrau de 1 % na referência de tensão da máquina equivalente.

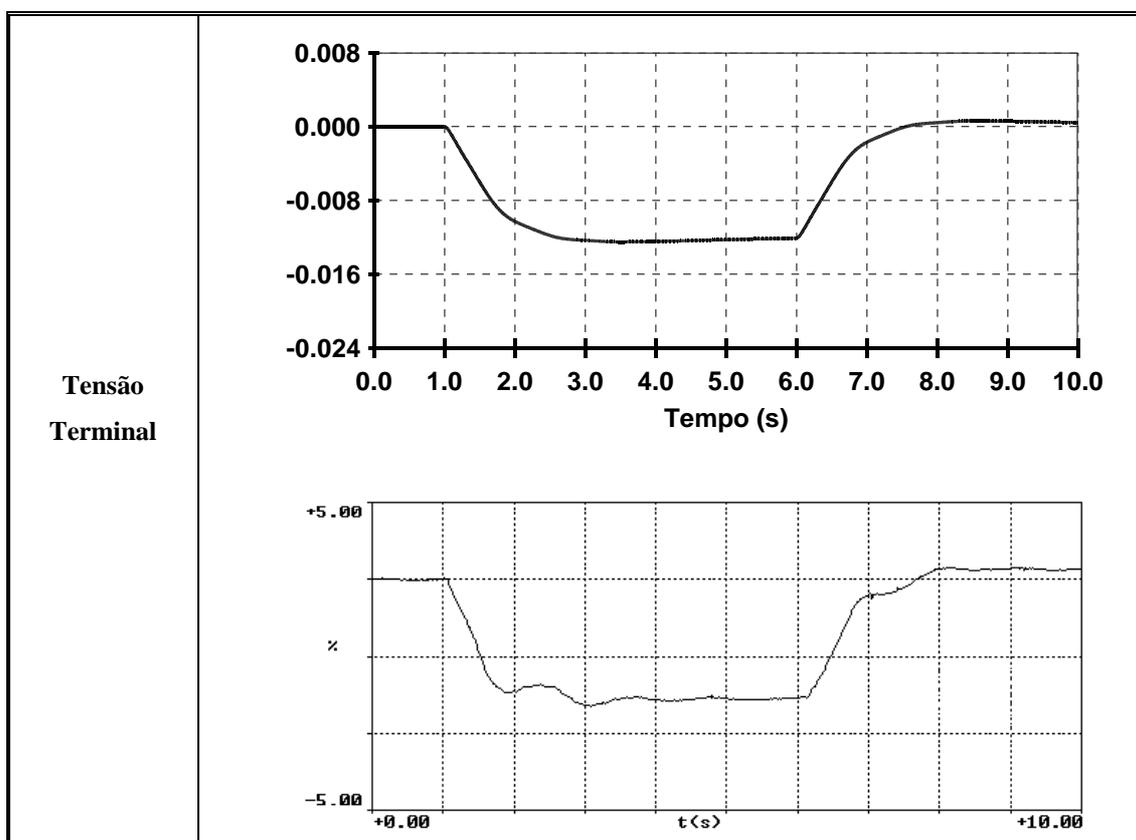


Figura 156 – Comparação entre teste de campo e simulação – Tensão Terminal.

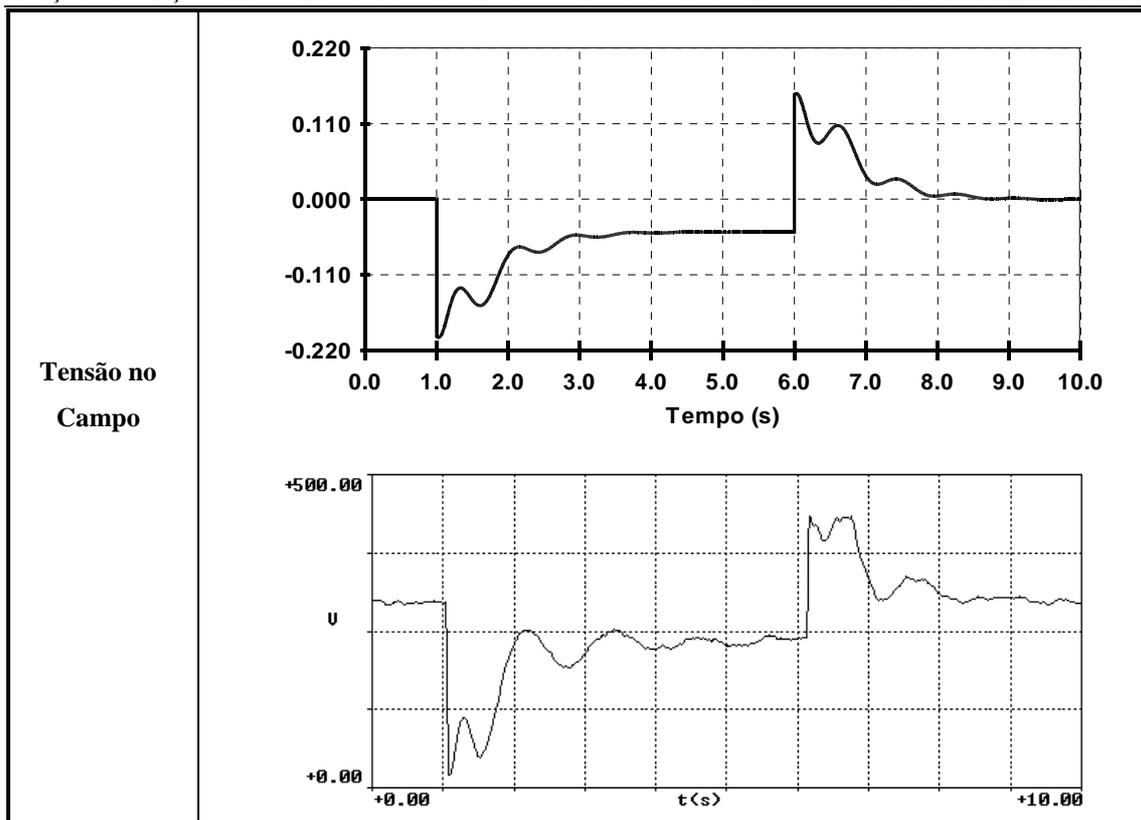


Figura 157 – Comparação entre teste de campo e simulação – Tensão de Campo.

