



METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS EM MÚLTIPLOS CENÁRIOS

Thiago José Masseran Antunes Parreiras

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Glauco Nery Taranto
Sergio Gomes Junior

Rio de Janeiro
Agosto de 2012

METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS EM MÚLTIPLOS CENÁRIOS

Thiago José Masseran Antunes Parreiras

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph. D.

Prof. Sergio Gomes Junior, D. Sc.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

Prof. João Alberto Passos Filho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2012

Parreiras, Thiago José Masseran Antunes

Metodologia e Implementação Computacional para
Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais em Múltiplos
Cenários/ Thiago José Masseran Antunes Parreiras –
Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XV, 121 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Glauco Nery Taranto

Sergio Gomes Junior

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Elétrica, 2012.

Referencias Bibliográficas: p. 93 - 96

1. Estabilidade a Pequenas Perturbações. 2. Controle do
Amortecimento de Oscilações. 3. Análise Modal. 4.
Análise de Múltiplos Cenários. I. Taranto, Glauco Nery, *et
al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Trabalho dedicado a toda a minha família, por tudo o que ela sempre me proporcionou e por todo apoio que ela sempre deu em todos os momentos da minha vida.

“If i have seen further, that is because i stood on the shoulders of giants.”

Sir Isaac Newton

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela minha existência e por todas as bênçãos e graças que Ele me proporciona, à minha mãe, Maria Helena Masseran, ao meu pai, Nivaldo Antunes Parreiras, a toda minha família que sempre me deu força e apoio em todos os momentos da minha vida e aos meus amigos que me ajudaram durante todo este percurso nesta pós-graduação.

Gostaria de agradecer a todos os professores que participaram da minha formação acadêmica durante este curso de mestrado e ao professor Glauco Nery Taranto do Programa de Engenharia Elétrica (PEE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) que foi o meu orientador neste trabalho.

Agradeço, também, aos pesquisadores Tiago Amaral e Daniel Stevens do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) pela colaboração neste trabalho e ao pesquisador Sergio Gomes Junior do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) que foi meu co-orientador durante o mestrado e que proporcionou todo o suporte para o desenvolvimento do trabalho que foi realizado e descrito nesta dissertação de mestrado.

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

METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS EM MÚLTIPLOS CENÁRIOS

Thiago José Masseran Antunes Parreiras

Agosto/2012

Orientadores: Glauco Nery Taranto
Sergio Gomes Junior

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta utilizações da análise de múltiplos cenários implementada no programa computacional PacDyn, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que é utilizado em análises de estabilidade a pequenos sinais de sistemas elétricos de potência.

São revisados os conceitos básicos de análise modal, que são importantes para a compreensão de estudos de estabilidade a pequenas perturbações. Serão apresentados, de forma resumida, métodos de projetos de estabilizadores que podem utilizar múltiplos cenários de sistemas de potência.

Também serão realizados o estudo de um sistema de pequeno porte e do Sistema Interligado Nacional, com o objetivo de comprovar os benefícios trazidos pela utilização da nova ferramenta desenvolvida no PacDyn.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

METHODOLOGY AND COMPUTATIONAL IMPLEMENTATION FOR
ANALYSIS OF THE SMALL SIGNALS STABILITY IN MULTIPLES SCENARIOS

Thiago José Masseran Antunes Parreiras

August/2012

Advisors: Glauco Nery Taranto
Sergio Gomes Junior

Department: Electrical Engineering

This work presents utilizations of the multiple scenarios analysis implemented in the computational program PacDyn, developed by the Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), which is utilized in analysis of small signals stability of electrical power systems.

It will be made a review of the basic concepts of modal analysis, which are important for the understanding of small signals stability studies. It will be presented, in a simplified way, methods of stabilizers that can use multiple scenarios of power systems.

It will also be made the study of a small electrical system and of the Brazilian Interconnected System, in order to demonstrate the benefits brought by the utilization of the new tool developed in PacDyn.

Índice

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Estabilidade Angular de Sistemas de Potência	2
1.3. Análise de Múltiplos Cenários de Sistemas de Potência	5
1.4. Estrutura da Dissertação	9
1.5. Publicações Geradas por esta Dissertação	10
CAPÍTULO 2	11
Conceitos Básicos de Análise Modal	11
2.1. Modelagem de Sistemas Elétricos de Potência	11
2.2. Autovalores e Autovetores	13
2.3. Mode Shapes e Fatores de Participação	15
2.4. Fatores de Controlabilidade, Observabilidade e Resíduos	18
CAPÍTULO 3	23
Projetos de Estabilizadores	23
3.1. Projeto de Estabilizadores por Diagrama de Nyquist	23
3.1.1. Cálculo da Compensação de Fase	26
3.1.2. Cálculo da Compensação de Módulo	26
3.2. Projetos Coordenados em Múltiplos Cenários	28
3.2.1. Projetos de Estabilizadores por Algoritmo Genético	28
3.2.2. Projetos de Estabilizadores por Ajuste de Ganhos	31
3.2.3. Projetos de Estabilizadores por Realimentação de Estados	35
3.3. Outros Métodos de Projetos de Estabilizadores	36
3.4. Metodologia de Projeto de Estabilizadores no PacDyn	36
CAPÍTULO 4	39
Estudos Realizados	39
4.1. Estudo do Sistema de Pequeno Porte	39
4.1.1. Descrição do Sistema Estudado	39
4.1.2. Análise Modal do Sistema	43
4.1.3. Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência	53
4.2. Estudo do Sistema Interligado Nacional	63
4.2.1. Descrição dos Casos Estudos do SIN	63

4.2.2. Análise Modal do Sistema Interligado Nacional.....	66
4.2.3. Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência.....	70
CAPÍTULO 5	88
Conclusão	88
5.1. Observações.....	88
5.2. Conclusões.....	91
5.3. Trabalhos Futuros	92
Referências	93
Bibliográficas	93
Anexo A.....	97
Interface Gráfica Implementada	97
A.1. Gerenciamento dos Casos.....	97
A.2. Gerenciamento dos Múltiplos Cenários.....	99
A.3. Seleção dos Casos dos Múltiplos Cenários	100
A.4. Ativação da Análise de Múltiplos Cenários	102
A.5. Funcionalidades do PacDyn	103
Anexo B.....	104
Funcionalidades Implementadas	104
B.1. Cálculo de Modos ou Pólos	104
B.2. Cálculo de Zeros	106
B.3. Cálculo de Sensibilidades	108
B.4. Cálculo de Root Locus.....	110
B.5. Cálculo da Resposta no Tempo.....	112
B.6. Cálculo da Resposta na Frequência	114
Anexo C.....	118
Dados Utilizados nos Estudos	118
C.1. Dados Dinâmicos do Sistema de Pequeno Porte	118
C.2. Dados de Fluxo de Potência do Sistema de Pequeno Porte.....	119
C.3. Dados do Sistema Interligado Nacional.....	120
C.4. Dados do Estabilizador da Usina Barbosa Lima Sobrinho.....	120
Anexo D.....	121
Tempo de Processamento	121
D.1. Tempo de Processamento das Funções Utilizadas	121

Lista de Figuras

Figura 1: Tipos de estabilidade de sistemas elétricos de potência.	3
Figura 2: Tipos de estabilidade angular de sistemas elétricos de potência.	4
Figura 3: Diagrama de blocos e função de transferência de um PSS simples.	5
Figura 4: Algoritmo genérico utilizado na análise de múltiplos cenários.	7
Figura 5: Exemplos esquemáticos de <i>mode shapes</i>	16
Figura 6: Função de transferência utilizada para o projeto de PSSs.	24
Figura 7: Diagrama de Nyquist do sistema sem o PSS, no intervalo $0 \leq \omega < \infty$	24
Figura 8: Diagrama de Nyquist do sistema com o PSS, no intervalo $0 \leq \omega < \infty$	25
Figura 9: Diagrama de Nyquist do sistema com a compensação de fase.	27
Figura 10: Indivíduo utilizado para ajuste da função de transferência PSS(s).	29
Figura 11: Exemplo de cruzamento de indivíduos.	30
Figura 12: Exemplo de mutação de um indivíduo.	31
Figura 13: Função de transferência utilizada para o ajuste dos ganhos dos PSSs.	32
Figura 14: Algoritmo para o projeto de PSSs utilizando múltiplos cenários.	38
Figura 15: Rede elétrica do caso em estudo.	40
Figura 16: Modos calculados, pelo método QR, para os pontos de operação de 2 a 7. .	43
Figura 17: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 2.	44
Figura 18: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 3.	44
Figura 19: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 4.	45
Figura 20: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 5.	45
Figura 21: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 6.	45
Figura 22: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 7.	45
Figura 23: Resíduos do modo selecionado no histórico 2.	47
Figura 24: Resíduos do modo selecionado no histórico 3.	47
Figura 25: Resíduos do modo selecionado no histórico 4.	47
Figura 26: Resíduos do modo selecionado no histórico 5.	48
Figura 27: Resíduos do modo selecionado no histórico 6.	48
Figura 28: Resíduos do modo selecionado no histórico 7.	48
Figura 29: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 2.	49
Figura 30: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 3.	49
Figura 31: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 4.	49
Figura 32: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 5.	50

Figura 33: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 6.....	50
Figura 34: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 7.....	50
Figura 35: Observabilidade do modo selecionado no histórico 2.	50
Figura 36: Observabilidade do modo selecionado no histórico 3.	51
Figura 37: Observabilidade do modo selecionado no histórico 4.	51
Figura 38: Observabilidade do modo selecionado no histórico 5.	51
Figura 39: Observabilidade do modo selecionado no histórico 6.	51
Figura 40: Observabilidade do modo selecionado no histórico 7.	52
Figura 41: Modos calculados pelo método QR para todos os pontos de operação.	53
Figura 42: <i>Mode shape</i> do modo eletromecânico menos amortecido do histórico 11... ..	54
Figura 43: Resíduos do modo eletromecânico menos amortecido do histórico 11.....	55
Figura 44: Diagrama de Nyquist obtido para o histórico 11.	56
Figura 45: Diagrama de Nyquist com PSS obtido para o histórico 11.....	57
Figura 46: Modos calculados para todos os pontos de operação com o PSS projetado.	57
Figura 47: Resposta ao degrau em VREF da máquina Maq3 para o histórico 13.....	58
Figura 48: Resposta ao degrau em BSHU da barra 3 para o histórico 13.	59
Figura 49: Resposta ao degrau em VREF da máquina Maq3 para o histórico 39.....	59
Figura 50: Resposta ao degrau em BSHU da barra 3 para o histórico 39.	59
Figura 51: Resposta da tensão terminal da máquina Maq3 ao degrau em VREF.	60
Figura 52: Resposta da frequência da máquina Maq3 ao degrau em VREF.	60
Figura 53: Resposta da tensão terminal da máquina Maq3 ao degrau em BSHU.....	61
Figura 54: Resposta da frequência da máquina Maq3 ao degrau em BSHU.	61
Figura 55: <i>Root Locus</i> do sistema para o histórico 13.....	62
Figura 56: <i>Root Locus</i> do sistema para o histórico 39.....	62
Figura 57: Modos calculados para os históricos de 1 a 9 pelo método de <i>Rayleigh</i>	66
Figura 58: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 1.	67
Figura 59: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 2.	67
Figura 60: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 3.	68
Figura 61: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 4.	68
Figura 62: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 5.	68
Figura 63: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 6.	68
Figura 64: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 7.	69
Figura 65: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 8.	69
Figura 66: <i>Mode shape</i> do modo selecionado no histórico 9.	69
Figura 67: Modos calculados através do método DPSE com o PSS de Itaipu 60 Hz. ...	71

Figura 68: Modos calculados através do método DPSE sem o PSS de Itaipu 60 Hz.....	72
Figura 69: <i>Mode shape</i> do modo menos amortecido obtido no histórico 6.	73
Figura 70: Resíduos do modo menos amortecido obtido no histórico 6.	74
Figura 71: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 15%.	75
Figura 72: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 15% com PSS.....	76
Figura 73: <i>Root Locus</i> do sistema no histórico 6 com o PSS projetado	76
Figura 74: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 5%.	77
Figura 75: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 5% com PSS.....	78
Figura 76: Diagrama de Nyquist com PSS nos casos em operação normal.....	79
Figura 77: Diagrama de Nyquist com PSS nos casos em contingência.	79
Figura 78: Comparação do RAT de Itaipu 60 Hz com um RAT usual.	80
Figura 79: Modos calculados em todos os pontos de operação com o PSS projetado. ...	80
Figura 80: Resposta ao degrau em VREF de Itaipu 60 Hz para o histórico 6.....	82
Figura 81: Resposta ao degrau em BSHU da barra 1107 para o histórico 6.	82
Figura 82: Resposta ao degrau em VREF de Itaipu 60 Hz para o histórico 24.....	83
Figura 83: Resposta ao degrau em BSHU da barra 1107 para o histórico 24.	83
Figura 84: Resposta da tensão terminal da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em VREF.....	84
Figura 85: Resposta da frequência da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em VREF.....	85
Figura 86: Resposta da tensão terminal da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em BSHU. ...	85
Figura 87: Resposta da frequência da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em BSHU.	86
Figura 88: <i>Root Locus</i> do sistema para o histórico 6.....	86
Figura 89: <i>Root Locus</i> do sistema para o histórico 24.....	87
Figura 90: Opção “ <i>Case Manager</i> ” no menu “ <i>View</i> ” do PacDyn.	97
Figura 91: Botão “ <i>Case Manager</i> ” na janela principal do PacDyn.....	98
Figura 92: Janela “ <i>Case Manager Window</i> ” do programa PacDyn.	98
Figura 93: Opção “ <i>Multiple Scenarios Manager</i> ” no menu “ <i>View</i> ” do PacDyn.....	99
Figura 94: Janela “ <i>Multiple Scenario Manager Window</i> ” do programa PacDyn.....	100
Figura 95: Botão “ <i>Insert Case</i> ” da janela “ <i>Multiple Scenario Manager Window</i> ”	101
Figura 96: Janela “ <i>New Case of a Multiple Scenario</i> ” do programa PacDyn.	101
Figura 97: Botão “ <i>Mult Scen</i> ” na janela principal do PacDyn.	102
Figura 98: Opção “ <i>Multiple Scenarios</i> ” no menu “ <i>Tools</i> ” do PacDyn.....	103
Figura 99: Destaque dos menus de acionamento das funcionalidades do PacDyn.	103
Figura 100: Destaque dos botões de acionamento das funcionalidades do PacDyn. ...	103
Figura 101: Métodos de cálculo de pólos encontrados no menu “ <i>Poles</i> ”.....	104
Figura 102: Exemplo de arquivo de saída do cálculo de pólos.	105

Figura 103: Métodos de cálculo de zeros encontrados no menu “Zeros”	106
Figura 104: Exemplo de arquivo de saída do cálculo de zeros.	107
Figura 105: Tipos de sensibilidades encontrados no menu “Sensitivities”	108
Figura 106: Exemplo de arquivos de saída do cálculo de <i>mode shape</i>	109
Figura 107: Métodos de cálculo de <i>root locus</i> implementados.	110
Figura 108: Exemplo de arquivos de saída do cálculo de <i>root locus</i>	111
Figura 109: Cálculo de resposta no tempo pelo menu “Simulation”	112
Figura 110: Cálculo de resposta no tempo pelo botão “Time Response”	113
Figura 111: Exemplo de arquivos de saída do cálculo da resposta no tempo.	113
Figura 112: Cálculo de resposta na frequência pelo menu “Simulation”	114
Figura 113: Cálculo de resposta na frequência pelo botão “Frequency Response” ...	115
Figura 114: Exemplo de arquivos de saída do cálculo da resposta na frequência.....	115
Figura 115: Diagramas de Nyquist com e sem um PSS projetado para o caso 2.....	116
Figura 116: Diagramas de Nyquist com e sem um PSS projetado para o caso 3.....	117

Lista de Tabelas

Tabela 1: Caso exemplo onde foi utilizado o programa ANATO.....	8
Tabela 2: Novas potências das máquinas do sistema em questão.....	40
Tabela 3: Despachos e cargas do sistema em operação normal.....	41
Tabela 4: Descrição dos casos em contingência.....	41
Tabela 5: Descrição dos casos em contingência - continuação.....	42
Tabela 6: Modos selecionados para serem analisados.....	44
Tabela 7: Ajuste do número de unidades geradoras na usina Maq1.....	46
Tabela 8: Despachos das usinas estudadas.....	64
Tabela 9: Descrição dos casos em contingência.....	64
Tabela 10: Descrição dos casos em contingência – continuação.....	65
Tabela 11: Modos determinados através do método de <i>Rayleigh</i>	67
Tabela 12: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de pólos.....	106
Tabela 13: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de zeros.....	108
Tabela 14: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de sensibilidades.....	110
Tabela 15: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de <i>root locus</i>	112
Tabela 16: Tempos de Processamento – Sistema de Pequeno Porte.....	121
Tabela 17: Tempos de Processamento – Sistema Interligado Nacional.....	121

CAPÍTULO 1

Introdução

Neste capítulo, serão introduzidos, resumidamente, os conceitos básicos da estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e da análise de múltiplos cenários de sistemas de potência. Será realizada uma breve descrição das divisões da estabilidade de sistemas de potência que são a estabilidade de tensão, a estabilidade de frequência e a estabilidade angular de sistemas elétricos. No contexto da estabilidade angular, serão descritos os estudos da estabilidade transitória e da estabilidade a pequenas perturbações e, por fim, será apresentado o conceito da análise de múltiplos cenários de sistemas de potência.

1.1. Motivação

No planejamento da expansão e da operação de sistemas elétricos de potências, são necessários estudos de diversos pontos de operação, de forma a se determinar possíveis problemas que podem ocorrer nesse sistema. Dentre os estudos realizados em sistemas elétricos, pode-se destacar o estudo de fluxo de potência, de curto-circuito e de estabilidade eletromecânica.

O estudo da estabilidade eletromecânica visa a determinação do comportamento dinâmico do sistema em análise, quando ocorre uma perturbação no mesmo. Através deste estudo, é possível identificar problemas de estabilidade no sistema, que podem ser solucionados através do ajuste de controladores deste sistema. Esse ajuste dos controladores deve ser testado em diversos pontos de operação do sistema em análise, de forma que estes controladores tenham um comportamento considerado aceitável em todos os casos estudados, o que garante uma robustez para os projetos desses equipamentos.

Em geral, os programas computacionais utilizados para a análise da estabilidade de sistemas elétricos de potência e projetos de controladores rodam apenas um caso por vez e, se o usuário desejar analisar diversos pontos de operação diferentes, o processo de análise se torna repetitivo, demanda bastante tempo e acaba inviabilizando o estudo.

Um dos programas computacionais utilizados nesse tipo de estudo é o programa PacDyn, desenvolvido pelo CEPEL. Devido a essa dificuldade de se analisar muitos pontos de operação nos estudos de estabilidade, foi implementada, nesta dissertação, a análise de múltiplos cenários no PacDyn, para automatizar os procedimentos de estudo de sistemas elétricos, viabilizando o estudo de muitos casos ou pontos de operação.

O objetivo da implementação da análise de múltiplos cenários no PacDyn é possibilitar uma melhor previsão do sistema que está sendo estudado pelo usuário desse programa, permitindo melhores projetos de controladores (e outros equipamentos) desse sistema, contribuindo para a obtenção de controladores mais robustos.

Neste trabalho, não foi desenvolvido um novo método de projeto de controladores (como os estabilizadores de sistemas de potência) em múltiplos cenários, mas foi implementada uma nova ferramenta no programa PacDyn que viabiliza a análise de múltiplos pontos de operação de um sistema de potência. Esta nova ferramenta, que é a análise de múltiplos cenários no PacDyn, possibilitará que sejam desenvolvidos novos métodos de projeto de controladores em múltiplos cenários em trabalhos futuros.

1.2. Estabilidade Angular de Sistemas de Potência

A estabilidade de um sistema elétrico de potência é o estudo do comportamento do sistema mediante a ocorrência de determinados eventos no mesmo, tais como aberturas de linhas de transmissão e alterações dos *set points* dos sistemas de controles ou controladores do sistema em questão [1].

O estudo da estabilidade de sistemas de potência é dividido nos estudos da estabilidade de tensão, da estabilidade de frequência e da estabilidade angular, conforme a Figura 1 [2].

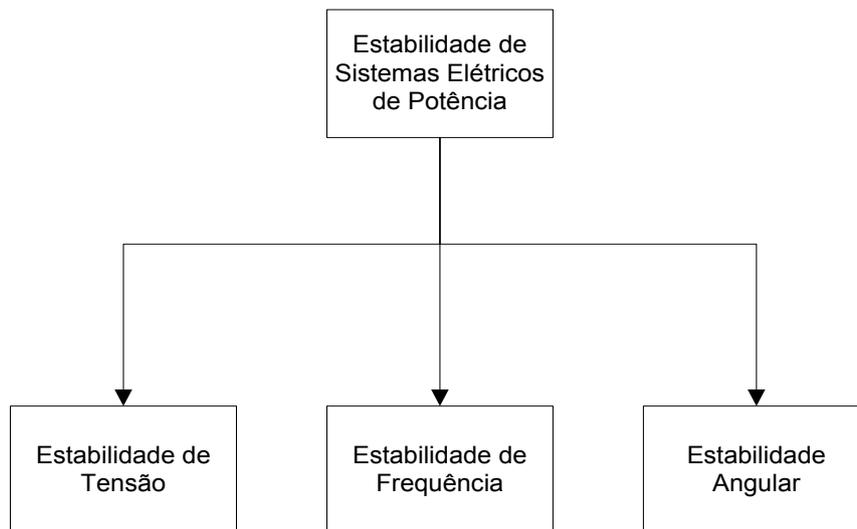


Figura 1: Tipos de estabilidade de sistemas elétricos de potência.

A estabilidade de tensão de um sistema elétrico de potência está relacionada ao comportamento da tensão do sistema após a ocorrência de uma perturbação, onde se verifica se o sistema é capaz de voltar a operar em regime permanente, mantendo um adequado perfil de tensão [2], [3].

O estudo da estabilidade de tensão também está diretamente relacionado à potência demandada pelas cargas, à potência fornecida pelos geradores e à capacidade de transmissão do sistema. Neste estudo, também são analisadas quedas abruptas de tensão, o que é chamado de colapso de tensão [2].

A estabilidade de frequência está relacionada à capacidade de um sistema elétrico de potência manter uma frequência aceitável após a ocorrência de eventos ou perturbações que causem grande desbalanço entre a carga e a geração, sem que haja a atuação dos sistemas de proteção promovendo o corte de carga ou de geração neste sistema ou havendo o mínimo de interferência dos sistemas de proteção possível [2].

A estabilidade angular de um sistema elétrico de potência é o estudo do comportamento dos geradores de um sistema elétrico de potência mediante a ocorrência de uma perturbação no mesmo, que está diretamente relacionado com o torque mecânico e com o torque eletromagnético existentes nas máquinas do sistema em questão [2].

Neste estudo, pode-se observar o comportamento do ângulo de carga e da velocidade das máquinas do sistema (dentre outras grandezas), de forma a se verificar o sincronismo das unidades geradoras ou usinas deste sistema e se as oscilações eletromecânicas destas unidades são satisfatoriamente amortecidas [2].

O estudo da estabilidade angular de um sistema elétrico de potência é dividido nas análises da estabilidade transitória e da estabilidade a pequenas perturbações, conforme a Figura 2 [2].

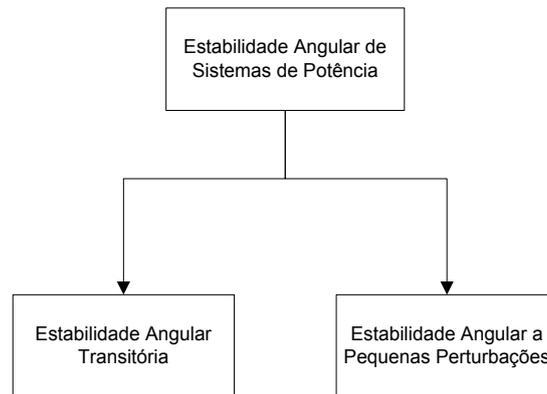


Figura 2: Tipos de estabilidade angular de sistemas elétricos de potência.

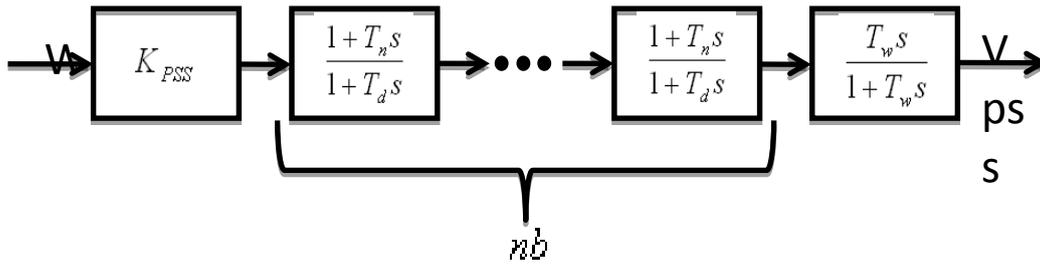
A estabilidade angular transitória é aquela que estuda o comportamento do sistema elétrico frente a uma grande perturbação como a ocorrência de um curto-circuito ou a abertura de uma linha de transmissão.

A estabilidade angular a pequenas perturbações, que também pode ser chamada de estabilidade a pequenos sinais, é aquela que estuda o comportamento do sistema elétrico frente a pequenas variações no mesmo, como variações de potência, carga ou *set point* dos seus sistemas de controle (reguladores de velocidade, reguladores de tensão, dentre outros).

No estudo da estabilidade a pequenos sinais, é feita a linearização do sistema em questão, o que permite a utilização de técnicas de controle linear e uma análise modal do mesmo.

Através desta análise modal, pode-se verificar os modos existentes no sistema e pode-se projetar sistemas de controle capazes de alterar o amortecimento de alguns dos modos do sistema, de forma a se obter um determinado comportamento do sistema.

Um dos controladores que se pode projetar através do estudo do sistema linearizado é o estabilizador de sistema de potência (ESP) ou *power system stabilizer* (PSS), cuja forma mais simples possui o diagrama de blocos e a função de transferência da Figura 3, tendo a velocidade do gerador no qual está conectado como variável de entrada (variável “W”) e o sinal de estabilização como variável de saída (variável “V_{pss}”), que auxilia no amortecimento das oscilações desta máquina.



$$PSS(s) = K_{PSS} \left(\frac{1 + T_n s}{1 + T_d s} \right)^{nb} \left(\frac{T_w s}{1 + T_w s} \right)$$

Figura 3: Diagrama de blocos e função de transferência de um PSS simples.

Um sistema elétrico de potência é considerado estável quando o mesmo possui estabilidade oscilatória e a estabilidade não oscilatória. A estabilidade oscilatória está relacionada ao amortecimento dos modos do sistema, que podem ser verificados através das técnicas de análise modal. A estabilidade não oscilatória, por sua vez, está relacionada à manutenção do sincronismo entre as usinas do sistema elétrico que está em análise.

1.3. Análise de Múltiplos Cenários de Sistemas de Potência

Quando são realizadas alterações em um sistema elétrico de potência, diversos estudos devem ser realizados, de forma a se prever o comportamento do sistema e determinar possíveis reforços a serem instalados na rede elétrica ou possíveis alterações nos sistemas de controle (ou controladores) deste sistema.

Um dos estudos que devem ser realizados é o estudo da estabilidade angular do sistema elétrico em questão, onde são observadas a estabilidade transitória e a estabilidade a pequenas perturbações.

Em determinadas situações são observadas algumas oscilações no sistema que, para serem examinadas com maiores detalhes, são estudadas através da análise modal, o que é estudado na análise da estabilidade a pequenos sinais.

Em casos de sistemas elétricos de potência de grande porte, são necessários programas computacionais para se realizar esta análise da estabilidade a pequenas perturbações, como o programa computacional PSS/E (desenvolvido pela Siemens/PTI) e o programa computacional PacDyn (desenvolvido pelo CEPEL) [4].

Uma das grandes utilizações da análise da estabilidade a pequenos sinais e da análise modal são os ajustes dos sistemas de controle do sistema elétrico em estudo. Ao se alterar um ajuste de algum controlador do sistema, deve-se fazer a análise da estabilidade a pequenas perturbações em diversos pontos de operação diferentes do sistema em questão.

No caso do PacDyn, apenas um ponto de operação era analisado por vez, de forma que o usuário do programa tinha que utilizar manualmente uma determinada função do mesmo, em todos os casos ou pontos de operação que desejava, o que não era muito prático e inviabilizava a análise de muitos pontos de operação.

Devido a esta dificuldade de se analisar a estabilidade a pequenas perturbações de muitos pontos de operação de um sistema elétrico, foi realizada a implementação da análise de múltiplos cenários no programa computacional PacDyn.

A análise de múltiplos cenários consiste na automatização dos procedimentos de análise de mais de um ponto de operação no PacDyn de forma que o usuário defina apenas uma lista de casos e pontos de operação que deseja estudar, acione a função desejada apenas uma vez e o programa faça a utilização desta funcionalidade para cada um dos casos e históricos definidos pelo usuário, conforme o algoritmo genérico da Figura 4.

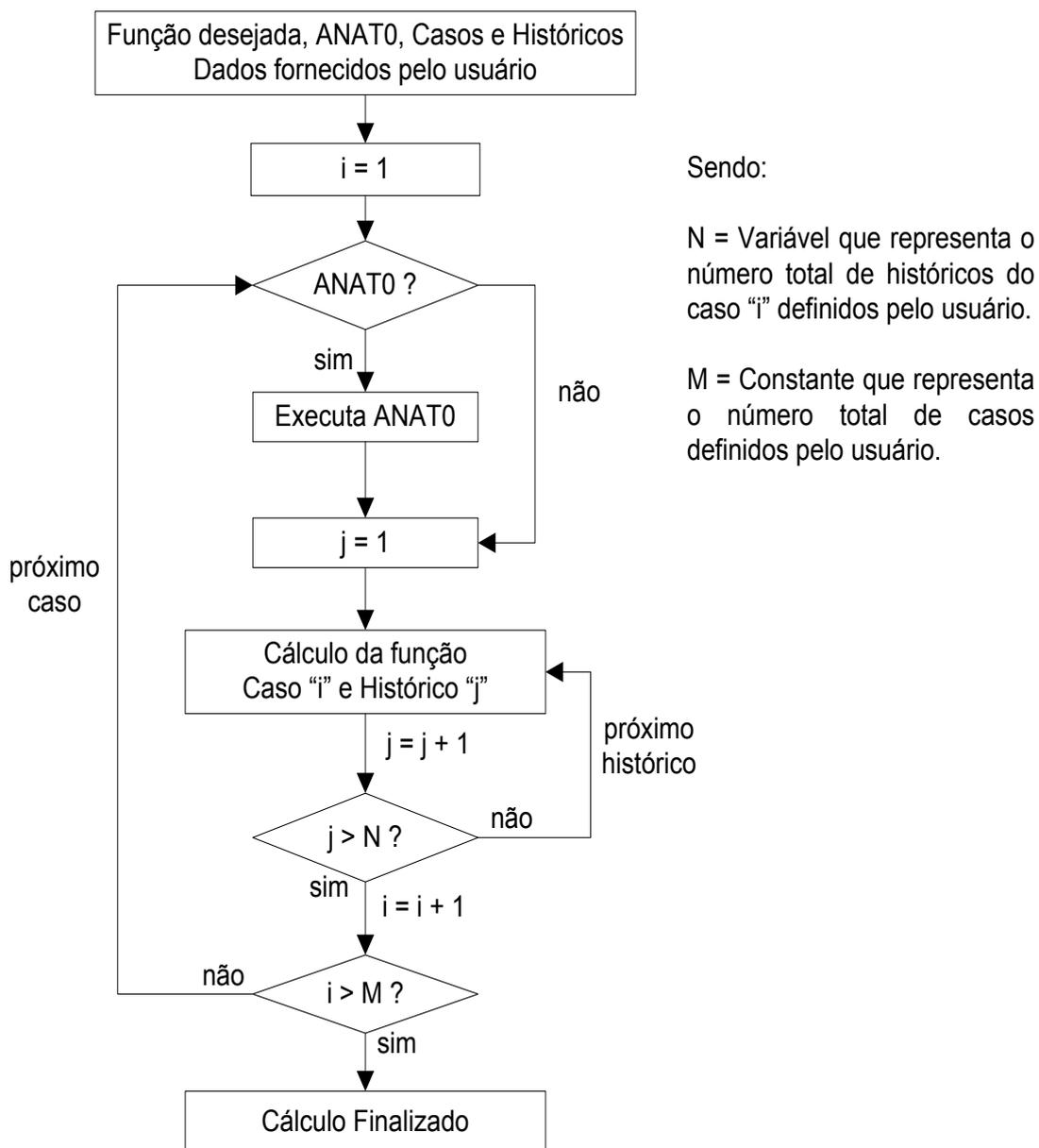


Figura 4: Algoritmo genérico utilizado na análise de múltiplos cenários.

Assim como na Figura 4, ao longo de todo o texto desta dissertação, foram denominados históricos, os pontos de operação de um sistema potência.

Como pode ser observado no algoritmo mostrado na Figura 4, o usuário do PacDyn pode optar pela utilização do programa ANAT0 do CEPTEL antes da realização do cálculo da função desejada.

O programa ANAT0 é utilizado pelo PacDyn para ajustar o número de unidades geradoras e o valor da impedância dos transformadores das usinas dos casos em estudo de acordo com o despacho do sistema, sendo necessária sua utilização sempre que forem estudados pontos de operação com diferentes despachos em uma análise de múltiplos cenários.

Após o ajuste do número de unidades geradoras e da impedância dos transformadores das usinas, o ANAT0 recalcula o fluxo de potência do sistema em análise, mas não utiliza ajustes adicionais no ponto de operação, como chaveamento automático de banco de capacitores ou reatores, o que poderia ser utilizado.

A Tabela 1 apresenta os resultados do ajuste do número de unidades de uma usina (Usina U1) de um caso exemplo realizado através do programa ANAT0, onde a usina U1 possuía quatro unidades geradores de 300 MW.

Tabela 1: Caso exemplo onde foi utilizado o programa ANAT0.

Ponto de Operação	Potência Ativa Usina U1	Número de Unidades Usina U1 – ANAT0
1	200 MW	1
2	400 MW	2
3	600 MW	2
4	800 MW	3
5	1000 MW	4
6	1100 MW	4

A implementação desta nova funcionalidade para a análise de múltiplos cenários no programa computacional PacDyn, devido às suas novas facilidades, permitirá que seus usuários passem a analisar um grande número de pontos de operação do sistema em estudo, o que permitirá um melhor conhecimento do comportamento dinâmico deste sistema, permitindo, assim, melhores ajustes de seus componentes como equipamentos de controle, tais como, reguladores de tensão, reguladores de velocidade e estabilizadores de sistemas de potência.

Neste trabalho, será realizada a descrição do modelo matemático de um sistema elétrico de potência, dos conceitos básicos de análise modal (tais como, autovalores, autovetores, *mode shapes*, fatores de participação, fatores de controlabilidade, fatores de observabilidade e resíduos) e de métodos de projetos de estabilizadores que utilizam múltiplos cenários.

Além disso, serão realizados estudos em um caso exemplo com um sistema de pequeno porte e no Sistema Interligado Nacional com o objetivo de demonstrar o funcionamento da nova ferramenta desenvolvida e as facilidades trazidas pela implementação da análise de múltiplos cenários no PacDyn.

Por facilitar o estudo de diversos pontos de operação, a análise de múltiplos cenários implementada no programa PacDyn permitirá a determinação de importantes características dos sistemas elétricos de potência tais como a relação entre as características dos modos de oscilação do sistema com o carregamento do mesmo.

A determinação dessas características do sistema é possível somente através do estudo de um grande número de pontos de operação, o que só é viável através da análise de múltiplos cenários, uma vez que antes da implementação desta nova ferramenta, o usuário do programa PacDyn teria que rodar os diversos casos um a um, demandando grande quantidade de tempo, o que inviabilizava este tipo de estudo.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Conceitos Básicos de Análise Modal: Apresenta a modelagem de matemática de sistemas elétricos de potência e os principais conceitos utilizados nas técnicas de análise modal;
- Capítulo 3 – Projetos de Estabilizadores: Apresenta o método de projeto de estabilizadores através do diagrama de Nyquist, resume alguns métodos de projetos de controladores em múltiplos cenários e apresenta a metodologia de projeto de estabilizadores utilizada nos estudos deste trabalho;

- Capítulo 4 – Estudos Realizados: Apresenta o estudo de um sistema de pequeno porte e o estudo do Sistema Interligado Nacional que foram realizados neste trabalho;
- Capítulo 5 – Conclusão: Apresenta observações e conclusões sobre a análise de múltiplos cenários no PacDyn e os resultados dos estudos realizados neste trabalho.

1.5. Publicações Geradas por esta Dissertação

1. PARREIRAS, T. J. M. A., GOMES JR., S., TARANTO, G. N., AMARAL, T., “Desenvolvimentos no PacDyn para Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais de Múltiplos Cenários em Sistemas de Potência de Grande Porte”, *XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE*, Rio de Janeiro, 2012.

CAPÍTULO 2

Conceitos Básicos de Análise Modal

Neste capítulo, será realizada a descrição dos conceitos básicos relacionados à análise modal de sistemas elétricos de potência que são bastante utilizados na análise de estabilidade a pequenas perturbações. Serão apresentadas a modelagem matemática de sistemas elétricos de potência e as definições de autovalores, autovetores, *mode shapes*, fatores de participação, fatores de controlabilidade, fatores de observabilidade e resíduos de funções de transferência.

2.1. Modelagem de Sistemas Elétricos de Potência

Um sistema elétrico de potência de ordem n pode ser descrito matematicamente por n equações diferenciais de primeira ordem. Para se determinar as equações diferenciais que determinam o comportamento dinâmico do sistema elétrico, são definidas as variáveis de estado.

Além dessas equações diferenciais, o sistema a ser modelado possui equações algébricas que podem estar relacionadas à rede elétrica ou aos sistemas de controle utilizados nas usinas.

O modelo matemático de um sistema elétrico de potência pode ser descrito através das equações (1), (2) e (3), conforme [5], [6]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}) \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}) \quad (3)$$

onde:

x = Vetor de variáveis de estado do sistema;

r = Vetor de variáveis algébricas do sistema;

u = Vetor de variáveis de entrada do sistema.

O modelo matemático linearizado do sistema em questão, em torno de seu ponto de operação inicial (x_0, r_0, u_0) , pode ser representado de forma matricial através da equação (4), conforme [5], [6]:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, r_0, u_0) & \frac{\partial f}{\partial r}(x_0, r_0, u_0) & \frac{\partial f}{\partial u}(x_0, r_0, u_0) \\ \frac{\partial g}{\partial x}(x_0, r_0, u_0) & \frac{\partial g}{\partial r}(x_0, r_0, u_0) & \frac{\partial g}{\partial u}(x_0, r_0, u_0) \\ \frac{\partial h}{\partial x}(x_0, r_0, u_0) & \frac{\partial h}{\partial r}(x_0, r_0, u_0) & \frac{\partial h}{\partial u}(x_0, r_0, u_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta r \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde a matriz jacobiano (ou matriz de derivadas) do sistema é calculada no ponto de operação inicial do mesmo (x_0, r_0, u_0) .

Através de manipulações matemáticas, com o intuito de se eliminar as variáveis algébricas da modelagem, o modelo linearizado do sistema mostrado anteriormente pode ser reescrito através das equações (5) e (6), conforme [5], [6], [7]:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (5)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (6)$$

onde:

A = Matriz de estados do sistema;

B = Matriz de entrada do sistema;

C = Matriz de saída do sistema;

D = Matriz de transferência direta do sistema.

Através da matriz de estados A do sistema modelado, pode-se determinar os modos do sistema elétrico que definem o comportamento dinâmico do mesmo. Esses modos são os autovalores da matriz A .

2.2. Autovalores e Autovetores

São definidos autovalores da matriz A , o conjunto de valores (escalares) λ , são definidos autovetores à direita da matriz A , o conjunto de vetores v , e são definidos autovetores à esquerda da matriz A , o conjunto de vetores w que possibilitam a determinação de soluções para o sistema linear das equações (7) e (8), diferente das soluções triviais ($v = 0$) e ($w = 0$) [5], [6], [7], [8].

$$A v = \lambda v \quad (7)$$

$$w A = w \lambda \quad (8)$$

Manipulando-se matematicamente e reescrevendo os sistemas lineares representados nas equações (7) e (8), podem ser obtidas as equações (9), (10), (11) e (12):

$$A v - \lambda v = 0 \quad (9)$$

$$(A - \lambda I)v = 0 \quad (10)$$

$$w A - w \lambda = 0 \quad (11)$$

$$w(A - \lambda I) = 0 \quad (12)$$

onde:

I = Matriz identidade da ordem da matriz A .

Para que existam outras soluções, além das triviais ($v = 0$) e ($w = 0$), para os sistemas lineares mostrados, a matriz $A - \lambda I$ deve ser singular, possuindo determinante nulo. Dessa forma, pode-se obter a equação característica do sistema, que é determinada pela fórmula do determinante da matriz $A - \lambda I$, conforme a equação (13).

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (13)$$

Resolvendo-se a equação acima, é determinado um conjunto de n valores λ , que são os autovalores da matriz A . Substituindo cada um desses valores na equação (9), é possível determinar um conjunto de autovetores à direita v , não nulos ($v \neq 0$), capazes de solucionar o sistema linear em questão. Cada autovalor da matriz A possui um autovetor relacionado, como pode ser visto nas equações (14) e (15):

$$(A - \lambda_i I)v_i = 0 \quad (14)$$

$$w_i(A - \lambda_i I) = 0 \quad (15)$$

onde:

λ_i = Modo i do sistema modelado;

v_i = Autovetor à direita associado ao modo i do sistema modelado.

w_i = Autovetor à esquerda associado ao modo i do sistema modelado.

Os elementos dos autovetores da matriz de estados A de um sistema elétrico de potência possuem importantes informações sobre as oscilações causadas pelos modos que definem o comportamento dinâmico desse sistema, como os chamados *mode shapes* e os fatores de participação.

2.3. Mode Shapes e Fatores de Participação

Continuando o estudo da modelagem de um sistema elétrico de potência, é possível realizar uma transformação linear utilizando a matriz de autovetores à direita do sistema (cujas colunas são os autovetores à direita da matriz de estados A) nas variáveis de estado originais do mesmo, de forma a se obter uma nova matriz de estados Λ e novas variáveis de estado que possuem características bastante interessantes, denominadas variáveis de estado modal [5], conforme as equações (16) e (17):

$$x = \Phi z \quad (16)$$

$$\Lambda = \Phi^{-1} A \Phi = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \lambda_i & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

onde:

x = Vetor de variáveis de estado originais;

z = Vetor de variáveis de estado modal;

Φ = Matriz de autovetores à direita da matriz de estados;

λ_i = Modo i do sistema modelado;

Λ = Matriz de estados modal (que apresenta forma diagonal, no caso de seus autovalores possuírem valores distintos).

