

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Doutorado em Engenharia Elétrica

Wesley Peres

**PROJETO DE CONTROLADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO
OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA**

Juiz de Fora
2016

Wesley Peres

Projeto de Controladores de Sistemas de Potência Utilizando Otimização Bioinspirada

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc.

Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Juiz de Fora

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Peres, Wesley.
Projeto de Controladores de Sistemas de Potência Utilizando Otimização Bioinspirada / Wesley Peres. -- 2016.
306 f. : il.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Junior
Coorientador: João Alberto Passos Filho
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

1. Estabilidade de Sistemas de Potência. 2. Controle de Sistemas de Potência. 3. Otimização Bioinspirada. 4. Controle Descentralizado. 5. Controle Hierárquico. I. Silva Junior, Ivo Chaves da, orient. II. Passos Filho, João Alberto, coorient. III. Título.

Wesley Peres

Projeto de Controladores de Sistemas de Potência Utilizando Otimização Bioinspirada

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 28 de Março de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc. (Co-Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a Patricia Teixeira Leite Asano, Dra.Eng.
Universidade Federal do ABC

Prof.^a Valceres Vieira Rocha e Silva, Ph.D.
Universidade Federal de São João del-Rei

Prof. Tales Pulinho Ramos , D.Sc.
Instituto Federal Sudeste MG

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. André Augusto Ferreira, Dr.Eng.
Universidade Federal de Juiz de Fora

*Dedico esse trabalho aos meus pais e
aos meus sobrinhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora do Perpétuo Socorro.

Aos meus pais Antonio e Rute, aos meus irmãos Warleson e Wederli, aos meus padrinhos Reni e Cica, à minha prima Silvinha, à minha cunhada Ana Flavia, demais familiares e amigos por me ajudarem a chegar até essa etapa.

Agradeço de forma especial aos meus orientadores, Professores Ivo Chaves e João Alberto Passos Filho. Sou grato por terem verdadeiramente me orientado desde o início do trabalho, quando eu pouco ou nada sabia de controle, estabilidade de sistemas de potência e otimização bioinspirada. O respeito e a amizade que vocês têm pelos seus alunos são exemplos a serem seguidos em minha carreira acadêmica.

À amiga Paula La Gatta pelas inúmeras discussões técnicas, incluindo os finais de semana via *Skype*.

Agradeço aos colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei (DEPEL/UFSJ). Sei que é injusto eu citar nomes aqui, pois sou grato à maioria. Entretanto, não posso deixar de agradecer explicitamente às professoras Valceres Silva e Lane Rabelo por terem me incentivado durante as etapas mais difíceis desse trabalho. Obrigado por não terem deixado eu perder o foco! Registro também o meu agradecimento à chefia departamental pela compreensão, às secretárias do departamento e aos colegas mais próximos pela acolhida e pela convivência agradável.

Aos professores que aceitaram participar da banca.

À coordenação do PPEE/UFJF pelo esforço na viabilização da minha defesa de doutorado na UFJF.

Aos amigos e colegas de mestrado e doutorado que conviveram tanto tempo comigo no LABSPOT/UFJF (2010-2014).

Por fim, agradeço o suporte financeiro recebido da CAPES durante o período em que fui bolsista de doutorado do PPEE/UFJF.

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes".

Isaac Newton (1643-1727)

*"Embora eu caminhe por um vale tenebroso,
nenhum mal temerei, pois junto a mim estás..."*

Salmo 23,4.

PROJETO DE CONTROLADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA

Wesley Peres

Março de 2016

Orientadores: Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc.

Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Programa: Engenharia Elétrica.

Os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) têm sido usados por décadas para fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas através do controle de excitação dos geradores síncronos.

No presente trabalho, são propostas metodologias para o projeto de estabilizadores por meio do ajuste de ganho e fase. O ajuste é realizado de forma simultânea (coordenada), considerando múltiplos pontos de operação com o objetivo de garantir a robustez dos controladores. Duas estruturas são consideradas: a descentralizada, que utiliza somente sinais locais, e a hierárquica, que utiliza sinais remotos.

A dinâmica do sistema elétrico de potência é modelada em espaço de estados e o procedimento de ajuste é formulado como um problema de otimização para a maximização do coeficiente de amortecimento do autovalor dominante do sistema em malha fechada considerando todos os pontos de operação.

As metodologias, aqui abordadas, são baseadas em métodos de otimização bioinspirados no comportamento de enxames: Enxame de Partículas e Eco-localização de Morcegos. São desenvolvidas metodologias híbridas baseadas no acoplamento dos métodos bioinspirados com o Método do Gradiente Descendente para o refinamento dos ganhos dos controladores de forma a melhorar a busca local do processo de otimização. Com o objetivo de manter a diversidade da população, estratégias baseadas em multipopulações também são propostas.

As metodologias propostas foram validadas através da simulação de sistemas teste de pequeno e médio porte, que são normalmente utilizados na literatura especializada. Os resultados são considerados promissores e acredita-se que as metodologias propostas possam ser de grande valor nessa área de conhecimento.

Palavras-chave: Estabilidade de sistemas de potência, controle de sistemas de potência, otimização bioinspirada, controle descentralizado, controle hierárquico.

POWER SYSTEM CONTROLLERS DESIGN USING BIO-INSPIRED OPTIMIZATION

Wesley Peres

March 2016

Supervisor: Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc.
Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Department: Electrical Engineering.

Power system stabilizers have been used for decades in order to provide the necessary damping of power system oscillations through generators excitation control.

In this thesis, methodologies for stabilizers design (gain and phase compensation tuning) are presented. All stabilizers are simultaneously designed (coordinated design) taking into account a set of pre-specified operating conditions in order to ensure robustness. Two control structures are considered: decentralized (based on the use of local signals) and hierarchical (that uses remote signals).

The power system dynamic is modeled in state space and the tuning procedure is formulated as an optimization problem in order to maximize the damping coefficient associated to the dominant pole in closed-loop operation for all operating conditions.

The proposed methodologies are based on optimization algorithms bio-inspired in swarm behavior: Particle Swarm Optimization and Bat Algorithm. Hybrid methodologies are developed through coupling bio-inspired methods to the Steepest Descent method in order to enhance the local search procedure during the optimization process (only the stabilizers gain are adjusted in the local search). Multipopulational approaches are also developed in order to prevent the population diversity lost.

The proposed methodologies are validated by using small and medium-sized benchmark power systems. The results are considered to be promising and the proposed methodologies are found of a great value in this research field.