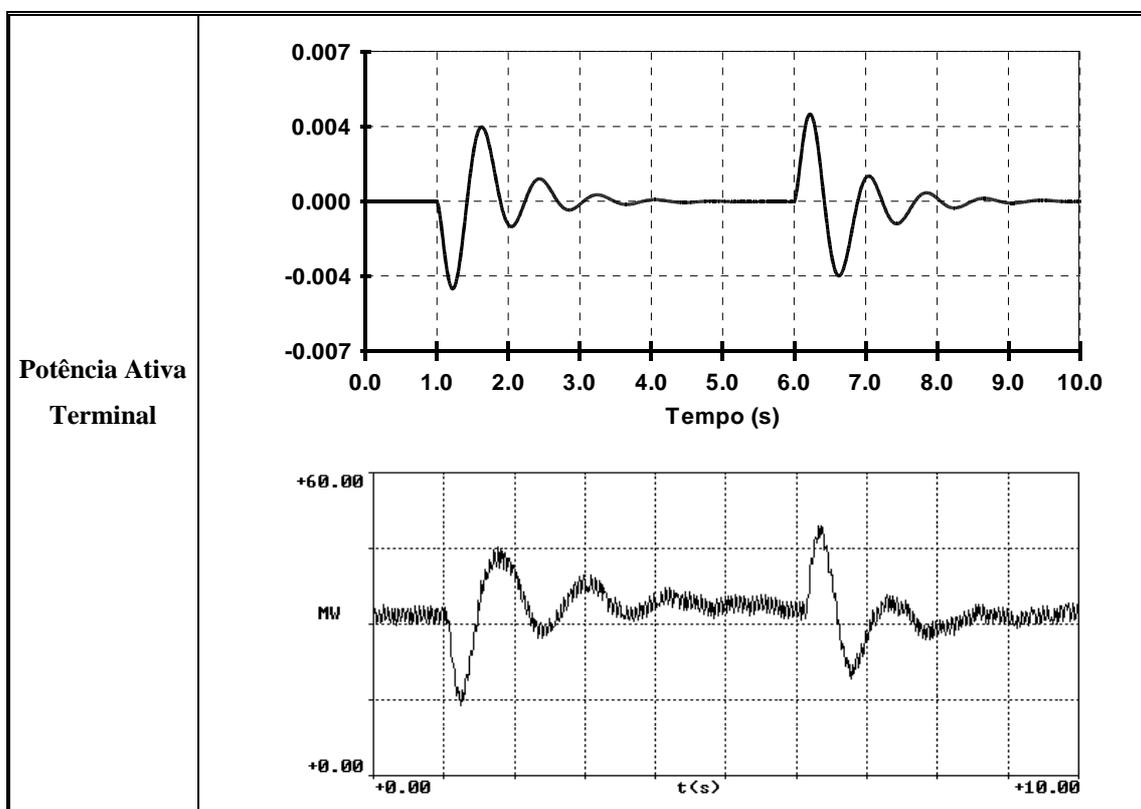


Figura 158 – Comparação entre teste de campo e simulação – Potência Ativa.

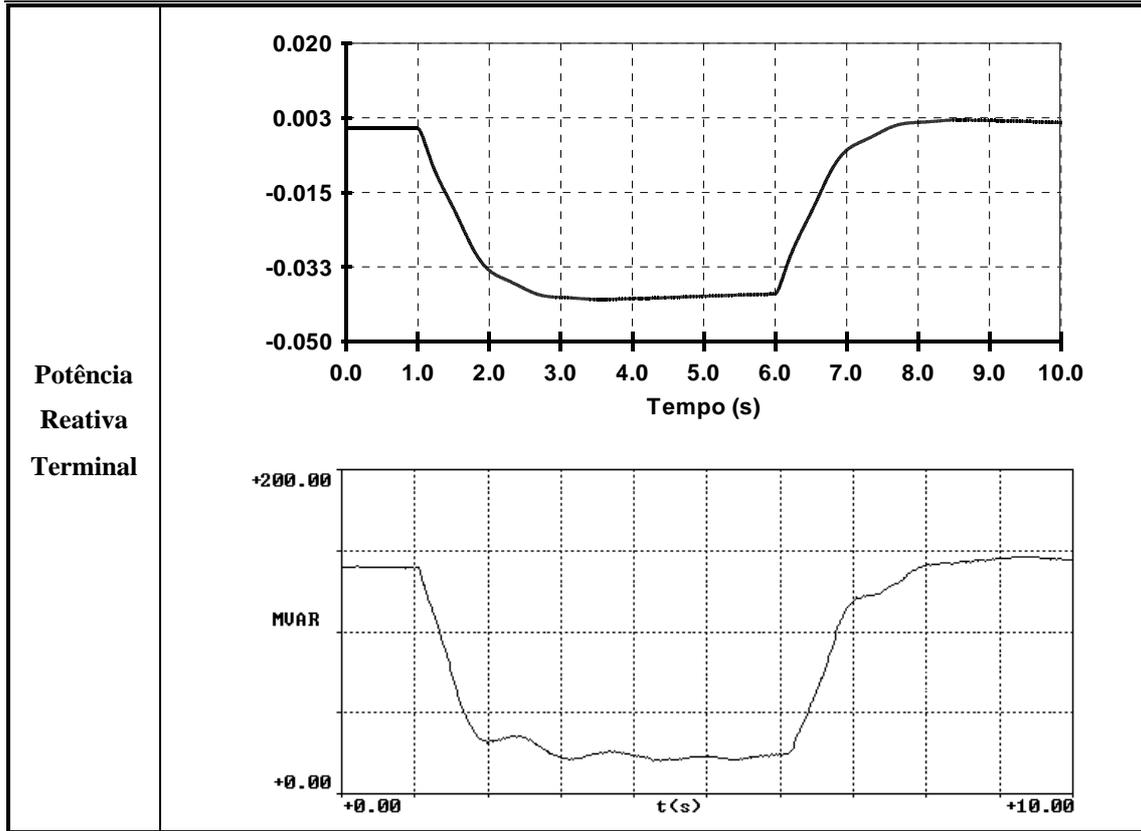


Figura 159 – Comparação entre teste de campo e simulação – Potência Reativa.

IV.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi mostrada a influência da posição dos zeros de funções de transferência de interesse no desempenho dinâmico dos sistemas. Foram analisados um sistema típico de segunda ordem e um caso de sistema de potência.

A influência do tipo de sinal utilizado na malha de estabilização (velocidade do rotor, potência terminal ou integral de potência acelerante) e a estrutura do controlador foram avaliados através da posição dos zeros de funções de transferência de interesse. Estas análises contribuem para o melhor entendimento do comportamento dinâmico de ESPs. Foi demonstrada a relação entre a posição dos zeros e o desempenho dos ESPs, salientando os possíveis impactos adversos.

Nos diversos casos analisados, ESPs derivados de diferentes sinais mostraram comportamento idêntico quando, após distúrbios na potência mecânica do gerador, são avaliadas as oscilações de potência ativa nos seus terminais. No entanto, quando as oscilações de tensão e de potência reativa terminal são verificadas, o comportamento difere bastante de um ESP para outro. Em alguns casos, a amplitude dessas oscilações mostra o impacto adverso que o controlador pode causar no sistema.

Foram analisados alguns aspectos da estrutura do ESP derivado de integral de potência acelerante. O uso do filtro passa-baixa de quarta ordem com rastreador de rampa com constante de tempo $T = 0,1$ s é altamente recomendado, pois resulta em redução considerável do transitório de potência reativa. Os resultados indicam que a constante de tempo T deste filtro não deve ser igual ou superior a 0,3 s, por ocasionar variações transitórias de potência reativa e tensão terminal intoleráveis. O ESP com rastreador de rampa mostrou-se eficiente e robusto frente diversas condições operativas da usina, tanto transitórias como de regime permanente.

As simulações dos modelos não lineares no domínio do tempo comprovaram as conclusões obtidas na análise linear realizada inicialmente.

Capítulo V

Conclusão

V.1 Considerações Gerais

Esta tese abordou três assuntos relacionados com a estabilização de Sistemas Elétricos de Potência (SEP): ajuste coordenado de controladores, avaliação da robustez de controladores e impactos adversos causados por estabilizadores.

A metodologia descrita no Capítulo II mostrou-se eficiente na coordenação dos ganhos dos ESPs de sistemas de grande porte. Considerando de forma adequada vários cenários operativos simultaneamente.

Os resultados obtidos mostram que a ordem de grandeza da duração de um estudo de coordenação para estudos de sistemas de grande porte pode diminuir de meses para semanas utilizando a metodologia proposta. A solução final é obtida através de melhorias sucessivas de uma solução anterior, utilizando uma direção de avanço que leva em consideração a influência de cada controlador na variação da posição de cada um dos pólos. Esta direção é obtida através da informação dos resíduos da função de transferência da malha de controle associados aos pólos de interesse. É possível, portanto, extrair informações do sistema durante o processo.

No Capítulo III foi apresentado um sistema sintético de duas barras que permite avaliar o comportamento do conjunto máquina-RAT-ESP frente modos de oscilação de diferentes frequências (desde intraplanta até entre áreas). A metodologia aqui proposta, utilizando o sistema sintético para o teste de controladores, permite a avaliação da robustez do ESP. Quando incorporada a uma ferramenta comercial, será

possível disponibilizar de forma automática ao engenheiro uma lista priorizada dos ESPs que apresentam desempenho insatisfatório.