Cada variável de estado modal está diretamente relacionada a um determinado modo de oscilação do sistema, ou seja, cada variável de estado modal está diretamente relacionada a um determinado autovalor da matriz A do sistema.

As oscilações representadas por cada um dos modos desse sistema definem o comportamento dinâmico das variáveis de estado modal associadas aos respectivos modos. As variáveis de estado originais do sistema podem ser obtidas através de combinações lineares das variáveis de estado modal.

São denominados *mode shapes*, os gráficos obtidos através da plotagem dos elementos da matriz de autovetores do sistema Φ relacionados a um determinado modo de oscilação e a determinadas variáveis do mesmo. Os *mode shapes* mostram como as variáveis observadas se comportam na oscilação do modo em análise. Exemplos de *mode shapes* são mostrados na Figura 5.

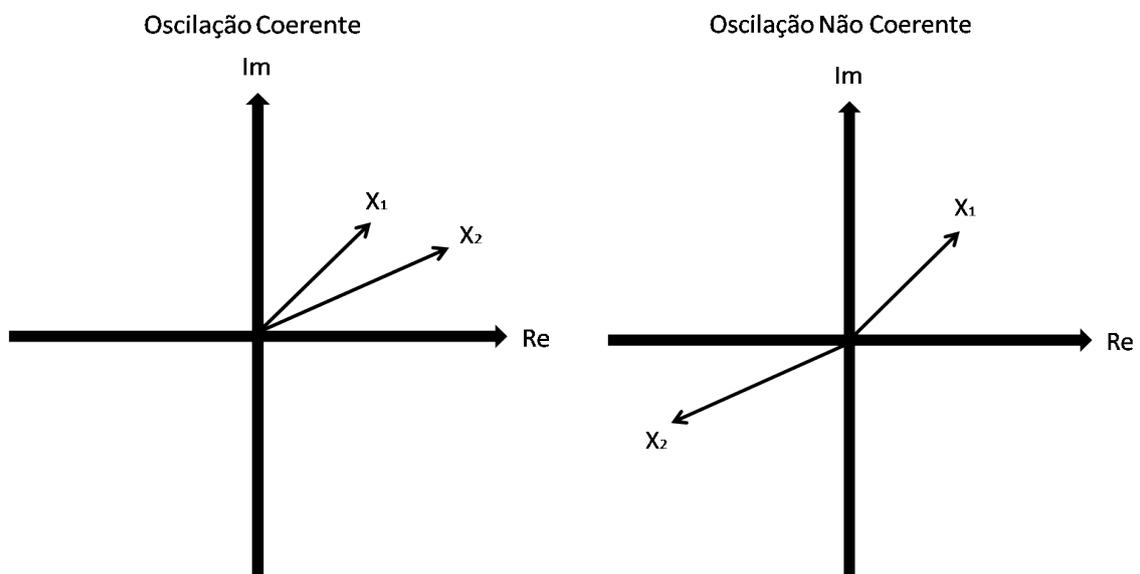


Figura 5: Exemplos esquemáticos de *mode shapes*.

Os gráficos obtidos nos cálculos de *mode shapes* podem representar oscilações coerentes ou oscilações não coerentes. Oscilações são coerentes quando as variáveis observadas se comportam dinamicamente de maneira parecida, oscilando praticamente da mesma forma. Oscilações são não coerentes quando as variáveis observadas aparecem em oposição de fase no *mode shape*, indicando que as mesmas oscilam em contra-fase, tendo comportamentos dinâmicos contrários.

No caso de sistemas de potência, o *mode shape* calculado para as velocidades dos rotores das unidades geradores das usinas fornecem informações importantes a respeito das oscilações das máquinas do sistema causadas por um determinado modo.

Os *mode shapes* de velocidade calculados para modos eletromecânicos (modos relacionados às equações de oscilação dos rotores das usinas) permitem determinar como as máquinas estão oscilando entre si (de forma coerente ou não coerente). Com isso, torna-se possível identificar diferentes tipos de modos eletromecânicos, que podem ser: intra-planta, local, inter-área e multi-máquinas.

Além do tipo de oscilação causada por um determinado modo, os *mode shapes* também fornecem a informação da amplitude e da fase das oscilações das variáveis que estão sendo analisadas. Essa amplitude e essa fase estão relacionadas aos módulos e às fases dos elementos da matriz de autovetores plotadas no gráfico.

Outra importante definição é o conceito de fatores de participação que representam a influência de cada variável de estado no aparecimento dos modos de oscilação do sistema elétrico modelado.

Matematicamente, os fatores de participação podem ser obtidos através do produto de elementos da matriz de autovetores à direita Φ com elementos da matriz de autovetores à esquerda do sistema Ψ , que pode ser definida como sendo a inversa da matriz de autovetores à direita ($\Psi = \Phi^{-1}$), conforme as equações (18) e (19):

$$P = [P_1 \quad \cdots \quad P_i \quad \cdots \quad P_n] \quad (18)$$

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} & \Psi_{i1} \\ \vdots & \vdots \\ \Phi_{ni} & \Psi_{in} \end{bmatrix} \quad (19)$$

onde:

P = Matriz de fatores de participação;

P_i = Vetor de fatores de participação associados ao modo i ;

P_{1i} , P_{ni} = Elementos do vetor P_i associados às variáveis de estado 1 e n ;

Φ_{1i} , Φ_{ni} = Elementos dos autovetor à direita relativo ao modo i associados às variáveis de estado 1 e n ;

Ψ_{1i} , Ψ_{ni} = Elementos dos autovetor à esquerda relativo ao modo i associados às variáveis de estado 1 e n .

Os fatores de participação permitem identificar a origem dos modos de oscilação existentes no sistema, que podem ser provenientes de equações dos sistemas elétricos, dos sistemas de controle ou dos sistemas mecânicos que representam o comportamento dinâmico dos componentes do sistema de potência.

Um modo de oscilação é considerado modo eletromecânico quando os maiores fatores de participação relacionados a ele são as variáveis provenientes da modelagem dos sistemas mecânicos (equações de oscilação dos rotores das usinas) existentes no sistema de potência.

No caso do programa computacional PacDyn, essas variáveis são os ângulos de carga (variável DELT) e as velocidades dos rotores (variável WW) das unidades geradoras das usinas do sistema.

2.4. Fatores de Controlabilidade, Observabilidade e Resíduos

Completando a transformação linear realizada mostrada na equação (12), é possível a obtenção de um novo modelo para o sistema elétrico de potência, como pode ser observado nas equações (20), (21), (22) e (23):

$$x = \Phi z \quad (20)$$

$$A = \Phi^{-1} A \Phi \quad (21)$$

$$B' = \Phi^{-1} B \quad (22)$$

$$C' = C \Phi \quad (23)$$

onde:

A = Nova matriz de estados do sistema;

B' = Nova matriz de entrada do sistema;

C' = Nova matriz de saída do sistema.

O novo modelo do sistema elétrico de potência obtido através da transformação linear utilizando a matriz de autovetores à direita do mesmo pode ser representado através das equações (24) e (25):

$$\dot{\Delta z} = \Lambda \Delta z + B' \Delta u \quad (24)$$

$$\Delta y = C' \Delta z + D \Delta u \quad (25)$$

A nova matriz de estados do sistema Λ é a forma de Jordan da matriz de estados original do mesmo A , sendo diagonal e apresentando os próprios autovalores da matriz de estados original em sua diagonal (supondo que a matriz A possua n autovalores distintos, consequentemente, a sua forma de Jordan é diagonal).

Supondo que não há termo de transferência direta no modelo do sistema ($D = 0$) e aplicando a Transformada de Laplace, pode-se determinar as funções de transferências [9] que relacionam as variáveis de entrada e de saída do sistema, conforme as equações (26), (27) e (28).

$$\Delta \dot{z} = \Lambda \Delta z + B' \Delta u \quad (26)$$

$$\Delta y = C' \Delta z \quad (27)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C' (S I - \Lambda)^{-1} B' \quad (28)$$

Supondo ainda, que o sistema linear seja SISO (*single input single output*), ou seja, possua apenas uma variável de entrada e uma variável de saída, a função de transferência mostrada pode ser reescrita através das equações (29) e (30):

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = c' (S I - \Lambda)^{-1} b' \quad (29)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{c'_i b'_i}{s - \lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (30)$$

onde:

b' = Vetor de entrada do sistema;

c' = Vetor de saída do sistema.

b'_i = Elemento relativo ao modo i do vetor b' ;

c'_i = Elemento relativo ao modo i do vetor c' ;

R_i = Resíduo do modo i na função de transferência $\frac{Y(s)}{U(s)}$.

Conceitualmente, pode-se definir o fator de controlabilidade como sendo a capacidade que uma determinada variável de entrada possui de excitar um determinado modo de oscilação do sistema.

Matematicamente, o fator de controlabilidade de um modo em relação à variável de entrada de uma função de transferência pode ser obtido da através da equação (31), conforme [5]:

$$F.C. = b'_i = \Psi_i b \quad (31)$$

onde:

$F.C.$ = Fator de controlabilidade do modo i ;

b = Vetor de entrada original do sistema;

Ψ_i = Autovetor à esquerda associado ao modo i .

Pode-se definir, também, o fator de observabilidade como sendo a capacidade que uma determinada variável de saída possui de observar e refletir as oscilações provenientes da excitação de um determinado modo de oscilação do sistema.

Matematicamente, o fator de observabilidade de um modo em relação à variável de saída de uma função de transferência pode ser obtido da através da equação (32), conforme [5]:

$$F.O. = c'_i = c \Phi_i \quad (32)$$

onde:

$F.O.$ = Fator de observabilidade do modo i ;

c = Vetor de saída original do sistema;

Φ_i = Autovetor à direita associado ao modo i .

Pode-se, ainda, definir o conceito de resíduo de um determinado modo em uma função de transferência como sendo a influência das oscilações representadas por este modo no comportamento dinâmico de uma determinada variável de saída do sistema quando o modo é excitado por uma determinada variável de entrada.

O resíduo também corresponde à sensibilidade de um modo ou pólo em relação a um ganho correspondente ao de uma realimentação fictícia infinitesimal da função de transferência analisada [10].

Por este motivo, o resíduo pode ser utilizado para determinar as funções de transferência mais adequadas para modificar o posicionamento de um determinado modo, para ser utilizada como malha de controle para estabilização.

Neste sentido, outra grandeza que também pode auxiliar nesta escolha da malha de controle mais adequada são os zeros da função de transferência que indicam qual será o posicionamento final do pólo em um *root locus*, considerando a realimentação por um ganho infinito.

Matematicamente, o resíduo de uma função de transferência relacionado a um determinado modo do sistema pode ser obtido através do produto do fator de controlabilidade do modo em relação à variável de entrada com o fator de observabilidade em relação à variável de saída da função de transferência, como pode ser visualizado na equação (33), conforme [5]:

$$R_i = F.O. \times F.C. = c'_i b'_i = c \Phi_i \Psi_i b \quad (33)$$

onde:

$$R_i = \text{Res\u00edduo do modo } i \text{ na fun\u00e7\u00e3o de transfer\u00eancia } \frac{Y(s)}{U(s)}.$$

Um modo de um sistema linear \u00e9 dito n\u00e3o control\u00e1vel quando a matriz B' do sistema apresenta a linha relativa a este modo nula e um modo \u00e9 dito n\u00e3o observ\u00e1vel quando a matriz C' do mesmo sistema apresenta a coluna relativa a este modo nula.

Pode-se notar em (33) que quando a vari\u00e1vel de sa\u00edda e a vari\u00e1vel de entrada correspondem a um determinado estado (os vetores b e c possuem um \u00fanico elemento unit\u00e1rio na posi\u00e7\u00e3o referente \u00e0 vari\u00e1vel de estado em quest\u00e3o e os demais elementos nulos), o res\u00edduo torna-se igual ao fator de participa\u00e7\u00e3o da vari\u00e1vel de estado correspondente.

CAPÍTULO 3

Projetos de Estabilizadores

Neste capítulo, será realizada a descrição de métodos de projetos de estabilizadores de sistemas de potência utilizados para aumentar o amortecimento de modos eletromecânicos de sistemas de potência. Serão apresentados um método de projeto de estabilizadores através do diagrama de Nyquist e alguns métodos de projetos de estabilizadores em múltiplos cenários. Também será descrita a metodologia utilizada nos estudos realizados neste trabalho para os projetos de sistemas de controles através da utilização da análise de múltiplos cenários no PacDyn.

3.1. Projeto de Estabilizadores por Diagrama de Nyquist

O projeto de estabilizadores de sistemas de potência (PSSs), controlador utilizado para aumentar o amortecimento de modos eletromecânicos, pode ser realizado de através do diagrama de Nyquist [11], [12]. O diagrama de Nyquist analisa a malha aberta do sistema elétrico em estudo para determinar o comportamento desse mesmo sistema com o fechamento de uma determinada malha de controle.

No caso de sistemas elétricos de potência, o modelo de um gerador com seus controladores (regulador de tensão e regulador de velocidade) e com os demais componentes do sistema pode ser representado pela função de transferência $G(s)$ e o modelo do estabilizador de sistemas de potência pode ser representado pela função de transferência $PSS(s)$, conforme Figura 6.

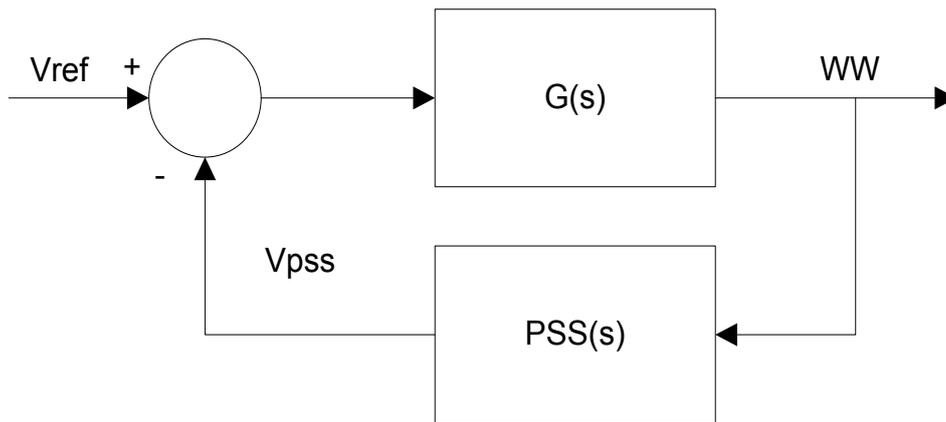


Figura 6: Função de transferência utilizada para o projeto de PSSs.

Calculando-se o diagrama de Nyquist com um determinado amortecimento ξ da função de transferência de malha aberta do sistema $G(s)$, pode-se determinar o módulo M e a fase ϕ dessa função de transferência para uma determinada frequência ω , que é a frequência do modo eletromecânico que se deseja amortecer, conforme pode ser visualizado na Figura 7.

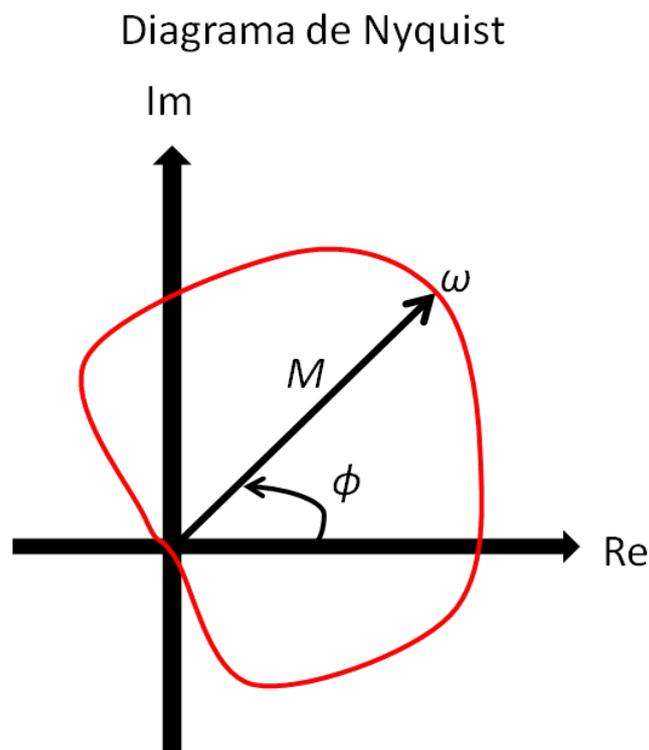


Figura 7: Diagrama de Nyquist do sistema sem o PSS, no intervalo $0 \leq \omega < \infty$.

Com isso, é possível projetar a função de transferência do estabilizador, $PSS(s)$, que compensa a fase obtida no diagrama de Nyquist e adiciona um ganho ao sistema, de forma que o diagrama de Nyquist compensado passe a cruzar o eixo real do plano complexo no ponto -1, conforme pode ser visualizado na Figura 8, garantindo de acordo com o critério de Nyquist, que o modo em análise tenha um amortecimento ξ no sistema em malha fechada [12].

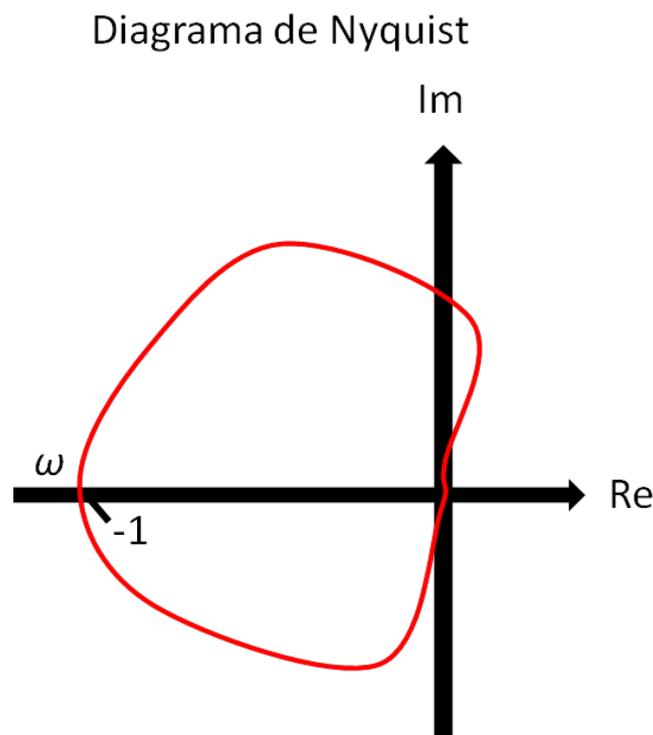


Figura 8: Diagrama de Nyquist do sistema com o PSS, no intervalo $0 \leq \omega < \infty$.

Dessa forma, com o fechamento da malha de controle do estabilizador de sistemas de potência, o modo eletromecânico de frequência ω passa a ter o amortecimento desejado ξ , que era o valor de amortecimento com o qual foi calculado o diagrama de Nyquist.

Em [12] é apresentado como calcular os parâmetros para compensação de amplitude e fase pelo método de Newton e em [11] são apresentadas fórmulas analíticas que permitem o cálculo dos parâmetros por método direto não iterativo.

3.1.1. Cálculo da Compensação de Fase

Supondo que a compensação do sistema $G(s)$ deva ser realizada através da função de transferência $PSS(s) = K_{pss} \left(\frac{1+TS}{1+\alpha TS} \right)^{nb}$, de acordo com [9], o cálculo da compensação de fase desse sistema pode ser realizado através das equações (34) (35) e (36), onde são determinados os parâmetros T e α do controlador que está sendo projetado.

$$\phi_{avanço} = 180^\circ - \phi \quad (34)$$

$$\sin\left(\frac{\phi_{avanço}}{nb}\right) = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad (35)$$

$$\omega = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}} \quad (36)$$

onde:

ω = Frequência do modo que deve ser amortecido.

$\phi_{avanço}$ = Compensação de fase desejada;

nb = Número de blocos *Lead-Lag* utilizados no controlador;

ϕ = Fase do diagrama de Nyquist que deve ser compensado para a frequência ω ;

3.1.2. Cálculo da Compensação de Módulo

Supondo que a compensação do mesmo sistema $G(s)$ deva ser realizada através da mesma função de transferência $PSS(s) = K_{pss} \left(\frac{1+TS}{1+\alpha TS} \right)^{nb}$ e que o ajuste dos parâmetros dos blocos *Lead-Lag* do controlador já foi realizado, o novo diagrama de Nyquist do sistema, com a compensação de fase realizada, pode ser representado pela Figura 9.

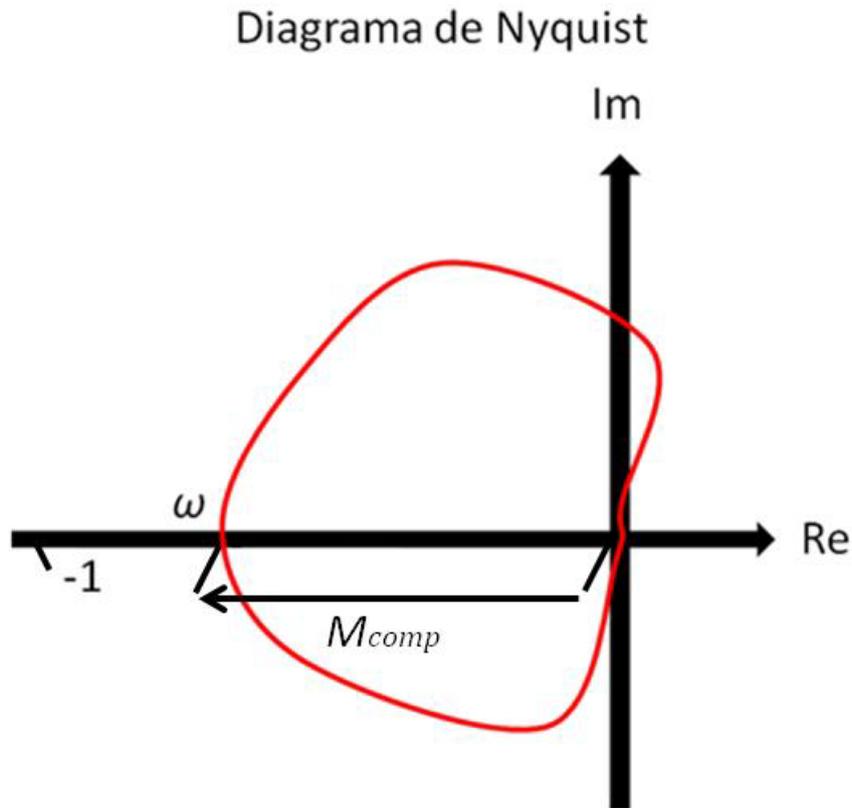


Figura 9: Diagrama de Nyquist do sistema com a compensação de fase.

De acordo com [9], o cálculo da compensação de módulo do sistema em questão pode ser realizado através da equação (37), onde é determinado o ganho K_{pss} do controlador que está sendo projetado.

$$K_{pss} = \frac{1}{M_{comp}} \quad (37)$$

onde:

M_{comp} = Módulo do diagrama de Nyquist com a compensação de fase realizada para a frequência ω .

3.2. Projetos Coordenados em Múltiplos Cenários

Com o intuito de se aprimorar cada vez mais os projetos de estabilizadores de sistemas de potência, em busca de uma maior robustez nos sistemas de controles utilizados nos equipamentos de sistemas elétricos de potência, foram desenvolvidos alguns métodos de projetos de PSSs que conseguem realizar ajustes coordenados de determinados parâmetros desses estabilizadores (ou seja, diversos PSSs são ajustados ao mesmo tempo) e que podem levar em consideração diversos cenários ou pontos de operação (múltiplos cenários) desse sistema de potência.

Ao se realizar projetos de controladores da forma mencionada anteriormente, pode-se obter ajustes para os diversos estabilizadores de sistemas de potência que estejam sendo projetados, de forma a se garantir um determinado amortecimento mínimo em todos os cenários ou pontos de operação.

Esses tipos de projetos fazem com que os controladores sejam mais robustos, mantendo o amortecimento dos modos do sistema em análise em valores aceitáveis nos diversos pontos de operação nos quais esse sistema pode vir a operar.

Dentre os métodos de projetos de controladores existentes, dois métodos interessantes de ajustes coordenados de estabilizadores, que levam em consideração múltiplos cenários, são o método proposto por Bomfim (que utiliza algoritmos genéticos para realizar o ajuste coordenado de todos os parâmetros dos PSSs a serem projetados [13]) e o método proposto por Ferraz (que utiliza ferramentas matemáticas para realizar o ajuste coordenado dos ganhos dos PSSs a serem projetados [14]).

3.2.1. Projetos de Estabilizadores por Algoritmo Genético

O método de projeto coordenado de PSSs baseado na utilização de algoritmos genéticos, proposto por BOMFIM [13], consiste na variação dos parâmetros dos PSSs que devem ser projetados com o objetivo de se obter um determinado amortecimento mínimo para os modos do sistema elétrico em análise, em todos os cenários ou pontos de operação previamente selecionados.

Esse ajuste coordenado é realizado através da utilização da teoria de algoritmo genético onde são criados diversos indivíduos ou cromossomos distintos com informações dos valores dos parâmetros dos PSSs que serão projetados, como pode ser visualizado no exemplo mostrado na Figura 10.

Função de Transferência PSS(s)

$$PSS(s) = K_{PSS} \left(\frac{1 + T_n s}{1 + T_d s} \right) \left(\frac{T_w s}{1 + T_w s} \right)$$

Indivíduo Utilizado no Método

K_{PSS}	T_n	T_d	T_w
-----------	-------	-------	-------

Figura 10: Indivíduo utilizado para ajuste da função de transferência PSS(s).

Esses indivíduos são separados em diversas populações. Um conjunto de populações define uma geração. A cada geração criada são calculados os modos do sistema utilizando cada um dos indivíduos, em todos os pontos de operação desejados, com intuito de se obter o modo com o menor amortecimento do sistema.

Se esse modo menos amortecido do sistema apresentar um amortecimento maior que o valor mínimo desejado, então a solução para o problema foi encontrada e é o indivíduo que gerou este amortecimento. Caso contrário, se o amortecimento do modo em questão for menor que o valor mínimo desejado, novas populações devem ser criadas, até que o amortecimento mínimo seja obtido.

Com o objetivo de melhorar a performance desse método de ajuste de PSSs baseado na teoria de algoritmos genéticos, são utilizadas algumas ferramentas de otimização, de forma a se diminuir o tempo gasto para a determinação da solução que atende ao critério de mínimo amortecimento que é definido no início da formulação do problema.

Essas ferramentas são os métodos de seleção, cruzamento e mutação de indivíduos, que permitem que a solução para o problema de ajuste coordenado de estabilizadores seja encontrada mais rapidamente.

O método do cruzamento de indivíduos consiste na criação de um novo indivíduo que contém parte dos dados dos indivíduos que o geraram, conforme pode ser visualizado no exemplo mostrado na Figura 11.

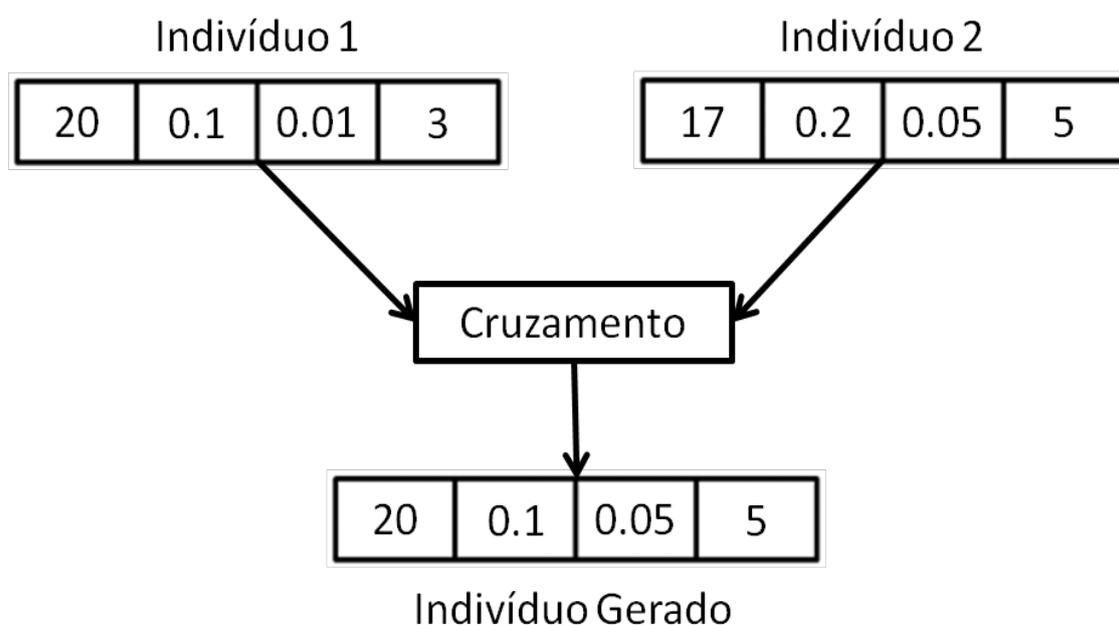


Figura 11: Exemplo de cruzamento de indivíduos.

O exemplo de cruzamento mostrado anteriormente foi realizado com parâmetros com valores reais apenas para facilitar a compreensão do funcionamento desse método. Deve-se destacar que, no algoritmo proposto em [13], os indivíduos são representados em números binários e o método do cruzamento é aplicado sobre esta representação.

Com isso o indivíduo gerado pelo cruzamento de dois outros indivíduos pode conter parâmetros com valores reais completamente distintos dos parâmetros dos indivíduos que o geraram.

O método da mutação de indivíduos consiste na criação de um novo indivíduo que contém praticamente todos os dados iguais aos dados do indivíduo que sofreu a mutação e o gerou, com apenas poucos parâmetros modificados, conforme pode ser visualizado no exemplo mostrado na Figura 12.

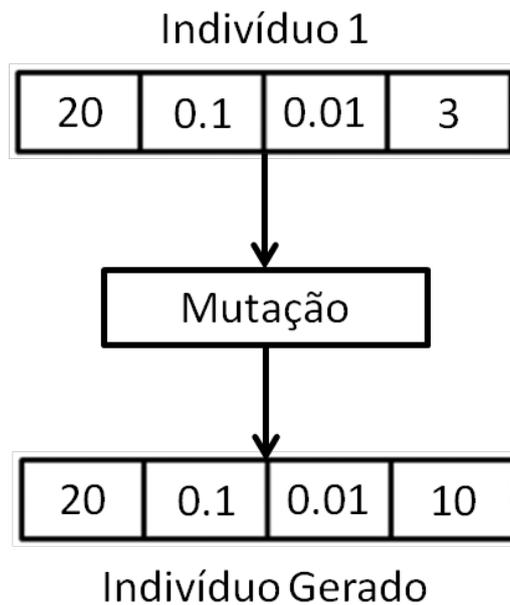


Figura 12: Exemplo de muta o de um indivíduo.

O método de sele o de indivíduos consiste na manuten o dos indivíduos que geraram os melhores resultados em sua popula o, na gera o seguinte, de forma que seus resultados não sejam perdidos durante o processo iterativo do algoritmo genético utilizado no ajuste dos controladores.

Quando a soluço   encontrada, os parâmetros obtidos para os estabilizadores de sistemas de potência, que garantem que o modo menos amortecido do sistema apresente um amortecimento maior que o amortecimento mínimo desejado, são aqueles encontrados no indivíduo com o qual a soluço foi determinada.

3.2.2. Projetos de Estabilizadores por Ajuste de Ganhos

O método de projeto coordenado de estabilizadores baseado no ajuste dos ganhos dos estabilizadores, proposto por FERRAZ [14], consiste na utiliza o de uma rela o entre a varia o do posicionamento no plano complexo dos modos que devem ser mais bem amortecidos $\Delta\lambda$ e a varia o dos ganhos dos PSSs que estão sendo projetados ΔK , com o objetivo de se obter um determinado amortecimento mínimo para os modos do sistema elétrico em análise, em todos os cenários ou pontos de opera o previamente selecionados.

A malha de controle utilizada no método de projeto de estabilizadores citado anteriormente contém uma função de transferência $G(s)$ que representa o sistema elétrico de potência, suas máquinas e seus controladores e uma outra função de transferência $H(s)$ que representa o ajuste de fase do PSS que se deseja projetar [14], conforme pode ser observado na Figura 13.

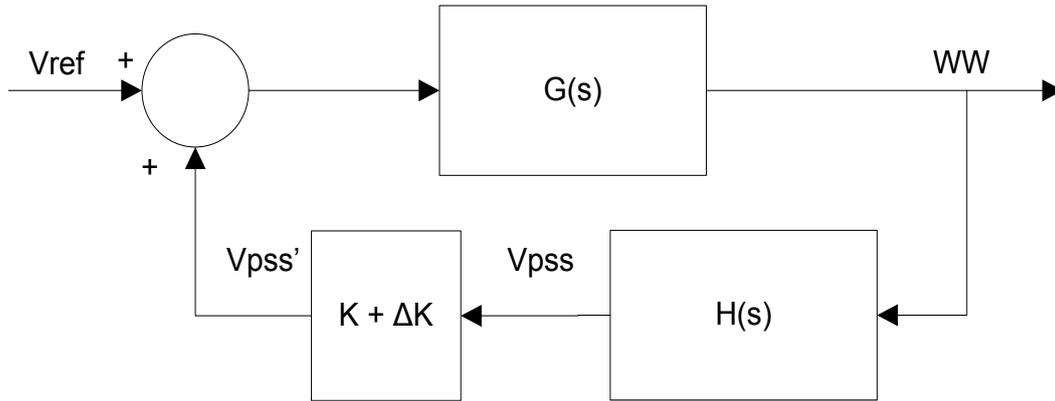


Figura 13: Função de transferência utilizada para o ajuste dos ganhos dos PSSs.

A variação do ganho do estabilizador ΔK que se deseja projetar pode ser relacionada com a variação do posicionamento no plano complexo (parcela real e parcela imaginária) do modo $\Delta\lambda$ que se deseja amortecer, através da relação matemática mostrada na equação (38):

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta K} = R\left(\frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)}, \lambda\right) \quad (38)$$

onde:

$\Delta\lambda$ = Variação do posicionamento do modo que deve ser amortecido (λ);

ΔK = Variação do ganho do PSS que deve ser projetado;

$R\left(\frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)}, \lambda\right)$ = Resíduo do modo λ na função de transferência $\frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)}$.

Esse método de ajuste coordenado dos ganhos dos estabilizadores de sistemas de potência utiliza o método iterativo de Newton-Rapshon de solução de sistemas não lineares para a determinação da variação do ganho ΔK do PSS.

Através de manipulações matemáticas, a relação entre a variação do ganho ΔK do PSS e a variação do posicionamento dos modos que devem ser mais bem amortecidos $\Delta\lambda$ pode ser reescrita na forma matricial mostrada na equação (39):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -Re \left[R \left(\frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)}, \lambda \right) \right] \\ 0 & 1 & -Im \left[R \left(\frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)}, \lambda \right) \right] \\ 1 & \frac{\xi_d}{2\sqrt{1-\xi_d}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma \\ \omega \\ \Delta K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \omega_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

onde:

$$Re \left[R \left(\frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)}, \lambda \right) \right] = \text{Parcela real do resíduo do modo } \lambda \text{ na função de transferência } \frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)};$$

$$Im \left[R \left(\frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)}, \lambda \right) \right] = \text{Parcela imaginária do resíduo do modo } \lambda \text{ na função de transferência } \frac{V_{pss}(s)}{V_{ref}(s)};$$

ΔK = Variação do ganho do PSS que deve ser projetado;

σ = Parte real do modo λ ;

ω = Parte imaginária do modo λ ;

σ_0 = Parte real do modo λ na posição inicial;

ω_0 = Parte imaginária do modo λ na posição inicial;

ξ_d = Amortecimento desejado para o modo λ .

Aplicando-se o método iterativo de Newton-Rapshon no sistema matricial mostrado anteriormente, pode-se determinar a variação do ganho ΔK , de forma a se obter o amortecimento desejado ξ_d para o modo λ .

O processo iterativo converge quando a diferença entre o amortecimento obtido para o modo λ em uma determinada iteração $\xi(K)$ e o valor do amortecimento desejado ξ_d for menor do que uma determinada tolerância Tol , ou seja, o processo iterativo utilizado é considerado convergente e termina as iterações quando a relação matemática mostrada nas equações (40) e (41) é atendida:

$$\xi(K) - \xi_d \leq Tol \quad (40)$$

$$\Delta\xi \leq Tol \quad (41)$$

onde:

$\xi(K)$ = Amortecimento do modo λ ;

ξ_d = Amortecimento desejado para o modo λ ;

$\Delta\xi$ = Diferença entre os amortecimentos obtido e desejado;

Tol = Tolerância utilizada no processo iterativo.

Quando a condição mostrada acima é atendida, o ganho K do estabilizador de sistema de potência que estava sendo projetado é, finalmente, determinado. Com isso o projeto do PSS em questão chega ao fim.

Esse procedimento para o projeto de um PSS pode ser expandido para o projeto de diversos estabilizadores de sistemas de potência e para o aumento do amortecimento de diversos modos do sistema de potência, que podem ser todos de um mesmo ponto de operação ou podem ser de diversos pontos de operação (ou seja, múltiplos cenários) [14].

Como a quantidade de pólos monitorados nos diversos pontos de operação é, geralmente, diferente da quantidade de ganhos dos estabilizadores a serem ajustados, o sistema matricial é retangular e é resolvido por pseudo-inversa. A solução do sistema, a cada iteração, corresponderá a uma menor variação dos ganhos dos estabilizadores que produzem um amortecimento adequado para os pólos monitorados [14].

3.2.3. Projetos de Estabilizadores por Realimentação de Estados

O método de projeto de estabilizadores de sistemas de potência em múltiplos pontos de operação proposto em [15] consiste na utilização da modelagem em espaço de estados e da realimentação de estados [8].

Nesse método de projeto de PSSs, são utilizados os conceitos da matriz de controlabilidade e da matriz de observabilidade para se determinar se o sistema elétrico em análise é controlável e observável [8].

Se o sistema for controlável é possível a determinação de um controlador estático capaz de alocar os pólos desse sistema elétrico de forma conveniente, através da realimentação de estados, garantindo um amortecimento mínimo desejado para o sistema em análise [8].

Se o sistema for observável é possível a determinação de um observador de estados capaz de estimar os estados originais desse sistema, permitindo a utilização de controladores baseados em estimadores de estados [8], onde se faz a realimentação dos estados estimados do sistema e não dos estados originais.

No método proposto em [15], é realizado um projeto de controlador estático baseado na realimentação de estados estimados, mas expandido para um sistema com múltiplas condições de operação ou múltiplos cenários.

Em [15], é proposta uma representação em espaço de estados para sistemas elétricos que considera diversos pontos de operação e, também, é proposto um método de se determinar os ganhos do controlador estático e do estimador de estados (ou observador) capazes de alocar os pólos desse sistema de uma forma desejada, garantindo que o sistema tenha um bom amortecimento.

Através desse método, é possível a determinação de um controlador baseado na realimentação de estados estimados capaz de estabilizar o sistema em estudo para os diversos pontos de operação considerados.

3.3. Outros Métodos de Projetos de Estabilizadores

Outros métodos de projetos de estabilizadores de sistemas de potência existentes podem ser encontrados em [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25] e [26].

3.4. Metodologia de Projeto de Estabilizadores no PacDyn

Neste trabalho, não houve o desenvolvimento de um novo método de projeto de estabilizadores em múltiplos cenários de sistemas de potência, mas foi utilizada uma metodologia para se projetar esses controladores através da análise de múltiplos cenários implantada no programa computacional PacDyn.

Essa metodologia consiste na definição de valores de amortecimentos mínimos para os modos do sistema de potência em estudo, para pontos de operação com o sistema em operação normal e para pontos de operação com o sistema em contingência, e em um processo cíclico de projetos de PSSs.

Esse processo de projetos de PSSs consiste em um procedimento iterativo onde são realizados projetos de estabilizadores de forma sequencial, através do método de projeto automático do PacDyn (que é baseado na utilização de diagramas de Nyquist com amortecimento). O processo é finalizado quando o critério de amortecimento mínimo, previamente definido, é atendido para cada um dos cenários analisados.

Primeiramente, deve-se calcular os modos do sistema em estudo para os casos onde o sistema opera normalmente (sem contingência) para se determinar o ponto de operação menos amortecido para o sistema em operação normal. Esse ponto de operação deve ser utilizado como caso base para o projeto do estabilizador que deve ser desenvolvido.

Em seguida, projeta-se o PSS, através do método de desenvolvimento automático de estabilizadores de sistemas de potência do programa PacDyn, utilizando esse ponto de operação, onde foi obtido o modo com menor amortecimento para o sistema em operação normal.

Depois, com o PSS projetado operando no sistema em estudo, deve-se calcular novamente os modos de forma a se determinar se o critério de amortecimento mínimo foi obtido tanto para os pontos de operação com o sistema em operação normal quanto para os pontos de operação com o sistema em contingência.

Se, com o estabilizador projetado, o critério de amortecimento mínimo foi atendido para os casos estudados, o projeto do PSS está finalizado. Caso contrário, deve-se realizar um novo projeto de PSS, utilizando o mesmo método e o mesmo caso base citado anteriormente, com o objetivo de se obter um estabilizador de sistemas de potência ainda mais eficiente, alcançando-se os valores mínimos de amortecimento para os modos do sistema elétrico em estudo.

Com o novo PSS projetado operando no sistema em estudo, deve-se calcular novamente os modos de forma a se verificar se o critério de amortecimento mínimo foi atendido em todos os pontos de operação.

Esse procedimento de projeto de estabilizadores e de verificação do critério de amortecimento deve ser repetido até que com o último PSS projetado, o sistema passe a ter amortecimento aceitáveis em todos os pontos de operação estudados.

Pode-se, então, propor um algoritmo para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência realizados através do PacDyn, com a utilização da ferramenta de múltiplos cenários implementada neste trabalho. Esse algoritmo pode ser visualizado na imagem da Figura 14.

Utilizando o algoritmo proposto, é possível a determinação de estabilizadores de sistemas de potência mais robustos, que garantem amortecimentos aceitáveis para os modos do sistema elétrico de potência em estudo, para os diversos pontos de operação analisados com a ferramenta de múltiplos cenários implementada no PacDyn.