Keywords: Power System Stability, power system control, bio-inspired optimization, decentralized control, hierarchical control.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	4
1.3	OBJETIVOS E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	7
1.3.1	Objetivos	7
1.3.2	Principais Contribuições.....	7
1.4	PUBLICAÇÕES E SUBMISSÕES DECORRENTES DA PESQUISA	10
1.4.1	Trabalhos Publicados ou Submetidos para Periódicos decorrente da Pesquisa	11
1.4.2	Trabalhos Publicados ou Submetidos para Congressos decorrentes da Pesquisa	11
1.5	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	13
2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO BASEADAS NA DIREÇÃO DE BUSCA E METAHEURÍSTICAS	14
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
2.2	CONCEITOS PRELIMINARES	14
2.3	FORMULAÇÃO GERAL DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO CONTÍNUA....	15
2.4	REVISÃO GERAL DOS MÉTODOS PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVO	16
2.4.1	Classificação Geral.....	16
2.5	MÉTODOS DE DIREÇÃO DE BUSCA PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVOS	19
2.5.1	Filosofia dos Métodos de Direção de Busca	19
2.5.2	Métodos de Busca Direta	19
2.5.3	Métodos de Busca Baseados em Derivadas	20
2.5.4	Método do Gradiente Descendente	23
2.5.5	Tratamento de Restrições	28
2.6	MÉTODOS POPULACIONAIS BIOINSPIRADOS PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVOS	29
2.6.1	Métodos Populacionais Bioinspirados	29
2.6.2	Tratamento de restrições em Algoritmos Populacionais.....	33
2.6.3	Otimização baseada em Enxame de Partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i>).....	33

2.6.4	Otimização baseada na Eco-localização de Morcegos (<i>Bat Algorithm</i>)	40
2.7	DIVERSIFICAÇÃO E INTENSIFICAÇÃO EM ALGORITMOS POPULACIONAIS MONO-OBJETIVOS	46
2.7.1	Conceituação	46
2.7.2	Técnicas para a Manutenção da Diversidade da População	47
2.7.3	Métodos Cooperativos ou Colaborativos	49
2.8	THE NO FREE LUNCH THEOREM FOR OPTIMIZATION	51
2.9	MÉTODOS BIOINSPIRADOS HÍBRIDOS PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVOS	52
2.9.1	Classificação dos Algoritmos Híbridos	52
2.9.2	Visão Geral dos Algoritmos Híbridos	53
2.10	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO	56
3	CONTROLE PARA O AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES	57
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	57
3.2	ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES	57
3.2.1	Conceituação	57
3.2.2	Modelagem Dinâmica do Sistema Elétrico de Potência	57
3.2.3	Modos de Oscilação	59
3.2.4	Torques de Sincronismo e de Amortecimento	60
3.3	AMORTECIMENTO DOS MODOS DE OSCILAÇÃO	61
3.3.1	Modos de Oscilação Local	61
3.3.2	Modos de Oscilação Inter-área	62
3.4	REQUISITOS ASSOCIADOS AOS CONTROLADORES	64
3.4.1	Ganho Nulo em Regime Permanente	64
3.4.2	Realimentação Dinâmica de Saídas	64
3.4.3	Esforço do Controle	65
3.4.4	Redução de Ordem	66
3.5	ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	67
3.5.1	Conceituação e Estrutura Física	67
3.5.2	Tipos de Sinais Físicos	68
3.6	DISPOSITIVOS <i>FACTS</i>	69
3.7	REQUISITOS DE PROJETO	71

3.7.1	Coordenação.....	71
3.7.2	Robustez.....	71
3.8	MODELAGEM DO CONTROLE.....	73
3.9	ESTRUTURAS DE CONTROLE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	74
3.9.1	Controle Descentralizado.....	74
3.9.2	Controle Centralizado.....	74
3.9.3	Controle Quase-Descentralizado.....	75
3.9.4	Controle Hierárquico.....	75
3.9.5	Tempos de Atraso na Transmissão do Sinal.....	76
3.10	METODOLOGIAS DE PROJETO.....	78
3.10.1	Classificação Geral das Metodologias de Projeto.....	78
3.10.2	Metodologias Baseadas em Controle Clássico.....	79
3.10.3	Metodologias Baseadas no Resíduo da Função de Transferência.....	80
3.10.4	Metodologias Analíticas de Alocação de Pólos.....	81
3.10.5	Metodologias Baseadas em Controle Robusto: <i>LQR</i>	81
3.10.6	Metodologias Baseadas em Controle Robusto: <i>LMI</i> s e <i>BMI</i> s.....	82
3.10.7	Metodologias Baseadas em Otimização Paramétrica.....	86
3.10.8	Outras Metodologias.....	88
3.11	RESUMO DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	88
3.11.1	Agrupamento das Metodologias de Projeto Paramétricas.....	88
3.11.2	Metodologias de Projeto.....	89
3.11.3	Otimização Paramétrica usando Algoritmos Populacionais Híbridos.....	96
3.12	ÁREAS PROPÍCIAS PARA NOVAS INVESTIGAÇÕES.....	97
3.13	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO.....	98
4	METODOLOGIA PROPOSTA.....	99
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	99
4.2	MODELAGEM DO PROBLEMA.....	99
4.2.1	Estruturas de Controle.....	99
4.2.2	Sistema em Malha Aberta e Fechada.....	101
4.2.3	Estrutura dos Estabilizadores.....	102
4.2.4	Modelagem dos Tempos de Atraso.....	103
4.2.5	Coordenação e Robustez.....	103

4.2.6	Localização dos Controladores	104
4.3	FORMULAÇÃO COMO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	104
4.3.1	Formulação Geral	104
4.3.2	Projeto do Controle Hierárquico	106
4.4	SOLUÇÃO POR MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADOS	106
4.4.1	Estrutura dos Indivíduos.....	107
4.4.2	Função Aptidão	107
4.5	ILUSTRAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE AJUSTE.....	107
4.6	CONCEITUAÇÃO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS	109
4.6.1	Conceitual Geral.....	110
4.6.2	Algoritmos Meméticos baseados em uma Única População.....	110
4.6.3	Algoritmos baseados no Conceito de Multipopulação.....	113
4.6.4	Algoritmos Meméticos Multipopulacionais.....	114
4.7	ALGORITMOS DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS	115
4.7.1	Refinamento dos Ganhos usando o Método do Gradiente Descendente.....	115
4.7.2	Algoritmos Meméticos baseados em uma Única População.....	116
4.7.3	Algoritmos Multipopulacionais.....	119
4.7.4	Algoritmos Meméticos Multipopulacionais.....	121
4.8	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	123
4.8.1	Plataforma de Simulação.....	123
4.8.2	Implementação Computacional.....	124
4.9	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO	125
5	RESULTADOS.....	126
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	126
5.2	PARÂMETROS COMUNS DE SIMULAÇÃO	127
5.3	SISTEMA SUL-SUDESTE (CONTROLE DESCENTRALIZADO)	129
5.3.1	Descrição do Sistema	129
5.3.2	Desempenho em Malha Aberta	129
5.3.3	Definição de Parâmetros de Simulação.....	135
5.3.4	Resultados	136
5.3.5	Análise da Convergência.....	141
5.3.6	Parâmetros dos Controladores Projetados e Análise dos Cenários	147