A avaliação automática do desempenho frente pequenos distúrbios de todas as máquinas do sistema através do sistema sintético é de utilidade para os estudos práticos de sistemas de grande porte.

No Capítulo IV foi mostrada a influência da posição dos zeros de funções de transferência de interesse no desempenho dinâmico dos sistemas. A influência do tipo de sinal utilizado na malha de estabilização e a estrutura do controlador foram avaliados através da posição dos zeros de funções de transferência de interesse. Estas análises contribuem para o melhor entendimento do comportamento dinâmico de ESPs. Foi demonstrada a relação entre a posição dos zeros e o desempenho dos ESPs, salientando os possíveis impactos adversos.

Foram analisados alguns aspectos da estrutura do ESP derivado de integral de potência acelerante. Esta estrutura é a mais utilizada no mundo. O uso do filtro passa-baixa de quarta ordem com rastreador de rampa com constante de tempo $T = 0,1$ s é altamente recomendado, pois resulta em redução considerável do transitório de potência reativa. Os resultados indicam que a constante de tempo T deste filtro não deve ser igual ou superior a 0,3 s, por ocasionar variações transitórias de potência reativa e tensão terminal intoleráveis. O ESP com rastreador de rampa mostrou-se eficiente e robusto frente diversas condições operativas da usina, tanto transitórias como de regime permanente. As simulações dos modelos não lineares no domínio do tempo comprovaram as conclusões obtidas na análise linear realizada inicialmente.

V.2 Desenvolvimentos Futuros

São sugeridos como alguns possíveis trabalhos futuros:

➤ Ajuste Coordenado

Ajuste coordenado de outros equipamentos, como dispositivos FACTS;

Coordenação do ajuste da fase do ESP;

Utilização conjunta com o sistema sintético no projeto de ESPs.

➤ Sistema Sintético para Avaliação de Robustez

Realizar análises de diversas máquinas do sistema brasileiro, incluindo o modelo correspondente do RAT;

Desenvolver módulo de automação do teste, para fornecer lista de equipamentos com desempenho inadequado;

Avaliar a possibilidade de inclusão de outra barra no sistema, com a finalidade de sintetizar outro modo de oscilação eletromecânica.

➤ Impactos Adversos Causados por ESPs

Verificação da importância da presença de filtros de quarta ordem para redução do ruído em altas frequências do sinal de velocidade;

Avaliação da influência dos modos intraplanta, (verificação de possível cancelamento dos modos intraplanta em V_{Alta} e Q_{Usina}).

Referências Bibliográficas

- [Abdalla 1983] O. H. Abdalla, S. A. Hassan and N. T. Tweig, “Coordinated Stabilization of a Multi-machine Power System”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Los Angeles, USA, 1983.
- [Abe 1983] S. Abe and A. Doi, “A New Power System Stabilizer Synthesis in Multi-machine Power Systems”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Los Angeles, USA, 1983.
- [Araujo 2000] P. B. Araujo and L. C. Zanetta Jr., “Pole Placement Method in Power System with SVC Using the Jacobian Matrix”. In: *Proceedings of the VII SEPOPE*, Curitiba, Brasil, Maio 2000.
- [Barbosa 1999] A. A. Barbosa, *Utilização de Ferramentas Lineares na Análise e Controle do Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Grande Porte*, Tese de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 1999.
- [Bazanella 1995] A. S. Bazanella, A. Fischman, A. S. Silva, J. M. Dion and L. Dugard, “Coordinated Robust Controllers in Power Systems”, In: *Proceedings of the IEEE Power Tech*, Stockholm, Sweden, 1995.
- [Bazanella 1997] A. S. Bazanella, A. Fischman, A. S. Silva, J. M. Dion and L. Dugard, “Application of Linear Matrix Inequalities Techniques to the Design of Robust Coordinated Controllers for Power Systems”, In: *Proceedings of the IFAC 3rd Conference on System Structure and Control*, Bucharest, Hungary, 1997.
- [Bérubé 1999] G. R. Bérubé, L. M. Hajagos, R. Beaulieu, “Practical Utility Experience with Applications of Power System Stabilizers”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Edmonton, Canada, 1999.
- [Bomfim 1997] A. L. B. Bomfim, G. N. Taranto and D. M. Falcão, “Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms”, In: *Proceedings of the ISAP*, Seoul, South Korea, 1997.

- [Bomfim 1999] A. L. B. Bomfim, G. N. Taranto, D. M. Falcão and N. Martins, “Automated Design of Multiple Damping Controllers Using Genetic Algorithms”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, New York USA, 1999.
- [Bomfim 2000a] A. L. B. Bomfim, G. N. Taranto and D. M. Falcão, “Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 163-176, 2000.
- [Bomfim 2000b] A. L. B. Bomfim, *Ajuste de Estabilizadores de Sistema de Potência Usando Algoritmos Genéticos*, Tese de Doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2000.
- [Borkowska 1976] B. Borkowska, “Application of the Pseudo-Inverse to State Estimation”, *IEE Conference Publication*, no. 140, London, 1976.
- [Boukarim 2000] G. E. Boukarim, S. Wang, J. H. Chow, G. N. Taranto and N. Martins, “A Comparison of Classical, Robust and Decentralized Control Designs for Multiple Power Systems Stabilizers”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1287-1292, 2000.
- [Bourlès 1997] H. Bourlès, S. Peres, T. Margotin and M. P. Houry, “Analysis and Design of a Robust Coordinated AVR/PSS”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. Xx, no. xx, pp. xx-xx, 1997.
- [Brogan 1991] W. L. Brogan, *Modern Control Theory*. Prentice Hall, 1991.
- [Byerly 1978] R. T. Byerly, D. E. Sherman and R. J. Bernnon, “Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems”, *EPRI Report EL-726*, 1978.
- [CEPEL 2002a] CEPEL, *Programa de Análise de Estabilidade Frente Pequenas Perturbações / PacDyn – Manual do Usuário*, Versão 5.2. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- [CEPEL 2002b] CEPEL, *Programa de Análise de Redes / ANAREDE – Manual do Usuário*, Versão 08-Jan/02. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- [CEPEL 2002c] CEPEL, *Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos / ANATEM – Manual do Usuário*, Versão 09-Jan/02. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- [CEPEL 2002d] CEPEL, *Programa de Visualização de Gráficos / PlotCEPEL – Manual do Usuário*, Versão 3.3. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

- [Chen 1987a] C. L. Chen and Y. Y. Hsu, “Coordinated Synthesis of Multi-machine Power System Stabilizer Using Na Efficient Decentralized Modal Control (DMC) Algorithm”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 543-551, 1987.
- [Chen 1987b] C. L. Chen and Y. Y. Hsu, “Design of Decentralised Stabilizers in Multi-machine Power Systems”, *IEE Proceedings*, vol. 134, Pt. C, no. 4, pp. 289-290, 1987.
- [Chow 1988] J. H. Chow and J. J. Sanchez-Gasca, “Pole Placement Designs of Power System Stabilizers”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Portland, USA, 1988.
- [CIGRE 1996] *CIGRE Task Force 38.01.17 – Analysis and Control of Power System Oscillations*. CIGRE Technical Brochure no. 111, Paris, August 1996.
- [CIGRE 2000] *CIGRE Task Force 38.02.16 – Impact of Interactions Among Power System Controls*. CIGRE Technical Brochure no. 166, Paris, August 2000.
- [Costa 1997] A. S. Costa, F. D. Freitas and A. S. Silva, “Design of Decentralized Controllers for Large Power Systems Considering Sparsity”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 144-152, 1997.
- [Czuba 1985] J. S. Czuba, L. N. Hannett and J. R. Willis, “Implementation of Power System Stabilizer at The Ludington Pumped Storage Plant”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Vancouver, Canada, 1985.
- [D’Azzo 1966] J. J. D’Azzo and C. H. Houpis, *Feedback Control System Analysis & Synthesis*. 2 ed. USA, MzGraw Hill Inc., 1966.
- [De Mello 1969] F. P. De Mello and C. Concordia, “Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 88, pp. 316-329, 1969.
- [De Mello 1978] F. P. De Mello, L. N. Hannett and J. M. Undrill, “Practical Approaches to Supplementary Stabilizing from Accelerating Power”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 97, no. 5, pp. 1515-1522, 1978.
- [De Mello 1982] F. P. De Mello, L. N. Hannett, D. W. Parkinson and J. S. Czuba, “A Power System Stabilizer Design Using Digital Control”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, New York, USA, 1982.