É válido lembrar que, neste trabalho, não foi desenvolvido um novo método de projeto de controladores em múltiplos cenários. Trabalhos futuros podem considerar métodos automáticos de ajuste coordenado que podem usufruir dos novos recursos implementados para a análise de múltiplos cenários.

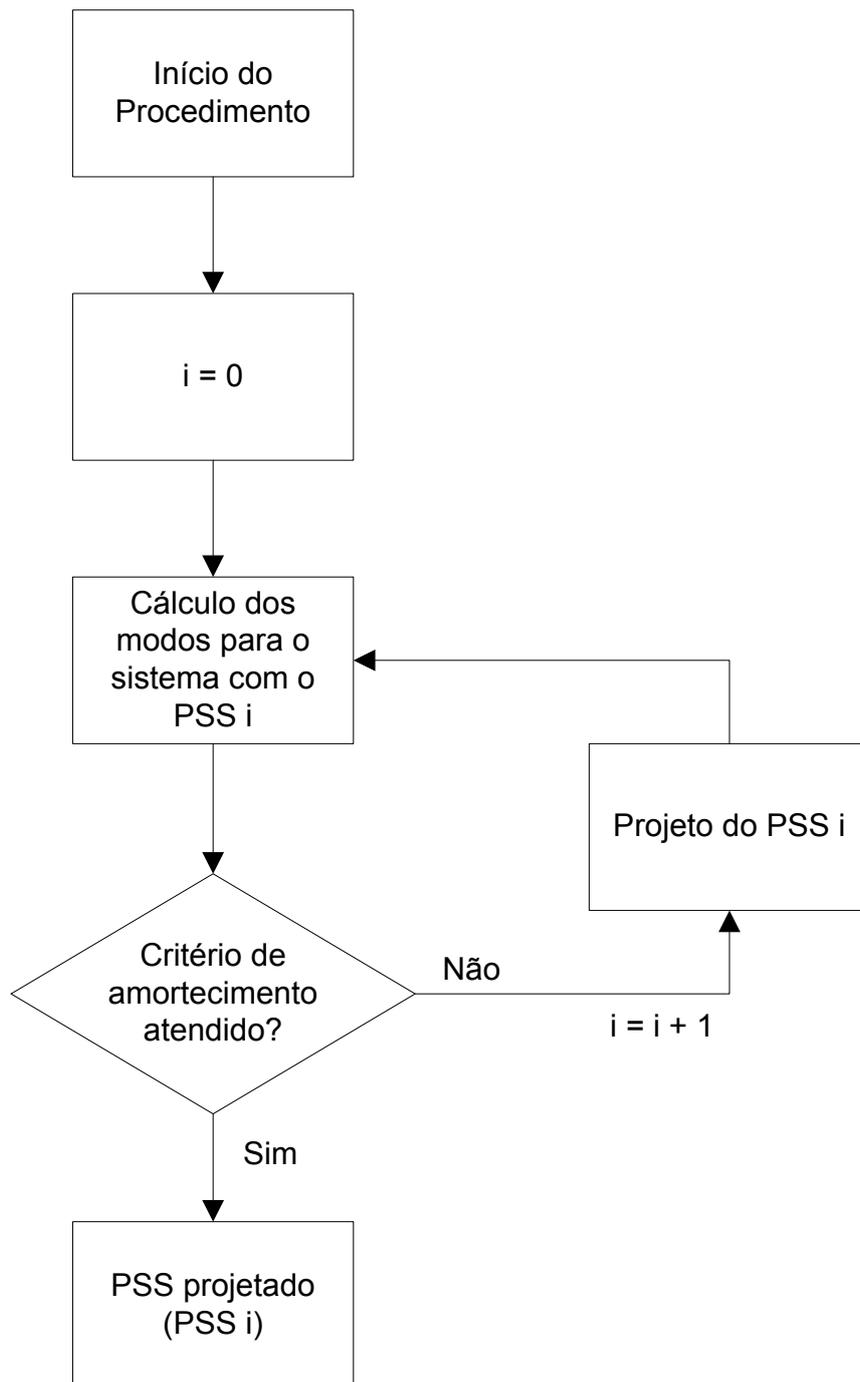


Figura 14: Algoritmo para o projeto de PSSs utilizando múltiplos cenários.

CAPÍTULO 4

Estudos Realizados

Neste capítulo, serão realizados os estudos de um sistema elétrico de pequeno porte e do Sistema Interligado Nacional, através da análise de múltiplos cenários desenvolvida no programa computacional PacDyn, de forma a se demonstrar os benefícios trazidos por esta nova funcionalidade.

4.1. Estudo do Sistema de Pequeno Porte

No estudo do sistema de pequeno porte, será realizada a descrição do sistema exemplo que será estudado, será analisado o comportamento desse sistema em determinados pontos de operação, através da análise modal, com o objetivo de se identificar características importantes do sistema em questão, e será realizado um projeto de estabilizador de sistema de potência para se demonstrar como a análise de múltiplos cenários possibilita a obtenção de um melhor ajuste dos controladores das máquinas do sistema elétrico em estudo.

4.1.1. Descrição do Sistema Estudado

O sistema elétrico analisado neste capítulo é um sistema de quatro geradores e onze barras com duas áreas definidas. As máquinas Maq1 e Maq2 formam a área 1 do sistema e as máquinas Maq3 e Maq4 formam a área 2. A rede elétrica do sistema em questão pode ser visualizada na Figura 15.

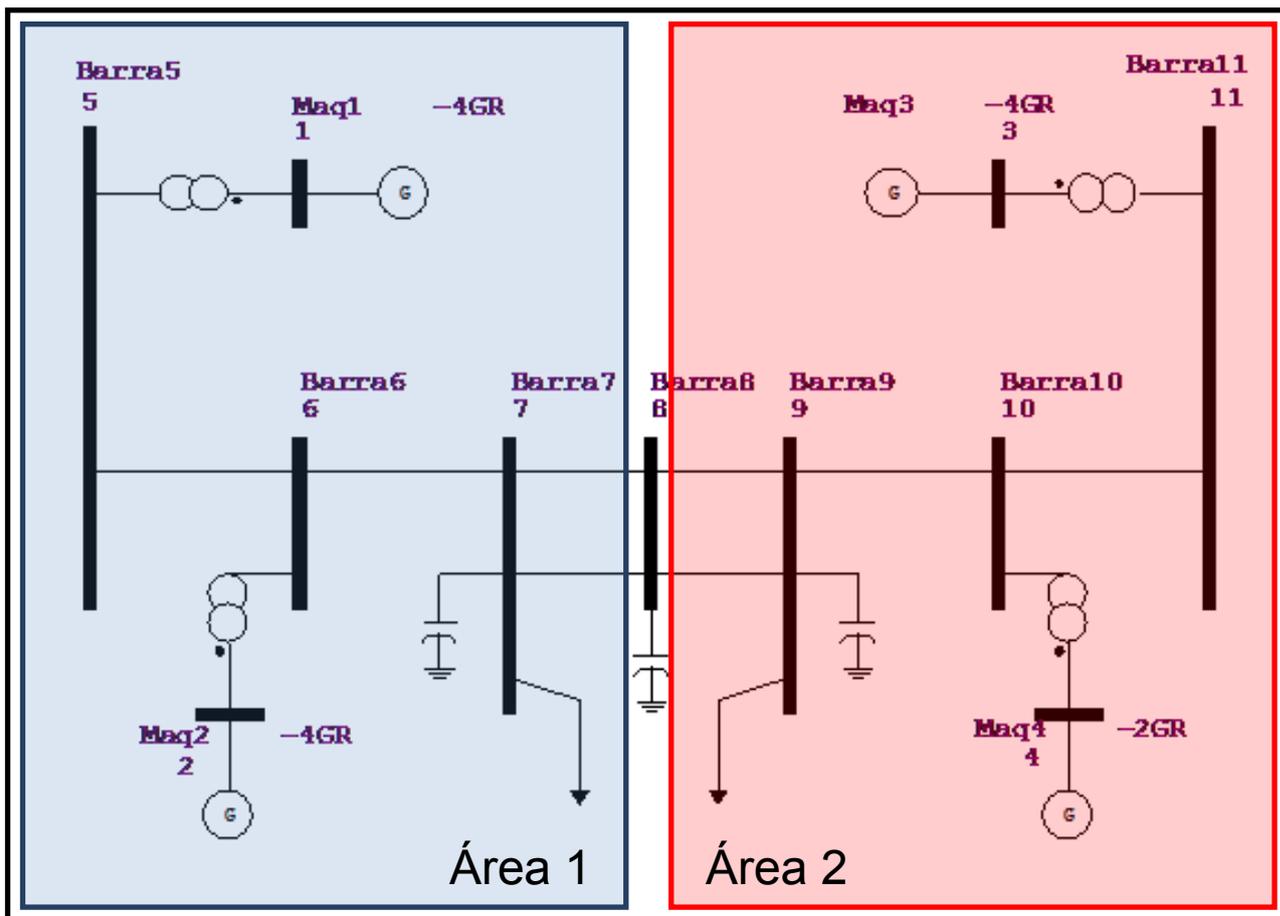


Figura 15: Rede elétrica do caso em estudo.

O sistema elétrico em questão é baseado em um caso exemplo, de quatro usinas e onze barramentos, encontrado em [5], com pequenas modificações nas potências nominais das máquinas existentes [27]. É válido dizer, também, que as máquinas Maq1, Maq2 e Maq3 possuem quatro unidades geradoras e a máquina Maq4 possui apenas duas unidades.

As novas potências nominais das máquinas do sistema em estudo podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Novas potências das máquinas do sistema em questão.

Máquina	Potência Nominal
Máquina 1 (Barra 1)	1200 MVA
Máquina 2 (Barra 2)	900 MVA
Máquina 3 (Barra 3)	900 MVA
Máquina 4 (Barra 4)	350 MVA

Nos casos estudados desse sistema, foram utilizados reguladores de tensão de primeira ordem em cada uma das quatro máquinas existentes e não foram utilizados reguladores de velocidade.

Foram analisados diversos pontos de operação, onde a configuração da rede elétrica, as cargas e as potências despachadas pelas máquinas do sistema foram sendo alteradas de acordo com a Tabela 3 e a Tabela 4.

Tabela 3: Despachos e cargas do sistema em operação normal.

Ponto de Operação	Potência Maq1	Potência Maq2	Potência Maq3	Potência Maq4	Carga Barra 7	Carga Barra 9
Histórico 1	1100 MW	700 MW	756,1 MW	300 MW	1167 MW	1567 MW
Histórico 2	200 MW	700 MW	717,5 MW	300 MW	817 MW	1067 MW
Histórico 3	400 MW	700 MW	726,4 MW	300 MW	917 MW	1167 MW
Histórico 4	600 MW	700 MW	720,8 MW	300 MW	997 MW	1267 MW
Histórico 5	800 MW	700 MW	716,5 MW	300 MW	1077 MW	1367 MW
Histórico 6	1000 MW	700 MW	721,1 MW	300 MW	1167 MW	1457 MW
Histórico 7	1100 MW	700 MW	721,8 MW	300 MW	1167 MW	1535 MW
Histórico 8	700 MW	300 MW	471,7 MW	300 MW	1167 MW	567 MW
Histórico 9	700 MW	300 MW	784,5 MW	200 MW	1167 MW	767 MW
Histórico 10	700 MW	300 MW	489,5 MW	100 MW	467 MW	1067 MW
Histórico 11	500 MW	250 MW	723,8 MW	100 MW	467 MW	1067 MW
Histórico 12	400 MW	250 MW	530,1 MW	180 MW	467 MW	867 MW
Histórico 13	500 MW	250 MW	530,2 MW	180 MW	767 MW	667 MW
Histórico 14	950 MW	100 MW	483,7 MW	250 MW	767 MW	967 MW

Tabela 4: Descrição dos casos em contingência.

Ponto de Operação	Descrição dos Casos em Contingência
Histórico 15	Despacho do histórico 1, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 16	Despacho do histórico 2, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 17	Despacho do histórico 3, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 18	Despacho do histórico 4, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 19	Despacho do histórico 5, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 20	Despacho do histórico 6, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.

Tabela 5: Descrição dos casos em contingência - continuação.

Ponto de Operação	Descrição dos Casos em Contingência
Histórico 21	Despacho do histórico 7, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 22	Despacho do histórico 8, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 23	Despacho do histórico 9, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 24	Despacho do histórico 10, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 25	Despacho do histórico 11, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 26	Despacho do histórico 12, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 27	Despacho do histórico 13, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 28	Despacho do histórico 14, sem a LT Barra 7 – Barra 8 circuito 1.
Histórico 29	Despacho do histórico 1, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 30	Despacho do histórico 2, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 31	Despacho do histórico 3, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 32	Despacho do histórico 4, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 33	Despacho do histórico 5, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 34	Despacho do histórico 6, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 35	Despacho do histórico 7, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 36	Despacho do histórico 8, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 37	Despacho do histórico 9, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 38	Despacho do histórico 10, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 39	Despacho do histórico 11, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 40	Despacho do histórico 12, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 41	Despacho do histórico 13, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.
Histórico 42	Despacho do histórico 14, sem a LT Barra 8 – Barra 9 circuito 1.

Os objetivos desse estudo são analisar o comportamento do sistema mediante o aumento da potência elétrica fornecida para o mesmo pelo gerador Maq1 e projetar um PSS para o sistema, de forma a se obter modos com amortecimento acima de 10% para os casos em operação normal e acima de 5% para os casos em contingência.

4.1.2. Análise Modal do Sistema

Primeiramente, foram calculados os modos do sistema elétrico mostrado anteriormente, através do método QR, com a utilização do programa ANATO, para os históricos de 2 a 7, onde há o incremento da potência elétrica fornecida pela máquina Maq1 ao sistema em estudo. Os resultados obtidos no cálculo dos modos foram plotados no plano complexo e podem ser visualizados na Figura 16.

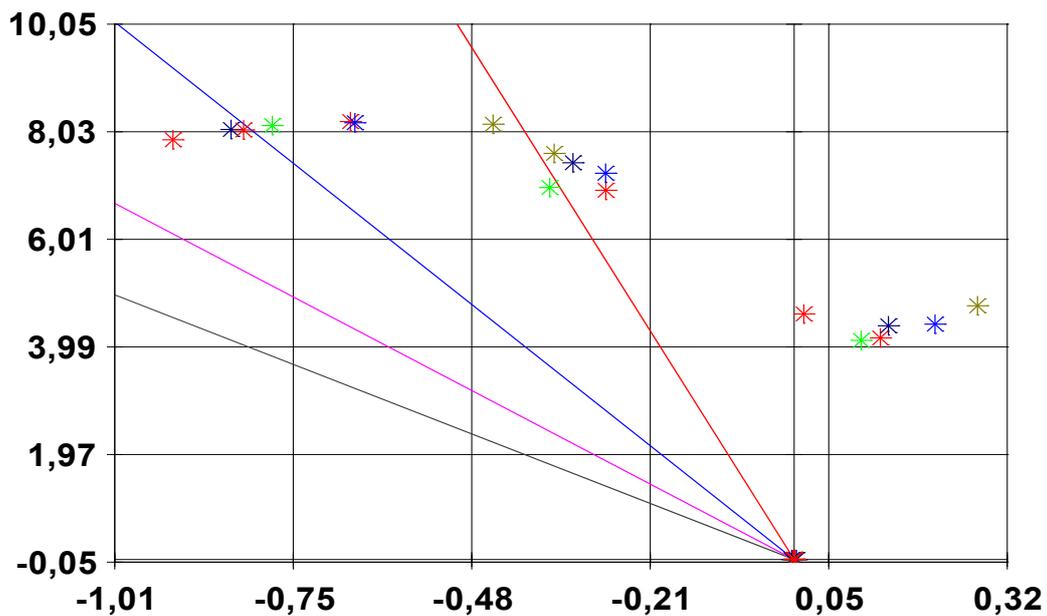


Figura 16: Modos calculados, pelo método QR, para os pontos de operação de 2 a 7.

Dentre os modos calculados, foram selecionados modos eletromecânicos poucos amortecidos ou com amortecimento negativo para serem estudados com maiores detalhes. Estes modos são listados na Tabela 6.

Tabela 6: Modos selecionados para serem analisados.

Ponto de Operação	Modo Selecionado	Amortecimento	Fator de Participação
Histórico 2	$0,01448 + j4,6094$	-0,3142%	DELT – Maq3
Histórico 3	$0,2737 + j4,7657$	-5,7331%	DELT – Maq3
Histórico 4	$0,1409 + j4,3851$	-3,2110%	DELT – Maq3
Histórico 5	$0,2103 + j4,4174$	-4,7552%	DELT – Maq3
Histórico 6	$0,1001 + j4,1120$	-2,4335%	DELT – Maq3
Histórico 7	$0,1288 + j4,1579$	-3,0955%	WW – Maq3

Em seguida, foi realizado o cálculo dos *mode shapes*, em relação à variável WW (velocidade dos geradores), para os históricos de 2 a 7 do fluxo de potência, de forma a se observar o comportamento das máquinas do sistema em relação às oscilações dos modos selecionados. Os resultados obtidos neste cálculo podem ser visualizados nas imagens da Figura 17 à Figura 22.

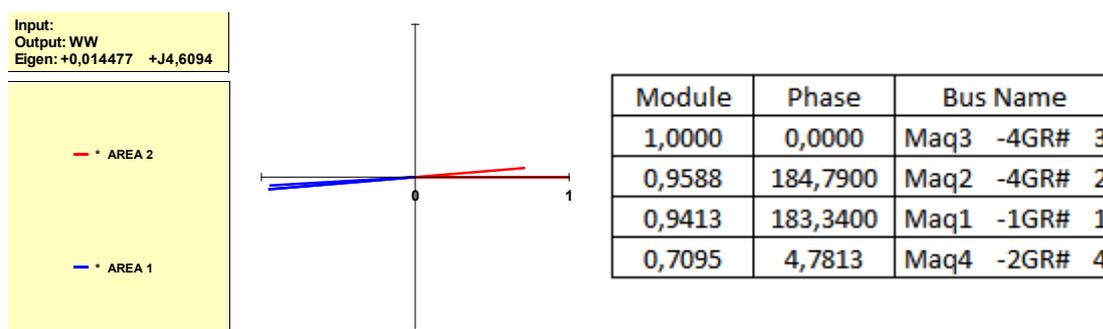


Figura 17: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 2.

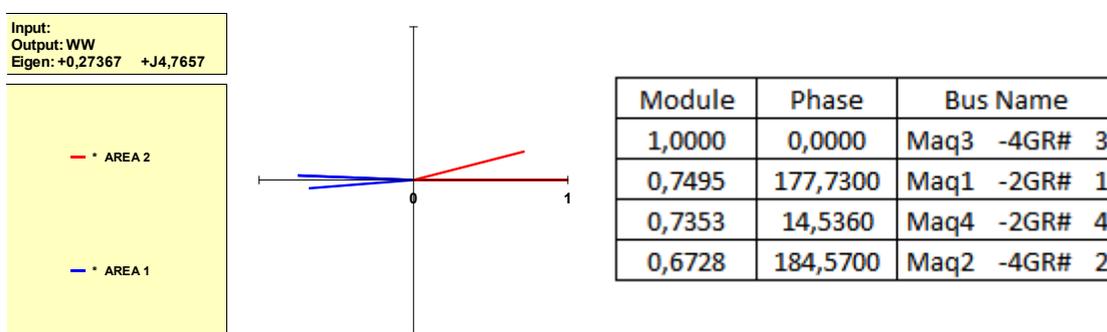


Figura 18: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 3.

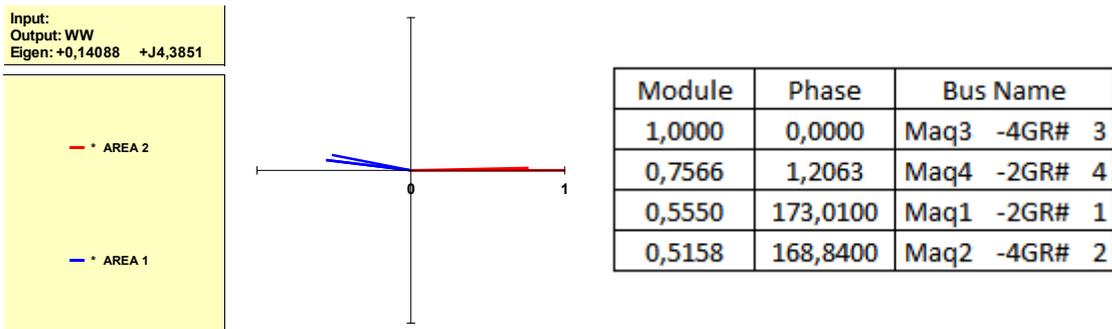


Figura 19: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 4.

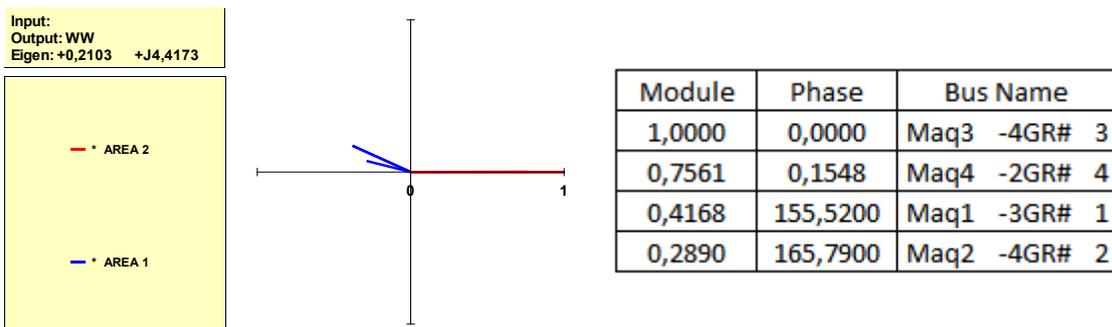


Figura 20: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 5.

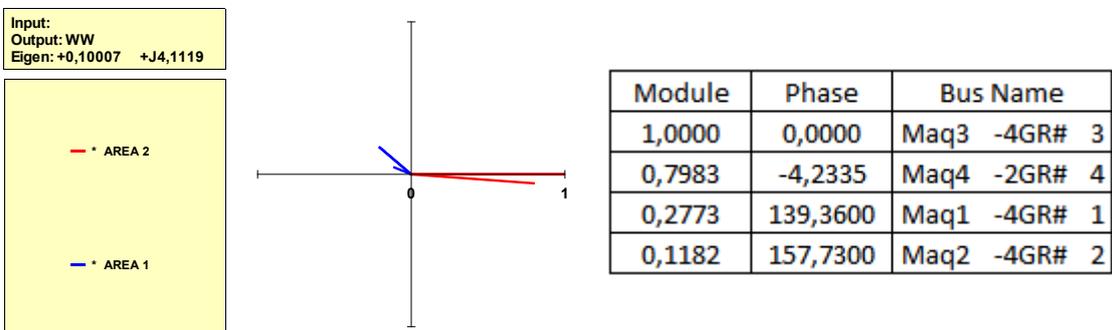


Figura 21: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 6.

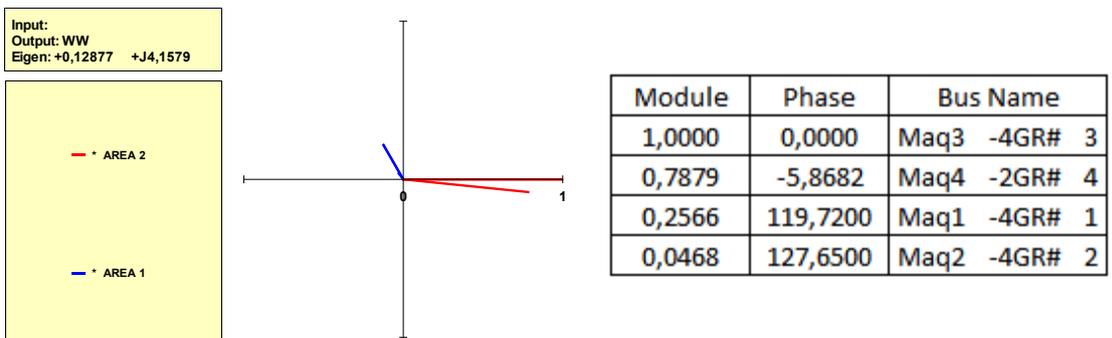


Figura 22: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 7.

Analisando-se os resultados obtidos através do cálculo de *mode shapes* em relação à variável WW para os modos selecionados, pode-se perceber que estes modos representam oscilações entre as áreas 1 e 2 do sistema.

Também se pode notar que, com o aumento da carga e da potência fornecida pelo gerador Maq1, esta máquina passa a ter cada vez mais uma maior influência nas oscilações da área 1, área a qual pertence, diminuindo a influência da máquina Maq2 nas oscilações desta mesma área.

Verificando-se as oscilações do sistema como um todo, pode-se dizer que a máquina Maq1, com o seu aumento de fornecimento de potência, passa a ter uma amplitude de oscilação cada vez menor, em relação às demais máquinas do sistema, como as máquinas Maq3 e Maq4.

Isso ocorre porque, com o aumento da potência fornecida pela máquina Maq1, um maior número de unidades é colocado em operação nesta usina (conforme pode ser observado na Tabela 7), aumentando, desta forma, a inércia deste conjunto de máquinas.

Tabela 7: Ajuste do número de unidades geradoras na usina Maq1.

Ponto de Operação	Potência Ativa Usina Maq1	Número de Unidades Usina Maq1 - ANAT0
Histórico 2	200 MW	1
Histórico 3	400 MW	2
Histórico 4	600 MW	2
Histórico 5	800 MW	3
Histórico 6	1000 MW	4
Histórico 7	1100 MW	4

Depois da análise dos *mode shapes* de velocidade, foi realizada a análise dos resíduos das funções de transferência que têm os sinais de referência dos reguladores de tensão das máquinas do sistema (VREF) como variáveis de entrada e a velocidade dos geradores (WW) como variáveis de saída, em relação aos modos selecionados.

Os resultados obtidos no cálculo dos resíduos realizado nesta etapa para as funções de transferência mencionadas, para os históricos de 2 a 7, podem ser visualizados nas imagens da Figura 23 à Figura 28.

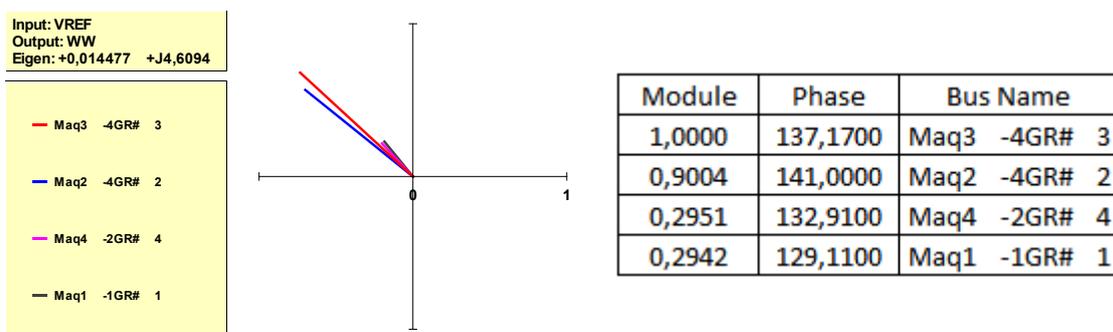


Figura 23: Resíduos do modo selecionado no histórico 2.

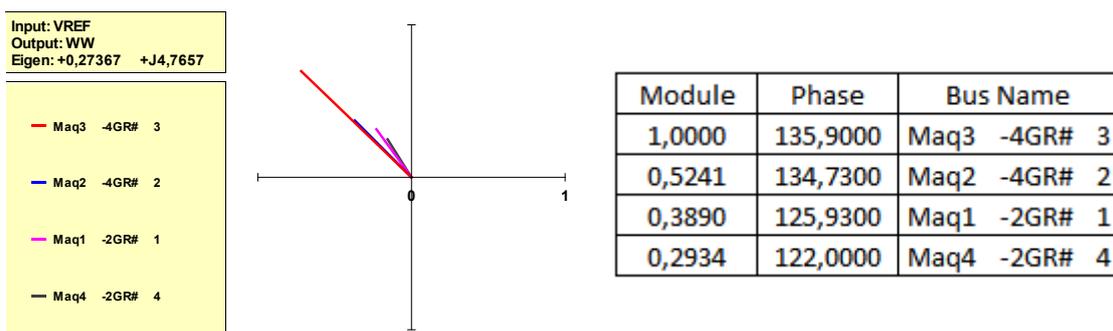


Figura 24: Resíduos do modo selecionado no histórico 3.

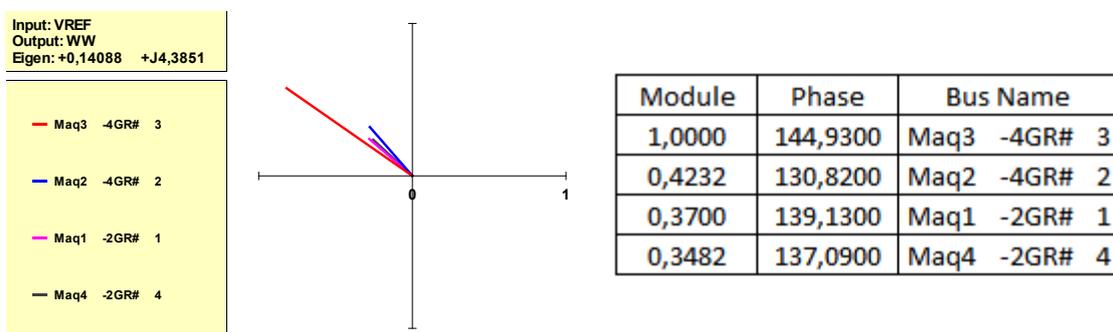


Figura 25: Resíduos do modo selecionado no histórico 4.

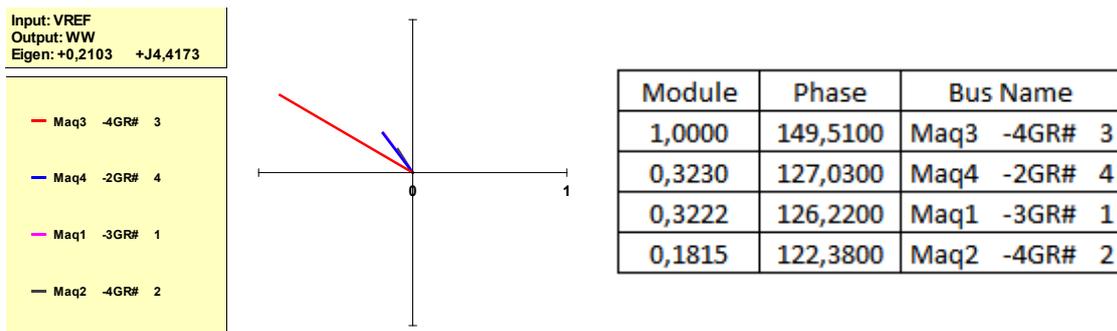


Figura 26: Resíduos do modo selecionado no histórico 5.

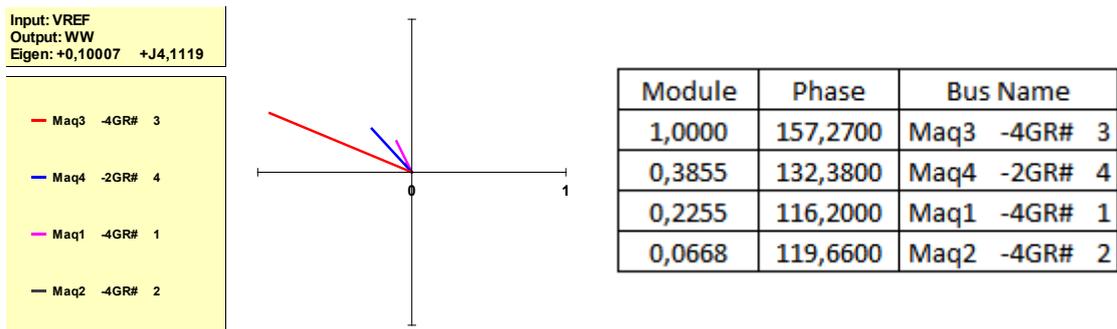


Figura 27: Resíduos do modo selecionado no histórico 6.

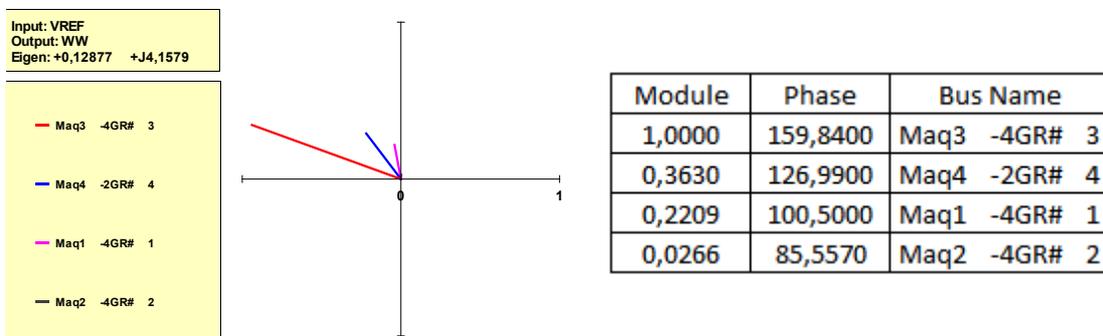


Figura 28: Resíduos do modo selecionado no histórico 7.

Analisando-se os resultados obtidos através do cálculo dos resíduos, pode-se perceber que, com o aumento da potência fornecida pela máquina Maq1 ao sistema, os resíduos desta máquina e da máquina Maq2 diminuem cada vez mais, em relação à máquina Maq3 que possuía o maior resíduo.

Para analisar melhor os motivos desta diminuição do resíduo do gerador Maq1, foram calculados os fatores de controlabilidade (em relação à variável VREF) e de observabilidade (em relação à variável WW) para os modos em estudo.

Os resultados obtidos nos cálculos dos fatores de controlabilidade para os modos em análise podem ser visualizados nas imagens da Figura 29 à Figura 34 e os resultados obtidos nos cálculos dos fatores de observabilidade para os modos em estudo podem ser visualizados nas imagens da Figura 35 à Figura 40.

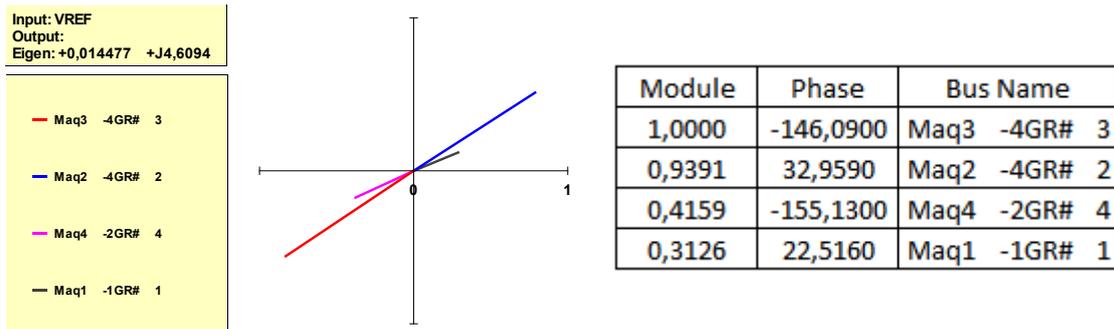


Figura 29: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 2.

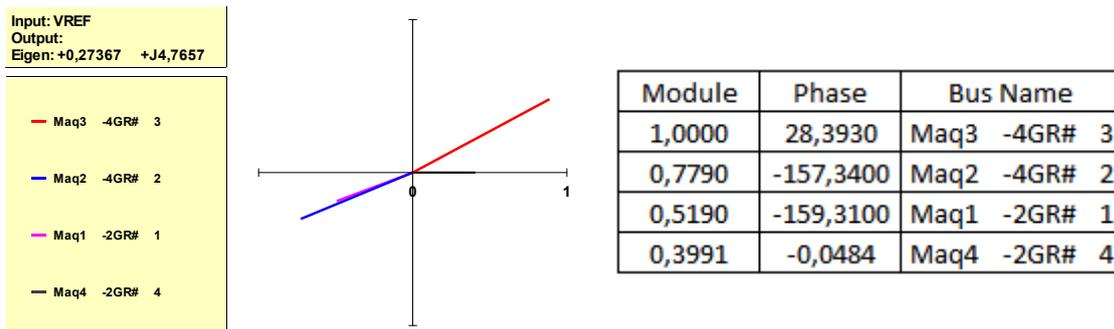


Figura 30: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 3.

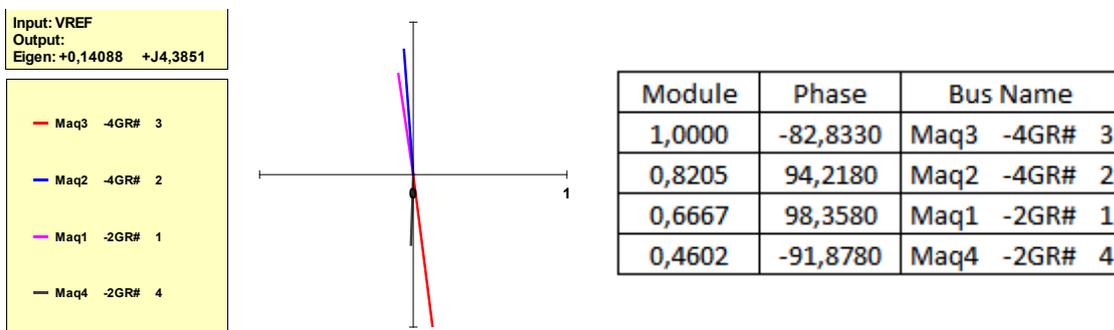


Figura 31: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 4.

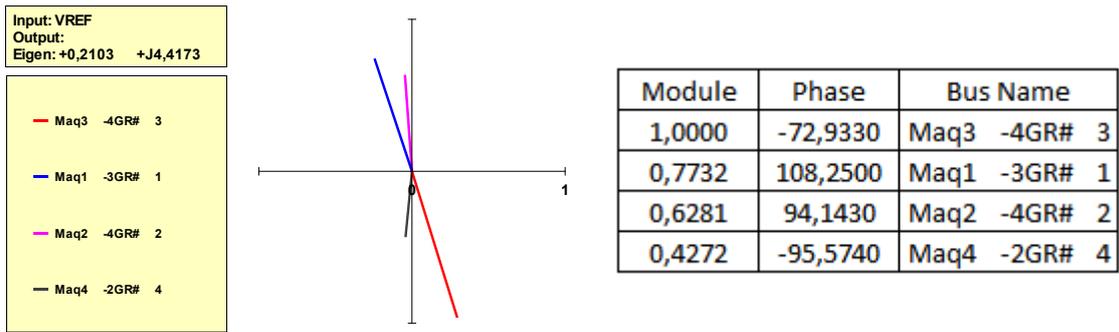


Figura 32: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 5.

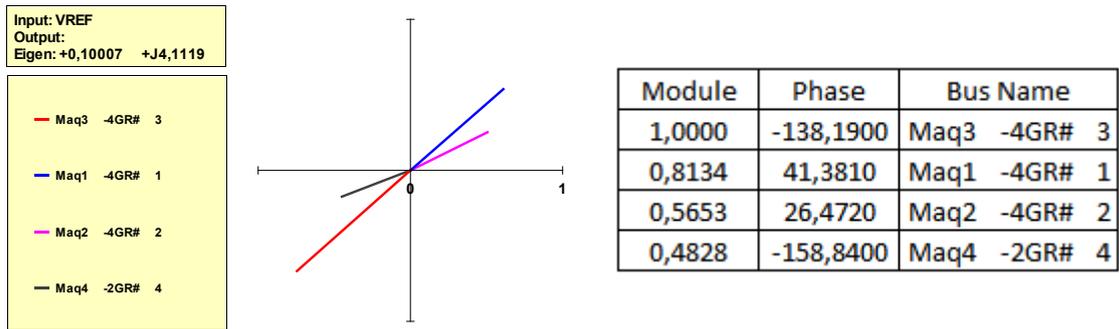


Figura 33: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 6.

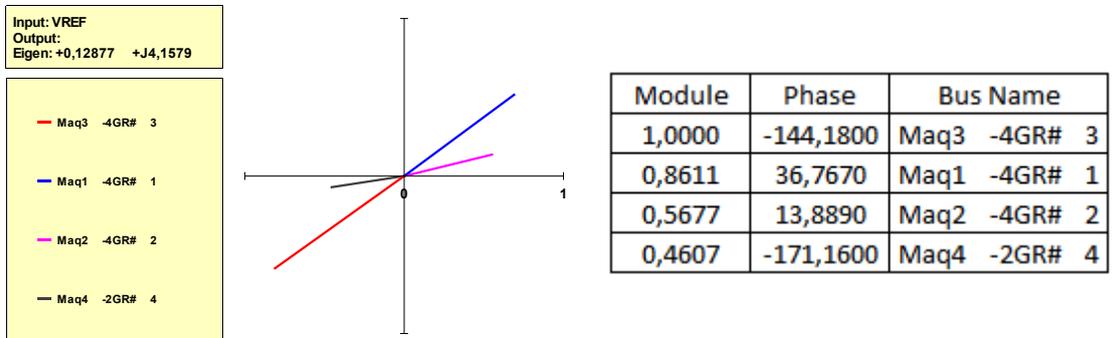


Figura 34: Controlabilidade do modo selecionado no histórico 7.

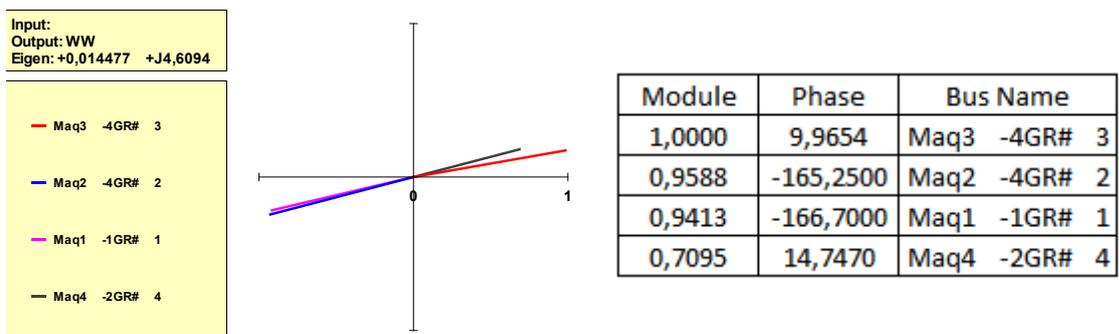


Figura 35: Observabilidade do modo selecionado no histórico 2.