5.3.7	Validação não linear dos Controladores Projetados.....	150
5.3.8	Comparação com a Literatura	152
5.3.9	Análise Preliminar de Resultados.....	153
5.4	SISTEMA NEW-ENGLAND	153
5.4.1	Descrição do Sistema	153
5.4.2	Desempenho em Malha Aberta	154
5.4.3	Definição de Parâmetros de Simulação.....	159
5.4.4	Resultados	160
5.4.5	Análise da Convergência.....	162
5.4.6	Parâmetros dos Controladores Projetados e Análise dos Cenários	164
5.4.7	Validação não linear dos Controladores Projetados.....	167
5.4.8	Comparação com a Literatura	172
5.4.9	Análise Preliminar de Resultados.....	172
5.5	SISTEMA DE 2 ÁREAS E 4 GERADORES	173
5.5.1	Descrição do Sistema	173
5.5.2	Definição dos Cenários de Operação	173
5.5.3	Desempenho em Malha Aberta	176
5.5.4	Definição de Parâmetros de Simulação.....	179
5.5.5	Resultados	181
5.5.6	Análise da Convergência.....	183
5.5.7	Parâmetros dos Controladores Projetados e Análise dos Cenários	185
5.5.8	Validação não linear dos Controladores Projetados.....	187
5.5.9	Comparação com a Literatura	191
5.5.10	Análise Preliminar de Resultados.....	191
5.6	SISTEMA SUL SUDESTE (CONTROLE CENTRALIZADO).....	192
5.6.1	Descrição do Caso	192
5.6.2	Ajuste do Controle Descentralizado.....	194
5.6.3	Projeto do Controle Centralizado	195
5.6.4	Projeto do Controle Centralizado: Tempo de Atraso de 400ms.....	196
5.6.5	Análise do Amortecimento para Diferentes Tempos de Atraso.....	209
5.6.6	Análise Preliminar de Resultados.....	210
5.7	ANÁLISE DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL	210
5.8	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO	214

6	CONCLUSÕES	215
6.1	CONCLUSÕES FINAIS	215
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	221
	REFERÊNCIAS	223
	APÊNDICE A – ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES E ANÁLISE MODAL.....	241
	APÊNDICE B – SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA (SMFS)	264
	APÊNDICE C – DADOS UTILIZADOS	266
	APÊNDICE D – EXEMPLO TUTORIAL.....	273

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura do algoritmo Cooperativo <i>PSO</i>	49
Figura 2.2 - Estrutura do algoritmo Cooperativo <i>Bat</i> : (a) Anel, (b) Mestre-Escravo.....	50
Figura 2.3 - Estrutura do algoritmo Cooperativo <i>Bat</i> : Anel-Mestre-Escravo.	51
Figura 3.1 - Estrutura do ESP convencional.....	68
Figura 3.2 - Ilustração das estruturas de controle. Adaptado de (DOTTA, 2009).	76
Figura 3.3 - Resposta ao degrau para as aproximações de Padé ($T = 1s$).	78
Figura 3.4 - Algoritmo híbrido proposto em (CASTOLDI, 2011).	96
Figura 4.1 - Estrutura de controle hierárquico (exemplo para dois geradores).	100
Figura 4.2 - Indivíduo representando o ajuste de dois estabilizadores.....	108
Figura 4.3 - Ilustração do cálculo do coeficiente de amortecimento mínimo para o ponto de operação 1:.....	109
Figura 4.4 - Ilustração do cálculo da função aptidão.....	109
Figura 4.5 - Estrutura do ajuste do controlador na etapa do Método do Gradiente do Método Híbrido.....	112
Figura 4.6 - Estrutura dos Métodos Populacionais.....	113
Figura 4.7 - Estrutura dos Métodos Populacionais Híbridos.....	114
Figura 4.11 - Plataforma computacional de simulação.	123
Figura 5.1 - Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	129
Figura 5.2 - <i>Mode shapes</i> de velocidade - Cenário 1.	131
Figura 5.3 - <i>Mode shapes</i> de velocidade - Cenário 2.	131
Figura 5.4 - <i>Mode shapes</i> de velocidade - Cenário 3.	132
Figura 5.5 - <i>Mode shapes</i> de velocidade - Cenário 4.	132
Figura 5.6 - <i>Mode shapes</i> de velocidade - Cenário 5.	132
Figura 5.7 - <i>Mode shapes</i> de velocidade - Cenário 6.	133
Figura 5.8 - Índices de controlabilidade de V_{ref} - Cenário 5.....	134
Figura 5.9 - Índices de observabilidade de ω - Cenário 5.....	134

Figura 5.10 - 1ª melhor solução (%) - Sistema Sul Sudeste.	137
Figura 5.11 - Convergência dos métodos.	142
Figura 5.12 - Convergência do método <i>PSO Multipopulacional</i> (sem e com gradiente).	143
Figura 5.13 - Convergência do método <i>BAT Multipopulacional</i> (sem e com gradiente).	144
Figura 5.14 - Identificação dos elementos associados ao evento.	150
Figura 5.15 - Ângulo do gerador de Itaipu- Cenário 5.	151
Figura 5.16 - Ângulo do gerador de Foz do Areia- Cenário 5.	152
Figura 5.17 - Sistema <i>New England</i>	154
Figura 5.18 - Mapa de Pólos para todos os Cenários em Malha Aberta.	155
Figura 5.19 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 10</i>) - Modos 1 e 2.	156
Figura 5.20 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 10</i>) - Modos 3 e 4.	157
Figura 5.21 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 10</i>) - Modos 5 e 6.	157
Figura 5.22 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 10</i>) - Modo 7.	158
Figura 5.23 - 1ª melhor solução (%) - Sistema <i>New-England</i>	161
Figura 5.24 - 3ª melhor solução (%) - Sistema <i>New-England</i>	161
Figura 5.25 - Porcentagem de variação do tempo computacional (%) - Sistema <i>New-England</i>	162
Figura 5.26 - Convergência dos métodos.	163
Figura 5.27 - Convergência do método <i>PSO Multipopulacional</i> (sem e com gradiente).	163
Figura 5.28 - Convergência do método <i>BAT Multipopulacional</i> (sem e com gradiente).	164
Figura 5.29 - Ângulo do gerador G31- Cenário 7.	168
Figura 5.30 - Ângulo do gerador G33- Cenário 7.	168
Figura 5.31 - Ângulo do gerador G37- Cenário 7.	169
Figura 5.32 - Esforço do controle no G31: $-0,05 \leq VESP \leq 0,10 pu$ - Cenário 7.	170
Figura 5.33 - Esforço do controle no G31: $-0,1 \leq VESP \leq 0,1 pu$ - Cenário 7.	171
Figura 5.34 - Ângulo do gerador G31: $-0,1 \leq VESP \leq 0,1 pu$ - Cenário 7.	171
Figura 5.35 - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	173