- [Doi 1984] A. Doi and S. Abe, “Coordinated Synthesis of Power System Stabilizers in Multi-machine Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 103, no. 6, pp. 1473-1479, 1984.
- [Doraiswami 1981] R. Doraiswami, J. R. B. de Souza e J. M. Soares, “Um Algoritmo Computacional Sistemático para a Determinação de Parâmetros dos Estabilizadores do Sistema Sul”, In: *Anais do VI SNPTEE*, Balneário Camboriú, Brasil, 1981.
- [Elangovan 1987] S. Elangovan and C. M. Lim, “Efficient Pole-Assignment Method for Designing Stabilizers in Multi-machine Power Systems”. In: *IEE Proceedings*, vol. 134, no. 6, pp. 383-384, 1987.
- [Falcão 1997] D. M. Falcão, A. L. B. Bomfim, C. R. R. Dornellas and G. N. Taranto, “Genetic Algorithms in Power System Optimization”, *EletroEvolução*, no. 1, ed. 1, 1997.
- [Farmer 1982] R. G. Farmer and B. L. Agrawal, “State of The Art Technique for Power System Stabilizer Tuning”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, San Francisco, USA, 1982.
- [Fleming 1981] R. J. Fleming, M. A. Mohan and K. Parvatisam, “Selection of Parameters of Stabilizers in Multi-machine Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 5, pp. 2329-2333, 1981.
- [Freitas 1995] F. D. Freitas, A. S. Silva and A. J. A. Simões Costa, “Coordinated Setting of Stabilizers For Synchronous Generators and FACTS Devices In Power Systems”. In: *Proceedings of the CIGRE Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems*, Tokyo, Japan, 1995.
- [Gibbard 1988] M. J. Gibbard, “Coordinated Design of Multi-machine Power System Stabilizers Based on Damping Torque Concepts”, *IEE Proceedings*, vol. 135, Pt. C, no. 4, pp. 276-284, 1988.
- [Gibbard 1991] M. J. Gibbard, “Robust Design of Fixed-Parameter Power Stabilizers Over a Wide Range of Operating Conditions”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 794-800, 1991.
- [Gibbard 1999] M. J. Gibbard, D. J. Vowles and P. Pourbeik, “Interactions between, and Effectiveness of, Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in Multi-machine Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 748-755, 1999.

- [Gooi 1981] H. B. Gooi, E. F. Hill, M. A. Mobarek, D. H. Thorne and T. H. Lee, “Coordinated Multi-machine Stabilizer Settings without Eigenvalue Drift”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, USA, 1981.
- [Golub 1989] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 2nd Edition, The John Hopkins University Press, USA, 1989.
- [Gomes 1998] S. Gomes Jr., N. Martins e H. J. C. P. Pinto, “Utilização do Método de Nyquist para Estabilização de Sistemas de Potência Envolvendo Alocação de Par de Pólos Complexos”, In: *Anais do XII CBA*, Uberlândia, Brasil, 1998.
- [Hauer 1995] J. F. Hauer, “BPA Experience in the Measurement of Power System Dynamics”, In: *Inter-Area Oscillations in Power Systems*, IEEE Publication 95 TP 101, 1995.
- [IEEE 1981] *Power System Stabilization via Excitation Control*, IEEE Publication 81 EH 0175-0 PWR, 1981.
- [IEEE 1989] *Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, IEEE Publication 90 TH 029203 PWR no.4, 1989.
- [IEEE 1995] *Inter-Area Oscillations in Power Systems*, IEEE Publication 95 TP 101, 1995.
- [Kundur 1988] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers and M. S. Zywno, “Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Portland, USA, 1988.
- [Kundur 1994] P. Kundur, *Power System Control and Stability*. 1 ed. USA, EPRI-Power System Engineering Series McGraw-Hill Inc., 1994.
- [Kuo 1999] B. Kuo, *Automatic Control Systems*. 7 ed. USA, Wiley, John & Sons Inc., 1999.
- [Larsen 1981a] E. V. Larsen and D. A. Swann, “Applying Power System Stabilizers, Part I: General Concepts”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 6, pp. 3017-3024, 1981.
- [Larsen 1981b] E. V. Larsen and D. A. Swann, “Applying Power System Stabilizers, Part II”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 6, pp. 3025-3033, 1981.

- [Larsen 1981c] E. V. Larsen and D. A. Swann, “Applying Power System Stabilizers, Part III: Practical Considerations”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 6, pp. 3034-3046, 1981.
- [Lawson 1974] C. L. Lawson and R. J. Hanson, *Solving Least Squares Problems*, 1st ed. USA, Prentice-Hall Inc., 1974.
- [Lee 1981] D. C. Lee, R. E. Beaulieu and J. R. R. Service, “A Power System Stabilizer Using Speed and Electrical Power Inputs – Design and Field Experience”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 9, pp. 4151-4167, September 1981.
- [Lefebvre 1982] S. Lefebvre, “Tuning of Stabilizers in Multi-machine Power Systems”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, San Francisco, USA, 1982.
- [Martins 1986] N. Martins, “Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small Signal Stability Studies”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 217-226, 1986.
- [Martins 1989] N. Martins and L. T. G. Lima, “Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small Signal Electromechanical Stability Problems”, *IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, Publication 90 TH 029203 PWR no.4, 1989.
- [Martins 1990] N. Martins and L. T. G. Lima, “Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static Var Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1455-1469, 1990.
- [Martins 1992] N. Martins, H. J. C. P. Pinto and L. T. G. Lima, “Efficient Methods for Finding Transfer Function Zeros of Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 1350-1361, 1992.
- [Martins 1999] N. Martins, A. A. Barbosa, J. C. R. Ferraz, *et al*, “Retuning Stabilizers for the North-South Brazilian Interconnection”. In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Edmonton, Canada, 1999.
- [Mathworks 2000] *Matlab User’s Manual*. Mathworks Inc., USA, 2000.

- [Monticelli 1983] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. 1ª ed. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher Ltda., 1983.
- [Murdoch 1998a] A. Murdoch, S. Venkataraman, R. A. Lawson and W. R. Pearson, “Integral of Accelerating Power Type PSS. Part I – Theory, Design and Tuning Methodology”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, Tampa, USA, 1998.
- [Murdoch 1998b] A. Murdoch, S. Venkataraman, R. A. Lawson and W. R. Pearson, “Integral of Accelerating Power Type PSS. Part II – Field Testing and Performance Verification”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, Tampa, USA, 1998.
- [Murdoch 1999] A. Murdoch, “Practical Application Considerations for Power Systems Stabilizers Controls”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Edmonton, Canada, 1999.
- [Pagola 1989] F. L. Pagola, I. J. Pérez-Arriaga and G. C. Verghese, “On Sensitivities, Residues and Participations: Applications to Oscillatory Stability Analysis and Control”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 278-285, 1989.
- [Paiva 1999] P. M. Paiva, J. M. Soares, N. Zeni Jr and F. H. Pons, “Extensive PSS Use in Large Systems: The Argentinean Case”, Panel Session on System Reliability as Affected by Power System Stabilizers. In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Edmonton, Canada, 1999.
- [Pellanda 1996] P. C. Pellanda, G. M. P. Gomes, L. T. G. Lima e N. Martins, “Controle Robusto Aplicado em Sistemas Elétricos de Potência”, In: *Anais do XI CBA*, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.
- [Penrose 1955] R. Penrose, “A Generalized Inverse for Matrices”, In: *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 51, part 3, pp. 406-413, 1955.
- [Pourbeik 1998] P. Pourbeik and M. J. Gibbard, “Simultaneous Coordination of Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in a Multi-machine Power System for Enhancing Dynamic Performance”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 473-479, 1998.
- [REIVAX 1995] *Relatório de Comissionamento dos Estabilizadores de Sistemas de Potência REIVAX PWX-500 na Usina de Xingó*, REIVAX Automação e Controle, Florianópolis, Brasil, 1995.
- [REIVAX 2002] *Power System Stabilizer REIVAX PWX-600 – Technical Description*, REIVAX Automação e Controle, Florianópolis, Brazil, 2002.