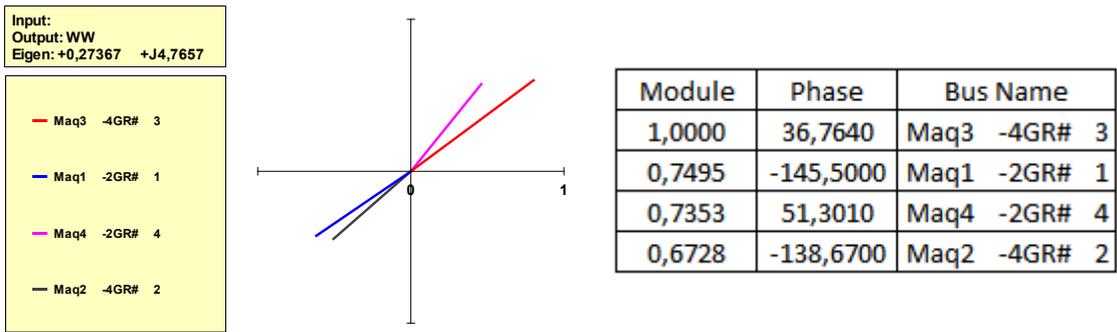


Figura 36: Observabilidade do modo selecionado no histórico 3.

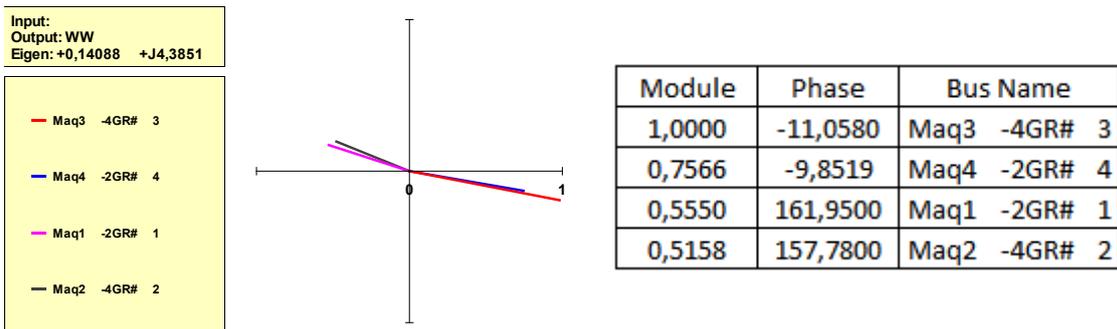


Figura 37: Observabilidade do modo selecionado no histórico 4.

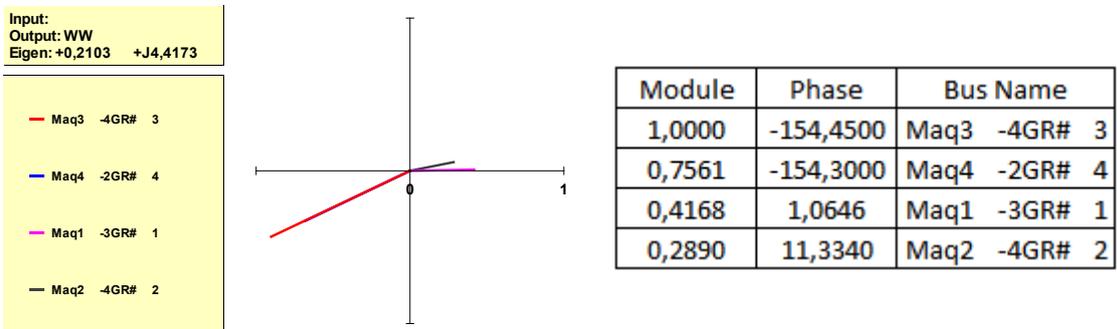


Figura 38: Observabilidade do modo selecionado no histórico 5.

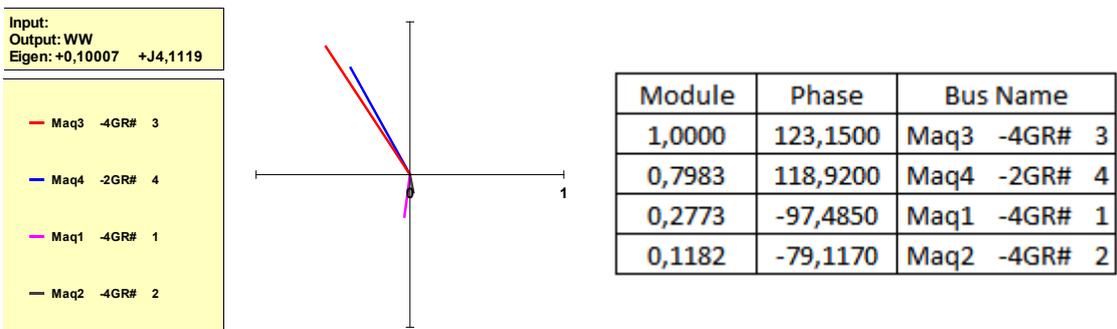


Figura 39: Observabilidade do modo selecionado no histórico 6.

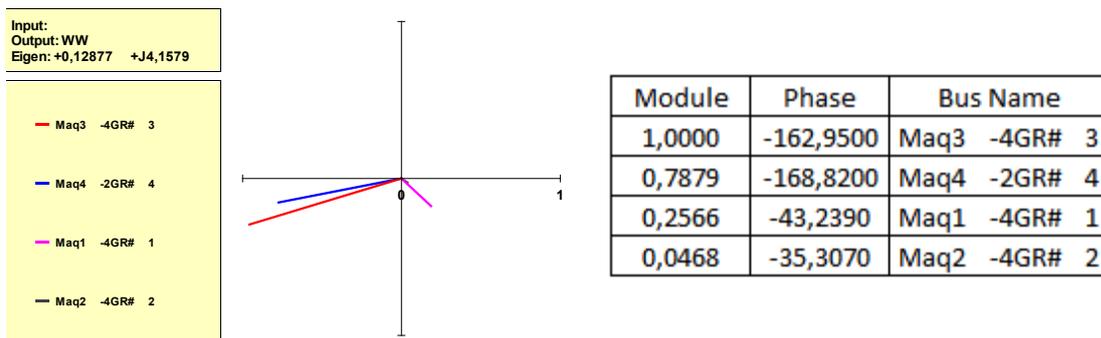


Figura 40: Observabilidade do modo selecionado no histórico 7.

Analisando-se os resultados obtidos no cálculo dos fatores de controlabilidade, pode-se perceber que a controlabilidade da máquina Maq1 sobre os modos estudados aumenta à medida que a potência fornecida por esta máquina ao sistema aumenta.

Pode-se imaginar que isto se deve ao aumento do número de unidades geradoras em operação na usina Maq1, diminui a impedância equivalente desta usina, possibilitando que o conjunto de geradores forneça um valor máximo de potência cada vez maior, o que faz com que uma determinada variação no sinal de referência dos reguladores de tensão acabe gerando uma maior variação instantânea da potência fornecida pelo gerador, aumentando assim a controlabilidade desta máquina em relação aos modos estudados.

Analisando-se os resultados obtidos no cálculo dos fatores de observabilidade, pode-se perceber que a observabilidade da máquina Maq1 dos modos estudados diminui à medida que a potência fornecida por esta máquina ao sistema aumenta.

Pode-se imaginar que isso ocorre devido ao aumento do número de unidades geradoras desta usina que faz com que esta máquina apresente uma amplitude de oscilação cada vez menor, como pode ser visto nos resultados dos cálculos dos *mode shapes* para os modos em análise, diminuindo assim a observação das oscilações destes modos por parte da máquina Maq1, ou seja, diminuindo a observabilidade destes modos de oscilação.

4.1.3. Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência

Nesta etapa, foram utilizados estabilizadores de sistemas de potência nas máquinas Maq1, Maq2 e Maq4 do sistema em estudo e foram analisados todos os históricos criados. Foram calculados os modos do sistema elétrico em questão, de forma a se determinar os modos eletromecânicos menos amortecidos.

Os resultados obtidos no cálculo dos modos, realizado através do método QR, podem ser visualizados na imagem da Figura 41.

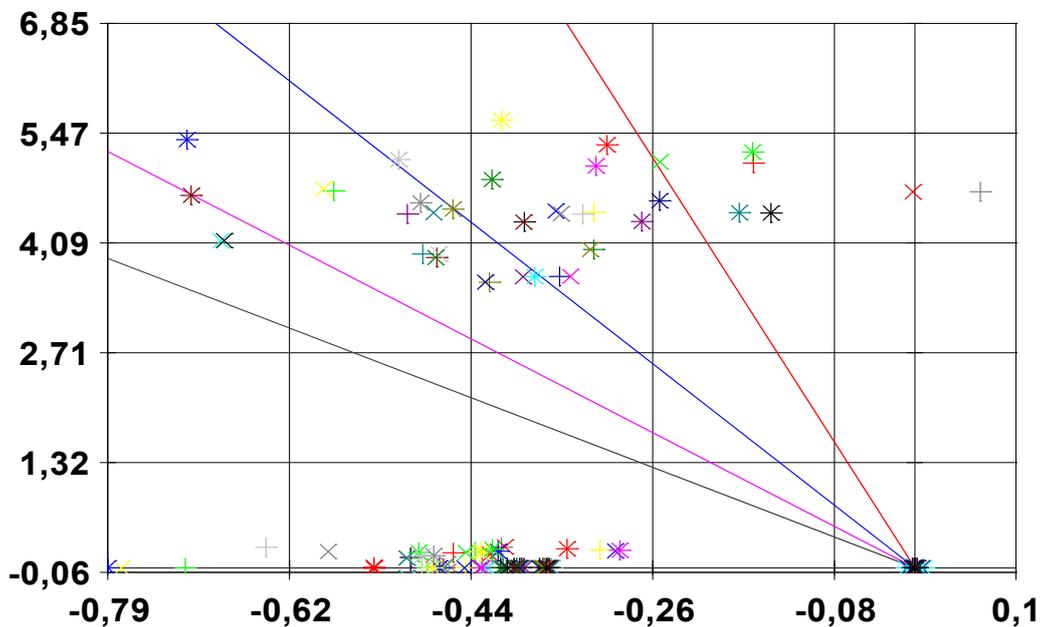


Figura 41: Modos calculados pelo método QR para todos os pontos de operação.

Analisando-se os resultados obtidos no cálculo dos modos do sistema em estudo, pode-se perceber que o modo menos amortecido do sistema em operação normal é o modo eletromecânico $-0,1597 + j5,2339$ com amortecimento de 3,0505%, obtido no histórico 11.

Com relação ao sistema em contingência, o modo menos amortecido é o modo eletromecânico $0,06453 + j4,7333$ com amortecimento de -1,3632%, obtido no histórico 39.

É válido notar que ambos os modos mencionados anteriormente, que são os modos de menor amortecimento do sistema para os casos em operação normal e em contingência, não atendem ao critério de amortecimento adotado neste estudo.

Deve-se perceber, também, que esses modos são modos eletromecânicos, o que significa que os mesmos podem ter seus amortecimentos aumentados através de projetos adequados de PSSs.

Por isso, será realizado um projeto de PSS, de forma a se aumentar o amortecimento do modo eletromecânico de menor amortecimento obtido nos casos do sistema em operação normal.

Após a determinação dos pólos do sistema, pode-se calcular os *mode shapes* de velocidade do modo que foi obtido no histórico 11, selecionado para ser amortecido (ou seja, o modo menos amortecido dos casos do sistema em operação normal), de forma a se determinar o comportamento das máquinas do sistema em estudo em relação às oscilações representadas por este modo, o que pode ser visualizada na Figura 42.

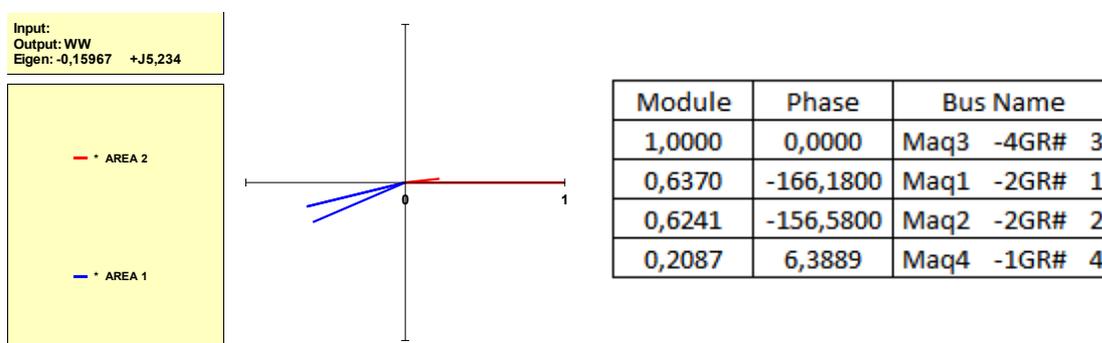


Figura 42: *Mode shape* do modo eletromecânico menos amortecido do histórico 11.

Analisando-se o resultado obtido no cálculo dos *mode shapes*, pode-se perceber que o modo em questão representa as oscilações entre as áreas 1 e 2 do sistema, ou seja, representa as oscilações das máquinas Maq1 e Maq2 em relação às máquinas Maq3 e Maq4, sendo assim um modo inter-área.

O passo seguinte é o cálculo dos resíduos das funções de transferência que têm os sinais de referência dos reguladores de tensão das máquinas do sistema (Vref) como variáveis de entrada e a velocidade dos geradores (WW) como variáveis de saída, em relação ao modo em estudo, cujo resultado, pode ser visualizado na imagem da Figura 43.

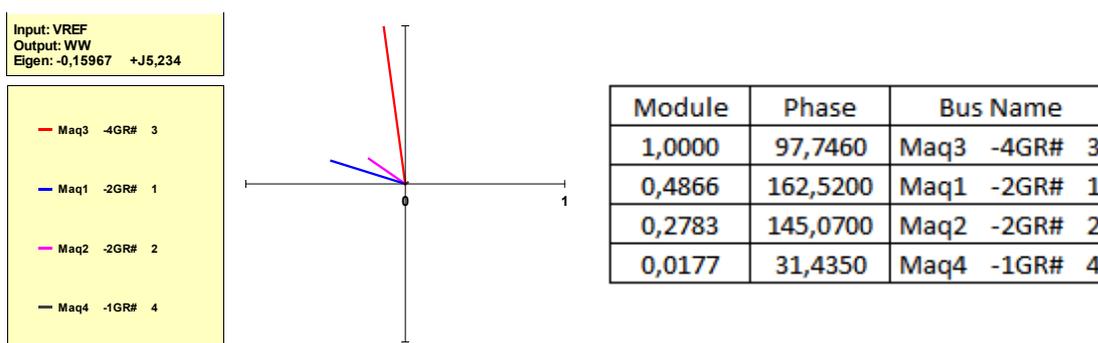


Figura 43: Resíduos do modo eletromecânico menos amortecido do histórico 11.

Analisando-se os resíduos calculados para o modo que se deseja amortecer, pode-se notar que a máquina Maq3 apresenta o maior resíduo, o que indica que esta é a máquina mais adequada do sistema para a instalação de um estabilizador de sistema de potência para amortecer o modo eletromecânico em questão.

Para se projetar o PSS citado anteriormente, é necessário o cálculo da resposta em frequência da função de transferência que tem o sinal de referência do regulador de tensão da máquina Maq3 (VREF 3) como variável de entrada e a velocidade deste mesmo gerador (WW 3) como variável de saída.

Com os resultados obtidos no cálculo das respostas em frequência, pode-se realizar um projeto automático de PSSs para o caso em análise, através do programa PacDyn com auxílio do programa PlotCepel.

O resultado obtido no cálculo da resposta em frequência ou diagrama de Nyquist, utilizando um amortecimento de 15% [11], [12] para o histórico 11, onde foi obtido o modo eletromecânico menos amortecido dos casos em operação normal, pode ser visualizado na Figura 44.

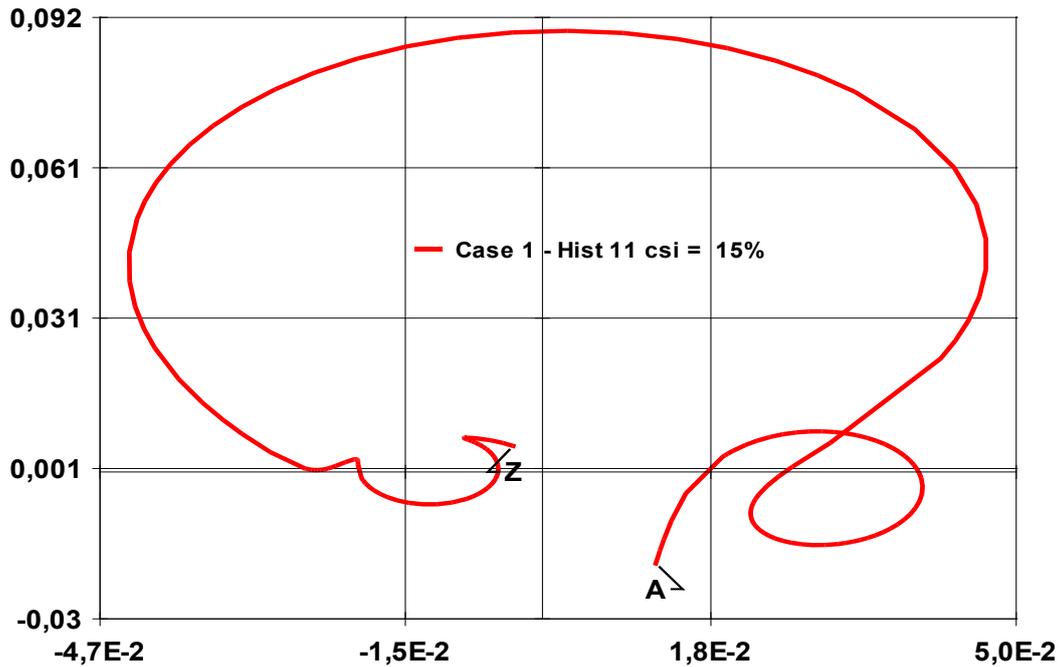


Figura 44: Diagrama de Nyquist obtido para o histórico 11.

Após o cálculo das respostas em frequência, foi realizado a projeto automático de PSSs citado anteriormente. O PSS projetado nesta etapa possui a seguinte função de transferência:

$$PSS(s) = K_{PSS} \left(\frac{1 + T_n s}{1 + T_d s} \right)^{nb} \left(\frac{T_w s}{1 + T_w s} \right)$$

onde: $K_{pss} = 3,06$; $nb = 2$; $T_w = 3$; $T_n = 0,364$; $T_d = 0,0986$.

Com o PSS projetado operando no sistema, o resultado obtido no cálculo da resposta em frequência, com amortecimento de 15%, pode ser visualizado na imagem da Figura 45.

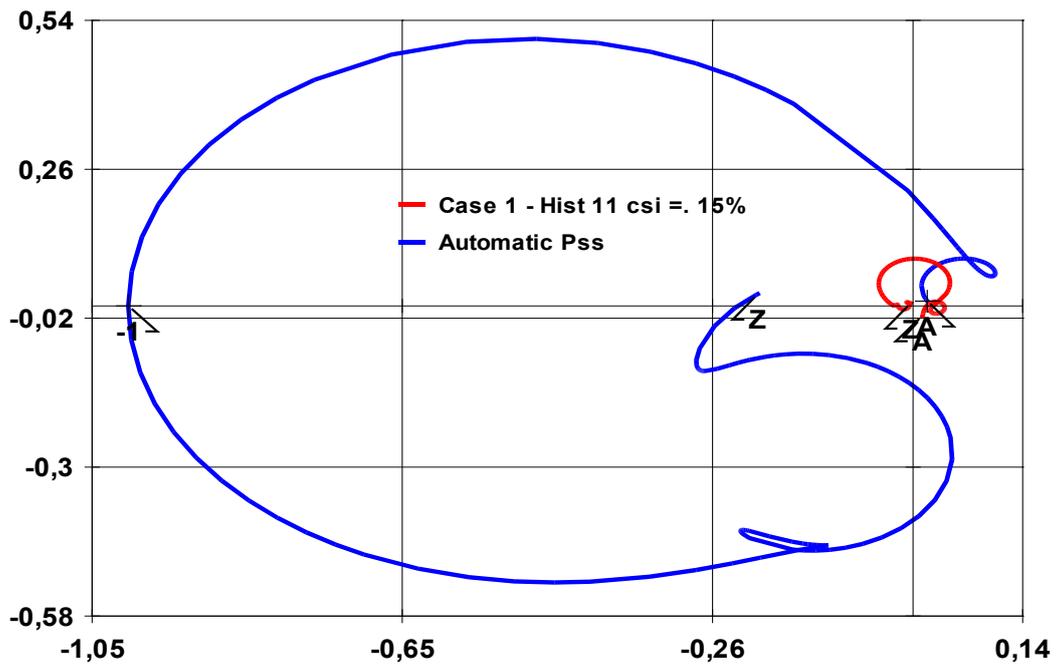


Figura 45: Diagrama de Nyquist com PSS obtido para o histórico 11.

Os resultados obtidos no cálculo dos modos do sistema em estudo, com o PSS projetado operando em todos os pontos de operação em análise, podem ser visualizados na Figura 46.

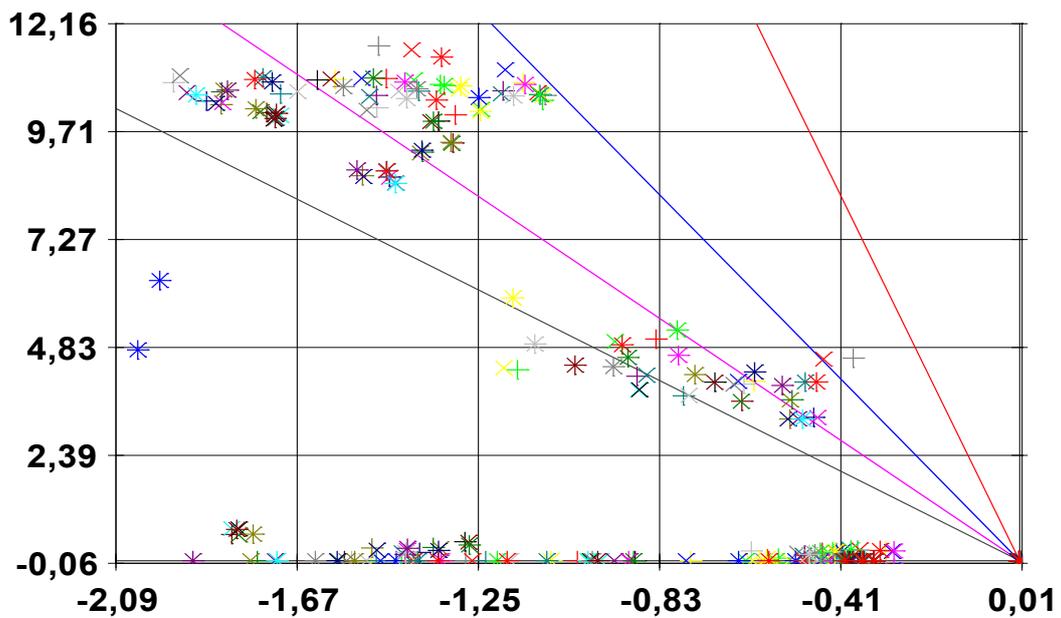


Figura 46: Modos calculados para todos os pontos de operação com o PSS projetado.

Analisando-se os resultados do cálculo dos modos mostrados anteriormente, pode-se perceber o PSS projetado para a máquina Maq3 aumentou o amortecimento dos modos do sistema em estudo. Com o PSS projetado operando, o modo menos amortecido do sistema em operação normal é o modo $-1,1091 + j10,551$ com amortecimento de 10,454%, obtido no histórico 13 e o modo menos amortecido do sistema em contingência é o modo $-0,3846 + j4,5877$ com amortecimento de 8,3538%, obtido no histórico 39.

Pode-se dizer que o projeto do PSS da máquina Maq3 foi realizado com sucesso, uma vez que, com este PSS operando, o modo menos amortecido para o sistema em operação normal possui um amortecimento maior que 10% e o modo menos amortecido para o sistema em contingência possui um amortecimento maior que 5%, estando de acordo com os valores desejados.

Para a verificação do bom amortecimento obtido para o sistema com o projeto do estabilizador da máquina Maq3, no sistema sem o PSS (caso 1) e com o PSS projetado (caso 2), foram calculadas as respostas no tempo da tensão terminal (VB 3) e da frequência (WW 3) desta máquina, quando é aplicado um degrau de 0,001 pu no sinal de referência do regulador de tensão (VREF 3) da mesma e quando é aplicado um degrau de 0,001 pu na potência reativa injetada na barra 3 (BSHU 3) do sistema, para os históricos 13 e 39, onde foram obtidos os modos menos amortecidos do sistema com o PSS projetado operando. Os resultados obtidos no cálculo das respostas no tempo realizado nesta etapa podem ser visualizados nas imagens da Figura 47 à Figura 50.

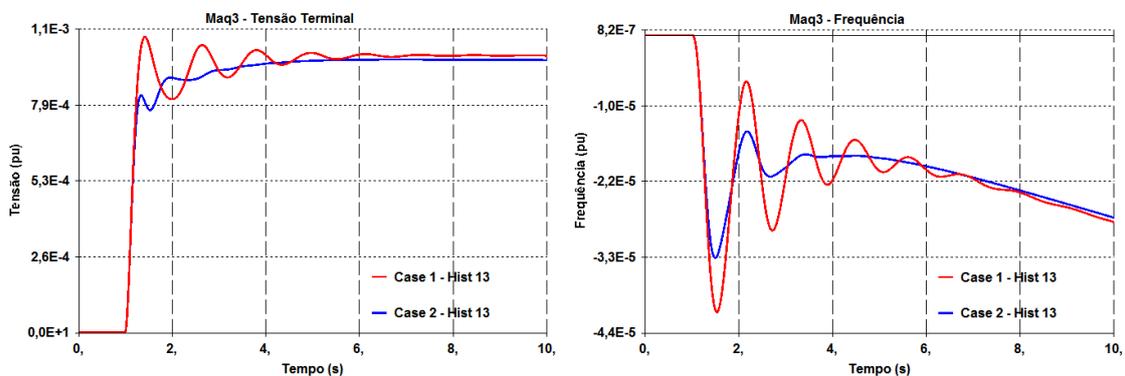


Figura 47: Resposta ao degrau em VREF da máquina Maq3 para o histórico 13.

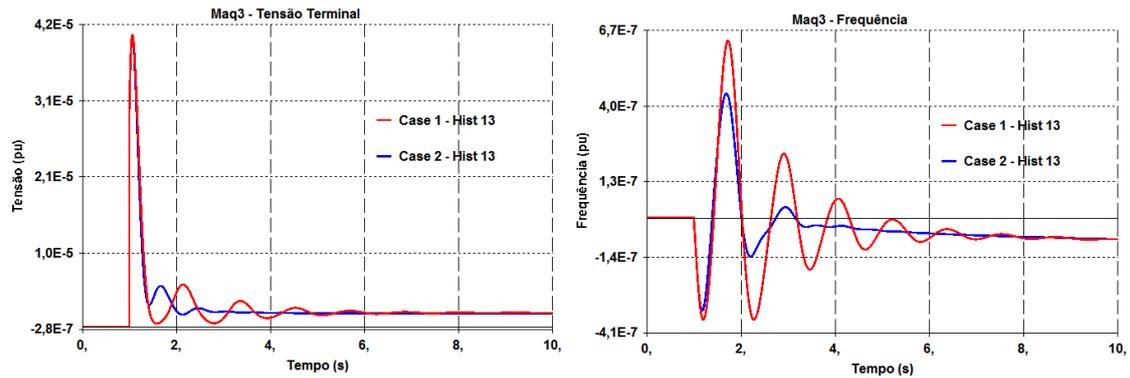


Figura 48: Resposta ao degrau em BSHU da barra 3 para o histórico 13.

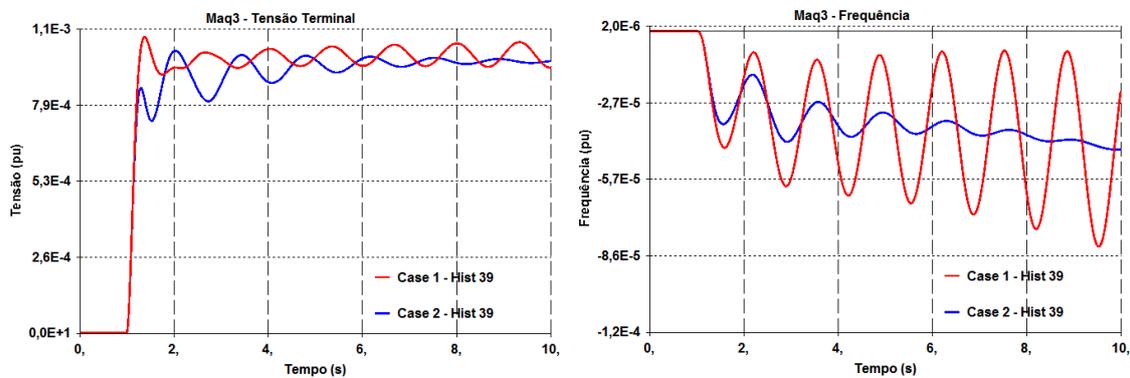


Figura 49: Resposta ao degrau em VREF da máquina Maq3 para o histórico 39.

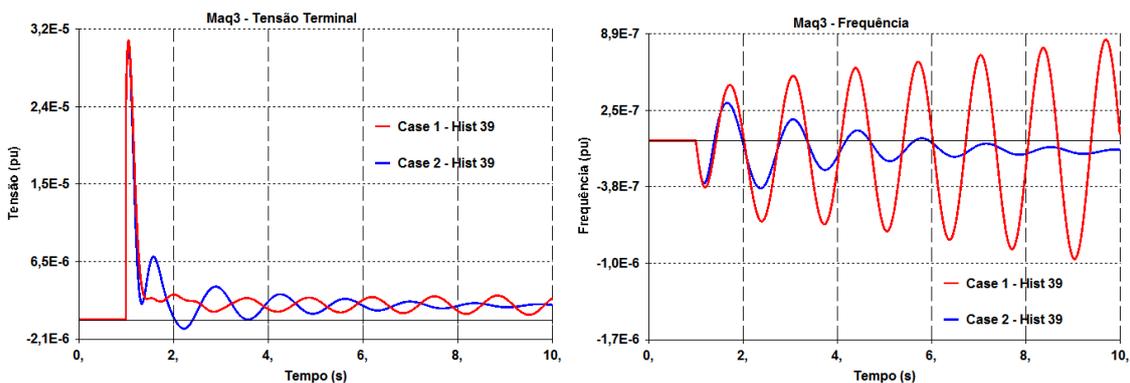


Figura 50: Resposta ao degrau em BSHU da barra 3 para o histórico 39.

Analisando-se os resultados obtidos no cálculo das respostas no tempo, pode-se notar a importância do PSS projetado para a máquina Maq3 para o aumento do amortecimento dos modos de oscilação do sistema, o que comprova o sucesso na realização do projeto do PSS em questão.

Para se verificar o bom amortecimento obtido para todos os pontos de operação em análise, pode-se observar os gráficos das mesmas simulações realizadas anteriormente para todos os casos estudados. Os resultados das simulações mencionadas podem ser visualizados nas imagens da Figura 51 à Figura 54.

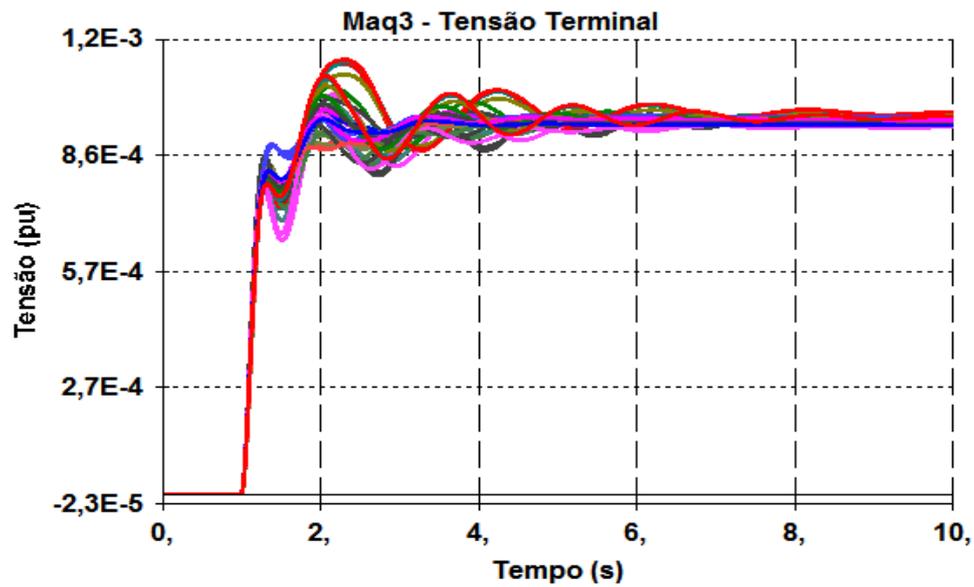


Figura 51: Resposta da tensão terminal da máquina Maq3 ao degra em VREF.

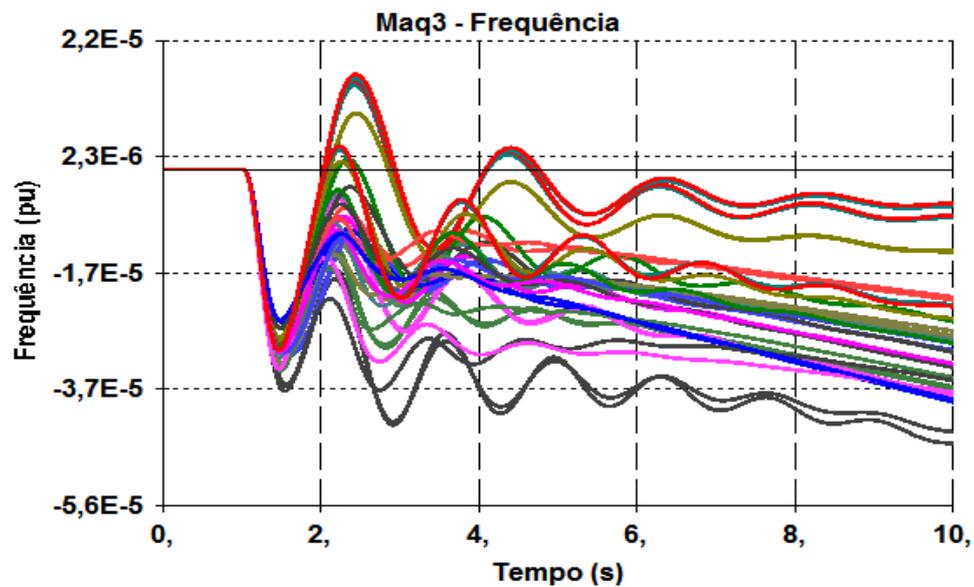


Figura 52: Resposta da frequência da máquina Maq3 ao degra em VREF.

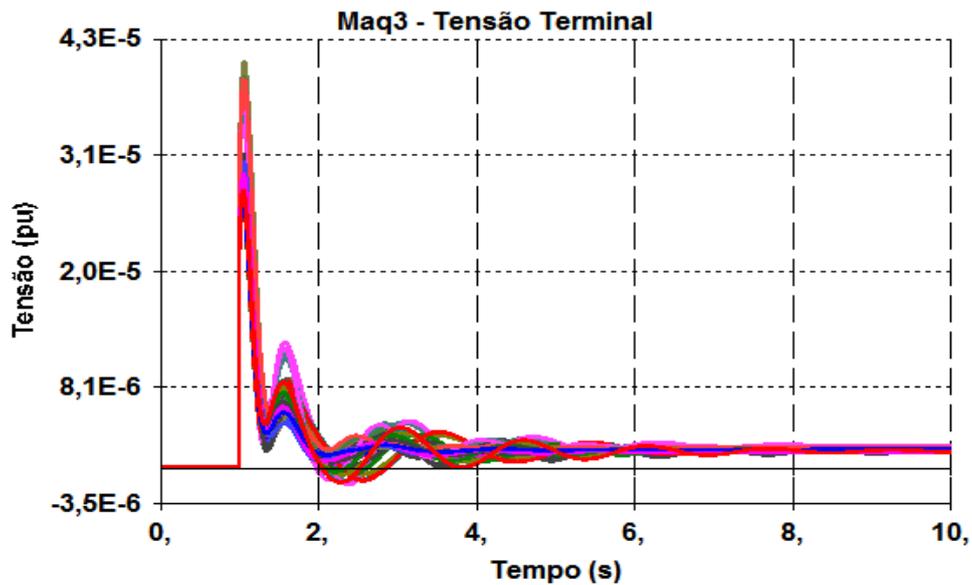


Figura 53: Resposta da tensão terminal da máquina Maq3 ao degrau em BSHU.

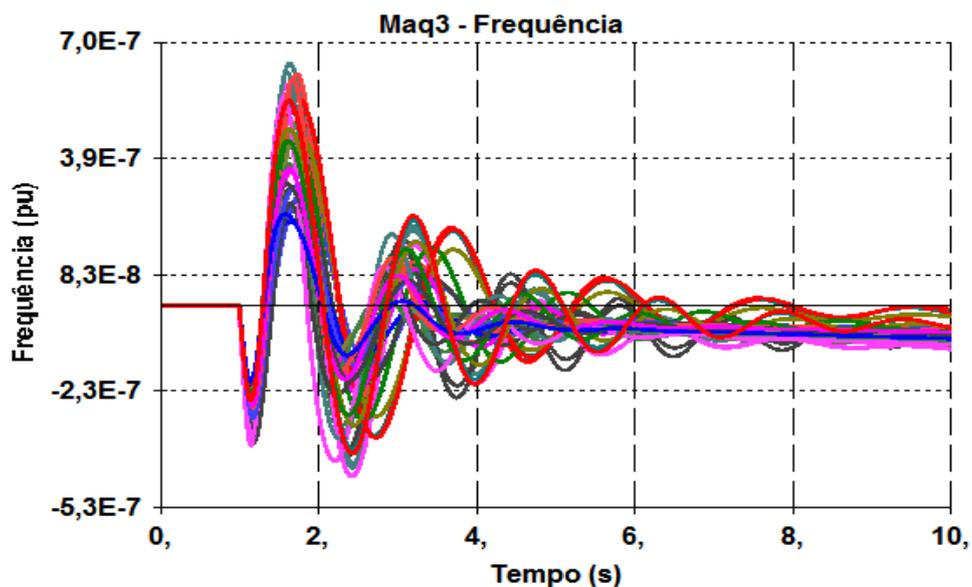


Figura 54: Resposta da frequência da máquina Maq3 ao degrau em BSHU.

Para finalizar a análise do sistema elétrico em estudo, pode-se calcular o *root locus* do sistema nos históricos 13 e 39, através do método QR, que são os pontos de operação onde foram encontrados os modos com menor amortecimento no sistema com o novo PSS projetado, em operação normal e em contingência, variando-se o ganho do PSS projetado, de 0% a 100% de seu valor original. Os resultados obtidos nos cálculos de *root locus* realizados nesta etapa podem ser visualizados na Figura 55 e na Figura 56.

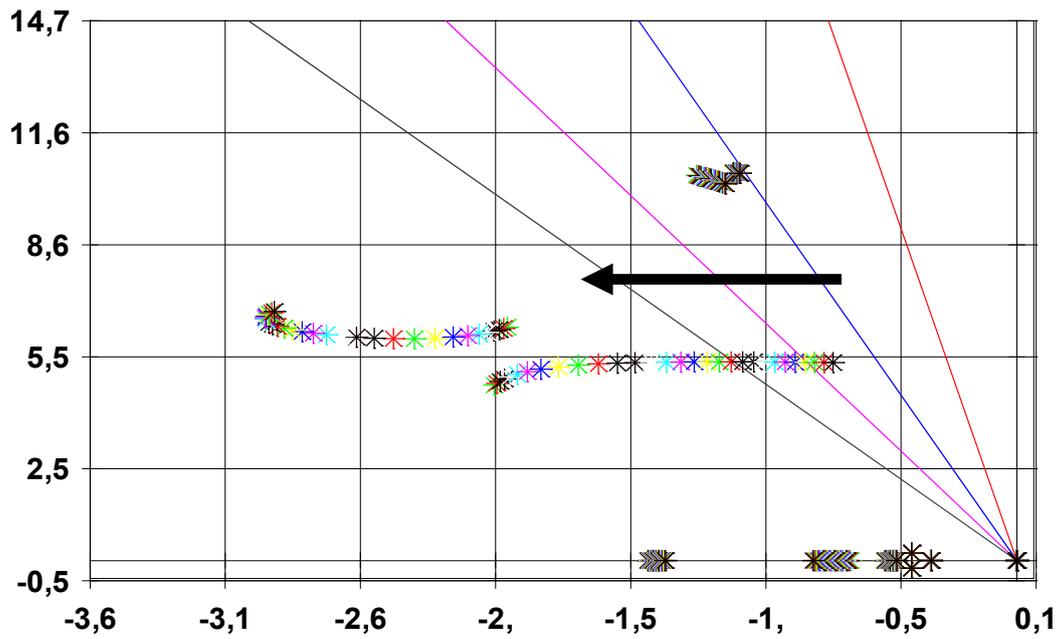


Figura 55: *Root Locus* do sistema para o histórico 13.