Figura 5.36 - Diferentes cenários de carga e geração: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	175
Figura 5.37 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 1 - Caso Base</i>).	177
Figura 5.38 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 2</i>).	177
Figura 5.39 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 3</i>).	178
Figura 5.40 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 4</i>).	178
Figura 5.41 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 5</i>).	178
Figura 5.42 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 6</i>).	179
Figura 5.43 - <i>Mode shapes</i> de velocidade (<i>cenário 13</i>).	179
Figura 5.44 - 1ª melhor solução (%) - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	182
Figura 5.45 - Porcentagem de variação do tempo computacional (%) - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	182
Figura 5.46 - Convergência dos métodos.	183
Figura 5.47 - Convergência do método <i>PSO</i> Multipopulacional (sem e com gradiente).	183
Figura 5.48 - Convergência do método <i>BAT</i> Multipopulacional (sem e com gradiente).	184
Figura 5.49 - Evolução do amortecimento após a etapa do gradiente: <i>PSO Comum + Grad.</i> - 1ª solução.	184
Figura 5.50 - Evolução do amortecimento após a etapa do gradiente: <i>PSO Comum + Grad.</i> - 2ª solução.	185
Figura 5.51 - (a) Potência elétrica terminal - G1 e G2. (b) <i>Mode shape</i> no 13º cenário.	188
Figura 5.52 - Potência elétrica terminal: (a) G3. (b) G4	188
Figura 5.53 - Potência elétrica terminal - G1 - 5º cenário.	189
Figura 5.54 - Potência elétrica terminal - G2 - 5º cenário.	189
Figura 5.55 - Potência elétrica terminal - G3 - 5º cenário.	189
Figura 5.56 - Potência elétrica terminal - G4 - 5º cenário.	190
Figura 5.57 - Potência elétrica terminal - 13º cenário.	190
Figura 5.58 - Sistema equivalente Sul-Sudeste - controle central com 16 estabilizadores ...	196
Figura 5.59 - Porcentagem de variação do tempo computacional (%) - Sistema Sul Sudeste - Centralizado.	198

Figura 5.60 - Convergência dos métodos.	199
Figura 5.61 - Convergência do método <i>PSO</i> Multipopulacional (sem e com gradiente).	199
Figura 5.62 - Convergência do método <i>BAT</i> Multipopulacional (sem e com gradiente).	200
Figura 5.63 - Ângulo do gerador de Itaipu- Cenário 5.	204
Figura 5.64 - Ângulo do gerador de Itaipu- Cenário 5.	205
Figura 5.65 - <i>Mode Shape</i> - modo crítico - controle centralizado sem as entradas $1e-3e$	207
Figura 5.66 - Variação de ξ_{min} com o tempo total de atraso (controlador projetado para 400ms).	208
Figura 5.67 - Variação de ξ_{min} com o tempo total de atraso (controlador projetado para 400ms).	208
Figura 5.68 - Variação do mínimo amortecimento com o tempo de atraso.	209
Figura 5.69 - Aumento do tempo computacional devido à hibridização: 1 população.	212
Figura 5.70 - Aumento do tempo computacional devido à hibridização: 2 subpopulações.	213

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Algoritmos híbridos das Classes 1 e 2.....	54
Tabela 2.2: Algoritmos híbridos da Classe 3.....	55
Tabela 3.1: Funções de Transferência - Aproximações de Padé.....	77
Tabela 3.2a: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.....	90
Tabela 5.1: Metodologias de projeto.....	127
Tabela 5.2: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados.....	128
Tabela 5.3: Cenários para o Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	130
Tabela 5.4: Característica dos Pontos de Operação do Sistema Equivalente Sul-Sudeste (Malha Aberta).....	130
Tabela 5.5: Parâmetros do sistema de controle usados para o Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	135
Tabela 5.6: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	136
Tabela 5.7: Mínimo amortecimento obtido: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	137
Tabela 5.8: Mínimo amortecimento obtido (<i>Bat Multipopulacional</i>): Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	140
Tabela 5.9: Mínimo amortecimento obtido (<i>Bat Multipopulacional com Gradiente</i>): Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	140
Tabela 5.10: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: <i>PSO + Gradiente</i>	145
Tabela 5.11: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: <i>BAT + Gradiente</i>	145
Tabela 5.12: Refinamento dos Ganhos: Ilustração nas Etapas Pré e Pós Gradiente.....	146
Tabela 5.13: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: <i>PSO Multipop. + Gradiente</i> - 1ª melhor solução.....	147
Tabela 5.14: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: <i>BAT Multipop. + Gradiente</i> - 1ª melhor solução.....	147
Tabela 5.15: Fator de amortecimento por cenário (%): Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	148
Tabela 5.16: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	149

Tabela 5.17: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste. . .	149
Tabela 5.18: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste. . .	149
Tabela 5.19: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste. . .	150
Tabela 5.20: Comparação com a Literatura: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.....	152
Tabela 5.21: Cenários pré-especificados de operação - Sistema <i>New-England</i>	155
Tabela 5.22: Modos de Oscilação Críticos no 10º Cenário- Sistema <i>New England</i>	156
Tabela 5.23: Parâmetros do sistema de controle usados para o Sistema <i>New-England</i>	159
Tabela 5.24: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados: Sistema <i>New-England</i>	159
Tabela 5.25: Mínimo amortecimento obtido: Sistema <i>New-England</i>	160
Tabela 5.26: Fator de amortecimento (%) e cenário associado: Sistema <i>New-England</i>	165
Tabela 5.27: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema <i>New-England</i>	165
Tabela 5.28: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema <i>New-England</i>	166
Tabela 5.29: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema <i>New-England</i>	166
Tabela 5.30: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema <i>New-England</i>	167
Tabela 5.31: Comparação com a Literatura: Sistema <i>New-England</i>	172
Tabela 5.32: Variações de carga e de geração : Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	174
Tabela 5.33: Variações de topologia : Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	175
Tabela 5.34: Cenários - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	176
Tabela 5.35: Parâmetros do sistema de controle usados para o Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	180
Tabela 5.36: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.....	180
Tabela 5.37: Mínimo amortecimento obtido: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.....	181
Tabela 5.38: Fator de amortecimento (%) e cenário associado: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	185
Tabela 5.39: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.....	186
Tabela 5.40: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.....	186
Tabela 5.41: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.....	186
Tabela 5.42: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.....	187