- [Rogers 2000a] G. J. Rogers, “The Application of Power System Stabilizers to a Multi-generator Plant”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 350-355, 2000.
- [Rogers 2000b] G. J. Rogers, *Power System Oscillations*, 1st ed. USA, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [Sanchez-Gasca 1989] J. J. Sanchez-Gasca, N. W. Miller, A. Kurita and S. Horiuchi, “Multivariable Control for Damping Interarea Oscillations in Power Systems”, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 28-32, 1989.
- [Sanchez-Gasca 1998] J. J. Sanchez-Gasca, “Coordinated Control of Two FACTS Devices for Damping Interarea Oscillations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 428-434, 1998.
- [Sandell 1978] N. R. Sandell Jr., P. Varaiya, M. Athans and M. G. Safonov, “Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale Systems”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 23, no. 2, pp. 108-128, 1978.
- [Seydel 1988] R. Seydel, *From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis*. 2 ed. New York, NY, Elsevier Science Publishing Co., 1988.
- [Silva 1992] A. S. Silva, F. D. Freitas e H. E. Peña, “Ajuste Coordenado de Controladores de Geradores Síncronos e Compensadores Estáticos de Reativo em Sistemas de Potência”, In: *Anais do IX CBA*, Vitória, Brasil, 1992.
- [Soares 1981] J. M. C. Soares, F. H. Pons, F. F. Figueiredo e P. M. P. de Paiva “Aplicação de Sinais Adicionais Estabilizadores em Usinas Hidrelétricas”, In: *Anais do VI SNPTEE*, Balneário Camboriú, Brasil, 1981.
- [Soares 1985] J. M. C. Soares and N. Zeni Jr., “Power System Stabilizers for Hydrogenerators: Analysis, Comparison and Field Implementation”, In: *Proceedings of the I SEPOPE*, Rio de Janeiro, Brazil, 1985.
- [Soares 1987] J. M. C. Soares, F. H. Pons, F. Reichert e D. O. Reis “Projeto e Ensaio de Um Sinal Adicional Estabilizador de Uso Geral”, In: *Anais do IX SNPTEE*, Belo Horizonte, Brasil, 1987.
- [Soares 1995] J. M. C. Soares, A. D. Aroni e F. H. Pons, “Estabilizadores de Sistemas de Potência Derivados da Potência Acelerante: Experiência no Sistema Colombiano”, In: *Anais do XIII SNPTEE*, Florianópolis, Brasil, 1995.

- [Soares 1996] J. M. C. Soares, “Operational Aspects of The Actuation of Power System Stabilizers: Coordination with Protection and Other Controllers”, In: *Proceedings of the V SEPOPE*, Recife, Brasil, 1996.
- [Soares 1997] J. M. C. Soares, N. Zeni Jr. E F. C. Neves, “Implantação de Estabilizadores de Sistemas de Potência na Argentina: Usinas Dotadas de Controle Conjunto de Ação Rápida”, In: *Anais do XIV SNPTEE*, Belém, Brasil, 1997.
- [Stroev 1995] V. A. Stroev, I. S. Rokotian and M. M. M. El-Shahat, “The Algorithms for Alleviating Line Overloads Using Pseudo-Inverse Method”. In: *Proceedings of the IEEE/KTH Power Tech Conference*, Stockholm, Sweden, pp. 458-461, 1995.
- [Taranto 1994] G. N. Taranto, J. H. Chow and H. A. Othman, “Robust Decentralized Control Design for Damping Power System Oscillations”, In: *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, USA, 1994.
- [Taranto 1995] G. N. Taranto, J. H. Chow and H. A. Othman, “Robust Redesign of Power System Damping Controllers”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 290-298, 1995.
- [Taranto 1997] G. N. Taranto, J. K. Shiau, J. H. Chow and H. A. Othman, “A Robust Decentralized Design for Multiple FACTS Damping Controllers”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 1, pp. 61-67, 1997.
- [Taranto 1998a] G. N. Taranto and D. M. Falcão, “Robust Decentralized Control Design Using Genetic Algorithms in Power System Damping Control”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 1, pp. 1-6, 1998.
- [Taranto 1998b] G. N. Taranto, A. L. B. Bomfim, D. M. Falcão, N. Martins, S. Gomes Jr., P. E. M. Quintão, “Combined Use of Analytic and Genetic Algorithms for Robust Coordinated Tuning of Power System Damping Controllers”, In: *Bulk Power System Dynamic and Control*, Santorini, Greece, 1998.
- [Van de Wal 2001] M. Van de Wal and B. de Jager, “A Review of Methods for Input/Output Selection”, *Automatica*, no. 37, pp. 487-510, 2001.
- [Varricchio 1999] S. L. Varricchio and N. Martins, “Applying Sensitivity Analysis to Improve Harmonic Voltage Performance”. In: *Proceedings of the VII SEPOPE*, Curitiba, 1999.

- [Vowles 1997] D. Vowles, P. Pourbeik and M. J. Gibbard, “Contribution of Individual PSSs and FACTS Device Stabilizers To the Damping of Rotor Modes of Oscillation”. In: *Proceedings of the International Power Engineering Conference – IPEC*, Singapore, pp. 196-201, 1997.
- [Yoshimura 1999] K. Yoshimura and N. Uchida, “Multi Input PSS Optimization Method For Practical Use by Considering Several Operating Conditions”, In: *Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting*, New York, USA 1999.
- [Yu 1986] Y. N. Yu, C. M. Lim and S. Elangovan, “Direct Power System Stabilizer Design for Optimal Performance of Multi-machine Systems”, In: *Proceedings of the IFAC Power Systems and Power Plant Control*, Beijing, pp. 107-112, 1986.
- [Yu 1989] Y. N. Yu and Q. H. Li, “Pole Placement Power System Stabilizers Design of An Unstable Nine-Machine System”, In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Long Beach, USA, 1989.
- [Zeni 1992] N. Zeni Jr., J. M. Soares, F. H. Pons, P. M. Paiva, et al, “Projeto e Implantação de Estabilizador de Sistema de Potência Derivado da Potência de Aceleração na Usina de Itaúba”, In: *Anais do III SEPOPE*, Belo Horizonte, Brasil, 1992.
- [Zeni 1999] N. Zeni Jr., J. M. Soares, F. H. Pons, P. M. Paiva, et al, “Implantación de Estabilizadores de Sistema de Potencia en La Argentina”, In: *Proceedings of ANDESCON*, Venezuela, 1999.
- [Zeni 2000] N. Zeni Jr., J. M. Soares, W. Seal, F. C. Neves e D. Kamers, “Estabilizador de Sistema de Potência Programável pelo Usuário”. In: *Anais do VII SEPOPE*, Curitiba, Brasil, Maio 2000.

Apêndice I

AI.1 Dados para Cálculo do Fluxo de Potência

A seguir, os dados do sistema Teste I em formato ANAREDE [CEPEL 2002b].