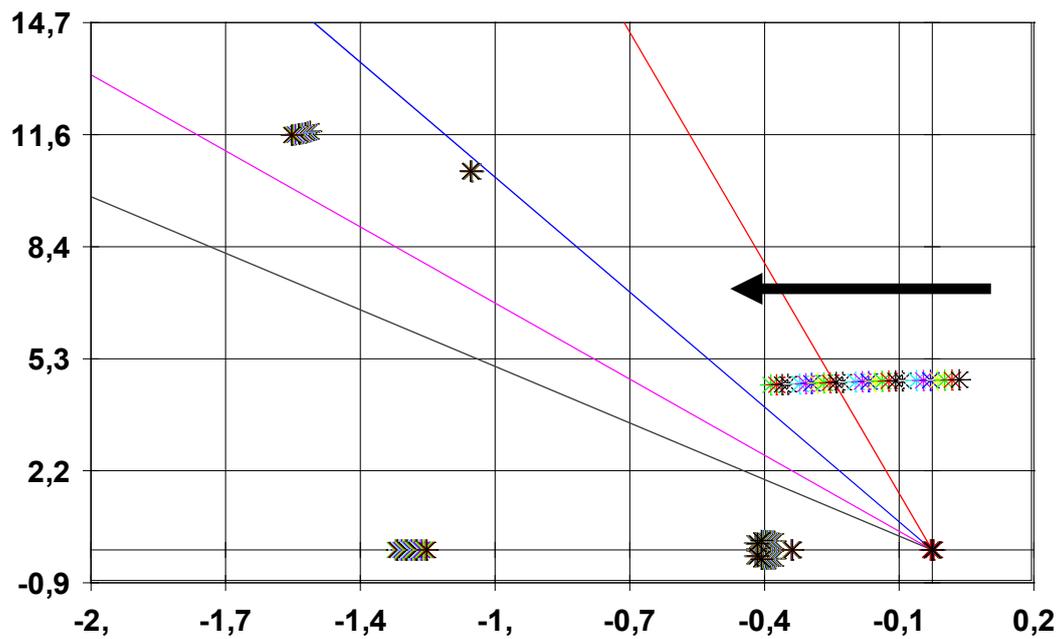


Figura 56: *Root Locus* do sistema para o histórico 39.

Analisando-se o resultado obtido nos cálculos de *root locus* mostrados anteriormente, pode-se perceber que com o aumento do ganho do PSS projetado, os pólos do sistema foram sendo deslocados para o lado esquerdo do plano complexo, o que significa que estes pólos foram caminhando para a região de estabilidade e, conseqüentemente, aumentando o seu amortecimento.

4.2. Estudo do Sistema Interligado Nacional

No estudo do Sistema Interligado Nacional, será realizada a descrição do sistema interligado nacional, será analisado o comportamento deste sistema em determinados pontos de operação através da análise modal, e será realizado o projeto de um estabilizador de sistema de potência com o auxílio da análise de múltiplos cenários.

4.2.1. Descrição dos Casos Estudos do SIN

O sistema elétrico de grande porte analisado neste capítulo é o sistema interligado nacional do banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) de mês de junho do ano de 2011 [28], com a utilização de um estabilizador de sistema de potência na usina Barbosa Lima Sobrinho (antiga Eletrobolt) para o grupo de unidades geradoras de número 10.

Foram analisados os cenários de carga pesada (históricos 1, 2, 3 e os demais pontos de operação que utilizam as mesmas situações de despacho), média (históricos 4, 5, 6 e os demais pontos de operação que utilizam as mesmas situações de despacho) e leve (históricos 7, 8, 9 e os demais pontos de operação que utilizam as mesmas situações de despacho). Nestes cenários, houve variações das potências elétricas fornecidas pelas usinas Itá, Machadinho, Foz do Chapecó, Salto Osório, Salto Santiago e G. B. Munhoz, de forma a se representar variações de vazão das bacias do Rio Uruguai e do Rio Iguaçu.

Foram estudados casos com o sistema brasileiro operando em regime normal e nas contingências das linhas de transmissão Foz do Iguaçu – Ivaíporã de 765 kV, Itaberá – Tijuco Preto de 765 kV, Assis – Londrina de 525 kV e Ibiúna – Bateias de 500 kV, que são linhas importantes para o fornecimento de energia elétrica às cargas das regiões sul e sudeste do Brasil.

É válido dizer que as linhas de transmissão Assis – Londrina e Ibiúna – Bateias operam no mesmo nível de tensão e a diferença existente na tensão nominal citada anteriormente ocorre devido a uma diferença da tensão base utilizada na modelagem do sistema na região sul. Esta região utiliza uma tensão base de 525 kV.

As diferentes situações de fornecimento de potência elétrica ao sistema pelas usinas mencionadas anteriormente e as diferentes configurações da rede elétrica deste mesmo sistema, que foram analisadas neste capítulo, estão representadas nos pontos de operação mostrados da Tabela 8 a Tabela 10.

Tabela 8: Despachos das usinas estudadas.

Ponto de Operação	Usinas da Bacia do Uruguai			Usinas da Bacia do Iguaçu		
	Itá	Machadinho	Foz do Chapecó	Salto Osório	Salto Santiago	G. B. Munhoz
Histórico 1	1420 MW	1120 MW	635 MW	870 MW	1380 MW	1250 MW
Histórico 2	700 MW	550 MW	420 MW	870 MW	1380 MW	1250 MW
Histórico 3	1420 MW	1120 MW	635 MW	490 MW	700 MW	800 MW
Histórico 4	1420 MW	1120 MW	635 MW	870 MW	1380 MW	1250 MW
Histórico 5	700 MW	550 MW	420 MW	870 MW	1380 MW	1250 MW
Histórico 6	1420 MW	1120 MW	635 MW	490 MW	700 MW	800 MW
Histórico 7	800 MW	800 MW	109 MW	870 MW	1000 MW	1000 MW
Histórico 8	700 MW	550 MW	50 MW	870 MW	1000 MW	1000 MW
Histórico 9	800 MW	800 MW	109 MW	490 MW	700 MW	800 MW

Tabela 9: Descrição dos casos em contingência.

Ponto de Operação	Descrição dos Casos em Contingência
Histórico 10	Histórico 1, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 11	Histórico 2, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 12	Histórico 3, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 13	Histórico 4, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 14	Histórico 5, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 15	Histórico 6, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 16	Histórico 7, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 17	Histórico 8, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 18	Histórico 9, sem a LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã circuito 1.
Histórico 19	Histórico 1, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 20	Histórico 2, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 21	Histórico 3, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 22	Histórico 4, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.

Tabela 10: Descrição dos casos em contingência – continuação.

Ponto de Operação	Descrição dos Casos em Contingência
Histórico 23	Histórico 5, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 24	Histórico 6, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 25	Histórico 7, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 26	Histórico 8, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 27	Histórico 9, sem a LT 765 kV Itaberá – Tijuco Preto circuito 1.
Histórico 28	Histórico 1, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 29	Histórico 2, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 30	Histórico 3, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 31	Histórico 4, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 32	Histórico 5, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 33	Histórico 6, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 34	Histórico 7, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 35	Histórico 8, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 36	Histórico 9, sem a LT 525 kV Assis – Londrina circuito 1.
Histórico 37	Histórico 1, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 38	Histórico 2, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 39	Histórico 3, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 40	Histórico 4, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 41	Histórico 5, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 42	Histórico 6, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 43	Histórico 7, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 44	Histórico 8, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.
Histórico 45	Histórico 9, sem a LT 500 kV Ibiúna – Bateias circuito 1.

Um dos objetivos desse estudo é analisar o comportamento do sistema nas diversas situações de fornecimento de potência das usinas das bacias do Rio Uruguai e do Rio Iguaçu. O outro objetivo é projetar um PSS para o sistema, de forma a se obter modos com amortecimento acima de 12% para os casos em operação normal e acima de 7% para os casos em contingência.

4.2.2. Análise Modal do Sistema Interligado Nacional

Primeiramente, foram calculados os modos do Sistema Interligado Nacional através do método de Rayleigh, com a utilização do programa ANATO, para os históricos de 1 a 9, onde são representadas diferentes situações de vazão das bacias do Rio Uruguai e do Rio Iguaçu e, conseqüentemente, são utilizados diferentes despachos de potência elétrica nas usinas Itá, Machadinho, Foz do Chapecó, Salto Osório, Salto Santiago e G. B. Munhoz.

O objetivo desse cálculo era determinar os modos que representam oscilações entre as máquinas das regiões sul e sudeste do Brasil nos patamares de carga pesada, média e leve, ou seja, os modos de oscilação da interligação sul - sudeste do sistema interligado nacional.

Os resultados obtidos no cálculo dos modos realizado nesta etapa podem ser visualizados na Figura 57.

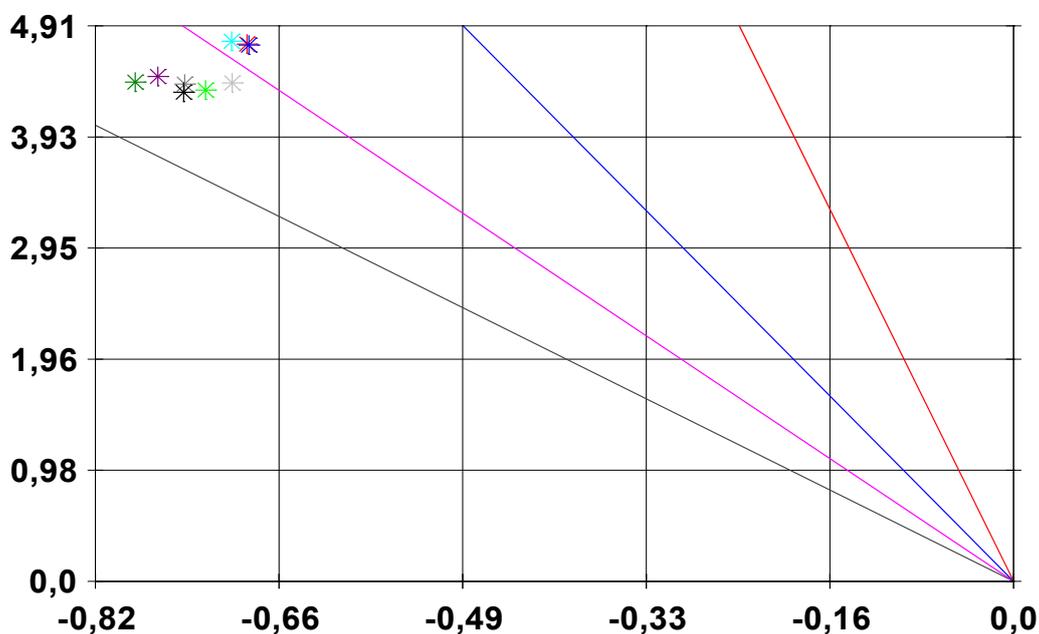


Figura 57: Modos calculados para os históricos de 1 a 9 pelo método de *Rayleigh*.

Os modos do sistema elétrico em estudo que foram determinados no cálculo realizado anteriormente são os modos eletromecânicos listados na Tabela 11.

Tabela 11: Modos determinados através do método de *Rayleigh*.

Ponto de Operação	Modo Selecionado	Amortecimento	Fator de Participação
Histórico 1	$-0,7438 + j4,3236$	16,955%	WW – UTBLSOBR 1
Histórico 2	$-0,7873 + j4,4135$	17,562%	DELT – I.SOLT
Histórico 3	$-0,7243 + j4,3434$	16,448%	DELT – I.SOLT
Histórico 4	$-0,7429 + j4,3953$	16,667%	DELT – I.SOLT
Histórico 5	$-0,7670 + j4,4629$	16,938%	DELT – I.SOLT
Histórico 6	$-0,7004 + j4,4049$	15,704%	DELT – I.SOLT
Histórico 7	$-0,6855 + j4,7400$	14,313%	WW – MACHADIN
Histórico 8	$-0,6871 + j4,7484$	14,321%	WW – MACHADIN
Histórico 9	$-0,7008 + j4,7738$	14,525%	WW – MACHADIN

Após os cálculos dos modos do sistema interligado, pode-se calcular os *mode shapes* de velocidade dos pólos obtidos, de forma a se determinar se estes modos são, realmente, os modos que representam oscilações entre as máquinas das regiões sul e sudeste brasileiras. Os resultados dos cálculos dos *mode shapes* podem ser visualizados nas imagens da Figura 58 à Figura 66.

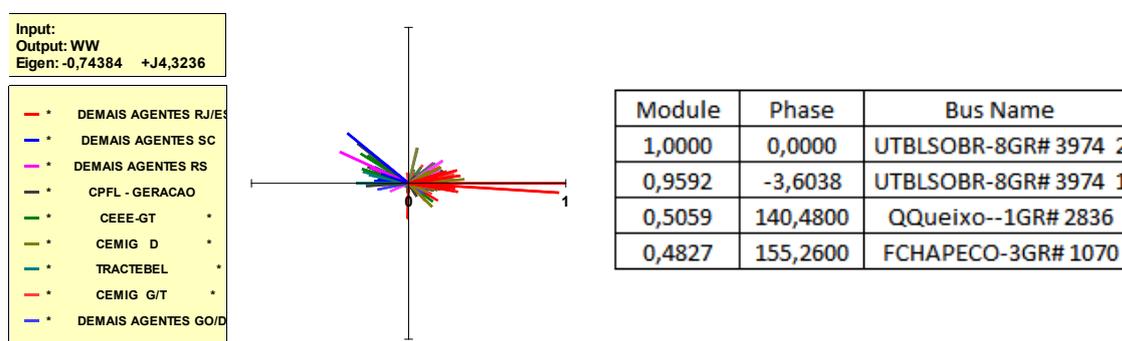


Figura 58: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 1.

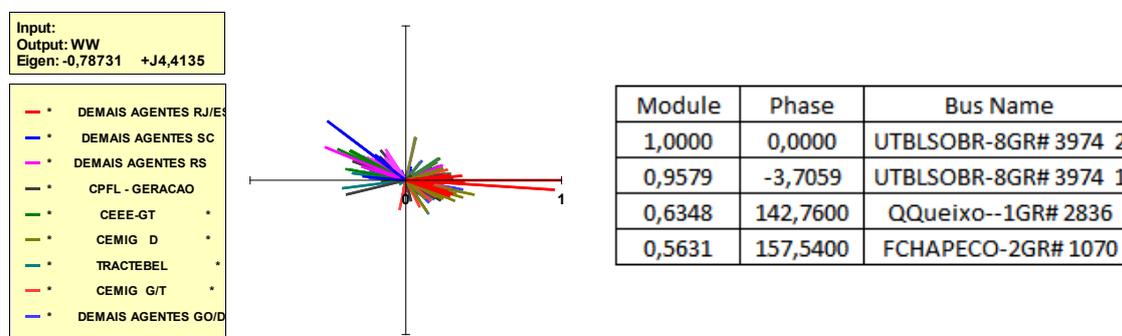


Figura 59: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 2.

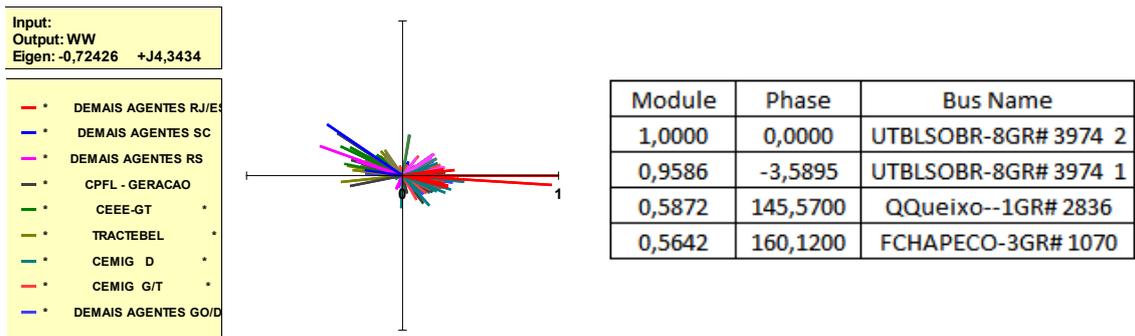


Figura 60: Mode shape do modo selecionado no histórico 3.

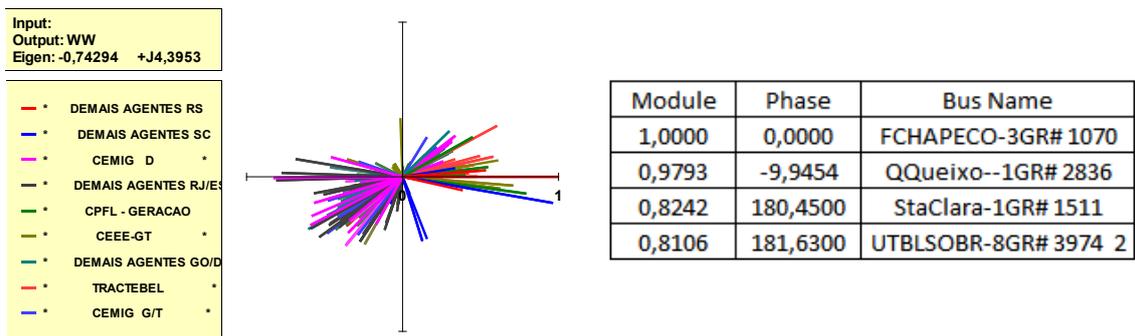


Figura 61: Mode shape do modo selecionado no histórico 4.

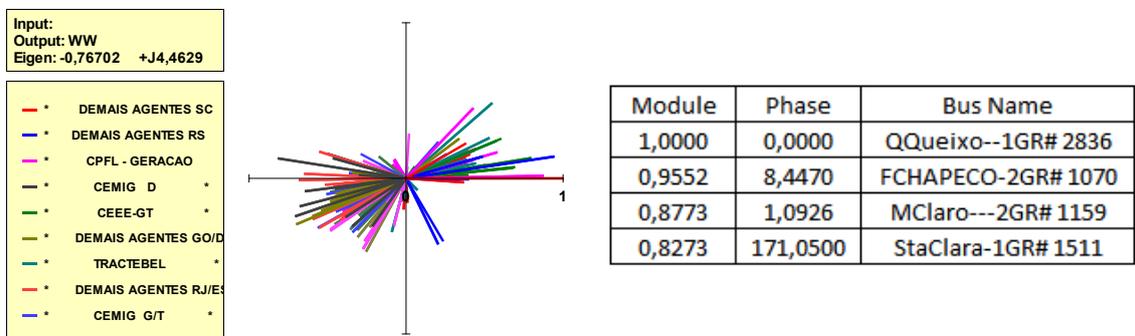


Figura 62: Mode shape do modo selecionado no histórico 5.

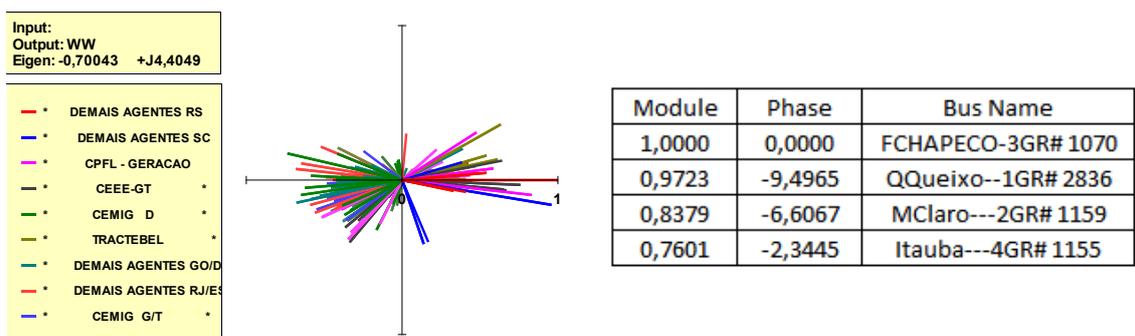


Figura 63: Mode shape do modo selecionado no histórico 6.

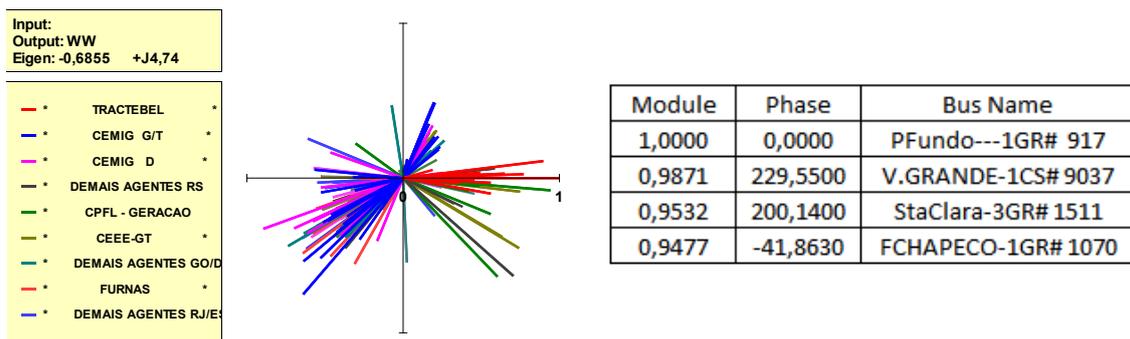


Figura 64: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 7.

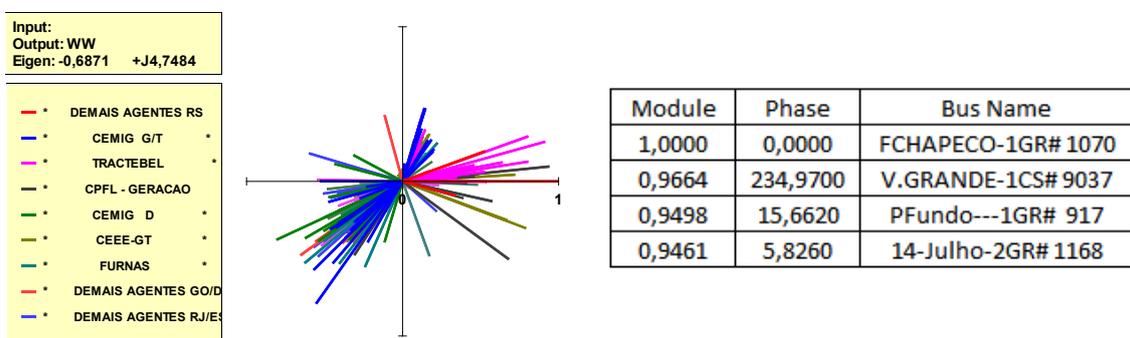


Figura 65: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 8.

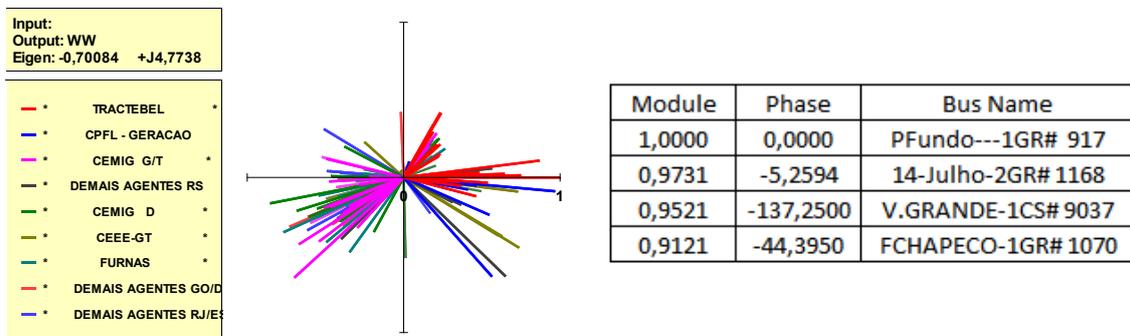


Figura 66: *Mode shape* do modo selecionado no histórico 9.

Analisando-se os resultados obtidos no cálculo dos *mode shapes* realizado anteriormente, pode-se observar que os modos eletromecânicos em estudo são modos que representam oscilações relacionadas à interligação sul - sudeste.

É válido notar que, dentre os modos calculados nesta etapa, o modo menos amortecido obtido para o patamar de carga pesada foi o modo $-0,7243 + j4,3434$ com amortecimento de 16,448% obtido no histórico 3, para o patamar de carga média foi o modo $-0,7004 + j4,4049$ com amortecimento de 15,704% obtido no histórico 6 e para o patamar de carga leve foi o modo $-0,6855 + j4,7400$ com amortecimento de 14,313% obtido no histórico 7.

Os casos históricos que apresentaram os modos com menor amortecimento nos patamares de carga pesada e média são os casos que representam situações de baixa vazão na bacia do Rio Iguaçu, onde as usinas Salto Osório, Salto Santiago e G. B. Munhoz apresentam baixa potência elétrica fornecida ao sistema, em operação normal (sem contingências).

O caso histórico que apresentou o modo com menor amortecimento no patamar de carga leve é o caso que representa a situação de vazão normal nas bacias do Rio Uruguai e do Rio Iguaçu, onde as usinas Itá, Machadinho, Foz do Chapecó, Salto Osório, Salto Santiago e G. B. Munhoz apresentam os despachos de potência originais do banco de dados do ONS.

Também é válido dizer que todos os modos determinados e estudados nesta etapa, que representam as oscilações da interligação sul - sudeste, apresentam amortecimentos com valores acima de 14%, ou seja, estes modos possuem bons valores de amortecimento, valores aceitáveis de amortecimento.

4.2.3. Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência

Nesta etapa, foram inicialmente calculados, através do método DPSE, os pólos dominantes da função de transferência que tem o sinal de referência do regulador de tensão das máquinas da usina de Itaipu 60 Hz (VREF 1107) como variáveis de entrada e a velocidade destes mesmos geradores (WW 1107) como variáveis de saída. Os resultados deste cálculo podem ser visualizados na Figura 67.

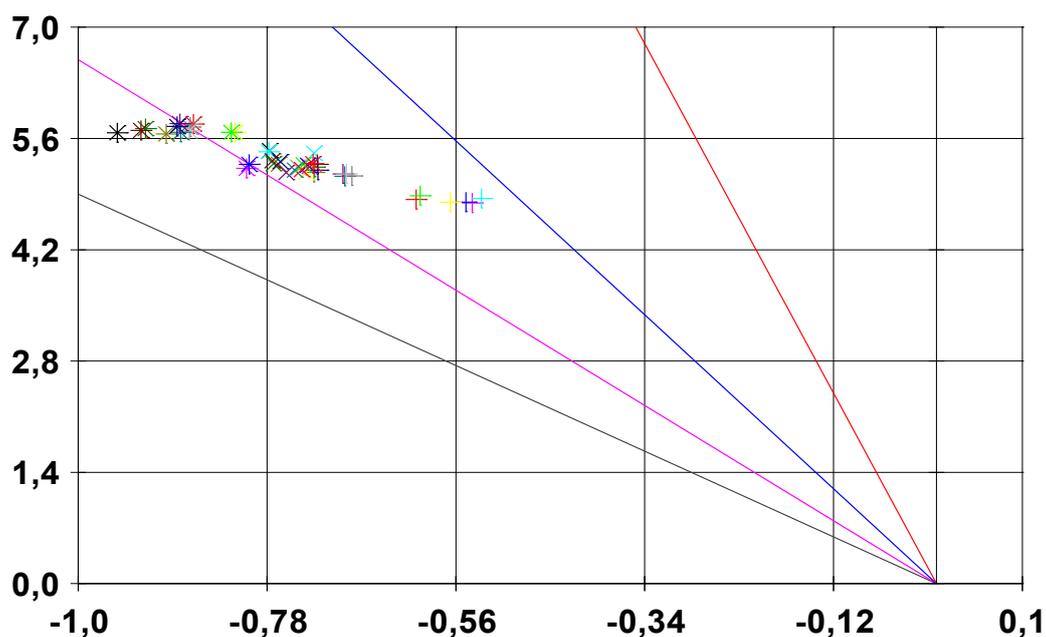


Figura 67: Modos calculados através do método DPSE com o PSS de Itaipu 60 Hz.

Analisando-se os resultados do cálculo dos modos do sistema em estudo mostrados anteriormente, pode-se perceber que o modo menos amortecido obtido para o sistema em operação normal é o modo eletromecânico $-0,7267 + j5,285$ com amortecimento de 13,621%, obtido no histórico 1, que representa o patamar de carga pesada com vazões normais nas bacias do Rio Uruguai e do Rio Iguaçu.

Com relação ao sistema em contingência, o modo menos amortecido obtido é o modo eletromecânico $-0,5301 + j4,8473$ com amortecimento de 10,871%, obtido no histórico 12, que representa o patamar de carga pesada com baixa vazão na bacia do Rio Iguaçu, sem a linha de transmissão Foz do Iguaçu – Ivaiporã de 765 kV circuito 1.

Em seguida, foi retirado o estabilizador de sistema de potência da usina Itaipu 60 Hz, de forma a se gerar oscilações pouco amortecidas ou com amortecimento negativo (instáveis) no sistema, relacionadas a esta máquina, para que houvesse a necessidade de se realizar o projeto de um novo PSS para a usina mencionada.

Inicialmente, foi realizado o cálculo dos modos do sistema interligado nacional na condição citada, através do método de DPSE. Os resultados deste cálculo podem ser visualizados na Figura 68.

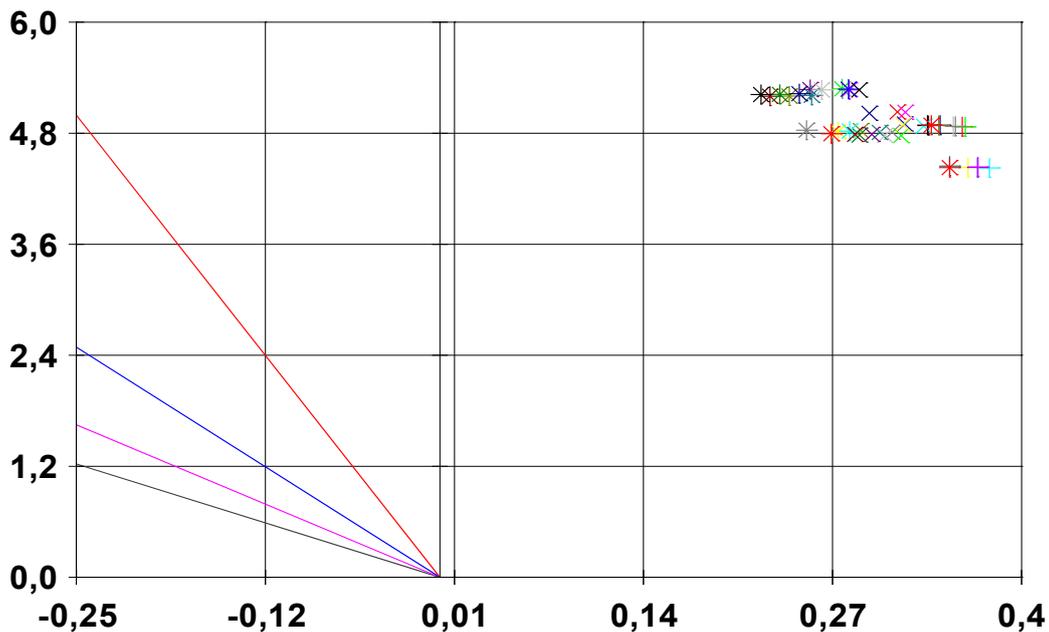


Figura 68: Modos calculados através do método DPSE sem o PSS de Itaipu 60 Hz.

Analisando-se os resultados do cálculo dos modos do sistema em estudo mostrados anteriormente, pode-se perceber que o modo menos amortecido obtido para o sistema em operação normal é o modo eletromecânico $0,3613 + j4,8692$ com amortecimento de $-7,4005\%$, obtido no histórico 6, que representa o patamar de carga média com baixa vazão na bacia do Rio Iguaçu (ou seja, baixos despachos das usinas Salto Osório, Salto Santiago e G. B. Munhoz).

Com relação ao sistema em contingência, o modo menos amortecido obtido é o modo eletromecânico $0,3780 + j4,4255$ com amortecimento de $-8,5103\%$, obtido no histórico 15, que representa o patamar de carga média com baixa vazão na bacia do Rio Iguaçu (mesma situação de vazão do histórico 6), sem a linha de transmissão Foz do Iguaçu – Ivaiporã de 765 kV circuito 1.

É válido notar que ambos os modos mencionados anteriormente, que são os modos de menor amortecimento do sistema obtidos para os casos em operação normal e em contingência, não atendem ao critério de amortecimento mínimo adotado neste estudo.

Calculando-se o fator de participação dos modos em estudo, pode-se perceber que esses modos são modos eletromecânicos, o que significa que os mesmos podem ter seus amortecimentos aumentados através de projetos adequados de estabilizadores de sistemas de potência.

Por isso, será realizado um projeto de PSS, de forma a se aumentar o amortecimento do modo eletromecânico menos amortecido obtido para o caso do sistema em operação normal.

Após a determinação dos pólos do sistema, pode-se calcular os *mode shapes* de velocidade do modo que foi obtido no histórico 6, selecionado para ser amortecido (ou seja, o modo com menor amortecimento dos casos do sistema em operação normal), de forma a se determinar o comportamento das máquinas do sistema interligado nacional em relação às oscilações representadas por este modo, o que pode ser visualizada na Figura 69.

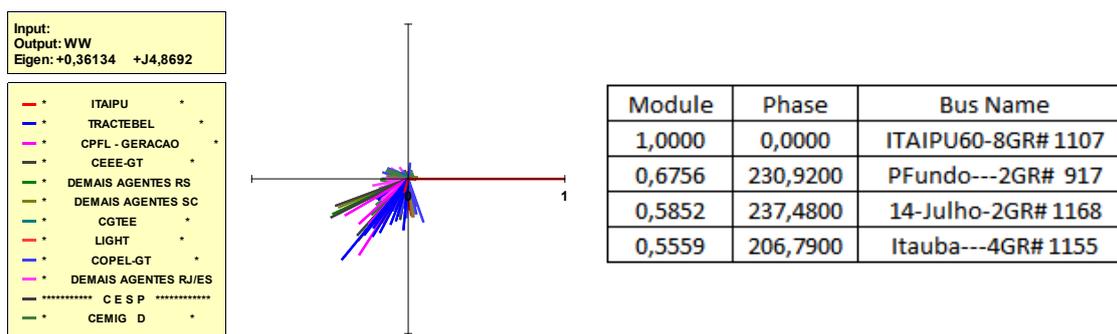


Figura 69: *Mode shape* do modo menos amortecido obtido no histórico 6.

Analisando-se o resultado obtido no cálculo dos *mode shapes*, pode-se perceber que o modo em questão representa as oscilações da usina Itaipu 60 Hz em relação às demais máquinas do sistema, ou seja, este modo de oscilação é um modo local da usina Itaipu 60 HZ.

Após a análise dos *mode shapes*, é realizado o cálculo dos resíduos das funções de transferência que têm os sinais de referência dos reguladores de tensão das máquinas do sistema (VREF) como variáveis de entrada e a velocidade dos geradores (WW) como variáveis de saída, em relação ao modo em estudo, cujo resultado, pode ser visualizado na Figura 70.

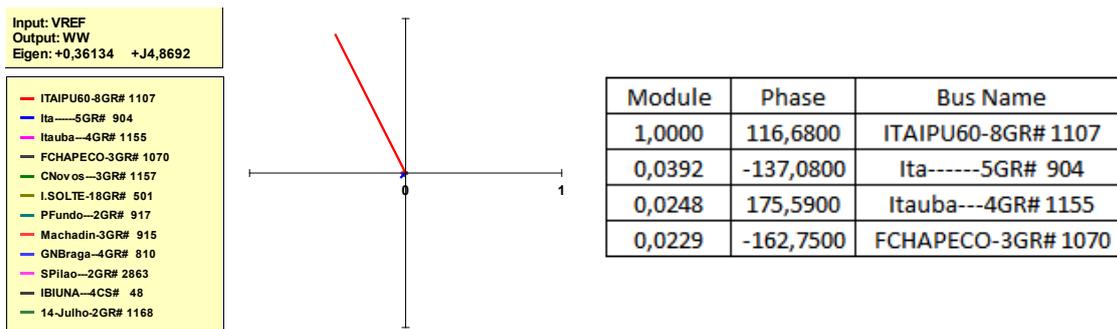


Figura 70: Resíduos do modo menos amortecido obtido no histórico 6.

Analisando-se os resíduos calculados para o modo que se deseja amortecer, pode-se notar que a máquina Itaipu 60 Hz apresenta o maior resíduo em relação ao mesmo, o que indica que esta é a máquina mais adequada do sistema para a instalação de um PSS para amortecer o modo eletromecânico em questão, o que era esperado, uma vez que o modo em questão é um modo local desta usina.

Para a realização de projetos de PSSs através do programa PacDyn, é necessário o cálculo da resposta em frequência da função de transferência que tem o sinal de referência do regulador de tensão da usina de interesse (VREF) como variável de entrada e a velocidade deste mesmo gerador (WW) como variável de saída.

Isto ocorre porque, em geral, o sinal do estabilizador de sistema potência é utilizado no regulador de tensão das usinas no somador onde se encontra o sinal de referência deste controlador.

No caso do regulador de tensão da usina de Itaipu 60 Hz, o sinal do estabilizador é utilizado em outra malha de controle e, por isso, para se projetar um PSS para esta usina, é necessário o cálculo da resposta em frequência da função de transferência que tem o próprio sinal do estabilizador da usina Itaipu 60 Hz (VPSS 1107) como variável de entrada e a velocidade deste mesmo gerador (WW 1107) como variável de saída.

Inicialmente, foi utilizado um amortecimento de 15% para o cálculo do diagrama de Nyquist realizado para o projeto do PSS para a usina de Itaipu 60 Hz [11], [12]. O resultado obtido neste cálculo, para o histórico 6, onde foi obtido o modo eletromecânico menos amortecido dos casos em operação normal, pode ser visualizado na Figura 71.

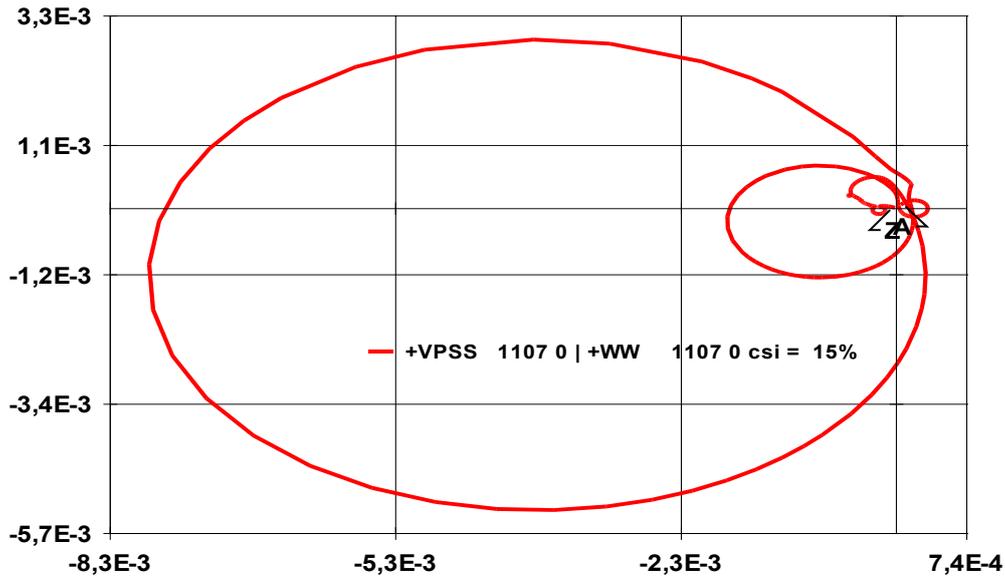


Figura 71: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 15%.

Analisando-se o resultado mostrado anteriormente, obtido no cálculo do diagrama de Nyquist, utilizando-se um amortecimento de 15%, pode-se perceber que há a presença de quatro ressonâncias nesta faixa de fator de amortecimento, representadas por variações circulares do diagrama de Nyquist, dificultando um pouco a sua visualização para o projeto de estabilizador de sistema de potência.

Após o cálculo da resposta em frequência mencionada, foi realizado a projeto automático de PSSs citado anteriormente. O PSS projetado nesta etapa possui a seguinte função de transferência.

$$PSS(s) = K_{PSS} \left(\frac{1 + T_n s}{1 + T_d s} \right)^{nb} \left(\frac{T_w s}{1 + T_w s} \right)$$

onde: $K_{pss} = -1250$; $nb = 2$; $T_w = 3$; $T_n = 0,137$; $T_d = 0,03$.

O resultado obtido no cálculo da resposta em frequência, com o PSS projetado operando no sistema, pode ser visualizado na Figura 72.

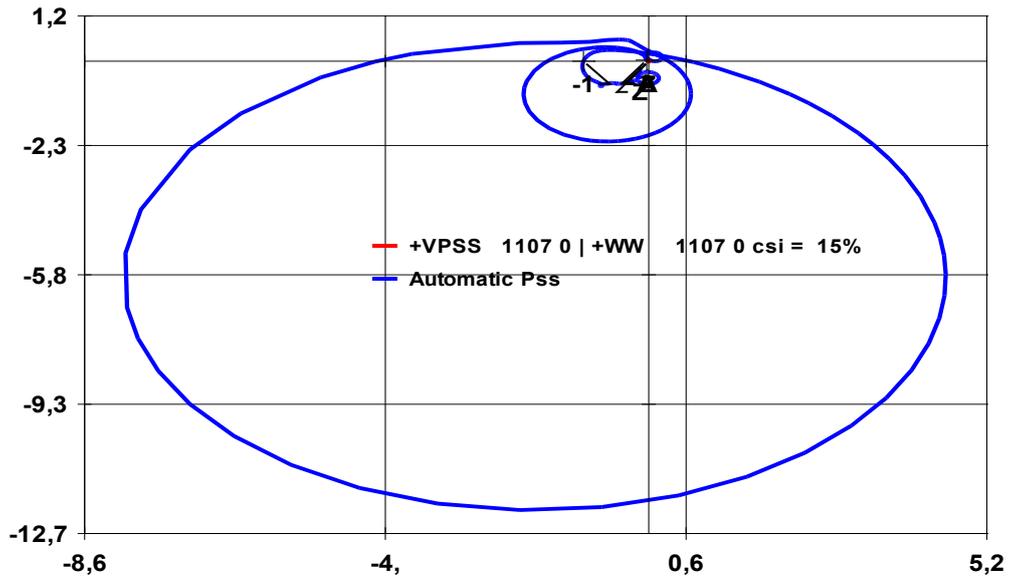


Figura 72: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 15% com PSS.

Para se observar a influência do PSS projetado para a usina de Itaipu 60 Hz sobre o modo cujo amortecimento devia ser aumentado, foi calculado o *root locus* do sistema no histórico 6, através do método DPSE, onde é possível verificar o aumento do amortecimento do modo em estudo, que ocorre conforme o ganho deste controlador varia de 0% a 100% de seu valor original. Os resultados obtidos nos cálculos de *root locus* realizados nesta etapa podem ser visualizados na Figura 73.