Tabela 5.43: Perturbações aplicadas.....	187
Tabela 5.44: Comparação com a Literatura: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.	191
Tabela 5.45: Projeto do controle descentralizado.....	194
Tabela 5.46: Modo de oscilação dominante - Controle Descentralizado.	195
Tabela 5.47: Parâmetros do sistema de controle usados para o controlador central.	195
Tabela 5.48: Mínimo amortecimento obtido: Sistema Equivalente Sul-Sudeste (Central)....	197
Tabela 5.49: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: <i>PSO + Gradiente</i>	200
Tabela 5.50: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: <i>PSO Multipop. + Gradiente</i> - 1ª melhor solução.	201
Tabela 5.51: Modo de oscilação dominante - Controle Centralizado.	201
Tabela 5.52: Comparação dos fatores de amortecimento mínimo.	202
Tabela 5.53: Controle Hierárquico - Comparação com a Literatura.	202
Tabela 5.54: Sistema Sul-Sudeste - controle centralizado - melhor solução.....	203
Tabela 5.55: Análise de robustez quanto a perda de canais de comunicação.	206
Tabela 5.56: Total de estados em malha aberta e fechada.....	211
Tabela 5.57: Número aproximado de execuções da rotina de cálculo de autovalores.	211
Tabela 5.58: Tempo computacional.	212

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 2.1- Método do Gradiente Descendente.....	24
Algoritmo 2.2 - Cálculo do Gradiente.	25
Algoritmo 2.3 - Seção Áurea.	27
Algoritmo 2.4 - Método <i>PSO</i>	39
Algoritmo 2.5 - <i>Bat Algorithm</i>	45
Algoritmo 4-1- <i>PSO</i> com etapa baseada no Método do Gradiente.....	117
Algoritmo 4-2- <i>Bat</i> com etapa baseada no Método do Gradiente.	118
Algoritmo 4-3- <i>PSO</i> Multipopulacional.	119
Algoritmo 4-4- <i>Bat</i> Multipopulacional.	120
Algoritmo 4-5- <i>PSO</i> Multipopulacional com Gradiente.	121
Algoritmo 4-6- <i>Bat</i> Multipopulacional com Gradiente.	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmos Genéticos
BFGS	<i>Broyden Fletcher Goldfarb Shanno</i>
BMI	<i>Bilinear Matrix Inequalities</i>
ESP	Estabilizador de Sistema de Potência
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
LMI	<i>Linear Matrix Inequalities</i>
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Units</i>
POD	<i>Power Oscillation Damper</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSS	<i>Power System Stabilizer</i>
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SMFS	Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada
UMFS	Unidades de Medição Fasorial Sincronizada

1 Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são caracterizados por serem uns dos mais complexos sistemas em operação no mundo. Abrangendo áreas geograficamente extensas e sujeitos aos mais diversos eventos da natureza que podem impactar em seu funcionamento, os SEP devem atender aos consumidores de energia elétrica com o maior padrão de qualidade e confiabilidade possível (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010). Nesse contexto, a manutenção da estabilidade dos SEP é um dos requisitos fundamentais para garantir a sua confiabilidade e qualidade no suprimento de energia.

O estudo da estabilidade dos SEP pode ser realizado de acordo com o fenômeno que está sendo estudado, destacando-se: (i) a *estabilidade a grandes perturbações*, associada a grandes excursões do ângulo do rotor (como por exemplo após um curto circuito trifásico), cujo estudo requer o uso de ferramentas de simulação no domínio do tempo e (ii) a *estabilidade a pequenas perturbações*, associada a pequenos desvios das variáveis em relação à condição inicial (devido a pequenas variações de carga e geração), cujo estudo pode ser conduzido utilizando-se as técnicas de análise modal para o sistema representado por equações linearizadas (KUNDUR, 1994; MONDAL, CHAKRABARTI e SENGUPTA, 2014).

Na ocorrência de variações de carga ou mudanças de topologia, têm-se desequilíbrios entre os torques elétricos e mecânicos das unidades geradoras, originando as oscilações eletromecânicas de baixa frequência associadas aos rotores das máquinas síncronas. As oscilações eletromecânicas não amortecidas comprometem a estabilidade do sistema e limitam a quantidade de potência transferida entre áreas (KUNDUR, 1994), podendo levar o sistema a um blecaute total ou parcial com grande prejuízo para a sociedade.

O estudo das oscilações eletromecânicas é realizado no âmbito da estabilidade às pequenas perturbações e consiste em determinar se o sistema é estável ou instável para uma dada configuração, quais os geradores que estão associados à um determinado modo de

oscilação e quais as medidas a serem tomadas para amortecê-lo. Nesse caso, o sistema é modelado em espaço de estados.

Com o objetivo de adicionar amortecimento às oscilações do rotor, pode-se empregar os controladores de amortecimento, os quais podem ser divididos em duas classes: (i) os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) instalados nos geradores e (ii) os estabilizadores *Power Oscillation Damper* instalados nos dispositivos *Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS-POD)*.

Os estabilizadores são controladores instalados nos geradores para modular a tensão de excitação das máquinas e são basicamente uma estrutura de compensação de fase e ganho (DEMELLO e CONCORDIA, 1969). Uma vez que existem vários controladores em um SEP, deve-se proceder com o ajuste dos parâmetros de forma a otimizar o amortecimento das oscilações. O primeiro requisito é que os controladores não podem interagir de forma a deteriorar o desempenho dinâmico do sistema (nesse caso, o ajuste simultâneo ou coordenado dos controladores é indicado). O segundo requisito é que o ajuste realizado deve ser robusto, isto é, eficaz diante das incertezas associadas à modelagem do sistema (devido às variações de carga e topologia).

Os controladores podem ser ajustados através de técnicas de controle clássico, de controle robusto (ou moderno) e métodos de otimização paramétrica. No caso dos métodos de otimização paramétrica, busca-se otimizar um índice explícito que quantifique o desempenho do sistema em malha fechada, isto é, com os controladores inclusos. Um dos índices que pode ser maximizado é o menor coeficiente de amortecimento associado aos autovalores da matriz de estados em malha fechada (MARTINS, TARANTO e HAUER, 2000).