DBAR

```
(No) O TB( nome )G( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc)( Pl)( Ql)( Sh)(A(VF)
1 1 FOZ DO AREIA 103024.51658.-412.-999999999 2405.-467.179.2 11000
2 1 SALTO SANTI 103027.21332.-200.-999999999 692.3-184.149.1 11000
3 1 SALTO SEGRE 102926.61540.-447.-999999999 688.2-235.114.2 11000
4 1 ITAIPU 103948.56500.1958.-999999999 62.6 24.3 36.8 21000
5 BARRA-5 99821.2 845.8 -9.2 33. 11000
6 BARRA-6 98921.4 -4.9 79.82142. 31000
7 2 SUDESTE 966 0.-3164952.3-999999999 2884.-196. 42. 31000
```

9999

DLIN

```
(De) O (Pa)NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)( Bc)(Cn)(Ce)Ns
1 3 1 .03 .38
2 3 1 .05 .76
4 6 1 .029 .734
5 1 1 .19 2.45
5 2 1 .15 2.25
6 5 1 .39
6 7 1 .04 .57
```

9999

DARE

```
(Ar) (Xchg) ( Identificacao da area ) (Xmin) (Xmax)
1 0. * Sul *
```

```
2 0. * ITAIPU C.A. *
```

```
3 0. * Sul - Sudeste *
```

9999

AI.2 Dados para Estudos de Transitórios Eletromecânicos Frente Pequenas Perturbações

A seguir, os dados sistema Teste I em formato PacDyn [CEPEL 2002a].

DGEN

```
#(#1)noR#(base)(-HH-)(-X'd)(-X'q)(-Xd-)(-Xq-)(-RR-)(T'd0)(T'q0)(Xp-)(-Sat-)(-D-)
#(#1)no (-X'd)(-X'q)(T"d0)(T"q0)(-Xl-)(-A--)(-B--)(-C--)(-Xt-)
  1 0 41900.0 4.500 0.300 0.000 0.850 0.7000.0000 5.000 0.0000.000 0.000
  1 0 0.200 0.200 0.053 0.123
  2 0 41400.0 4.500 0.300 0.000 0.850 0.7000.0000 5.000 0.0000.000 0.000
  2 0 0.200 0.200 0.053 0.123
  3 0 41944.0 4.500 0.300 0.000 0.880 0.6900.0000 5.000 0.0000.000 0.000
  3 0 0.200 0.200 0.060 0.090
  4 0 46633.0 5.070 0.300 0.000 0.900 0.6800.0000 7.600 0.0000.000 0.000
  4 0 0.240 0.270 0.090 0.190
  7 0 46000.0 5.000 0.300 0.000 1.000 0.7000.0000 8.000 0.0000.000 0.000 0.01
  7 0 0.250 0.250 0.090 0.200
```

-999

DAVR

```
#bus no(-Ka-)(-Ta-)(-Kf-)(-Tf-)(-Tn-)(-Td-)(-Ke-)(-Te-)(Vsat)(Vsmx)(Vmax)(Vc)M
  1 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 13
  2 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 23
  3 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 33
  4 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 43
  7 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 73
```

-999

Apêndice II

AII.1 Dados para Cálculo do Fluxo de Potência

A seguir, os dados sistema Teste II em formato ANAREDE [CEPEL 2002b].

DBAR

(No)	O	TB	(nome)	G(V)	(A)	(Pg)	(Qg)	(Qn)	(Qm)	(Bc)	(Pl)	(Ql)	(Sh)	(A(Vf)
1			bus #1	1048-9.5										11000
2			bus #2	1049-6.9										11000
3			bus #3	1031-9.8						322.	2.4			11000
4			bus #4	1004-11.						500.	184.			11000
5			bus #5	1005-9.4										11000
6			bus #6	1007-8.7										11000
7			bus #7	997-11.						233.8	84.			11000
8			bus #8	996-11.						522.	176.			11000
9			bus #9	1028-11.										11000
10			bus#10	1017-6.3										11000
11			bus#11	1013-7.1										11000
12			bus#12	1000-7.1						8.5	88.			11000
13			bus#13	1014 -7.										11000
14			bus#14	1012-8.7										11000
15			bus#15	1016-9.1						320.	153.			11000
16			bus#16	1032-7.7						329.4	32.3			11000
17			bus#17	1034-8.7										11000
18			bus#18	1031-9.5						158.	30.			11000
19			bus#19	1050 -3.										11000
20			bus#20	991-4.5						680.	103.			11000
21			bus#21	1032-5.3						274.	115.			11000
22			bus#22	1050-.82										11000
23			bus#23	1045 -1.						247.5	84.6			11000
24			bus#24	1038-7.6						308.6	-92.2			11000
25			bus#25	1058-5.5						224.	47.2			11000
26			bus#26	1052-6.8						139.	17.			11000
27			bus#27	1038-8.8						281.	75.5			11000
28			bus#28	1051-3.3						206.	27.6			11000
29			bus#29	1050-.54						283.5	26.9			11000
30	1		bus#30	1048-4.5	250.146.3	-999999999								11000
31	1		bus#31	982.115573.2207.1	-999999999					9.2	4.6			11000
32	1		bus#32	9831.73	650.205.3	-999999999								11000

33	1 bus#33	9972.17	632.108.6-999999999	11000
34	1 bus#34	1012.734	508.166.5-999999999	11000
35	1 bus#35	10494.14	650.209.3-999999999	11000
36	1 bus#36	10646.83	560.102.1-999999999	11000
37	1 bus#37	10281.24	540. .411-999999999	11000
38	1 bus#38	10276.52	830.23.02-999999999	11000
39	2 bus#39	1030-11.1000.87.43-999999999	1104. 250.	11000

9999

DLIN

(De) O (Pa)NcEP (R%)(X%)(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc)(Cn)(Ce)Ns

1	2 1	.35	4.11	69.87															
1	39 1	.1	2.5	75.															
2	3 1	.13	1.51	25.72															
2	25 1	.7	.86	14.6															
2	30 1		1.81		1.025														
3	4 1	.13	2.13	22.14															
3	18 1	.11	1.33	21.38															
4	5 1	.08	1.28	13.42															
4	14 1	.08	1.29	13.82															
5	6 1	.02	.26	4.34															
5	8 1	.08	1.12	14.76															
6	7 1	.06	.92	11.3															
6	11 1	.07	.82	13.89															
6	31 1		2.5		1.07														
7	8 1	.04	.46	7.8															
8	9 1	.23	3.63	38.04															
9	39 1	.1	2.5	120.															
10	11 1	.04	.43	7.29															
10	13 1	.04	.43	7.29															
10	32 1		2.		1.07														
12	11 1	.16	4.35		1.006														
12	13 1	.16	4.35		1.006														
13	14 1	.09	1.01	17.23															
14	15 1	.18	2.17	36.6															
15	16 1	.09	.94	17.1															
16	17 1	.07	.89	13.42															
16	19 1	.16	1.95	30.4															
16	21 1	.08	1.35	25.48															
16	24 1	.03	.59	6.8															
17	18 1	.07	.82	13.19															
17	27 1	.13	1.73	32.16															
19	20 1	.07	1.38		1.06														
19	33 1	.07	1.42		1.07														
20	34 1	.09	1.8		1.009														
21	22 1	.08	1.4	25.65															
22	23 1	.06	.96	18.46															
22	35 1		1.43		1.025														
23	24 1	.22	3.5	36.1															
23	36 1	.05	2.72																
25	26 1	.32	3.23	51.3															

25	37	1	.06	2.32	1.025
26	27	1	.14	1.47	23.96
26	28	1	.43	4.74	78.02
26	29	1	.57	6.25	102.9
28	29	1	.14	1.51	24.9
29	38	1	.08	1.56	1.025
9999					

AII.2 Dados para Estudos de Transitórios Eletromecânicos Frente Pequenas Perturbações