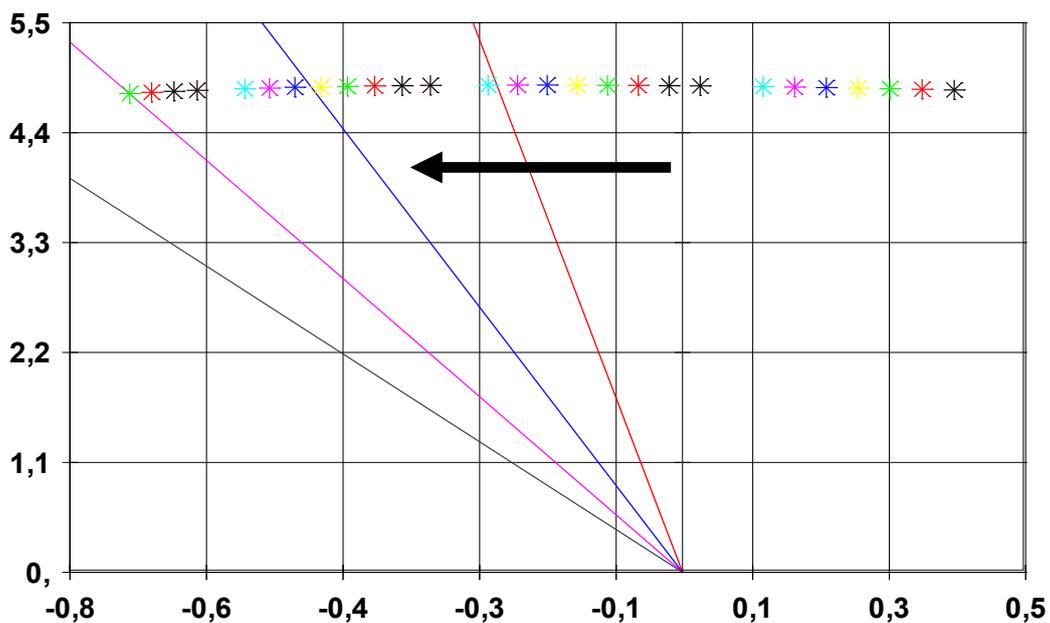


Figura 73: *Root Locus* do sistema no histórico 6 com o PSS projetado .

Analisando-se o resultado obtido no cálculo de *root locus* realizado anteriormente, pode-se perceber que, para o ganho do PSS em 100% de seu valor original, o modo em estudo, que antes apresentava um amortecimento negativo, passa a apresentar um amortecimento de 15%, o que é um bom valor de amortecimento.

Por questões didáticas, foi realizado o cálculo da resposta em frequência novamente, utilizando-se um amortecimento de 5%, que possui uma melhor visualização do diagrama de Nyquist para o projeto do PSS [11], [12].

O resultado obtido no cálculo da resposta em frequência, utilizando o amortecimento mencionado, para o histórico 6, onde foi obtido o modo eletromecânico menos amortecido dos casos em operação normal, pode ser visualizado na Figura 74.

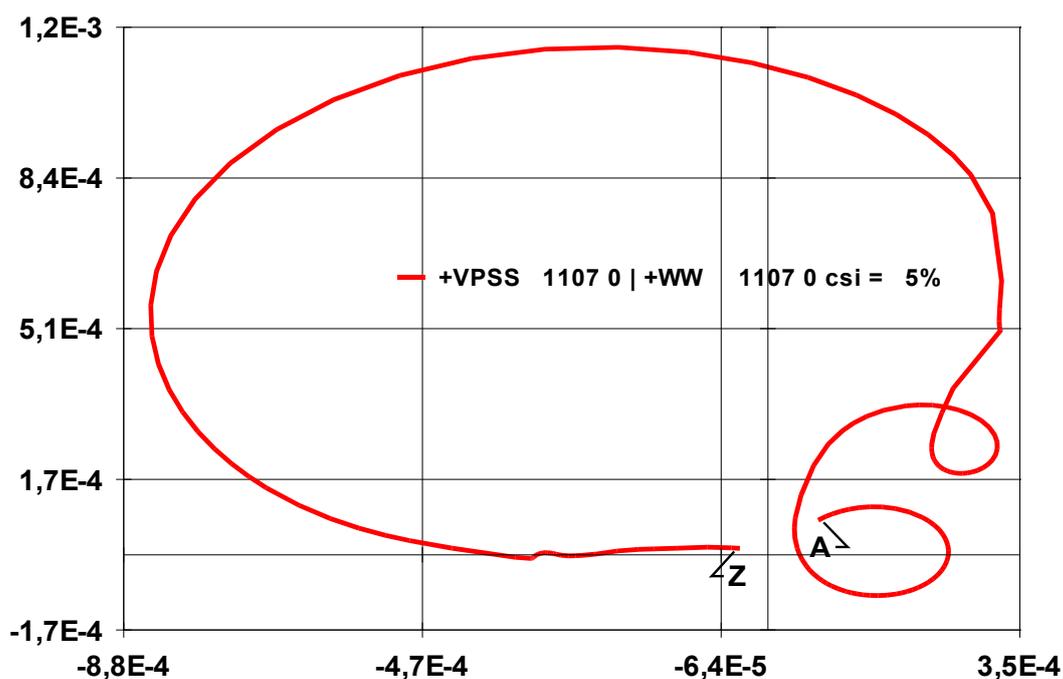


Figura 74: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 5%.

Após o cálculo das respostas em frequência mostradas anteriormente, foi realizado a projeto automático de PSSs mencionado. O estabilizador de sistema de potência projetado nesta etapa possui a função de transferência (e seus parâmetros) mostrada a seguir.

$$PSS(s) = K_{PSS} \left(\frac{1 + T_n s}{1 + T_d s} \right)^{nb} \left(\frac{T_w s}{1 + T_w s} \right)$$

onde: $K_{pss} = -703$; $nb = 2$; $T_w = 3$; $T_n = 0,343$; $T_d = 0,123$.

O resultado obtido no cálculo da resposta em frequência com amortecimento de 5%, com o PSS projetado operando no sistema elétrico em estudo, pode ser visualizado na imagem da Figura 75.

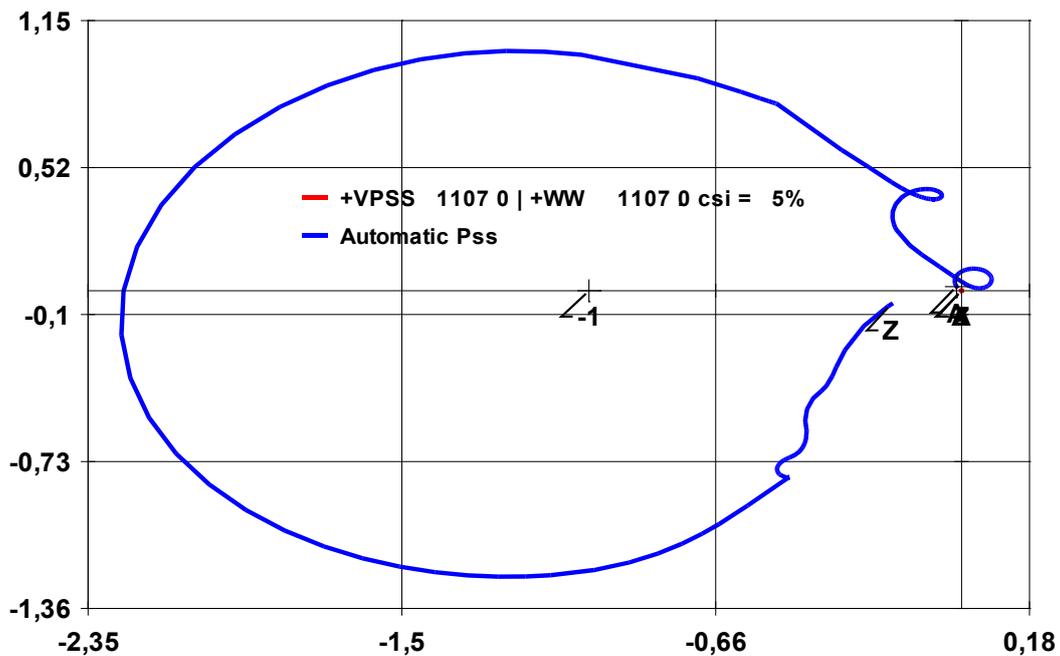


Figura 75: Diagrama de Nyquist com amortecimento de 5% com PSS.

O resultado obtido no cálculo da resposta em frequência com amortecimento de 12%, com o PSS projetado, em todos os casos em operação normal, pode ser visualizado na Figura 76.

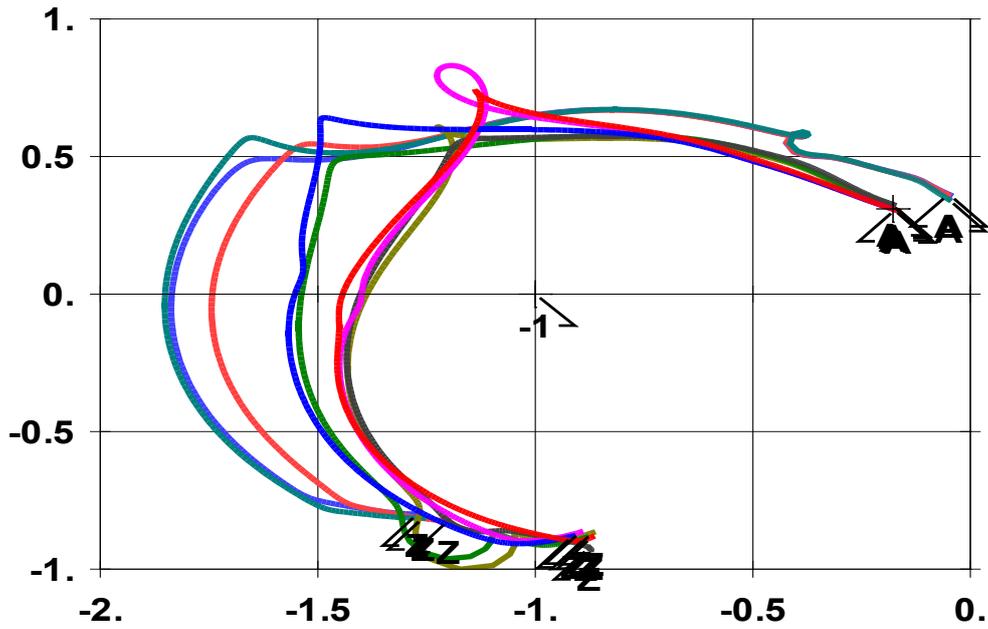


Figura 76: Diagrama de Nyquist com PSS nos casos em operação normal.

O resultado obtido no cálculo da resposta em frequência, com amortecimento de 7%, com o PSS projetado, em todos os casos em contingência, pode ser visualizado na Figura 77.

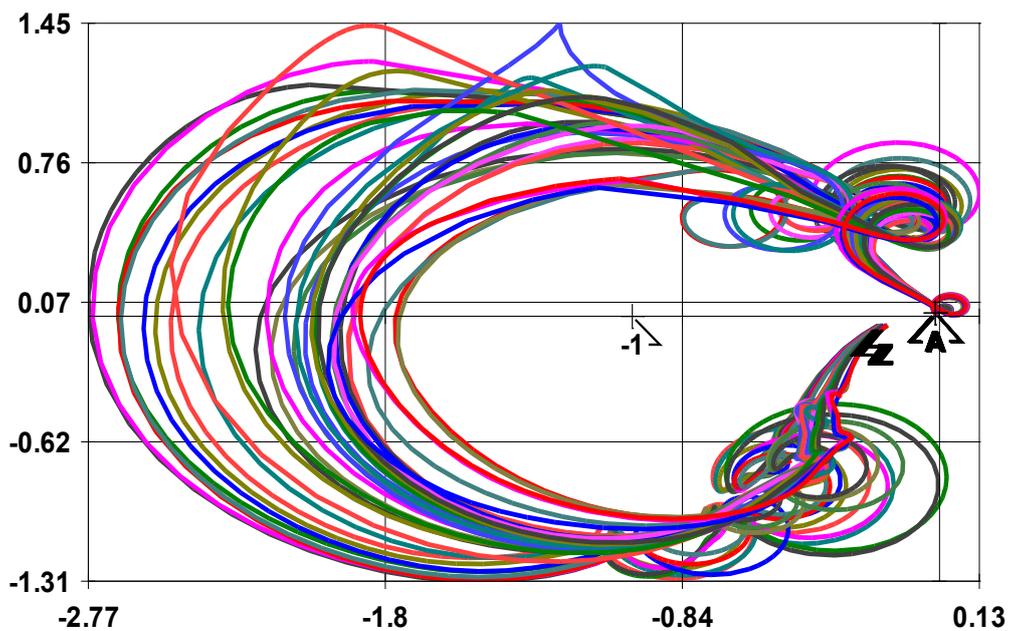


Figura 77: Diagrama de Nyquist com PSS nos casos em contingência.

É válido dizer que o sinal negativo e o alto valor do ganho do PSS projetado se devem à maneira como o sinal do estabilizador é utilizado na malha de controle do RAT da usina de Itaipu 60 Hz, que é uma forma diferente da usual, vide Figura 78.

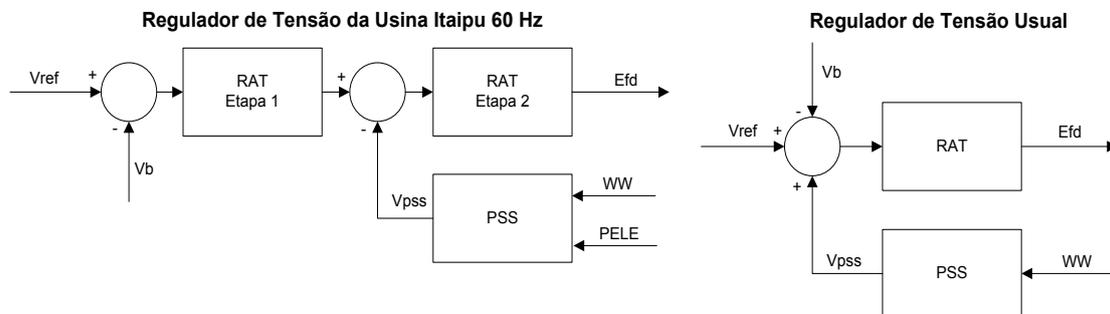


Figura 78: Comparação do RAT de Itaipu 60 Hz com um RAT usual.

Com o PSS projetado no histórico 6 para a máquina Itaipu 60 Hz, novamente foram calculados os modos do sistema em estudo, em todos os pontos de operação analisados nesta etapa.

Os resultados do cálculo dos modos, para o sistema interligado com o PSS projetado operando, realizado através do método de DPSE com estimativas iniciais bem próximas das utilizadas no cálculo dos modos do sistema sem o PSS projetado, podem ser visualizados na Figura 79.

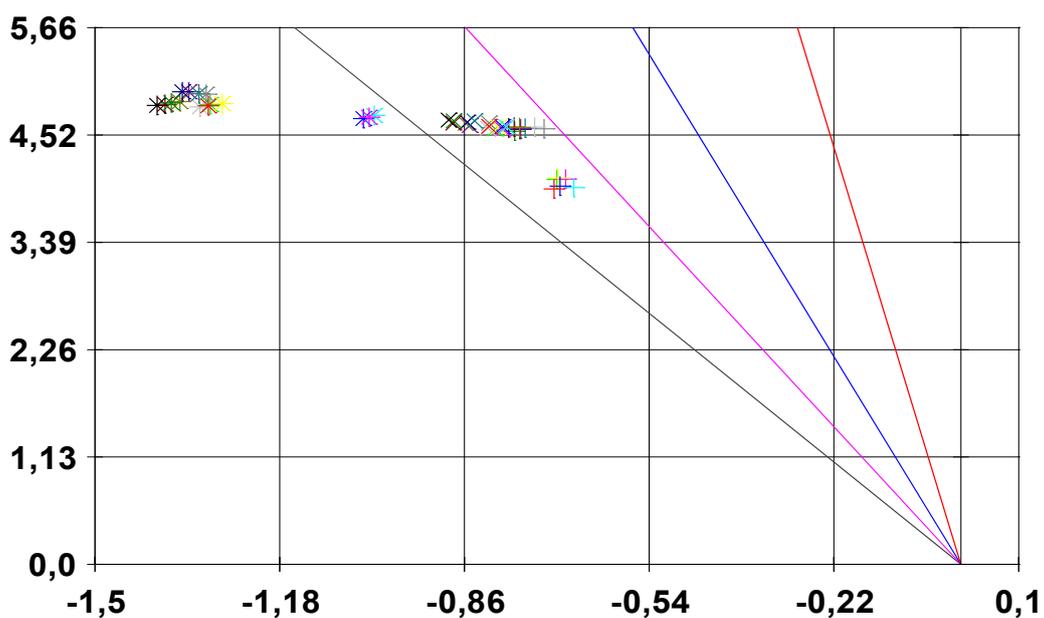


Figura 79: Modos calculados em todos os pontos de operação com o PSS projetado.

Analisando-se os resultados do cálculo dos modos mostrados anteriormente, pode-se perceber o PSS projetado para a usina Itaipu 60 Hz aumentou o amortecimento dos modos em estudo do SIN.

Com o PSS projetado operando, o modo menos amortecido obtido para o sistema em operação normal é o modo $-0,7630 + j4,5898$ com amortecimento de 16,399% obtido no histórico 6 e o modo menos amortecido obtido para o sistema em contingência é o modo $-0,7220 + j4,5904$ com amortecimento de 15,537% obtido no histórico 24.

Os casos históricos que apresentaram os modos com menor amortecimento representam o patamar de carga média com situação de vazão baixa na bacia do Rio Iguaçu, onde as usinas Salto Osório, Salto Santiago e G. B. Munhoz apresentam despachos reduzidos em relação aos despachos de potência originais do banco de dados do ONS. No caso do histórico 6, o sistema está em operação normal (sem contingência) e, no caso do histórico 24, o sistema está operando em contingência, sem a linha de transmissão Itaberá – Tijuco Preto de 765 kV circuito 1.

Pode-se dizer que o projeto do PSS da máquina Itaipu 60 Hz foi realizado com sucesso, uma vez que, com este PSS operando, o modo menos amortecido determinado para o sistema em operação normal possui um amortecimento maior que 12% e o modo menos amortecido obtido para o sistema em contingência possui um amortecimento maior que 7%, estando de acordo com os valores desejados.

Para a verificação do bom amortecimento obtido para o sistema com o projeto do estabilizador da usina Itaipu 60 Hz, no sistema sem o PSS (caso 1) e com o PSS projetado (caso 2), foram calculadas as respostas no tempo da tensão terminal (VB 1107) e da frequência (WW 1107) desta máquina, quando é aplicado um degrau de 0,001 pu no sinal de referência do regulador de tensão (VREF 1107) da mesma e quando é aplicado um degrau de 0,001 pu na potência reativa injetada na barra 1107 (BSHU 1107) do sistema, para os históricos 6 e 24, onde foram obtidos os modos menos amortecidos do sistema com o PSS projetado operando.

Os resultados obtidos no cálculo das respostas no tempo realizados nesta etapa podem ser visualizados nas imagens da Figura 80 à Figura 83.

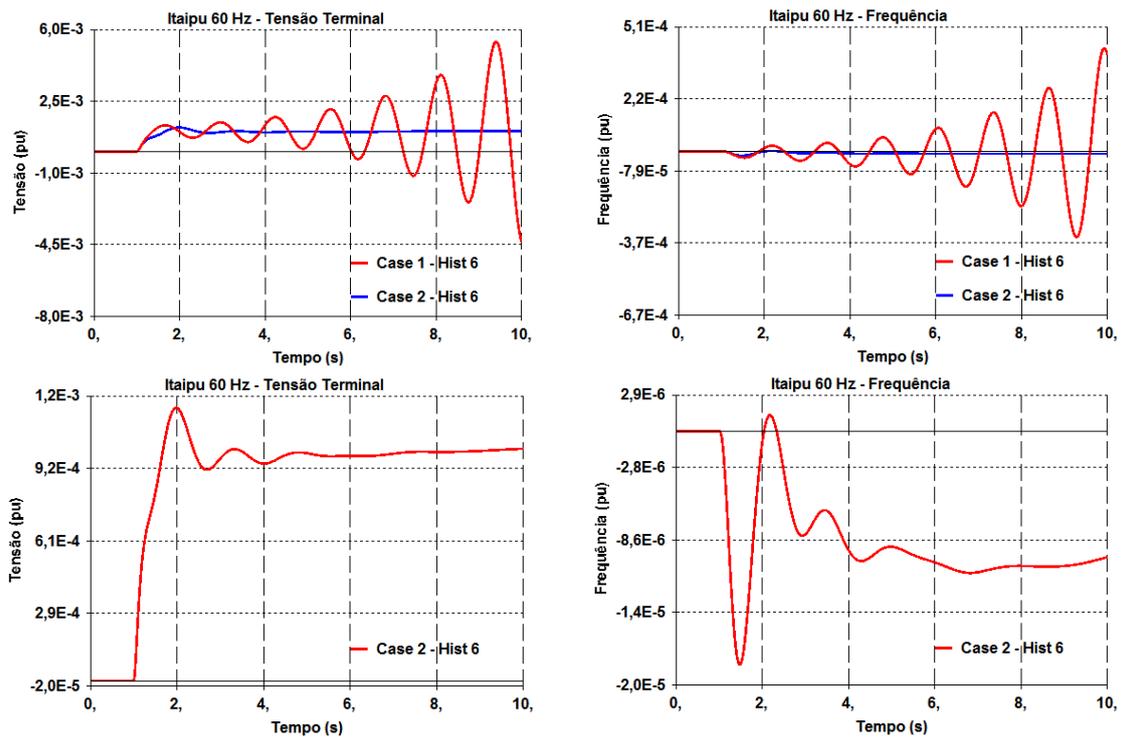


Figura 80: Resposta ao degrau em VREF de Itaipu 60 Hz para o histórico 6.

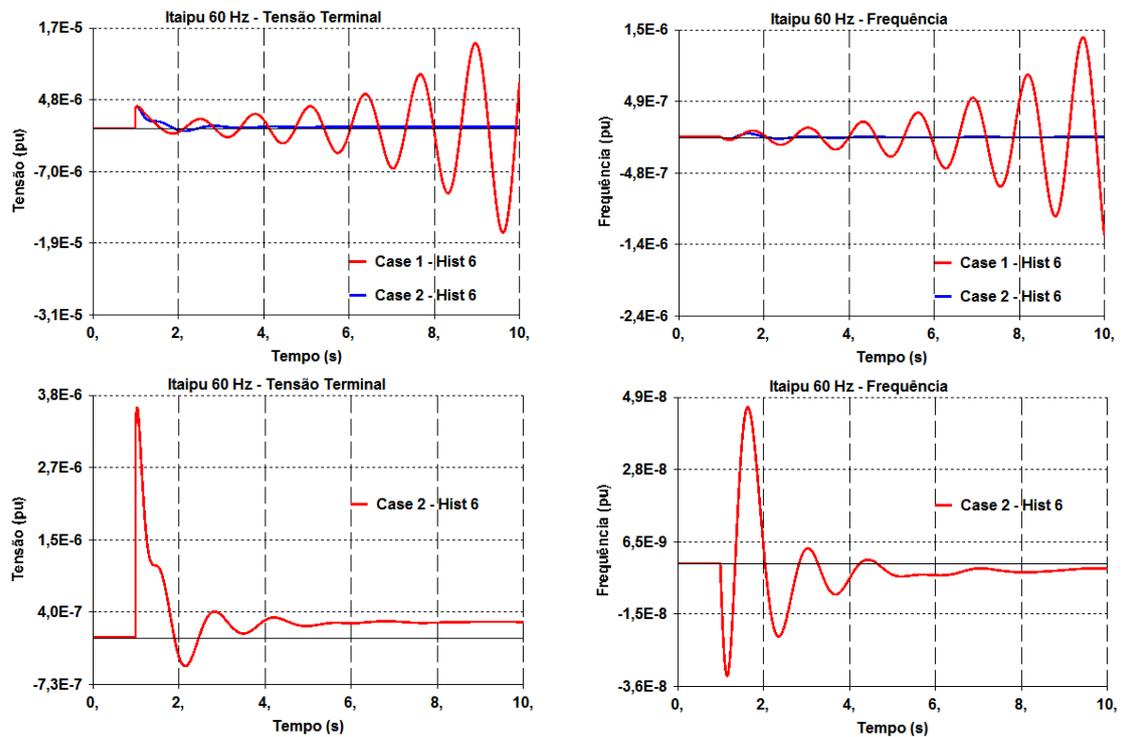


Figura 81: Resposta ao degrau em BSHU da barra 1107 para o histórico 6.

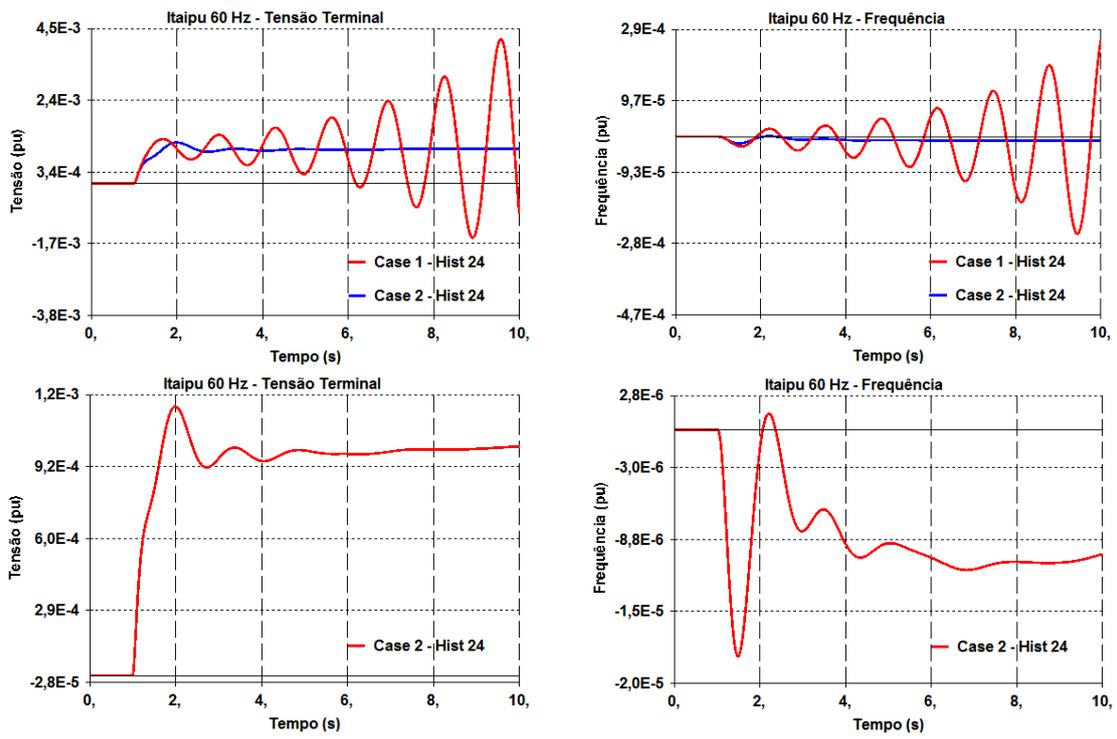


Figura 82: Resposta ao degrau em VREF de Itaipu 60 Hz para o histórico 24.

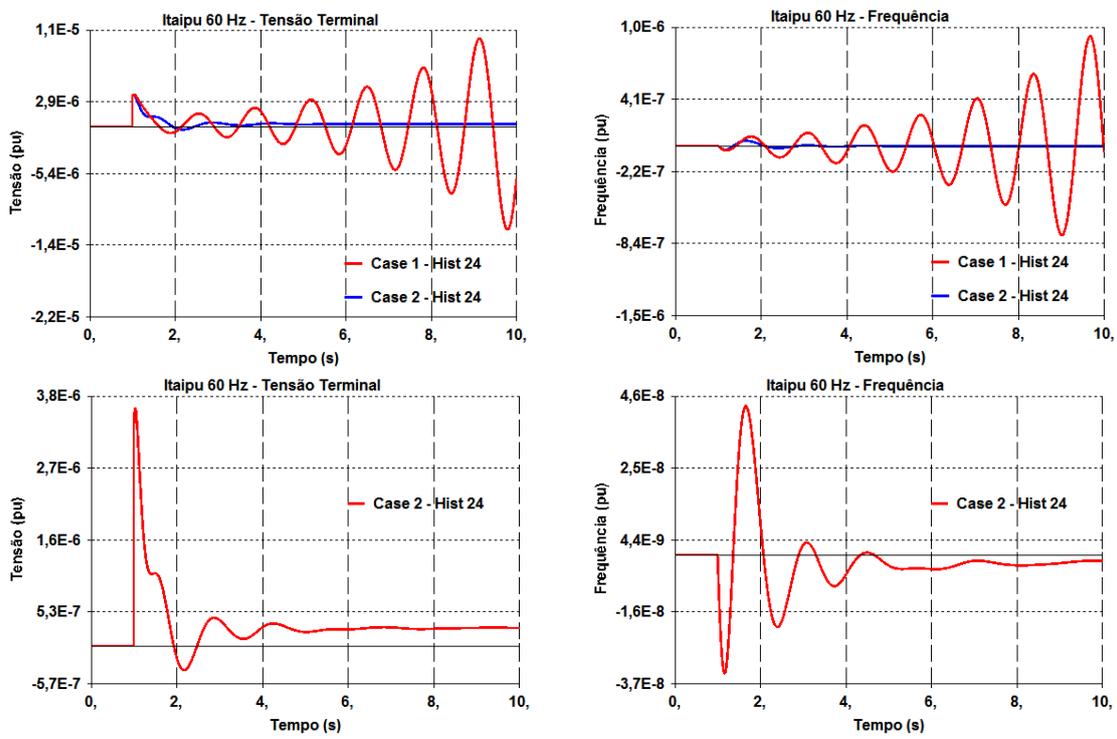


Figura 83: Resposta ao degrau em BSHU da barra 1107 para o histórico 24.

Analisando-se os resultados obtidos no cálculo das respostas no tempo para as situações do sistema operando sem e com o PSS projetado para a usina Itaipu 60 Hz, pode-se notar a importância deste PSS para o aumento do amortecimento dos modos de oscilação do sistema, o que comprova o sucesso na realização do projeto do PSS em questão.

Sem o estabilizador da usina Itaipu 60 Hz, o sistema apresentava um modo com amortecimento negativo, o que significa que o sistema estava instável nesta situação. Com a utilização do PSS projetado para a usina Itaipu 60 Hz, o sistema passou a apresentar modos bem mais amortecidos como pode ser observado no cálculo dos modos e das respostas no tempo realizado nesta etapa.

Para se verificar o bom amortecimento obtido para todos os pontos de operação em análise, pode-se observar os gráficos das mesmas simulações realizadas anteriormente para todos os casos estudados. Os resultados das simulações mencionadas podem ser visualizados nas imagens da Figura 84 à Figura 87.

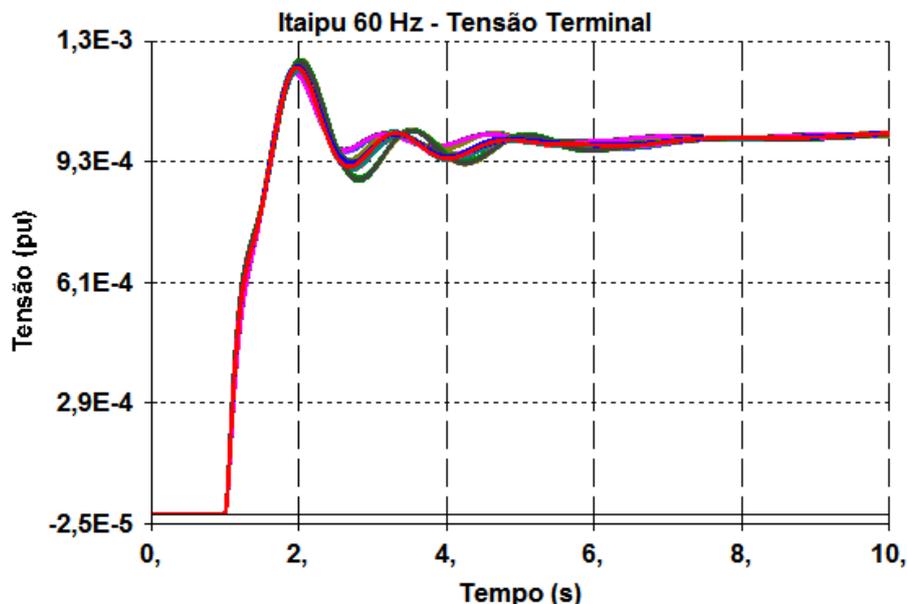


Figura 84: Resposta da tensão terminal da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em VREF.

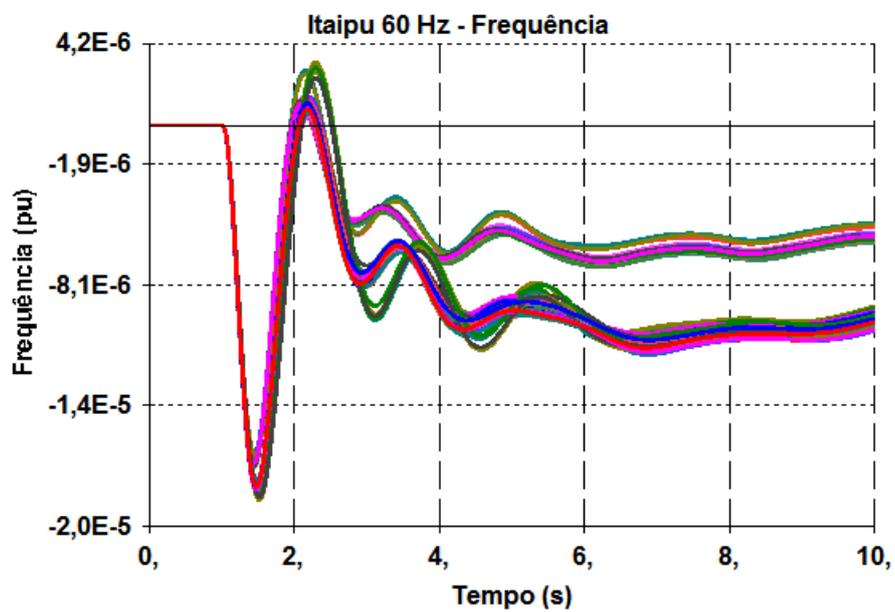


Figura 85: Resposta da frequência da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em VREF.

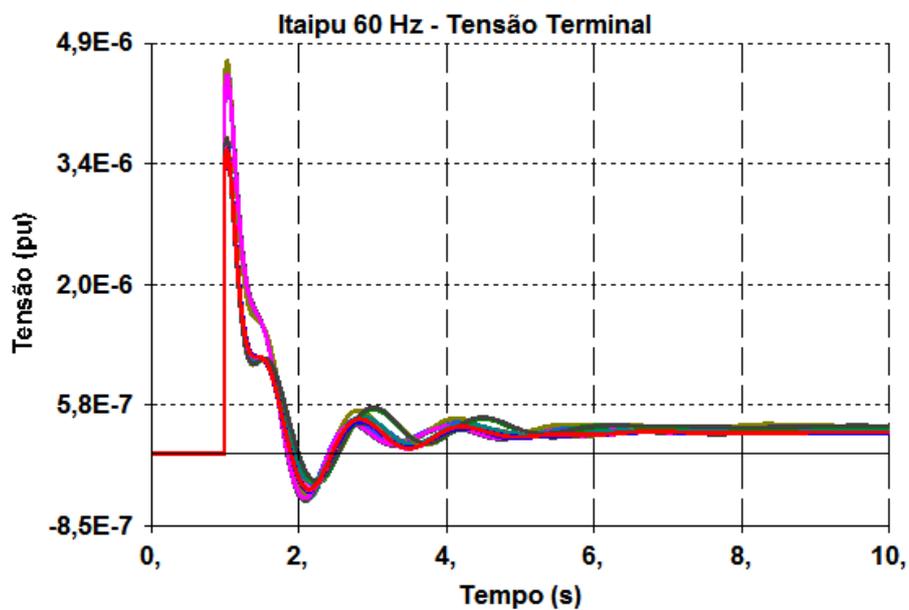


Figura 86: Resposta da tensão terminal da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em BSHU.

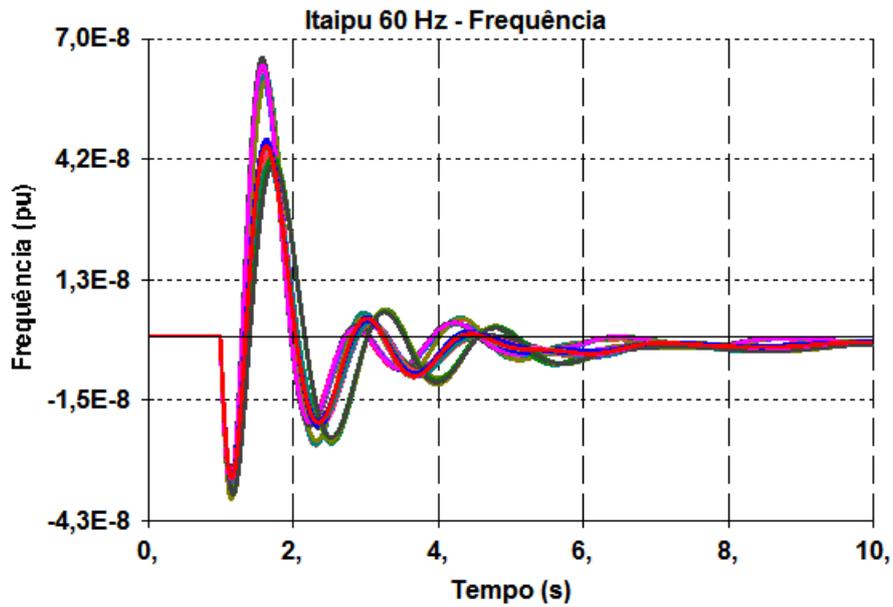


Figura 87: Resposta da frequência da usina Itaipu 60 Hz ao degrau em BSHU.

Para finalizar a análise do sistema em estudo, pode-se calcular o *root locus* do sistema nos históricos 6 e 24, através do método DPSE, que são os pontos de operação onde foram encontrados os modos com menor amortecimento no sistema com o novo PSS projetado, em operação normal e em contingência, variando-se o ganho do PSS projetado, de 0% a 100% de seu valor original. Os resultados obtidos nos cálculos de *root locus* realizados nesta etapa podem ser visualizados na Figura 88 e na Figura 89.

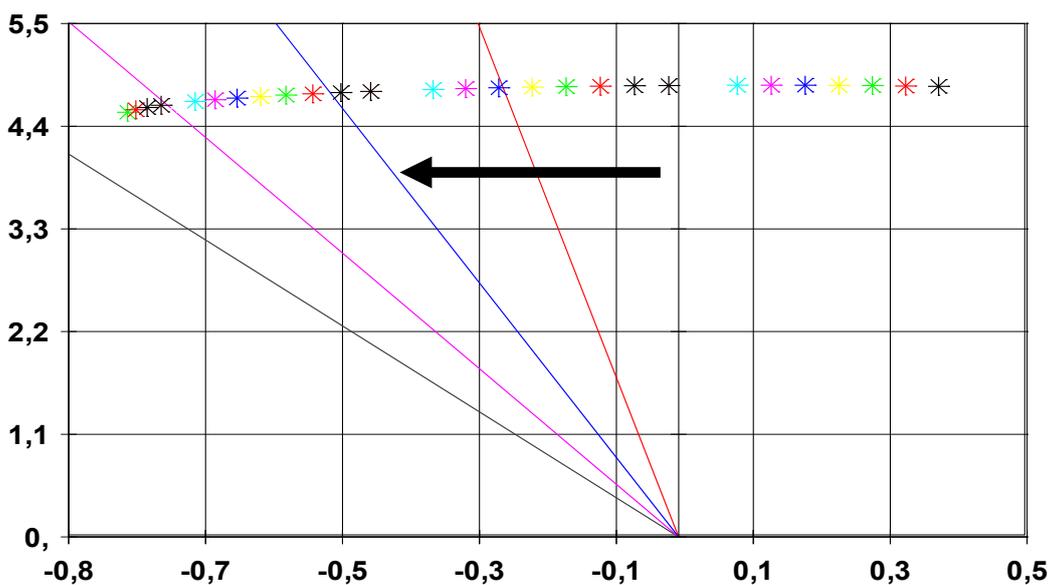


Figura 88: Root Locus do sistema para o histórico 6.

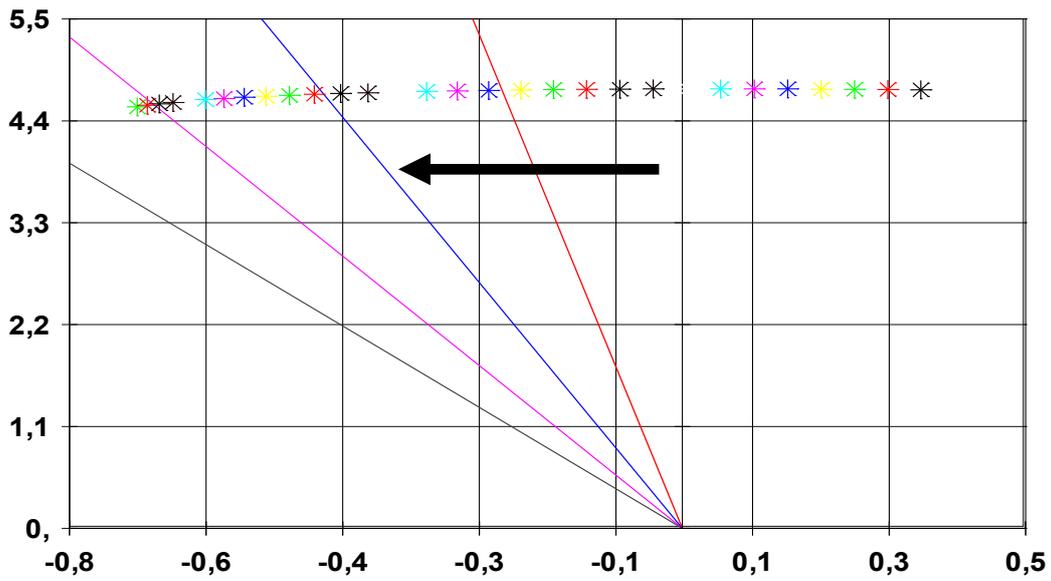


Figura 89: *Root Locus* do sistema para o histórico 24.

Analisando-se o resultado obtido nos cálculos de *root locus* realizados nesta etapa, pode-se perceber que com o aumento do ganho do PSS projetado para a usina de Itaipu 60 Hz, os pólos do sistema foram sendo deslocados para o lado esquerdo do plano complexo, o que significa que estes pólos foram caminhando para a região de estabilidade e, conseqüentemente, aumentando o seu amortecimento.

CAPÍTULO 5

Conclusão

Neste capítulo, serão feitas observações sobre a implementação da análise de múltiplos cenários no programa computacional PacDyn e sobre os resultados obtidos nas análises do sistema elétrico de pequeno porte estudado neste trabalho e do Sistema Interligado Nacional. Por fim, serão realizadas conclusões sobre os benefícios trazidos pela nova ferramenta desenvolvida no programa PacDyn para a análise de estabilidade a pequenas perturbações de diversos pontos de operação.