Ressalta-se que o projeto dos controladores de amortecimento de SEP é uma tarefa complexa que consome elevado esforço por parte do projetista. A primeira justificativa para essa afirmação está associada ao grande número de controladores que devem ser ajustados. A segunda justificativa é que o requisito de robustez é satisfeito, na maioria dos casos, através da consideração de múltiplos pontos de operação (obtidos a partir de variações de carga, geração e topologia), o que exige que o ajuste seja testado em todos estes pontos. Nesse contexto, a aplicação de métodos de otimização paramétrica é vantajosa devido aos seguintes fatores: (i) o ajuste coordenado e robusto é realizado de forma automática com a mínima

interferência do projetista e (ii) existem diversos métodos de otimização que podem ser utilizados.

Uma vez definido o índice explícito a ser otimizado, deve-se escolher qual o método de otimização a ser usado. Podem ser utilizados métodos baseados em direção de busca (com ou sem derivadas) ou metaheurísticas. No caso das metaheurísticas podem ser utilizados métodos baseados em uma única solução (métodos de trajetória) ou aqueles que utilizam um conjunto de soluções (métodos populacionais bioinspirados) (BLUM e ROLI, 2003).

O princípio fundamental dos métodos populacionais bioinspirados consiste em, partindo de uma população inicial, aplicar técnicas de busca com o objetivo de melhorar a solução considerando que os indivíduos são evoluídos de acordo com regras específicas que fazem o intercâmbio de informações entre os mesmos (SERAPIÃO, 2009).

Os métodos de otimização populacionais bioinspirados têm sido utilizados com sucesso em vários campos da engenharia (YANG, 2010a), tendo sido observada a proposição de diversos algoritmos nos últimos anos. Para o projeto de controladores de amortecimento de SEP, diversas aplicações de métodos populacionais bioinspirados têm sido realizadas (DILL e SILVA, 2012). As aplicações são apresentadas tanto para a otimização mono-objetivo quanto a multi-objetivo. Uma vantagem desses métodos é que, após sua execução, estes apresentam um conjunto de soluções entre as quais o projetista poderá escolher a mais adequada.

Embora tenham sido propostos diversos métodos populacionais bioinspirados, deve-se ressaltar que tais métodos não garantem a otimalidade da solução, mas sim a viabilidade. Adicionalmente, sabe-se que o sucesso desses métodos está associado ao correto balanceamento entre as etapas de diversificação (busca global) e intensificação (busca local).

Um problema associado aos métodos populacionais é a perda da diversidade da população, isto é, os indivíduos podem se deslocar prematuramente para pontos de solução de má-qualidade. Com isso, o processo de diversificação é deteriorado. Para contornar esse problema, técnicas de *niching* e algoritmos cooperativos têm sido empregados (DE JONG, 1975; GOLDBERG e RICHARDSON, 1987; RAIDL, 2006).

Uma vez que a busca global tenha posicionado os indivíduos em regiões de boas soluções, o processo de intensificação deve ser realizado para efetuar a busca local. O problema é que, na maioria dos métodos populacionais, essa busca é realizada somando-se

escalares randômicos de pequena magnitude à melhor solução corrente. Devido à essa estocasticidade, pode-se empregar bastante esforço computacional sem que a região seja satisfatoriamente explorada em nível local.

Ressalta-se ainda que, conforme o trabalho (WOLPERT e MACREADY, 1997), sob certas condições, nenhum algoritmo é melhor do que o outro. Dessa forma, em média, todos os algoritmos apresentam o mesmo desempenho de acordo com o "*The No Free Lunch Theorem for Optimization*" (WOLPERT e MACREADY, 1997). Com base nessa informação, torna-se necessário o desenvolvimento de algoritmos específicos para a solução do problema que se deseja resolver.

1.2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Com base no que foi anteriormente mencionado, observa-se que existem diversas metodologias para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência. Tais metodologias são baseadas na: (i) teoria de controle clássico, (ii) teoria de controle robusto e (iii) aplicação de métodos de otimização.

A primeira classe de métodos é baseada na teoria de controle clássico (tal como o método do Lugar das Raízes e técnicas de resposta em frequência) e consiste no projeto sequencial dos controladores (um a um). Embora seja uma técnica bem fundamentada na área de engenharia, essa técnica exige que o projetista tenha um sólido conhecimento na área de teoria de controle. Adicionalmente, uma vez que é projetado um controlador por vez, interações indesejadas podem ocorrer entre os controladores (MARTINS, TARANTO e HAUER, 2000). Além disso, esse processo não garante a robustez dos controladores, pois o procedimento de ajuste é realizado para um único ponto de operação.

A segunda classe é baseada na teoria de controle robusto (ou moderno), destacando-se os métodos baseados em *LMI* (*Linear Matrix Inequalities*), *BMI* (*Bilinear Matrix Inequalities*) e *LQR* (*Linear Quadratic Regulator*). Tais métodos compartilham a necessidade da redução de ordem do sistema para garantir controladores de ordem reduzida (no caso das *LMI* e *BMI*) ou para facilitar a definição de matrizes de ponderação (no caso do *LQR*) (RAMOS, ALBERTO e BRETAS, 2004; DOTTA, SILVA e DECKER, 2009). Adicionalmente, os métodos resolvidos por *LMI* exigem que o problema de otimização formulado seja convexo.

Os problemas de não-convexidade podem ser tratados através da técnica de substituições de variáveis, o que pode causar problemas numéricos (DILL e SILVA, 2012). O projeto de controladores robustos pode ser alternativamente realizado por meio de *BMI*, que não requer que o problema de otimização seja convexo, porém é de grande complexidade (VANANTWERP e BRAATZ, 2000).

Por fim, a terceira classe faz uso de métodos de otimização paramétricos, onde é otimizado um índice explícito que quantifica o desempenho do sistema em malha fechada. Essas técnicas são mais atrativas por permitirem o projeto de controladores robustos em uma formulação não necessariamente convexa e não necessitarem que o sistema tenha sua ordem reduzida (evitando a perda de informações que podem ser importantes).

A primeira subclasse dos métodos de otimização paramétricos é baseada nos métodos de direção de busca que utilizam ou não as derivadas da função objetivo (DOTTA, 2009; DILL, 2013). Como exemplo cita-se os métodos *Hooke-Jeeves* (sem derivadas) e o Método do Gradiente Descendente (com derivadas). Tais métodos compartilham o problema da sensibilidade às condições iniciais utilizadas.

A segunda subclasse é baseada nos métodos populacionais bioinspirados. Um dos métodos mais explorados é o Algoritmo Genético (AG) (DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000). Também populares na literatura, os métodos baseados na experiência de enxames tendem a ser mais rápidos que os AG por realizarem operações mais simples para a evolução da população. Ao não descartarem parte da população tal como feito nos AG e ao utilizarem a memória das melhores posições individual e social, tais métodos possuem menor tendência de estagnação em soluções de má qualidade (NIU, ZHU e HE, 2007).