A seguir, os dados sistema Teste II em formato PacDyn [CEPEL 2002a].

```

DGEN
#(#1)noRM(Base)(-HH-)(-X'd)(-X'q)(-Xd-)(-Xq-)(-Ra-)(T'd0)(T'q0)(Xp-)(-Sat-)(-D-)
#(#1)no  (-X"d)(-X"q)(T"d0)(T"q0)(-Xl-)(-A--)(-B--)(-C--)(-Xt-)
  30 0 21000.0 4.200 0.310 0.000 1.000 0.6900.001410.200 0.0000.125 0.000 4.0
  31 0 31000.0 3.030 0.697 1.700 2.950 2.8200.0270 6.560 1.5000.350 0.000 9.75
  32 0 31000.0 3.580 0.531 0.876 2.495 2.370.00386 5.700 1.5000.304 0.00010.00
  33 0 31000.0 2.860 0.436 1.660 2.620 2.580.00222 5.690 1.5000.295 0.00010.00
  34 0 31000.0 2.600 1.320 1.660 6.700 6.2000.0014 5.400 0.4400.540 0.000 3.00
  35 0 31000.0 3.480 0.500 0.814 2.540 2.4100.0615 7.300 0.4000.224 0.00010.00
  36 0 31000.0 2.640 0.490 1.860 2.950 2.920.00268 5.660 1.5000.322 0.000 8.00
  37 0 31000.0 2.430 0.570 0.911 2.900 2.800.00686 6.700 0.4100.280 0.000 9.00
  38 0 31000.0 3.450 0.570 0.587 2.106 2.0500.0030 4.790 1.9600.298 0.00014.00
  39
-999
DUDC
# MAQUINA 30 RAT
#(No) ( NOME )
  21 MAQ  30
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
  7 OUT  Efd  EFD  30
  1 IN   VREF Vref 30
  2 IN   VB   Vt   30
  8 IN   VPSS Vpss 30
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
  3 SUM  -Vt   X3   1.0
           Vref   1.0
           Vpss   1.0
          -X6   1.0
  4 LDLG X3   X4   #Ka   0.0   1.0   #Ta
  5 LDLG X4   Efd  1.0   0.0   #Ke   #Te
  6 LDLG Efd  X6   0.0   #Kf   1.0   #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
  DPAR           #Ka   5.00
  DPAR           #Ta   0.06
  DPAR           #Ke   1.00
  DPAR           #Te   0.25
  DPAR           #Kf   0.04
  STOP  DPAR           #Tf   1.00
# MAQUINA 31 RAT
#(No) ( NOME )

```

```

22 MAQ 31
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    7 OUT  Efd  EFD  31
    1 IN   VREF Vref 31
    2 IN   VB   Vt   31
    8 IN   VPSS Vpss 31
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    3 SUM  -Vt   X3   1.0
           Vref   1.0
           Vpss   1.0
           -X6   1.0
    4 LDLG X3   X4   #Ka   0.0   1.0   #Ta
    5 LDLG X4   Efd  1.0   0.0   #Ke   #Te
    6 LDLG Efd  X6   0.0   #Kf   1.0   #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    DPAR           #Ka   6.20
    DPAR           #Ta   0.05
    DPAR           #Ke   1.00
    DPAR           #Te   0.41
    DPAR           #Kf   0.057
STOP   DPAR           #Tf   0.50
# MAQUINA 32 RAT
#(No) ( NOME )
    23 MAQ 32
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    7 OUT  Efd  EFD  32
    1 IN   VREF Vref 32
    2 IN   VB   Vt   32
    8 IN   VPSS Vpss 32
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    3 SUM  -Vt   X3   1.0
           Vref   1.0
           Vpss   1.0
           -X6   1.0
    4 LDLG X3   X4   #Ka   0.0   1.0   #Ta
    5 LDLG X4   Efd  1.0   0.0   #Ke   #Te
    6 LDLG Efd  X6   0.0   #Kf   1.0   #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    DPAR           #Ka   5.00
    DPAR           #Ta   0.06
    DPAR           #Ke   1.00
    DPAR           #Te   0.50
    DPAR           #Kf   0.08
STOP   DPAR           #Tf   1.00
# MAQUINA 33 RAT
#(No) ( NOME )
    24 MAQ 33

```

```

#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    7 OUT   Efd  EFD  33
    1 IN    VREF Vref 33
    2 IN    VB   Vt   33
    8 IN    VPSS Vpss 33
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    3 SUM  -Vt   X3   1.0
           Vref   1.0
           Vpss   1.0
          -X6   1.0
    4 LDLG X3   X4   #Ka   0.0   1.0   #Ta
    5 LDLG X4   Efd  1.0   0.0   #Ke   #Te
    6 LDLG Efd  X6   0.0   #Kf   1.0   #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    DPAR           #Ka   5.00
    DPAR           #Ta   0.06
    DPAR           #Ke   1.00
    DPAR           #Te   0.50
    DPAR           #Kf   0.08
    STOP  DPAR           #Tf   1.00
# MAQUINA 34 RAT
#(No) ( NOME )
    25 MAQ  34
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    7 OUT   Efd  EFD  34
    1 IN    VREF Vref 34
    2 IN    VB   Vt   34
    8 IN    VPSS Vpss 34
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    3 SUM  -Vt   X3   1.0
           Vref   1.0
           Vpss   1.0
          -X6   1.0
    4 LDLG X3   X4   #Ka   0.0   1.0   #Ta
    5 LDLG X4   Efd  1.0   0.0   #Ke   #Te
    6 LDLG Efd  X6   0.0   #Kf   1.0   #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
    DPAR           #Ka   40.0
    DPAR           #Ta   0.02
    DPAR           #Ke   1.00
    DPAR           #Te   0.785
    DPAR           #Kf   0.03
    STOP  DPAR           #Tf   1.00
# MAQUINA 35 RAT
#(No) ( NOME )
    26 MAQ  35
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)

```

```

7 OUT  Efd  EFD  35
1 IN   VREF Vref 35
2 IN   VB   Vt   35
8 IN   VPSS Vpss 35
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
3 SUM  -Vt   X3   1.0
      Vref   1.0
      Vpss   1.0
      -X6    1.0
4 LDLG X3   X4   #Ka   0.0   1.0   #Ta
5 LDLG X4   Efd  1.0   0.0   #Ke   #Te
6 LDLG Efd  X6   0.0   #Kf   1.0   #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
      DPAR      #Ka   5.00
      DPAR      #Ta   0.02
      DPAR      #Ke   1.00
      DPAR      #Te   0.471
      DPAR      #Kf   0.0754
STOP   DPAR      #Tf   1.24
# MAQUINA 36 RAT
#(No) ( NOME )
      27 MAQ  36
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
7 OUT  Efd  EFD  36
1 IN   VREF Vref 36
2 IN   VB   Vt   36
8 IN   VPSS Vpss 36
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
3 SUM  -Vt   X3   1.0
      Vref   1.0
      Vpss   1.0
      -X6    1.0
4 LDLG X3   X4   #Ka   0.0   1.0   #Ta
5 LDLG X4   Efd  1.0   0.0   #Ke   #Te
6 LDLG Efd  X6   0.0   #Kf   1.0   #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
      DPAR      #Ka   40.0
      DPAR      #Ta   0.02
      DPAR      #Ke   1.00
      DPAR      #Te   0.73
      DPAR      #Kf   0.03
STOP   DPAR      #Tf   1.00
# MAQUINA 37 RAT
#(No) ( NOME )
      28 MAQ  37
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
7 OUT  Efd  EFD  37