5.1. Observações

Neste trabalho, foi realizada a implementação da análise de múltiplos cenários no programa computacional PacDyn, que consiste na automatização dos processos de utilização das funções deste programa para um conjunto de cenários (e não apenas um cenário, como o programa já analisava anteriormente), de forma que uma determinada funcionalidade escolhida pelo usuário deste mesmo programa fosse utilizada sequencialmente em todos os casos e pontos de operação definidos pelo usuário em questão.

Para isso, foram realizadas a implementação da interface gráfica da análise de múltiplos cenários e das funcionalidades previamente existentes no PacDyn para este tipo de estudo ou análise.

Também foi realizada uma descrição dos conceitos básicos de análise modal e de métodos de projetos de estabilizadores que utilizam múltiplos cenários [13], [14], para a contextualização do tema deste trabalho.

As implementações realizadas neste trabalho foram testadas com o objetivo de se comprovar os benefícios trazidos pela análise de múltiplos cenários para o estudo da estabilidade a pequenos sinais de sistema elétricos de potência. Para isso, foram analisados um sistema elétrico de pequeno porte e o Sistema Interligado Nacional, onde foram realizadas análises modais dos sistemas.

A análise realizada no sistema elétrico de pequeno porte apresentado neste trabalho permitiu determinar o comportamento desse sistema mediante o aumento da potência fornecida por um dos geradores do sistema, onde se pode verificar variações nos *mode shapes*, resíduos, controlabilidade e observabilidade nos modos dos diversos pontos de operação estudados.

Pode-se perceber que, com o aumento da potência fornecida pela máquina Maq1 do sistema, esta máquina passava a representar mais as oscilações referentes à sua área e a amplitude de suas oscilações (e, conseqüentemente, de sua área) diminuía.

Ainda analisando o sistema de pequeno porte citado, foi realizado o projeto de um estabilizador de sistema de potência para a máquina Maq3, considerando diversos pontos de operação onde eram variados os despachos das usinas, as cargas e a configuração da rede elétrica do sistema.

Neste estudo, através da análise de múltiplos cenários, foram determinados os pontos de operação que apresentavam os modos menos amortecidos do sistema e, através de um destes pontos, foi realizado o projeto do PSS para a usina citada.

Pelos resultados obtidos nesta etapa, pode-se dizer que o projeto do PSS em questão foi realizado com sucesso, uma vez que, com este PSS em operação, o sistema apresentou um maior amortecimento de suas oscilações, possuindo modos de oscilações com amortecimento dentre da faixa desejada (ou seja, maior que 10% para o sistema em operação normal e maior que 5% para o sistema em contingência).

A análise realizada no Sistema Interligado Nacional permitiu determinar o comportamento do SIN mediante diferentes situações de vazão nas bacias do Rio Uruguai e do Rio Iguaçu. Estas situações de vazão das bacias citadas foram representadas pela variação dos despachos das usinas Itá, Machadinho, Foz do Chapecó, Salto Osório, Salto Santiago e G. B. Munhoz.

Nesta etapa, foram analisados os modos eletromecânicos que representavam as oscilações entre as máquinas das regiões sul e sudeste do Brasil, ou seja, as oscilações da interligação sul - sudeste.

Pode-se perceber que, o ponto de operação que apresentou o modo menos amortecido do SIN foi o caso de carga leve com a situação de vazão normal das bacias do Rio Uruguai e do Rio Iguaçu, onde os despachos das usinas mencionadas anteriormente estavam em seus valores originais do banco de dados do ONS.

Ainda analisando o sistema interligado nacional, foi realizado o projeto de um estabilizador de sistema de potência para a usina Itaipu 60 Hz considerando diversos pontos de operação, onde foram adotadas diferentes situações de vazão das bacias citadas, diferentes configurações da rede elétrica e os patamares de carga leve, média e pesada do Sistema Interligado Nacional.

Neste estudo, através da análise de múltiplos cenários, foram determinados os pontos de operação que apresentavam os modos menos amortecidos do sistema e, através de um destes pontos, foi realizado o projeto do PSS para a usina citada.

Pelos resultados obtidos nesta análise, pode-se dizer que o projeto do PSS em questão foi realizado com sucesso, uma vez que, com este PSS operando, o sistema apresentou um maior amortecimento de suas oscilações, possuindo modos de oscilações com amortecimento dentro da faixa desejada (ou seja, maior que 12% para o sistema em operação normal e maior que 7% para o sistema em contingência).

Através das análises realizadas neste trabalho, pode-se ainda propor uma metodologia para o desenvolvimento de projetos automáticos de estabilizadores de sistema de potência realizados através do programa computacional PacDyn.

Esta metodologia consiste na criação de um múltiplo cenário contendo todos os casos do sistema em estudo, em operação normal e operando nas piores contingências das regiões que estão sendo estudadas, e na determinação dos modos menos amortecidos nos casos em operação normal e em contingência.

O caso que apresenta o modo de oscilação menos amortecido do sistema em operação normal deve ser utilizado para o projeto do PSS e, em seguida, o estabilizador criado deve ser utilizado em todos os pontos de operação em estudo, de forma a se determinar, novamente, os modos menos amortecidos do sistema em operação normal e em contingência.

Os amortecimentos dos modos menos amortecidos do sistema devem, então, ser comparados com os valores desejados e, se estes valores não forem alcançados, o projeto do PSS deve ser realizado novamente. Caso os amortecimentos apresentem valores dentro da faixa desejada, o projeto do estabilizador de sistema de potência terá sido realizado com sucesso.

5.2. Conclusões

Analisando-se todos os resultados obtidos nas análises do sistema de pequeno porte e do Sistema Interligado Nacional realizadas neste trabalho, pode-se perceber a importância da análise de múltiplos cenários para o estudo de estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência.

A análise de múltiplos cenários, através da automatização da utilização das funcionalidades do PacDyn para diversos pontos de operação, tornou viável o estudo de um grande número de casos e pontos de operação de sistemas elétricos, o que permite um estudo mais detalhado destes sistemas.

Este estudo de sistemas elétricos de potência, realizado de uma forma mais detalhada através da análise de diversos pontos de operação, possibilita uma melhor previsão do comportamento do sistema que está sendo analisado, o que acaba permitindo a obtenção de ajustes mais adequados para os equipamentos do sistema de potência analisado, assim como para seus controladores.

Resumindo, os benefícios trazidos pela implementação da análise de múltiplos cenários no programa computacional PacDyn são: a automatização da análise de estabilidade a pequenos sinais de diversos pontos de operação, a viabilidade da análise de um grande número de casos e pontos de operação, a possibilidade de uma melhor análise e previsão do comportamento do sistema em estudo e, conseqüentemente, a determinação de melhores ajustes para os sistemas de controle desse sistema elétrico, contribuindo para a realização de projetos de controladores mais robustos para os sistemas elétricos de potência.

Portanto, a análise de múltiplos cenários é extremamente importante para a realização de ajustes nos equipamentos dos sistemas elétricos de potência e para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações, possibilitando projetos de controladores mais robustos.

5.3. Trabalhos Futuros

Pode-se propor como tema para trabalhos futuros, o desenvolvimento de métodos de projetos de controladores de sistemas de potência que utilizem a ferramenta de análise de múltiplos cenários implementada no programa computacional PacDyn.

Referências

Bibliográficas

[1] STEVENSON, W. D., GRAINGER, J. J., *Power System Analysis*. 4 ed. New York, McGraw-Hill, 1994.

[2] KUNDUR, P., PASERBA, J., AJJARAPU, V., ANDERSON, G., BOSE, A., CANIZARES, C., HATZIARGYRIOU, N., HILL, D., STANKOVIC, A., TAYLOR, C., VAN CUTSEM, T., VITTAL, V., “Definition and Classification of Power Systems Stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 2, 2004.

[3] CORTEZ, A. N., *Proposta de Critério e Procedimentos para Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de M. Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2001.

[4] CEPTEL, “*PacDyn 9.2 - User’s Manual*”, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

[5] KUNDUR, P. S., *Power System Stability and Control*. 4 ed. New York, McGraw-Hill, 1994.

[6] SILVA, R. R., *Análise Dinâmica Frente a Pequenas e Grandes Perturbações do Sistema Elétrico Acre-Rondônia*, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

[7] SEVILLANO, J. E. V., *Análise Modal no Sistema Peruano*, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

[8] CHEN, C. T., *Linear System Theory and Design*. 2 ed. New York, CBS College Publishing, 1984.

[9] OGATA, K., *Engenharia de Controle Moderno*. 4 ed. New York, Prentice Hall, 2003.

[10] PAGOLA, F. L., PEREZ-ARRIAGA, I. J., VERGHESE, G. C., “On Sensitivities, Residues and Participations: Applications to Oscillatory Stability Analysis and Control”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 4, n. 1, Fev. 1989.

[11] GUIMARÃES, C. H. C., TARANTO, G. N., GOMES JR., S., MARTINS, N., “Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência por Posicionamento Parcial de Par de Pólos Complexos Conjugados”, In: *XIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, Florianópolis, 2000.

[12] GOMES JR., S., MARTINS, N., PINTO, H. J. C. P., “Utilização do Método de Nyquist para a Estabilização de Sistemas de Potência envolvendo Alocação de Par de Pólos Complexos”, In: *XII Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, Uberlândia, 1998.

[13] BOMFIM, A. L. B., *Ajuste Coordenado de Estabilizadores de Sistema de Potência usando Algoritmos Genéticos*, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

[14] FERRAZ, J. C. R., *Avanços na Utilização de Análise Linear em Sistemas Elétricos de Potência*, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

[15] CHOW, J. H., “A Pole-Placement Design Approach for Systems with Multiple Operating Conditions”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 35. n. 3, Mar. 1990.

[16] CRUZ, J. J., ZANETTA JR., L. C., “Stabilizer Design for Multimachine Power Systems Using Mathematical Programming”, *Electrical Power & Energy Systems*, v. 19, n. 8, pp. 519-523, Elsevier Science Ltd, 1997.

[17] ELANGO VAN, S., LIM, C. M., “Efficient Pole-Assignment Method for Designing Stabilizers in Multimachine Power Systems”, *IEE Proceedings*, v. 134, Pt. C, n. 6, Nov. 1987.

[18] ESLAMI, M., SHAREEF, H., MOHAMED, A., “Coordinated Design of PSS and TCSC Controller for Power System Stability Improvement”, *International Power & Energy Conference – IPEC*, Cingapura, 2010.

[19] GIBBARD, M. J., “Co-ordinated Design of Multimachine Power System Stabilizers Based on Damping Torque Concepts”, *IEE Proceedings*, v. 135, Pt. C, n. 4, Jul. 1988.

[20] GIBBARD, M. J., VOWLES, D. J., POURBEIK, P., “Interactions Between, and Effectiveness of, Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in Multimachine Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 2, Mai. 2000.

[21] LEI, X., LERCH, E. N., POVH, D., “Optimization and Coordination of Damping Controls for Improving System Dynamic Performance”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 3, Ago. 2001.

[22] OSTOJIC, D. R., “Stabilization of Multimodal Electromechanical Oscillations by Coordinated Application of Power System Stabilizers”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 4, Nov. 1991.

[23] POURBEIK, P., GIBBARD, M. J., “Simultaneous Coordination of Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in a Multimachine Power System for Enhancing Dynamic Performance”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 2, Mai. 1998.

[24] ROUCO, L., “Coordinated Design of Multiple Controllers for Damping Power System Oscillations”, *Electrical Power & Energy Systems*, 23, Elsevier Science Ltd, 2001.

[25] SIMOES COSTA, A. J. A., FREITAS, F. D., SILVA, A. S. e, “Design of Decentralized Controllers for Large Power Systems Considering Sparsity”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 1, Fev. 1997.

[26] ZANETTA JR., L. C., CRUZ, J. J., “An Incremental Approach to the Coordinated Tuning of Power Systems Stabilizers Using Mathematical Programming”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, Mai. 2005.

[27] GOMES JR., S., CASTRO, A., PARREIRAS, T. J. M. A., “Integração entre o PacDyn e ANATEM para Estudos Dinâmicos de Sistema Elétricos”, *XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, Recife, 2009.

[28] ONS, “Base de Dados de Estabilidade - Transitórios Eletromecânicos - Junho de 2011”, Site: http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx.

Anexo A

Interface Gráfica Implementada

A.1. Gerenciamento dos Casos

Para a realização do gerenciamento dos casos criados pelo usuário do PacDyn, foi desenvolvida a janela “*Case Manager Window*”. A ativação desta janela pode ser realizada através da opção “*Case Manager*” que pode ser encontrada no menu “*View*” do programa e através do botão “*Case Manager*” localizado abaixo da barra de menus do programa, como pode ser visualizado na Figura 90 e na Figura 91.

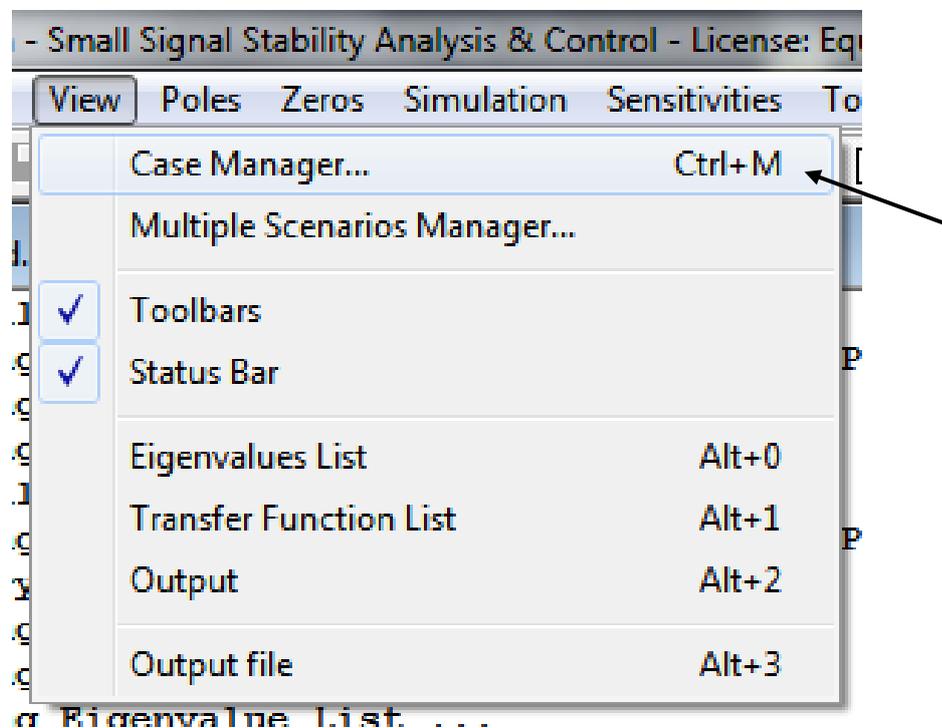


Figura 90: Opção “*Case Manager*” no menu “*View*” do PacDyn.



Figura 91: Botão “Case Manager” na janela principal do PacDyn.

A janela “Case Manager Window” permite ao usuário do PacDyn criar, editar e remover casos do banco de dados do programa em questão. Cada um desses casos definidos pelo usuário do PacDyn contém os dados de fluxo de potência e de modelagem dinâmica dos equipamentos do sistema elétrico que se deseja estudar ou analisar, como pode ser visualizado na Figura 92.

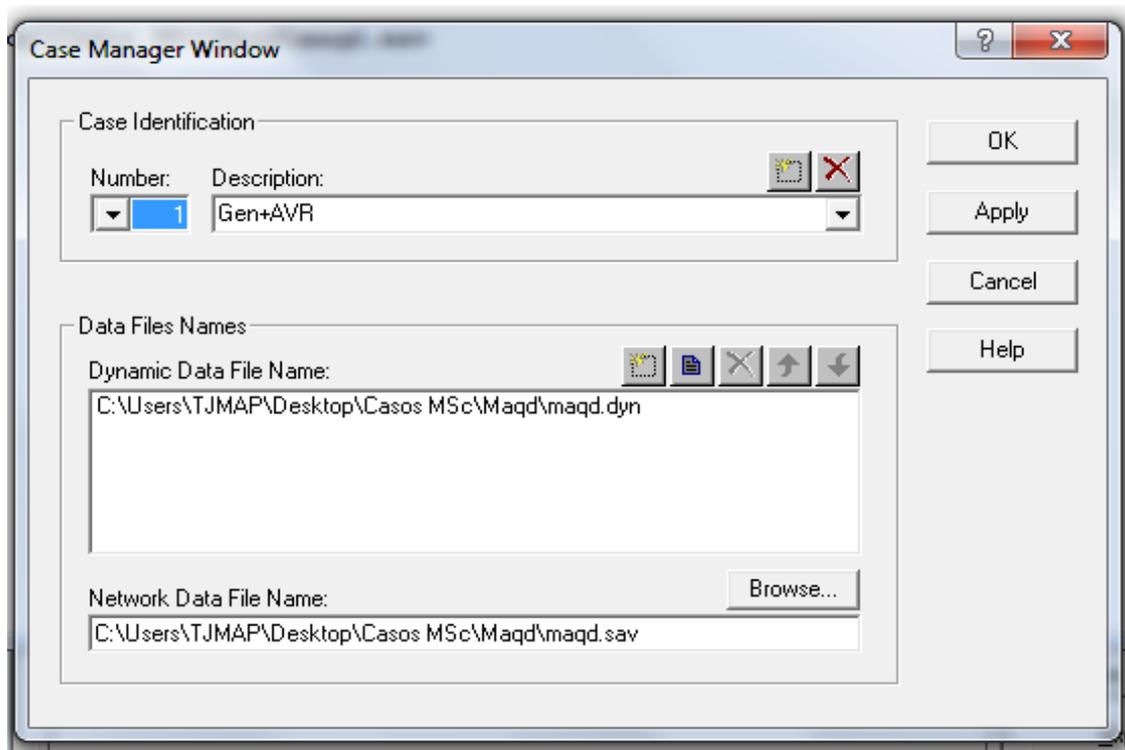


Figura 92: Janela “Case Manager Window” do programa PacDyn.

A.2. Gerenciamento dos Múltiplos Cenários

Para a realização do gerenciamento dos múltiplos cenários criados ou definidos pelo usuário do PacDyn, foi desenvolvida a janela “*Multiple Scenario Manager Window*”. A ativação desta janela pode ser realizada através da opção “*Multiple Scenario Manager*” que pode ser encontrada no menu “*View*” do programa, como pode ser visualizado na Figura 93.

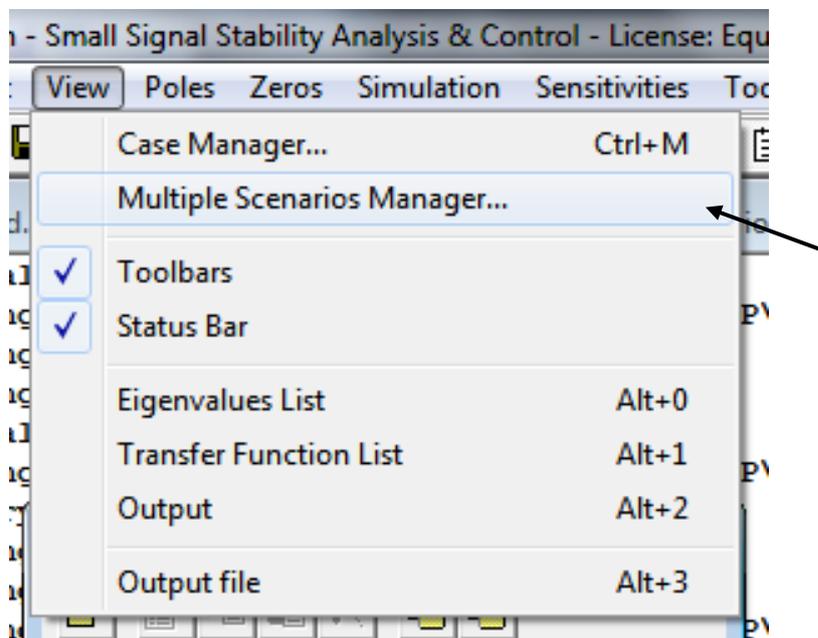


Figura 93: Opção “*Multiple Scenarios Manager*” no menu “*View*” do PacDyn.

A janela “*Multiple Scenario Manager Window*” permite ao usuário do PacDyn criar e remover múltiplos cenários do banco de dados do programa em questão, escolher os casos e os pontos de operação (históricos de fluxo de potência) que deseja estudar em um determinado múltiplo cenário, gerenciar estes casos através do acionamento da janela “*Case Manager Window*” (previamente existente no PacDyn), que permite a visualização dos arquivos com os dados do fluxo de potência e dos modelos dinâmicos dos equipamentos do sistema utilizados no caso em questão, e utilizar o programa ANAT0 do CEPEL, como pode ser visualizado na Figura 94.

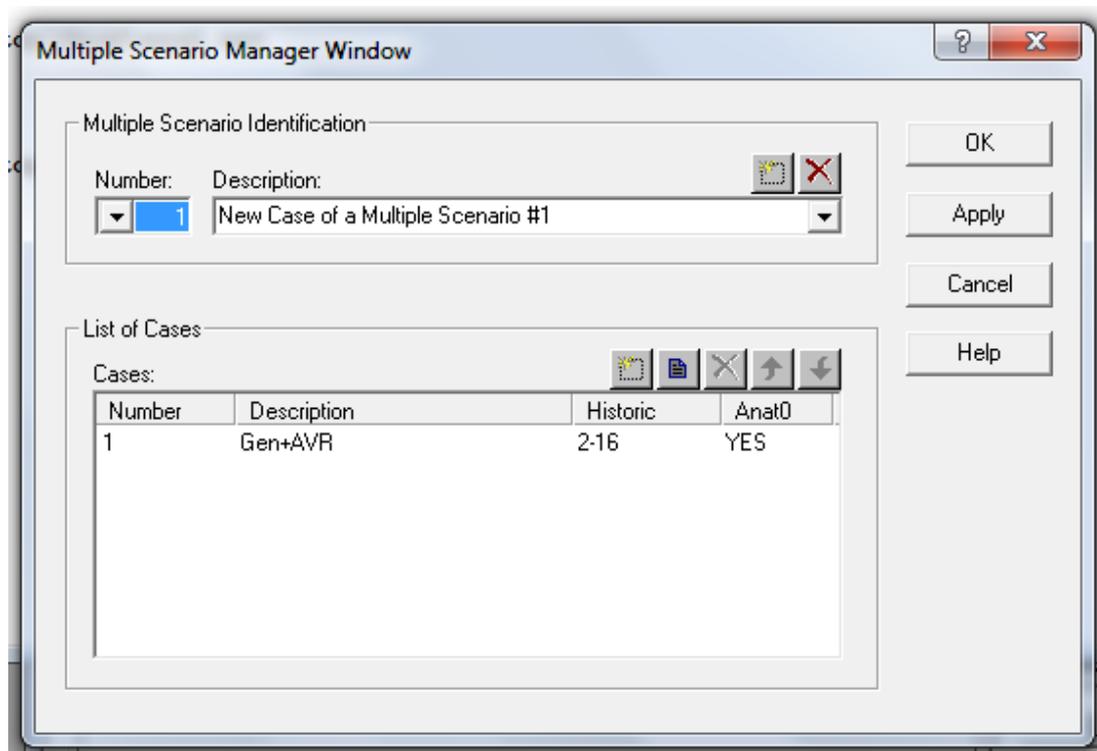


Figura 94: Janela “Multiple Scenario Manager Window” do programa PacDyn.

A.3. Seleção dos Casos dos Múltiplos Cenários

Para que o usuário do PacDyn possa escolher ou adicionar casos a serem estudados em um determinado múltiplo cenário, é necessário utilizar o botão “Insert Case”, que é encontrado na janela “Multiple Scenario Manager Window”, conforme pode ser visualizado na Figura 95.

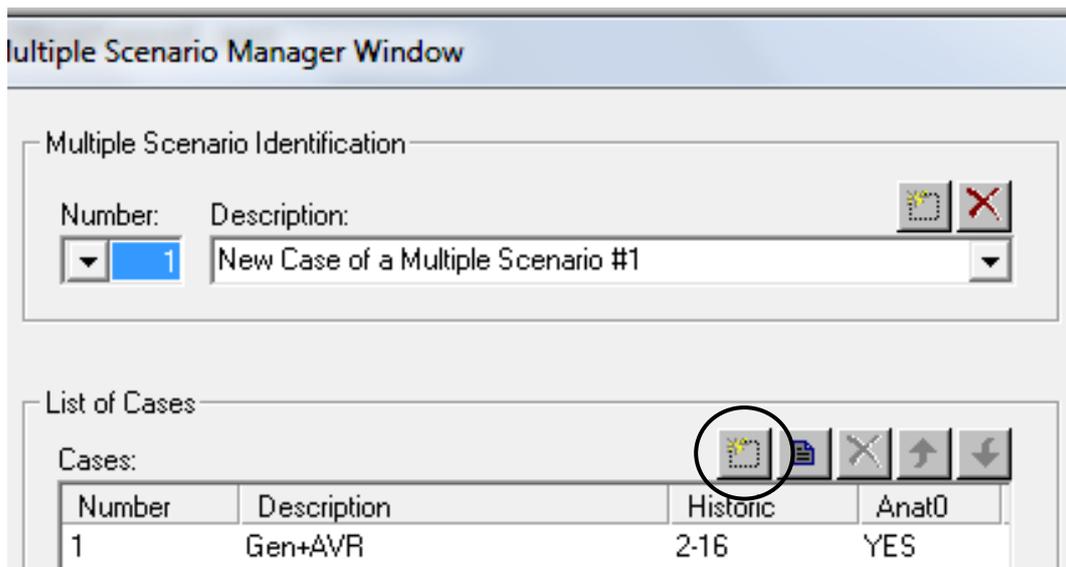


Figura 95: Botão “Insert Case” da janela “Multiple Scenario Manager Window”.

Ao se realizar o acionamento do botão “Insert Case”, a janela “New Case of a Multiple Scenario” é ativada, conforme pode ser visto na Figura 96.

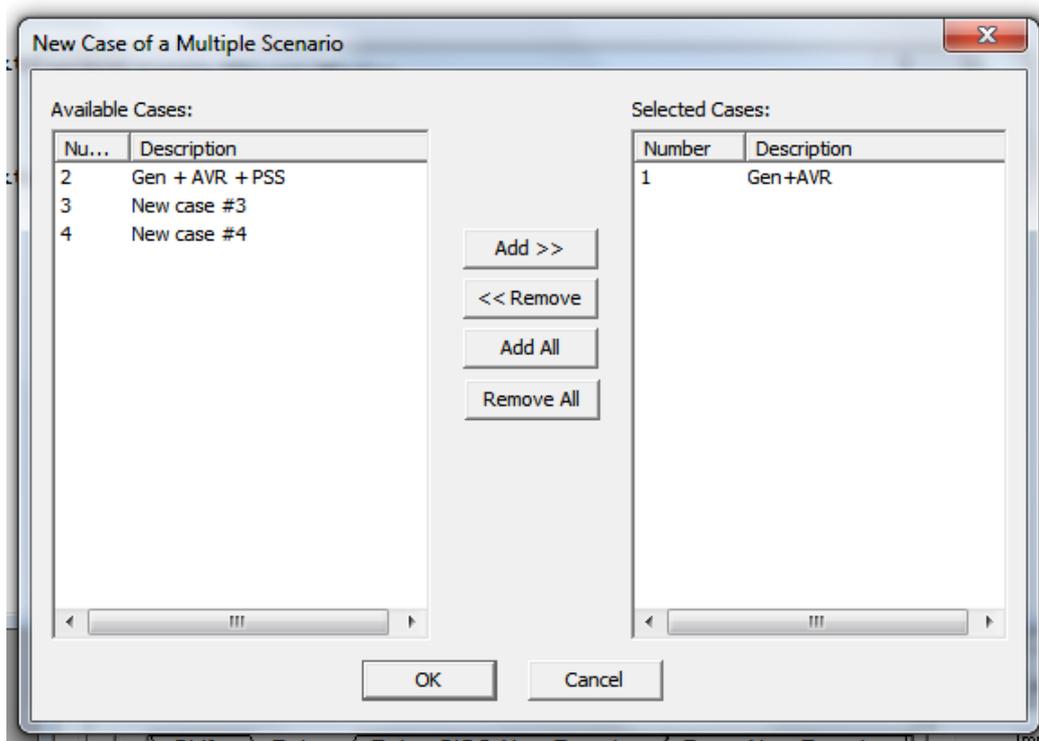


Figura 96: Janela “New Case of a Multiple Scenario” do programa PacDyn.

A janela “*New Case of a Multiple Scenario*” permite ao usuário do programa PacDyn selecionar uma lista de casos (dentre os casos existentes no banco de dados do programa) a serem estudados em um determinado múltiplo cenário.

A.4. Ativação da Análise de Múltiplos Cenários

Durante a implementação de interface gráfica realizadas na implementação da análise de múltiplos cenários no programa PacDyn, foram criadas duas interfaces de ativação da análise de múltiplos cenários neste programa, ou seja, foram desenvolvidas duas formas de se ativar a análise de múltiplos cenários. Uma das maneiras de se realizar a ativação da análise de múltiplos cenários no PacDyn é através do botão “*Mult Scen*” que fica localizado abaixo da barra de menus da janela principal do programa em questão, conforme pode ser visualizado na Figura 97.

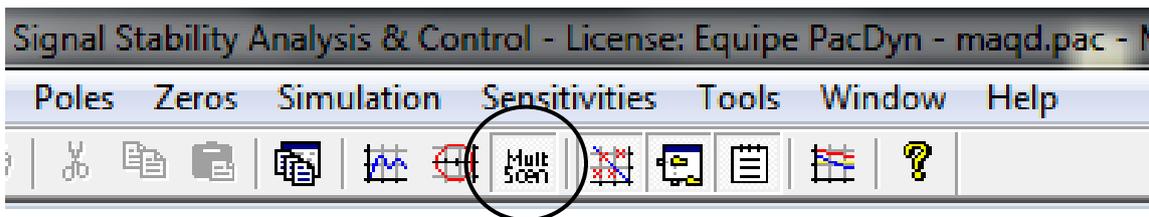


Figura 97: Botão “*Mult Scen*” na janela principal do PacDyn.

A outra maneira de se realizar a ativação da análise múltiplos cenários é através os menus do PacDyn. Para isso, deve-se ativar a opção “*Multiple Scenarios*” que está localizada no menu “*Tools*” do programa, o que pode ser visualizado na Figura 98.

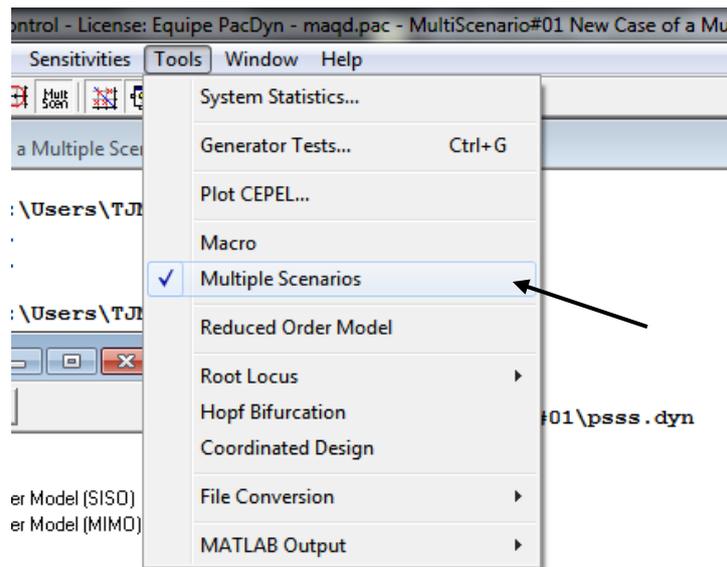


Figura 98: Opção “Multiple Scenarios” no menu “Tools” do PacDyn.

A.5. Funcionalidades do PacDyn

As interfaces gráficas utilizadas para o acionamento das funcionalidades já existentes do PacDyn, tais as ferramentas de análise modal e as respostas no tempo e na frequência, são as mesmas existentes previamente à implementação da análise de múltiplos cenários neste programa, como pode ser observado nas imagens

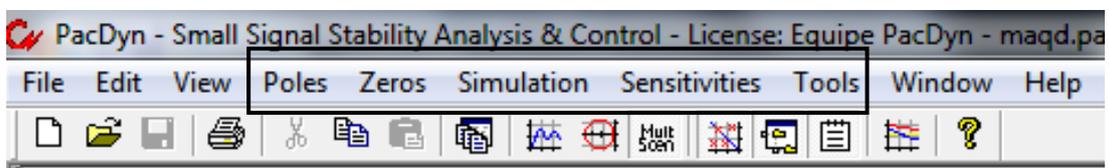


Figura 99: Destaque dos menus de acionamento das funcionalidades do PacDyn.

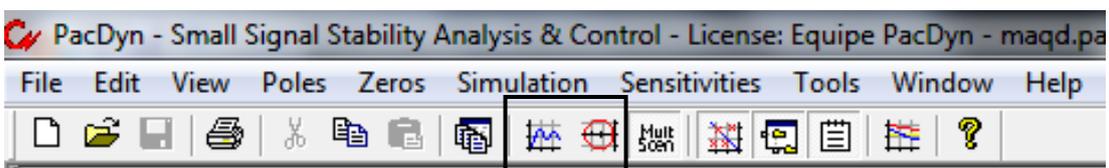


Figura 100: Destaque dos botões de acionamento das funcionalidades do PacDyn.

Anexo B

Funcionalidades Implementadas

B.1. Cálculo de Modos ou Pólos

No programa PacDyn, o cálculo de modos ou pólos pode ser realizado através dos métodos de *Rayleigh*, RBI, Pólo Dominante, DPSE, QR e QZ. Todos estes métodos, previamente existentes no PacDyn, foram implementados na análise de múltiplos cenários.

Os métodos de cálculo de pólos mencionados anteriormente podem ser acionados através do menu “*Poles*” encontrado na janela principal do programa PacDyn, como pode ser visualizado na Figura 101.

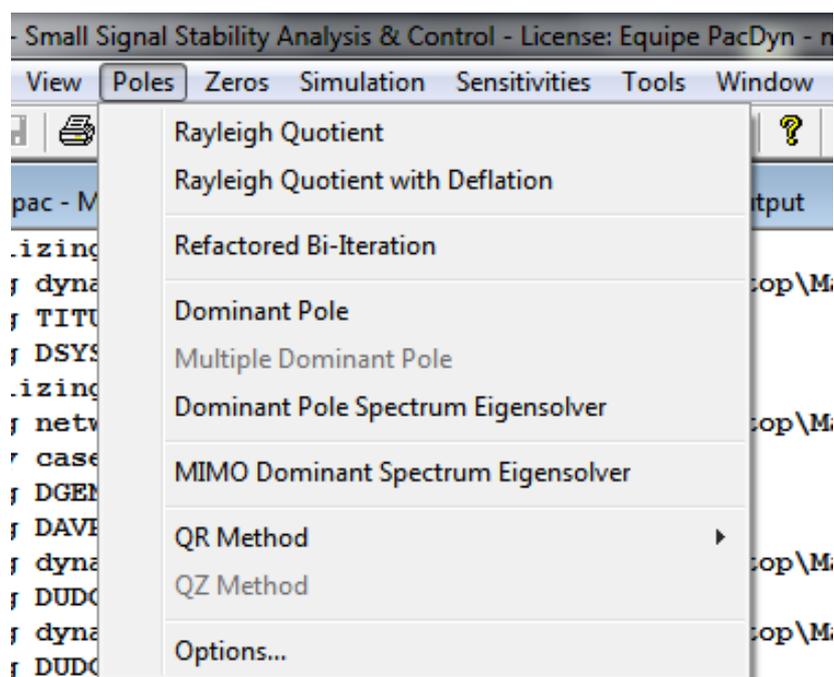


Figura 101: Métodos de cálculo de pólos encontrados no menu “*Poles*”.

Uma vez acionado um dos métodos de cálculo de pólos com a análise de múltiplos cenários ativada, o programa PacDyn calcula os pólos do sistema em análise para cada ponto de operação de cada um dos casos selecionados pelo usuário do programa para o múltiplo cenário em estudo, através do algoritmo mostrado anteriormente na Figura 4.

Após o término do cálculo dos pólos realizado através do método escolhido pelo usuário do programa, o PacDyn gera um arquivo que é automaticamente aberto no programa PlotCepel, também desenvolvido pelo CEPEL, com os resultados obtidos, conforme pode ser visualizado na Figura 102.

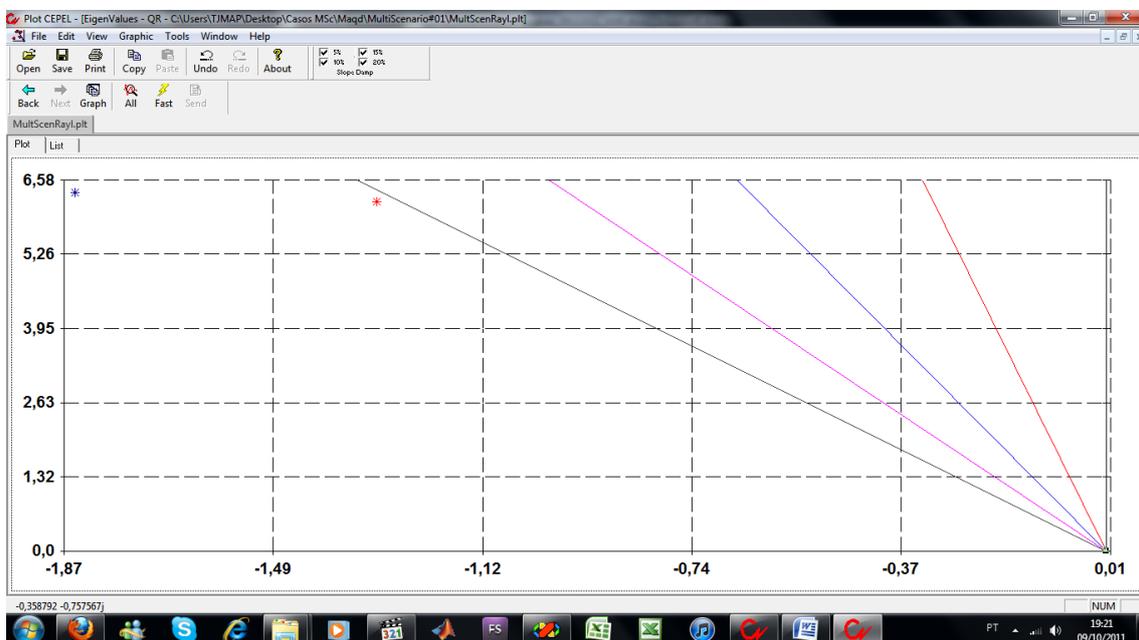


Figura 102: Exemplo de arquivo de saída do cálculo de pólos.

Os pólos plotados a partir dos dados do arquivo gerado pelo programa PacDyn podem ser visualizados todos juntos em um mesmo gráfico ou separados de acordo com ponto de operação e com o caso aos quais pertencem.

Esses arquivos gerados pelo programa PacDyn possuem nomes específicos para a identificação do método utilizado para o cálculo dos pólos em questão, conforme a Tabela 12.

Tabela 12: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de pólos.

Método Utilizado	Nome do Arquivo Gerado
<i>Rayleigh</i>	<i>MultiScenRayl.plt</i>
RBI	<i>MultiScenRbi.plt</i>
Dominante	<i>MultiScenDomi.plt</i>
DPSE	<i>MultiScenDPSE.plt</i>
QR	<i>MultiScenPoleQR.plt</i>
QZ	<i>MultiScenPoleQZ.plt</i>

B.2. Cálculo de Zeros

No programa PacDyn, o cálculo de zeros pode ser realizado através dos métodos de *Rayleigh*, Zero Dominante, QR e QZ. Todos estes métodos, previamente existentes no PacDyn, foram implementados na análise de múltiplos cenários.

Os métodos de cálculo de zeros mencionados anteriormente podem ser acionados através do menu “Zeros” encontrado na janela principal do programa PacDyn, como pode ser visualizado na Figura 103.

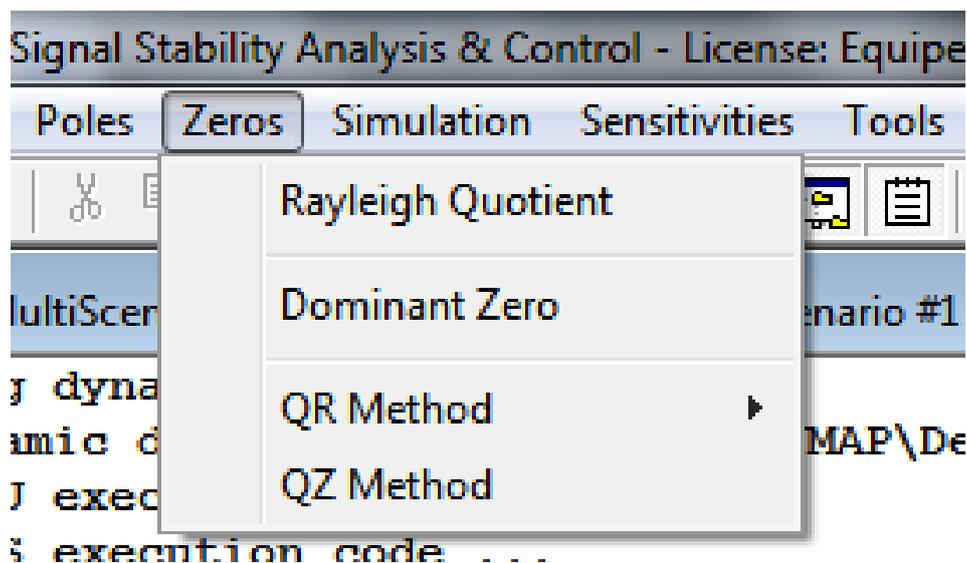


Figura 103: Métodos de cálculo de zeros encontrados no menu “Zeros”.

Uma vez acionado um dos métodos de cálculo de zeros com a análise de múltiplos cenários ativada, o programa PacDyn calcula os zeros do sistema em análise para cada ponto de operação de cada um dos casos selecionados pelo usuário do programa para o múltiplo cenário em estudo, através do algoritmo mostrado anteriormente na Figura 4.

Após o término do cálculo dos zeros realizado através do método escolhido pelo usuário do programa, o PacDyn gera um arquivo que é automaticamente aberto no programa PlotCepel, com os resultados obtidos, conforme pode ser visualizado na Figura 104.