Na presente tese serão usados dois métodos baseados na experiência de enxames para o projeto de controladores. O primeiro deles, proposto em 1995 por (KENNEDY e EBERHART, 1995) é a Otimização baseada no Enxame de Partículas (do inglês *Particle Swarm Optimization*). O segundo deles é a Otimização baseada na Eco-localização de Morcegos (*Bat Algorithm*) proposto recentemente em (YANG, 2010b). A diferença entre o *PSO* e o *Bat Algorithm* está no fato que no último, os indivíduos possuem maior grau de liberdade para movimentação no espaço de busca e existe uma etapa de intensificação (estocástica) ao redor da melhor solução. Em termos da dificuldade da implementação computacional, os métodos *PSO* e *Bat Algorithm* exigem menor esforço que os AGs.

Embora tenham sido relatados na literatura como mais eficientes que os AGs, o *PSO* e o *Bat Algorithm* também podem sofrer de convergência prematura devido a perda da diversidade da população (embora a probabilidade seja menor que nos AGs). Nesse sentido, foram propostos algoritmos cooperativos que consistem na divisão da população em subpopulações e na troca de informações entre elas, tanto para o *PSO* (NIU, ZHU e HE, 2007) quanto para o *Bat Algorithm* (JADDI, ABDULLAH e HAMDAN, 2015).

Apesar dos avanços no desenvolvimento de algoritmos populacionais bioinspirados, diversos pesquisadores têm realizado esforços na tentativa de melhorar o desempenho desses métodos. Uma área que tem atraído a atenção da comunidade de pesquisa é baseada na hibridização dos algoritmos populacionais com outros algoritmos de otimização (BLUM e PUCHINGER, 2011). Um caso específico são os Algoritmos Meméticos que são métodos populacionais que utilizam algoritmos específicos de otimização para executarem uma busca local (CAPONIO, CASCELLA e NERI, 2007; NERI e COTTA, 2012).

Especificamente a hibridização dos métodos populacionais com os métodos baseados na direção de busca com derivadas têm atraído a atenção da comunidade de pesquisa (BOSMAN, 2012). Tais algoritmos visam aproveitar as vantagens e superar as desvantagens de cada método: (i) os algoritmos populacionais bioinspirados possuem a vantagem de fornecerem soluções de boa qualidade através de uma busca global, porém possuem a convergência mais lenta e (ii) os algoritmos baseados nas derivadas da função objetivo possuem a vantagem de convergirem para ótimos locais com rapidez e a desvantagem de serem sensíveis às condições iniciais e não fazerem uma busca global.

Como anteriormente mencionado, com o trabalho (WOLPERT e MACREADY, 1997), intitulado "*The No Free Lunch Theorem for Optimization*", constatou-se a necessidade do desenvolvimento de algoritmos específicos para a solução do problema que se deseja resolver.

Nesse sentido, o desenvolvimento de algoritmos específicos para a solução do problema de ajuste de estabilizadores de sistemas de potência é a motivação para a presente tese de doutorado. Sendo assim, foram desenvolvidos algoritmos híbridos (métodos populacionais com algoritmos baseados na direção de busca com derivadas) e multipopulacionais (que dividem a população em subpopulações para manutenção da diversidade da população).

1.3 OBJETIVOS E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

1.3.1 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento de algoritmos específicos para o projeto coordenado (simultâneo) e robusto dos estabilizadores de sistemas de potência. Para cada estabilizador deve-se ajustar o valor do ganho e os parâmetros dos blocos de compensação de fase. O procedimento de ajuste é formulado como um problema de otimização visando à otimização (maximização) do fator de amortecimento do sistema em malha fechada.

Os objetivos específicos são:

- i. aplicar os métodos populacionais *PSO* e *Bat Algorithm* para o projeto de estabilizadores;
- ii. hibridizar cada um dos métodos populacionais do item (i) com o método do Gradiente Descendente, dando origem a dois Algoritmos Meméticos específicos para o projeto de estabilizadores;
- iii. dividir a população dos métodos *PSO* e *Bat Algorithm* do item (i) dando origem a dois Algoritmos Multipopulacionais para o projeto de estabilizadores;
- iv. hibridizar cada um dos algoritmos multipopulacionais do item (iii) com o método do Gradiente Descendente dando origem a dois Algoritmos Meméticos Multipopulacionais específicos para o projeto de estabilizadores.

1.3.2 Principais Contribuições

As principais contribuições da presente tese são listadas a seguir.

1. *Projeto Coordenado de Controladores Robustos*

O procedimento de ajuste de estabilizadores é realizado de forma coordenada (ajuste simultâneo de todos os controladores). O requisito de robustez é

satisfeito através da consideração de múltiplos cenários de operação na fase de projeto. O procedimento de ajuste é formulado como um problema de otimização com o objetivo de maximizar os coeficientes de amortecimento em malha fechada.

2. *Estruturas de Controle Descentralizada e Hierárquica*

As metodologias de projeto desenvolvidas são bastantes flexíveis e são utilizadas para o projeto de controle descentralizado (baseado no uso de sinais locais) e de controle hierárquico (baseado no uso de sinais remotos em uma malha adicional de controle).

3. *Aplicação de Metodologias Bioinspiradas no Projeto de Estabilizadores*

A presente tese inicialmente aplica dois algoritmos bioinspirados na inteligência de enxames para o projeto de controladores: o método *PSO* e *Bat Algorithm*.

Ressalta-se que um dos primeiros trabalhos na área de projeto coordenado de estabilizadores usando o *Bat Algorithm* foi publicado pelo autor dessa tese (PERES, PASSOS FILHO e DA SILVA JUNIOR, 2015). Em (SAMBARIYA e PRASAD, 2014), o *Bat Algorithm* é aplicado ao projeto de um único estabilizador de sistema de potência (Sistema Máquina Barra Infinita), não sendo tratados requisitos de coordenação (projeto simultâneo de vários controladores).

O objetivo do projeto é ajustar os valores do ganho e de dois parâmetros do bloco de compensação de fase para cada estabilizador (são considerados três parâmetros por estabilizador).

Cada indivíduo dos métodos populacionais está associado a uma solução do problema, onde cada um representa um ajuste para todos os estabilizadores. A função aptidão de cada indivíduo é dada pelo mínimo amortecimento obtido em todos os cenários em malha fechada (com os estabilizadores ajustados inclusos).

4. *Hibridização de Algoritmos Populacionais com o Método do Gradiente Descendente*

O presente trabalho desenvolve dois Algoritmos Meméticos através da hibridização dos métodos populacionais *PSO* e *Bat Algorithm* com o Método do Gradiente Descendente.