```

```

1 IN      VREF Vref 37
2 IN      VB   Vt   37
8 IN      VPSS Vpss 37
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
3 SUM    -Vt   X3   1.0
          Vref   1.0
          Vpss   1.0
          -X6    1.0
4 LDLG   X3   X4   #Ka    0.0    1.0    #Ta
5 LDLG   X4   Efd  1.0    0.0    #Ke    #Te
6 LDLG   Efd  X6   0.0    #Kf    1.0    #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
      DPAR          #Ka    5.00
      DPAR          #Ta    0.02
      DPAR          #Ke    1.00
      DPAR          #Te    0.528
      DPAR          #Kf    0.0845
STOP   DPAR          #Tf    1.26
# MAQUINA 38 RAT
#(No) ( NOME )
      29 MAQ  38
#NNNN NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
7 OUT    Efd  EFD  38
1 IN      VREF Vref 38
2 IN      VB   Vt   38
8 IN      VPSS Vpss 38
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
3 SUM    -Vt   X3   1.0
          Vref   1.0
          Vpss   1.0
          -X6    1.0
4 LDLG   X3   X4   #Ka    0.0    1.0    #Ta
5 LDLG   X4   Efd  1.0    0.0    #Ke    #Te
6 LDLG   Efd  X6   0.0    #Kf    1.0    #Tf
#.....NDB BLID S(IN) (OU) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---)
      DPAR          #Ka    40.0
      DPAR          #Ta    0.02
      DPAR          #Ke    1.00
      DPAR          #Te    1.40
      DPAR          #Kf    0.03
STOP   DPAR          #Tf    1.00
-999

```

Apêndice III

AIII.1 Dados para Estudos de Transitórios Eletromecânicos Frente Pequenas Perturbações

A seguir, os dados sistema Teste III em formato PacDyn [CEPEL 2002a].

DGEN

```
#(#1)noRM(Base)(-HH-)(-X'd)(-X'q)(-Xd-)(-Xq-)(-Ra-)(T'd0)(T'q0)(Xp-)(-Sat-)(-D-)
#(#1)no (-X'd)(-X"q)(T"d0)(T"q0)(-Xl-)(-A--)(-B--)(-C--)(-Xt-)
  12  6 500.0 9.0850.19010.00000.61820.36990.00005.60000.0000 1.0
  12  0.15670.0000 0.080 0.150
  14  6 300.0 2.5830.43110.00001.31330.86220.00008.13000.0000 1.0
  14  0.38000.0000 0.048 0.140
  16  6 700.0 8.1800.18200.00000.52410.35450.00005.50000.0000 1.0
  16  0.12890.0000 0.085 .2214
  18  6 500.015.7320.07120.00000.20000.14240.00008.30000.0000 1.0
  18  0.05470.0000 0.060 0.030
  20  6 700.0 9.5950.17360.00000.55780.33150.00005.40000.0000 1.0
  20  0.13150.0000 0.080 0.120
  22  6 600.0 1.5930.69590.00001.75161.04810.00005.00000.0000 1.0
  22  0.56570.0000 0.050 0.100
  26  6 200.0 2.5540.35710.00001.03570.71420.00003.50000.0000 1.0
  26  0.23800.0000 0.063 0.036
  30  6 200.0 7.7310.13390.00000.72770.71600.00005.36000.0000 1.0
  30  0.11210.0000 0.042 0.253
  31  6 200.0 4.1280.19470.00001.55621.51250.00007.20000.0000 1.0
  31  0.11560.0000 0.060 0.107
  44  6 200.0 3.2000.22000.00000.90000.52500.00008.00000.0000 1.0
  44  0.10000.0000 0.060 0.200
  48  6 300.0 4.8000.12330.00000.56660.33330.00009.00000.0000 1.0
  48  0.07330.0000 0.060 0.200
  50  6 100.0 4.8000.12330.00000.56660.33330.00009.00000.0000 1.0
  50  0.08330.0000 0.060 0.200
 250  6 100.011.4820.10410.00000.44920.26080.00009.69000.0000 1.0
 250  0.06530.0000 0.054 0.085
 253  6 100.0 6.0990.21830.00000.90030.52820.00007.79000.0000 1.0
 253  0.13420.0000 .0592 0.085
```

300	6	300.014.8080.10200.00000.29620.22000.00007.00000.0000	1.0
300		0.08160.0000 0.065 0.085	
301	6	400.0 4.7530.24820.00000.87050.51780.00003.14000.0000	1.0
301		0.12500.0000 0.060 0.107	
303	6	600.017.6240.08830.00000.33500.22790.00007.00000.0000	1.0
303		0.06700.0000 0.066 0.140	
305	6	400.0 4.2260.32000.00001.07000.68900.00003.26000.0000	1.0
305		0.22700.0000 0.030 0.065	
401	6	100.0 8.4990.14230.00000.45070.26330.00006.44000.0000	1.0
401		0.10390.0000 0.060 0.060	
402	6	100.014.7750.07320.00000.24240.14110.00007.08000.0000	1.0
402		0.05250.0000 .0525 0.060	
404	6	200.0 6.7490.15000.00001.11871.09680.00005.50000.0000	1.0
404		0.07810.0000 .0786 .0783	
500	6	500.011.0500.10400.00000.36400.22800.00006.20000.0000	1.0
500		0.08000.0000 0.043 0.074	
501	6	1900.0 6.5450.18240.00000.51180.41060.00004.28000.0000	1.0
501		0.14710.0000 0.040 0.100	
502	6	1000.0 5.0400.24110.00000.75890.49110.00003.93000.0000	1.0
502		0.16100.0000 0.067 0.137	
506	6	200.0 2.5800.50000.00001.52000.86000.00003.00000.0000	1.0
506		0.28000.0000 0.280 0.080	
507	6	400.010.0000.16850.00000.47700.30900.00006.85000.0000	1.0
507		0.12400.0000 0.030 0.090	
512	6	400.0 0.4902.27780.00005.72223.77780.00005.10000.0000	1.0
512		1.83300.0000 0.060 0.060	
514	6	400.0 5.3900.23030.00000.68430.46080.00004.15000.0000	1.0
514		0.18220.0000 0.022 0.028	
518	6	200.0 4.4800.28570.00000.79020.50000.00004.68000.0000	1.0
518		0.20090.2009 0.040 0.070	
519	6	300.0 5.3100.50000.00001.10000.63000.00007.00000.0000	1.0
519		0.38000.3800 0.031 0.029	
532	6	100.0 5.8500.15040.00000.72400.47600.0000 11.5 0.0000	1.0
532		0.09720.0000 0.120 0.150	
533	6	100.0 5.8500.15040.00000.72400.47600.0000 11.5 0.0000	1.0
533		0.09720.0000 0.120 0.150	
1107	6	100.037.3700.04070.00000.12210.09230.00007.60000.0000	1.0
1107		0.03260.0000 0.090 0.190	
753	6	300.0 3.1200.36990.00001.05990.72000.00004.17000.0000	1.0
753		0.27000.0000 0.060 0.060	
805	6	100.018.6000.07220.00000.21930.16380.00007.92000.0000	1.0
805		0.05780.0000 0.060 0.090	
806	6	300.018.6000.07220.00000.21930.16380.00007.92000.0000	1.0
806		0.05780.0000 0.060 0.090	
811	6	400.0 1.6120.36440.00001.45770.96200.00006.10000.0000	1.0
811		0.25510.0000 0.060 0.090	
907	6	200.0 1.7800.27020.00002.64862.64860.00005.00000.0000	1.0

928	100.	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9283
18	83.00	0.050										183
20	54.00	0.050										203
31	72.00	0.050										313
44	80.00	0.050										443
48	90.00	0.050										483
50	90.00	0.050										503
250	96.90	0.050										2503
253	77.90	0.050										2533
300	70.00	0.050										3003
303	70.00	0.050										3033
401	64.40	0.050										4013
402	70.80	0.050										4023
404	55.00	0.050										4043
500	62.00	0.050										5003
501	42.80	0.050										5013
507	68.50	0.050										5073
514	41.50	0.050										5143
518	46.80	0.050										5183
532	115.	0.050										5323
533	115.	0.050										5333
1107	76.00	0.050										11073
805	79.20	0.050										8053
806	79.20	0.050										8063
909	50.00	0.050										9093
911	48.90	0.050										9113
919	88.10	0.050										9193
1158	9.550	0.050										11583
1162	61.00	0.050										11623
1171	50.00	0.050										11713
1175	73.20	0.050										11753
-999												