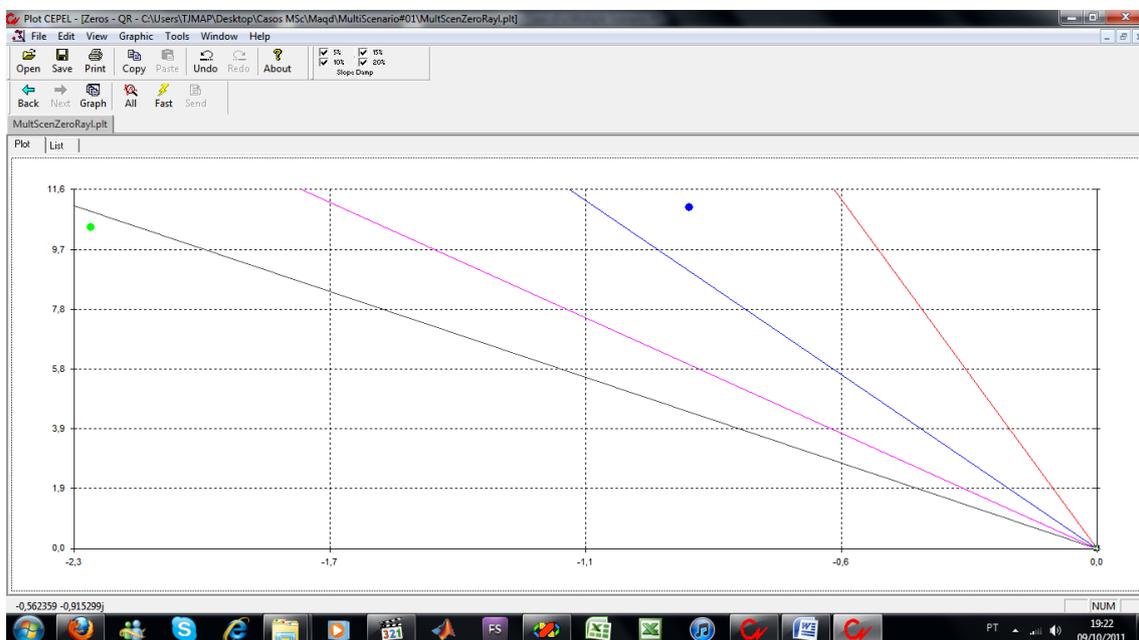


Figura 104: Exemplo de arquivo de saída do cálculo de zeros.

Os zeros plotados a partir dos dados do arquivo gerado pelo programa PacDyn podem ser visualizados todos juntos em um mesmo gráfico ou separados de acordo com ponto de operação e com o caso aos quais pertencem.

Esses arquivos gerados pelo programa PacDyn possuem nomes específicos para a identificação do método utilizado para o cálculo dos zeros em questão, conforme a Tabela 13.

Tabela 13: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de zeros.

Método Utilizado	Nome do Arquivo Gerado
<i>Rayleigh</i>	<i>MultiScenZeroRayl.plt</i>
Dominante	<i>MultiScenZeroDomi.plt</i>
QR	<i>MultiScenZeroQR.plt</i>
QZ	<i>MultiScenZeroQZ.plt</i>

B.3. Cálculo de Sensibilidades

O programa PacDyn pode realizar o cálculo de determinadas sensibilidades modais como os *mode shapes*, os resíduos de funções de transferências, os fatores de controlabilidade, os fatores de observabilidade e os fatores de participação.

O acionamento do cálculo dessas sensibilidades modais pode ser realizado através do menu “*Sensitivities*” encontrado na janela principal do programa PacDyn, como pode ser visualizado na Figura 105.

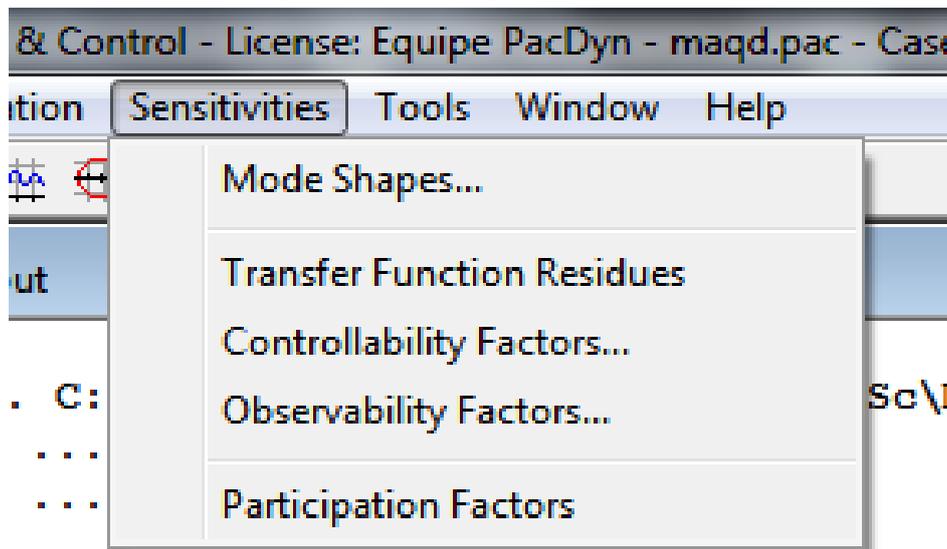


Figura 105: Tipos de sensibilidades encontrados no menu “*Sensitivities*”.

Uma vez acionado o cálculo de uma das sensibilidades modais para uma lista de modos selecionados, com a análise de múltiplos cenários ativada, o programa PacDyn calcula a sensibilidade desejada para cada ponto de operação de cada um dos casos selecionados pelo usuário do programa para o múltiplo cenário em estudo, através do algoritmo mostrado anteriormente na Figura 4.

Após o término do cálculo da sensibilidade desejada, o PacDyn gera um arquivo para cada ponto de operação de cada um dos casos em estudo, que são automaticamente abertos no programa PlotCepel, com os resultados obtidos, conforme pode ser visualizado na Figura 106.

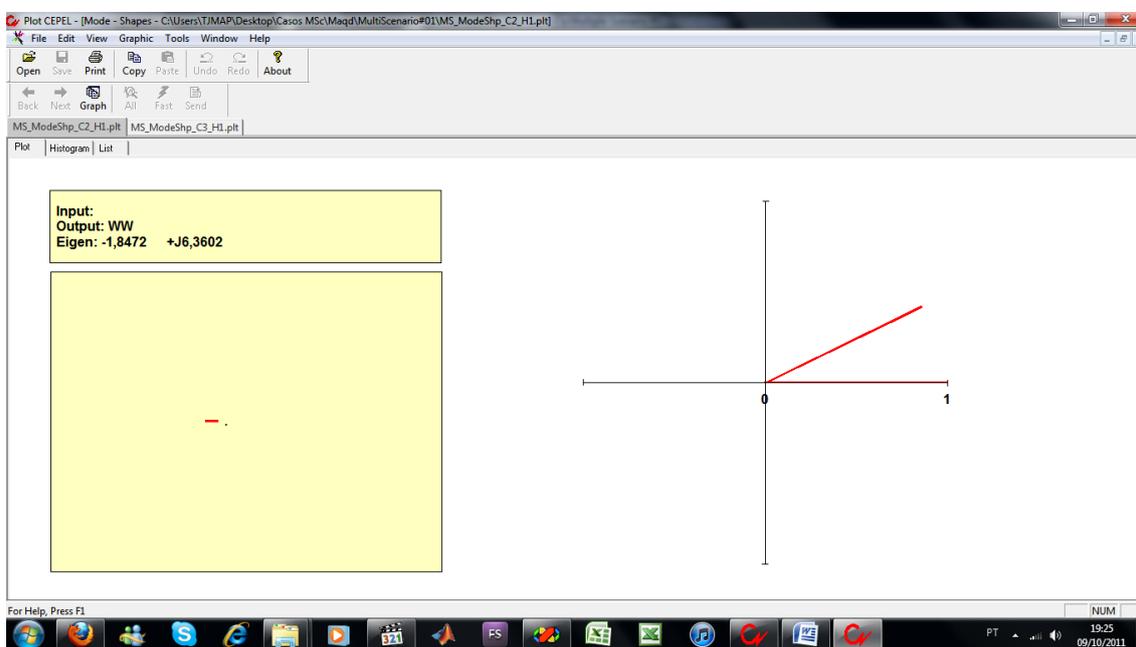


Figura 106: Exemplo de arquivos de saída do cálculo de *mode shape*.

Cada um desses arquivos de saída gerados pelo programa PacDyn contem os resultados dos cálculos da sensibilidade desejada para cada um dos modos selecionados pelo usuário. Esses arquivos ficam disponíveis ao usuário do PacDyn nas abas do programa PlotCepel. Os arquivos gerados pelo PacDyn possuem nomes específicos para cada tipo de sensibilidade e para cada ponto de operação analisado, conforme a Tabela 14.

Tabela 14: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de sensibilidades.

Sensibilidade	Nome do Arquivo Gerado
Resíduos	<i>MS_Resid_CX_HY.plt</i>
Controlabilidade	<i>MS_Contr_CX_HY.plt</i>
Observabilidade	<i>MS_Observ_CX_HY.plt</i>
<i>Mode Shapes</i>	<i>MS_ModeShp_CX_HY.plt</i>
Fatores de Participação	<i>MS_PartFact_CX_HY.plt</i>

Os termos “CX” e “HY” que aparecem nos nomes dos arquivos de saída do cálculo de sensibilidades modais indicam que esses arquivos possuem os resultados calculados para o caso de número “X” e para o histórico de fluxo de potência de número “Y”.

B.4. Cálculo de *Root Locus*

No programa PacDyn, o cálculo de *root locus* pode ser realizado através dos métodos DPSE e QR. Ambos os métodos, previamente existentes no PacDyn, foram implementados na análise de múltiplos cenários. Esses métodos de cálculo de *root locus* podem ser acionados através da opção “*Root Locus*” do menu “*Tools*”, encontrado na janela principal do PacDyn, como pode ser visualizado na Figura 107.

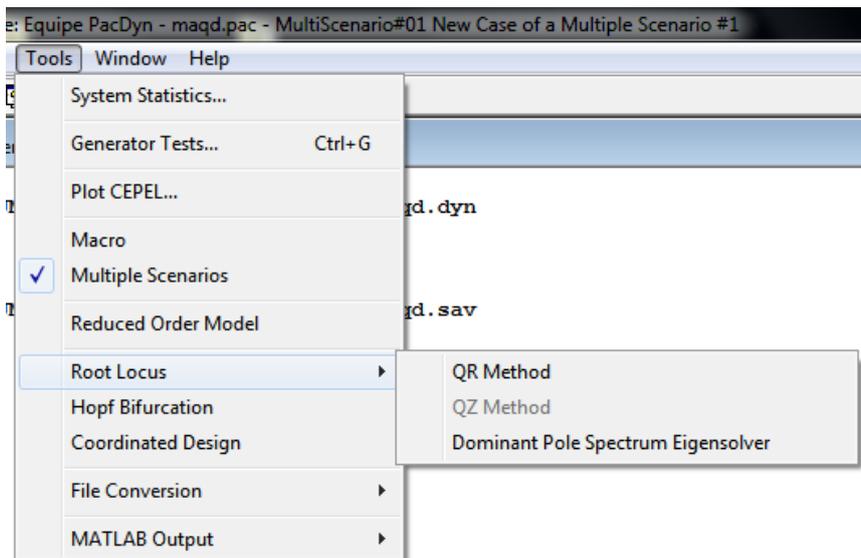


Figura 107: Métodos de cálculo de *root locus* implementados.

Uma vez acionado um dos métodos de cálculo de *root locus* com a análise de múltiplos cenários ativada, o programa PacDyn calcula diagrama do lugar das raízes do sistema em análise para cada ponto de operação de cada um dos casos selecionados pelo usuário do programa para o múltiplo cenário em estudo, através do algoritmo mostrado anteriormente na Figura 4.

Após o término do cálculo de *root locus* através do método desejado, o PacDyn gera um arquivo para cada ponto de operação de cada um dos casos em estudo, que são automaticamente abertos no programa PlotCepel, com os resultados obtidos, conforme pode ser visualizado na Figura 108.

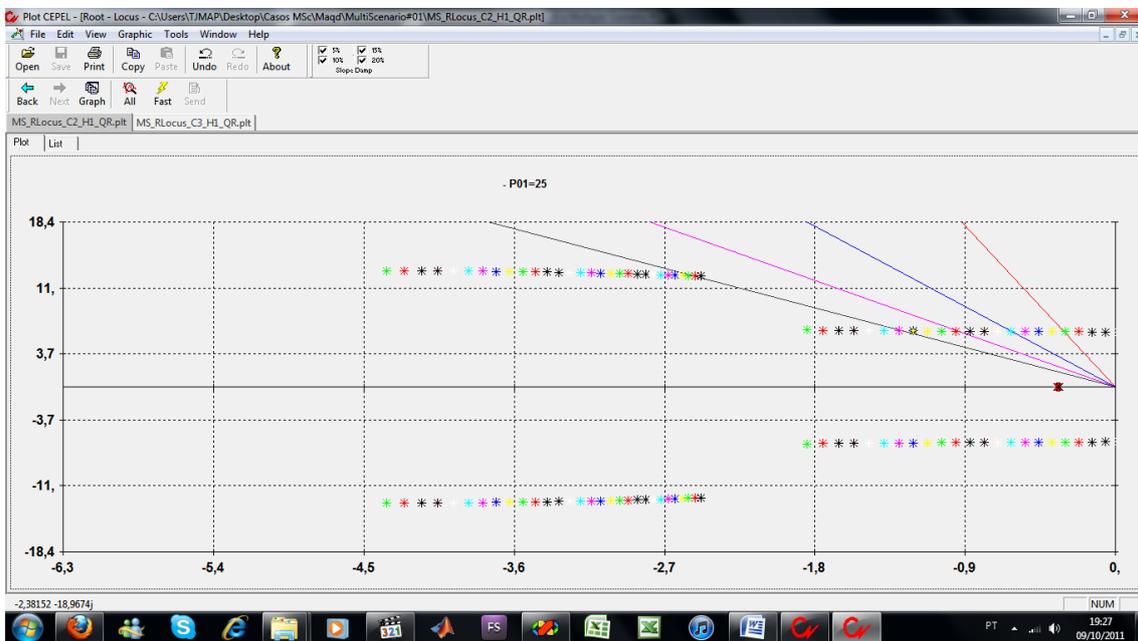


Figura 108: Exemplo de arquivos de saída do cálculo de *root locus*.

Cada um desses arquivos de saída gerados pelo programa PacDyn contem os resultados dos cálculos do *root locus* através do método desejado. Esses arquivos ficam disponíveis ao usuário do PacDyn nas abas do programa PlotCepel. Os arquivos gerados pelo PacDyn possuem nomes específicos para cada método de cálculo e para cada ponto de operação analisado, conforme a Tabela 15.

Tabela 15: Nomes dos arquivos de resultados do cálculo de *root locus*.

Método	Nome do Arquivo Gerado
QR	<i>MS_RLocus_CX_HY_QR.plt</i>
DPSE	<i>MS_Contr_CX_HY_DPSE.plt</i>

Os termos “CX” e “HY” que aparecem nos nomes dos arquivos de saída do cálculo de sensibilidades modais indicam que esses arquivos possuem os resultados calculados para o caso de número “X” e para o histórico de fluxo de potência de número “Y”.

B.5. Cálculo da Resposta no Tempo

No programa PacDyn, o acionamento do cálculo de respostas no tempo para uma determinada função de transferência pode ser realizado através do botão “*Time Response*” ou através do menu “*Simulation*”. Ambas as formas de acionamento da função em questão podem ser encontrados na janela principal do programa PacDyn, como pode ser visualizado na Figura 109 e na Figura 110.

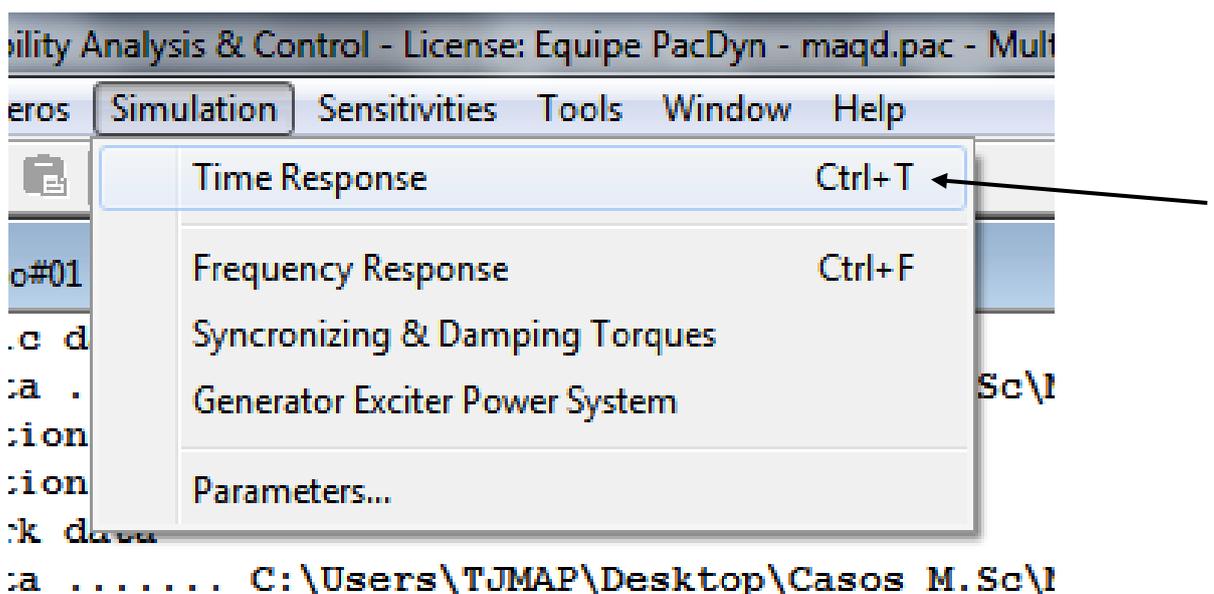


Figura 109: Cálculo de resposta no tempo pelo menu “*Simulation*”.

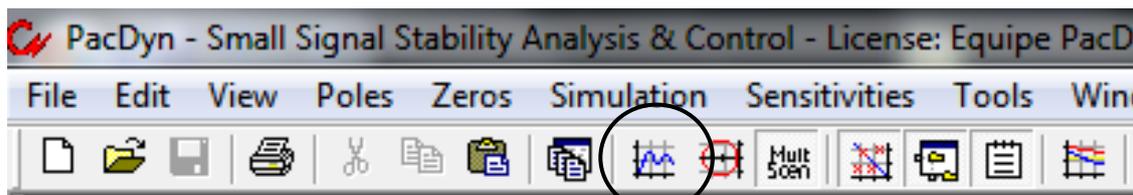


Figura 110: Cálculo de resposta no tempo pelo botão “Time Response”.

Uma vez acionado o cálculo de resposta no tempo com a análise de múltiplos cenários ativada, o programa PacDyn calcula os gráficos das respostas no tempo das funções de transferências previamente escolhidas para cada ponto de operação de cada um dos casos selecionados pelo usuário do programa para o múltiplo cenário em estudo, através do algoritmo mostrado anteriormente na Figura 4.

Após o término do cálculo de resposta no tempo para as funções de transferência desejadas, o PacDyn gera um arquivo com as informações dos gráficos obtidos, cujo nome é “*MultScenTime.plt*” e que é automaticamente aberto no programa PlotCepel, conforme pode ser visualizado na Figura 111.

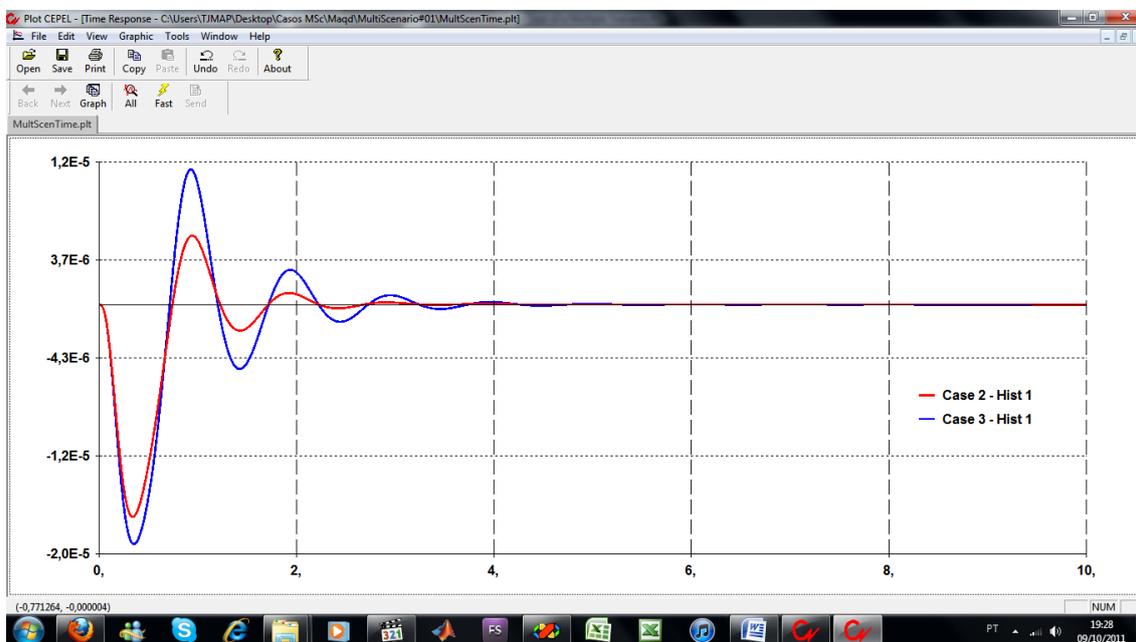


Figura 111: Exemplo de arquivos de saída do cálculo da resposta no tempo.

Os gráficos das respostas no tempo obtidas para cada uma das funções de transferência em estudo plotados a partir dos dados do arquivo gerado pelo programa PacDyn podem ser visualizados todos juntos em um mesmo gráfico ou separados de acordo com o ponto de operação e com o caso aos quais pertencem.

B.6. Cálculo da Resposta na Frequência

No programa PacDyn, o acionamento do cálculo de respostas na frequência para uma determinada função de transferência pode ser realizado através do botão “*Frequency Response*” ou através do menu “*Simulation*”. Ambas as formas de acionamento da função em questão podem ser encontrados na janela principal do programa PacDyn, como pode ser visualizado na Figura 112 e na Figura 113.

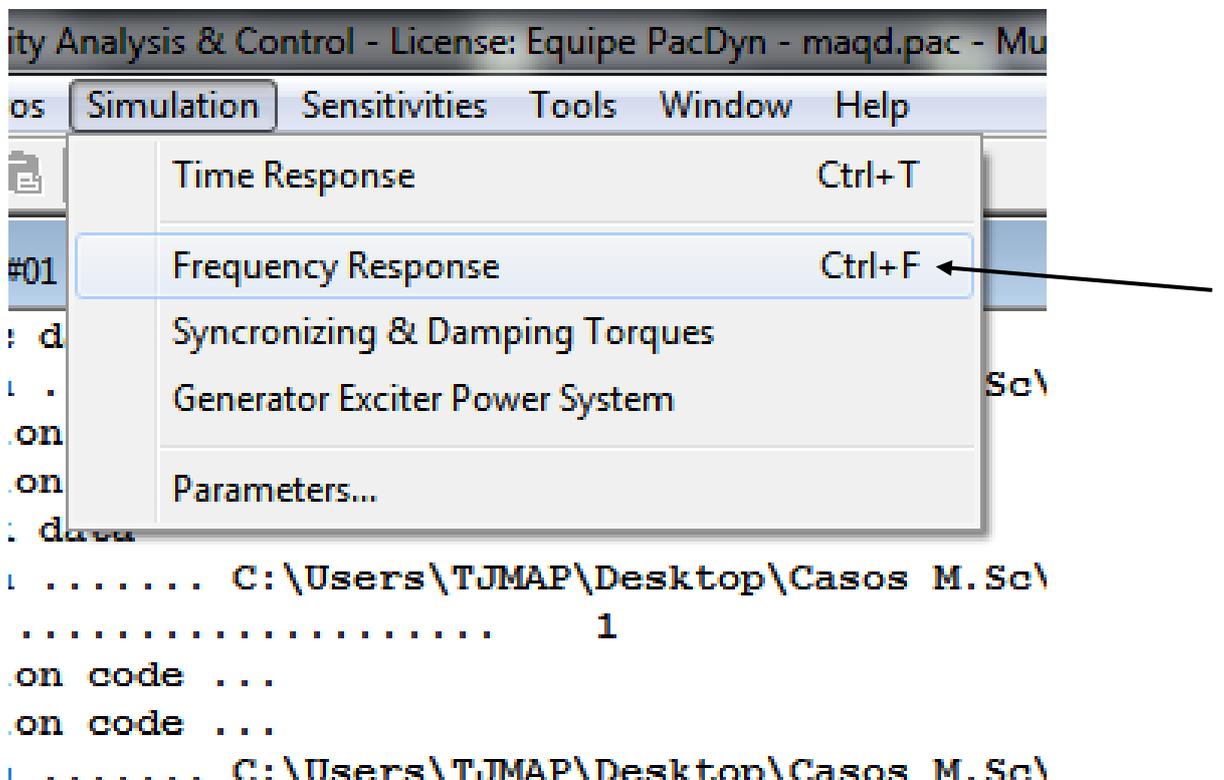


Figura 112: Cálculo de resposta na frequência pelo menu “*Simulation*”.

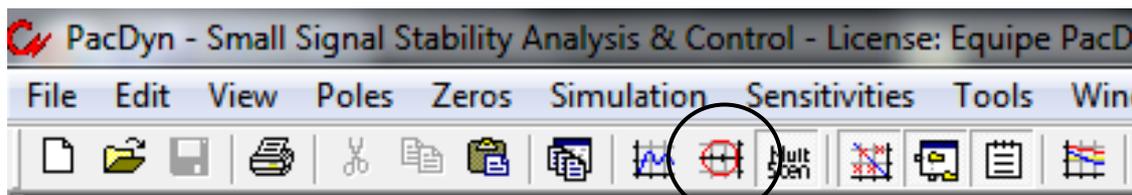


Figura 113: Cálculo de resposta na frequência pelo botão “Frequency Response”.

Uma vez acionado o cálculo de resposta na frequência com a análise de múltiplos cenários ativada, o programa PacDyn calcula os gráficos das respostas na frequência das funções de transferências previamente escolhidas para cada ponto de operação de cada um dos casos selecionados pelo usuário do programa para o múltiplo cenário em estudo, através do algoritmo mostrado anteriormente na Figura 4.

Após o término do cálculo de resposta na frequência para as funções de transferência desejadas, o PacDyn gera um arquivo com as informações dos gráficos obtidos, cujo nome é “*MultScenFreq.plt*” e que é automaticamente aberto no programa PlotCepel, conforme pode ser visualizado na Figura 114.

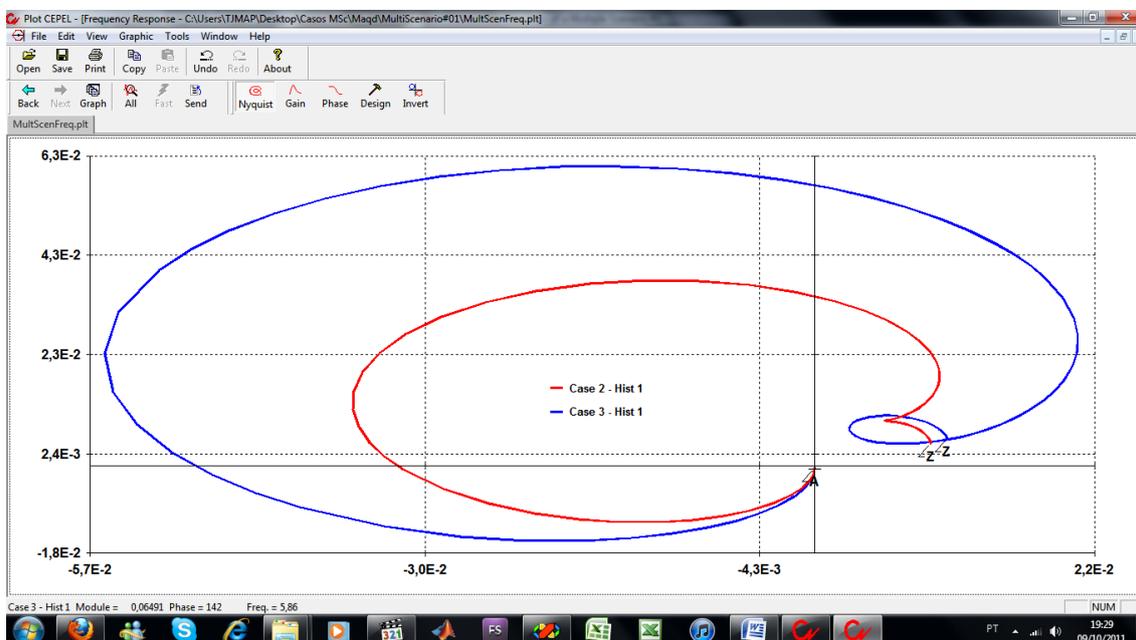


Figura 114: Exemplo de arquivos de saída do cálculo da resposta na frequência.

Os gráficos das respostas na frequência obtidos para cada uma das funções de transferência em estudo plotados a partir dos dados do arquivo gerado pelo programa PacDyn podem ser visualizados todos juntos em um mesmo gráfico ou separados de acordo com o ponto de operação e com o caso aos quais pertencem.

É válido dizer que, no caso dos gráficos obtidos nas respostas na frequência, o usuário pode optar por visualizar os resultados através do diagrama de Nyquist ou através do diagrama de Bode de módulo e de fase.

O cálculo da resposta em frequência é umas das etapas dos projetos de estabilizadores de sistemas de potência realizados a partir do programa PacDyn. É válido mencionar que, ao se realizar um projeto de PSS a partir do PacDyn, pode-se visualizar o diagrama de Nyquist com o efeito deste estabilizador, ou seja o diagrama do sistema elétrico compensado.

Na análise de múltiplos cenários, o efeito do PSS criado em um dos pontos de operação em estudo pode ser observado em todos os diagramas calculados, porém separadamente (e não simultaneamente como pode ser observado nos gráficos das respostas em frequência sem projetos de PSS), como pode ser visto na Figura 115 e na Figura 116.

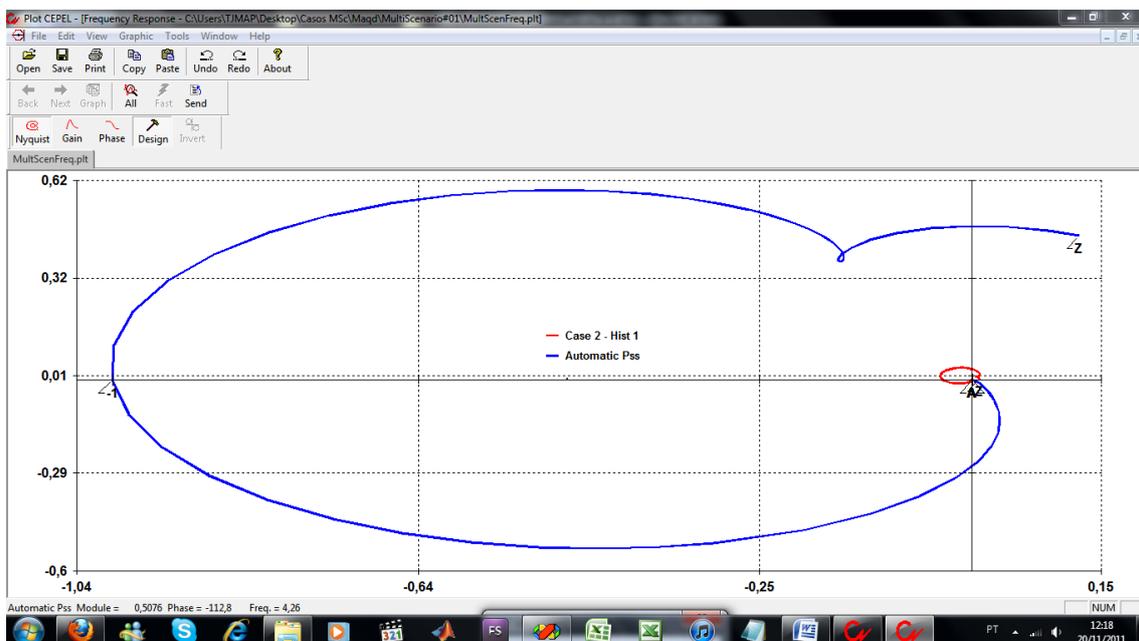


Figura 115: Diagramas de Nyquist com e sem um PSS projetado para o caso 2.

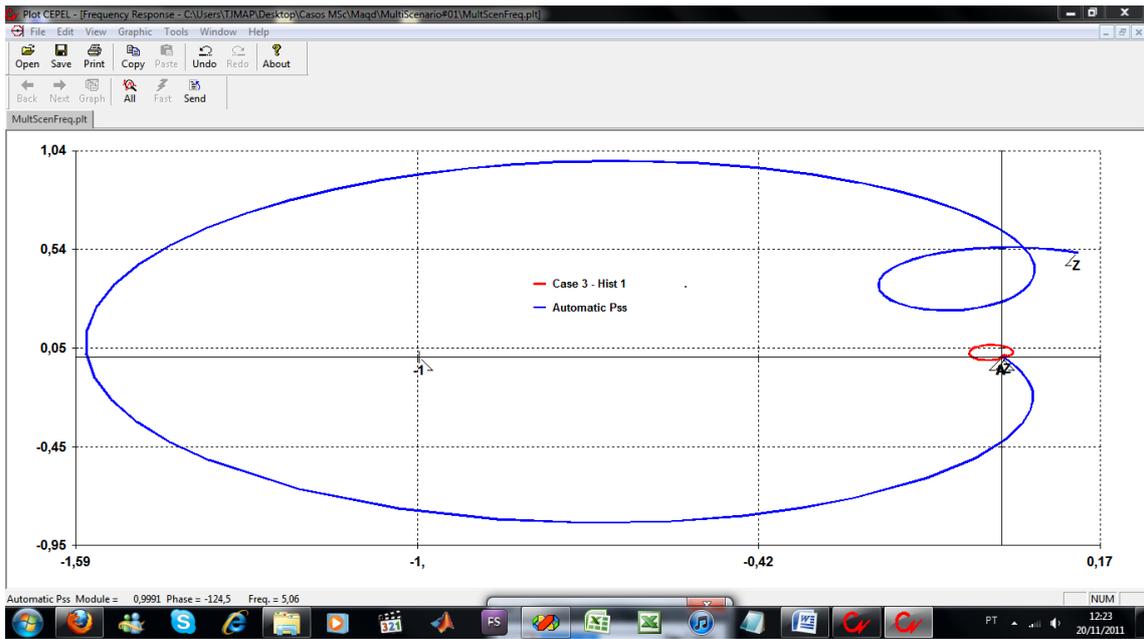


Figura 116: Diagramas de Nyquist com e sem um PSS projetado para o caso 3.

Anexo C

Dados Utilizados nos Estudos

C.1. Dados Dinâmicos do Sistema de Pequeno Porte

```
TITU
    ///                                     ///
    /// Two-Area System - Source: Kundur   ///
    ///                                     ///
DSYS
# N = Network File: P = PacDyn Formatted File (DEFAULT)
#                                     A = AnaRede Formatted File
#                                     H = AnaRede History File
# P = Network printout | T = Initial conditions test | V = Voltstab analysis
#(freq) (base) (no) N P T V I
60.000 100.00 0001 H N N N A
#
DGEN
#(#1 )noRM(base) (-HH-) (-X'd) (-X'q) (-Xd-) (-Xq-) (-RR-) (T'd0) (T'q0) (X1-) (-Sat-) (--D-)
#(#1 )no (-X"d) (-X"q) (T"d0) (T"q0) (-X1-) (-A--) (-B--) (-C--) (-Xt-)
#
1 0 5 300.0 6.5 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 0.0
1 0 4 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
#
2 0 5 225.0 6.5 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 0.0
2 0 4 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
#
3 0 5 225.0 6.175 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 0.0
3 0 4 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
#
4 0 5 175.0 6.175 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 0.0
4 0 2 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
-999
#
DAVR
#(Nb1)Nm(-Ka-) (-Ta-) (-Kf-) (-Tf-) (-Tn-) (-Td-) (-Ke-) (-Te-) (Vsat) (Vsmx) (Vmax) (Vc )M
0001 90.00 0.050 3
0002 90.00 0.050 3
0003 90.00 0.050 3
0004 90.00 0.050 3
-999
#
DUDC
#(NUDC) (---Name---)
000005 PSS
# (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
1 OUT VPSS VPSS 1
2 IN WW WW 1
# (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
3 LDLG WW X3 3.0 1.0 3.0
4 GAIN X3 X4 20.0
5 LDLG X4 X5 1.0 0.06 1.0 0.015
6 LDLG X5 VPSS 1.0 0.06 1.0 0.015
STOP
#(NUDC) (---Name---)
000006 PSS
# (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
1 OUT VPSS VPSS 2
2 IN WW WW 2
```

```

#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
3 LDLG  WW      X3      X3      3.0      1.0      3.0
4 GAIN  X3      X4      20.0
5 LDLG  X4      X5      1.0      0.06     1.0      0.015
6 LDLG  X5      VPSS     1.0      0.06     1.0      0.015
STOP
#(NUDC) (---Name---)
000008 PSS
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
1 OUT   VPSS     VPSS     4
2 IN    WW      WW      4
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
3 LDLG  WW      X3      X3      3.0      1.0      3.0
4 GAIN  X3      X4      20.0
5 LDLG  X4      X5      1.0      0.06     1.0      0.015
6 LDLG  X5      VPSS     1.0      0.06     1.0      0.015
STOP
-999
#
END

```

C.2. Dados de Fluxo de Potência do Sistema de Pequeno Porte

```

TITU
Two Area Test System
(
DCTE
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
BASE 100. DASE 1000. TEPA .1E-7 EXST 4. TETP 5. TBPA 5.
TLPP 1. TEPR .1E-7 QLST 4. TLPR 1. TLPQ 2. TSBZ .01
TSBA 5. ASTP .05 VSTP 5. TLVC .5 TLTC .01 TSFR .1E-7
ZMAX 500. TLPV .5 VDVM 200. VDVN 40. TUDC .001 TADC .01
PGER 30. TPST 2. VFLD 70. ZMIN .001 HIST 140 LFIT 10
ACIT 30 LFCV 1 DCIT 10 VSIT 10 LPIT 50 LFLP 10
PDIT 1 LCRT 30 LPRT 60 CSTP 500.
ICIT 30 DMAX 5 FDIV 2. ICMN .05 VART 5. TSTP 32
ICMV .5 APAS 90. CPAR 70. VAVT 2. VAVF 5. VMVF 15.
VPVT 2. VPVF 5. VPMF 10. VSVF 20. VINP 1. VSUP 1.
99999
(
DBAR
(Num)OETGb( nome )Gl( V) ( A) ( Pg) ( Qg) ( Qn) ( Qm) (Bc ) ( Pl) ( Ql) ( Sh)Are(Vf)
1 L1 Barra1 103020.3 700. 185.-999999999 11000
2 L1 Barra2 101010.5 700.234.6-999999999 11000
3 L2 Barra3 1030-6.8719.1 176.-999999999 21000
4 L1 Barra4 1010-17. 700. 202.-999999999 21000
5 L Barra5 100613.8 11000
6 L Barra6 9783.72 11000
7 L Barra7 961-4.7 967. 100. 200. 11000
8 L Barra8 949-19. 11000
9 L Barra9 971-32. 1767. 100. 350. 21000
10 L Barra10 983-24. 21000
11 L Barra11 1008-13. 21000
99999
(
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% ) ( X% ) (Mvar) (Tap) (Tm) (Tmx) (Phs) (Bc ) (Cn) (Ce)Ns
1 5 1 1.6666 1.
2 6 1 1.6666 1.
3 11 1 1.6666 1.
4 10 1 1.6666 1.
5 6 1 .25 2.5 4.375
6 7 1 .1 1. 1.75
7 8 1 1.1 11. 19.25
7 8 2 1.1 11. 19.25
8 9 1 1.1 11. 19.25
8 9 2 1.1 11. 19.25
9 10 1 .1 1. 1.75
10 11 1 .25 2.5 4.375
99999

```

```

(
DARE
(Ar      (Xchg)      (      Identificacao da area      ) (Xmin) (Xmax)
  1        0.        * AREA 1
  2        0.        * AREA 2
99999
(
FIM

```

C.3. Dados do Sistema Interligado Nacional

Os dados utilizados no estudo do Sistema Interligado Nacional podem ser encontrados no site do ONS, no link abaixo:

http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx

C.4. Dados do Estabilizador da Usina Barbosa Lima Sobrinho

Para o estudo do sistema interligado nacional, foram utilizados os arquivos do banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) de mês de junho do ano de 2011, com a utilização de um estabilizador de sistema de potência na usina Barbosa Lima Sobrinho grupo 10. O arquivo que contém os dados do PSS criado para a usina Barbosa Lima Sobrinho pode ser visualizado abaixo.

```

DUDC
#
*****UDC by Plot for Windows *****
#(NcdU) (---Name---)
  900000 PLOT
#Flag  (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
  1 OUT    OU0001 VPSS      3974      1
  2 IN     WW      IN0001  3974      1
#Flag  (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
  3 GAIN   IN0001 XV0001  1.152763
  4 LDLG   XV0001 XV0002  1.        .636331      1.        .06675221
  5 LDLG   XV0002 XV0003  1.        .636331      1.        .06675221
  STOP    6 LDLG   XV0003 OU0001  0.        3.        1.        3.
-999
END

```

Anexo D

Tempo de Processamento

D.1. Tempo de Processamento das Funções Utilizadas

Tabela 16: Tempos de Processamento – Sistema de Pequeno Porte.

Função Utilizada	Número de Casos Rodados	Tempo Demandado
Pólos – QR	42	3min
Sensibilidades	42	3min3s
Resposta no Tempo	42	3min38s
Resposta em Frequência	42	2min44s

Tabela 17: Tempos de Processamento – Sistema Interligado Nacional.

Função Utilizada	Número de Casos Rodados	Tempo Demandado
Pólos – Rayleigh	45	17min27s
Pólos – DPSE	45	18min52s
Sensibilidades	45	17min30s
Resposta no Tempo	45	1h49min38s
Resposta em Frequência	45	22min53s