Os indivíduos dos métodos populacionais estão associados aos parâmetros de ganho e de fase de cada estabilizador. Os algoritmos híbridos propostos consistem em incluir nos métodos populacionais de otimização uma etapa adicional baseada no método do gradiente descendente. Nessa etapa, somente os ganhos são otimizados, considerando fixos os parâmetros da compensação de fase associados à melhor solução corrente dos métodos populacionais. A aplicação do método do gradiente ocorre a cada *nlocal* gerações (intervalo empiricamente adotado).

Com isso, pretende-se fazer uma busca local direcionada pelo vetor gradiente da função objetivo a partir da melhor solução corrente fornecida pelos métodos populacionais. Desenvolveu-se portanto, Algoritmos Meméticos específicos para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência.

5. *Aplicação de Métodos Multipopulacionais e Hibridização com o Método do Gradiente Descendente*

Com o objetivo de manter a diversidade da população nos métodos *PSO* e *Bat Algorithm*, inicialmente a população desses métodos foi dividida em duas. Um procedimento mais simples foi empregado nessa tese, onde as subpopulações não interagem ao longo das gerações. Desenvolveu-se, portanto, algoritmos multipopulacionais baseados nos métodos *PSO* e *Bat Algorithm*. O termo multipopulacional foi usado porque as subpopulações não cooperam entre si. Tais algoritmos foram aplicados ao projeto de estabilizadores.

Em seguida, os métodos multipopulacionais baseados no *PSO* e no *Bat Algorithm* foram hibridizados com o Método do Gradiente Descendente da mesma forma que os métodos que utilizam uma única população. Nesse caso o método do gradiente foi aplicado duas vezes a cada *nlocal* gerações: uma vez

para cada subpopulação. Logo foram desenvolvidos Algoritmos Meméticos Multipopulacionais para o projeto de estabilizadores.

6. *Estudo da Convergência dos Algoritmos*

Em todos os trabalhos revisados, associados ao projeto de estabilizadores usando algoritmos populacionais bioinspirados, foi observado que a característica de convergência dos algoritmos foi pouco explorada. Em geral, é apresentada uma única solução, o que não permite avaliar a capacidade dos métodos em alcançar soluções de boa qualidade em um conjunto de simulações.

Os métodos desenvolvidos são comparados através de um estudo criterioso, onde: (i) todos os algoritmos partem de uma mesma população inicial e (ii) são executadas três simulações para cada algoritmo. A comparação está baseada na qualidade da solução e tempo computacional.

O desenvolvimento do presente trabalho é baseado em três programas computacionais principais: inicialmente a modelagem dinâmica do sistema de potência em espaço de estados é realizada através do programa PacDyn, dedicado à análise de estabilidade a pequenas perturbações (CEPEL, 2009b). Em seguida, as matrizes da formulação em espaço de estados são exportadas para a plataforma MATLAB[®], onde são implementadas as metodologias propostas para o ajuste de controladores. Por fim, os controladores projetados são validados através de simulações no domínio do tempo através do programa Anatem (CEPEL, 2010).

1.4 PUBLICAÇÕES E SUBMISSÕES DECORRENTES DA PESQUISA

No decorrer da pesquisa, os seguintes artigos foram publicados, aceitos ou submetidos para publicação:

1.4.1 Trabalhos Publicados ou Submetidos para Periódicos decorrente da Pesquisa

1. *"Coordinated Tuning of Power System Stabilizers Using Bio-Inspired Algorithms"*, PERES, W., PASSOS FILHO, J. A. e SILVA JUNIOR, I. C., *International Journal of Electrical Power and Energy Systems (IJEPES)*, vol. 64, pp.419-428, 2015.
DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.07.040.
2. *"A Memetic Algorithm for Power System Damping Controllers Design"*, PERES, W., SILVA, V. V. R., SILVA JUNIOR, I. C., PASSOS FILHO, J. A. e COELHO, F. C. R., **submetido à Edição Especial do *International Journal of Bio-Inspired Computation: Swarm Intelligence - Theory & Applications*. ISSN: 1758-0374.**
Artigo selecionado dos congressos CBIC e LACCI realizados em outubro de 2015 em Curitiba, Brasil.

1.4.2 Trabalhos Publicados ou Submetidos para Congressos decorrentes da Pesquisa

1. *"Algoritmo Híbrido para o Projeto de Controladores de Sistemas de Potência"*, PERES, W., SILVA, V. V. R. e COELHO, F. C. R., **XII Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional (CBIC), Outubro de 2015, Curitiba, Brasil.**
Artigo premiado com a distinção de terceira colocação geral no congresso.
2. *"Bat Algorithm hibridizado com o Método de Hooke Jeeves para o Projeto Robusto e Coordenado de Estabilizadores de Sistemas de Potência "*, PERES, W., SILVA JUNIOR, I. C., PASSOS FILHO, J. A. e SILVA, V. V. R., **aceito para apresentação no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) 2016 a ser realizado no mês de maio em Natal, Brasil.**

3. *"Power System Stabilizers Tuning using Bio-Inspired Algorithm"*, PERES, W., PASSOS FILHO, J. A., ARCANJO, D. N. e SILVA JUNIOR, I. C., ***Powertech Conference 2013***, Junho de 2013, Grenoble, France.
DOI: 10.1109/PTC.2013.6652355.
4. *"Ajuste Simultâneo de Estabilizadores de Sistemas de Potência utilizando Algoritmos Evolutivos "*, PERES, W., PASSOS FILHO, J. A. e SILVA JUNIOR, I. C., ***XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA)***, Setembro de 2012, Campina Grande, Brasil.

Adicionalmente o aluno pode realizar as seguintes publicações não relacionadas ao tema dessa tese:

1. *"Distribution System State Estimation: PMU Allocation and System Modelling"*, PEREIRA, J. L. R., ALVES, G. O., GARCIA, P. A. N., CARNEIRO JUNIOR, S., OLIVEIRA, E. J. e PERES, W., **submetido à *IEEE Transactions on Smart Grids***, Junho de 2015.
2. *"Branch Current Based State Estimation: Equality-Constrained WLS and Augmented Matrix Approaches"*, PERES, W., OLIVEIRA, E. J., PASSOS FILHO, J. A. e PEREIRA, J. L. R., ***XX Congresso Brasileiro de Automática (CBA)***, Setembro de 2014, Belo Horizonte, Brasil.
3. *"Distribution System State Estimation: Numerical Issues"*, PEREIRA, J. L. R., PERES, W., OLIVEIRA, E. J. e PASSOS FILHO, J. A., **painel apresentado no *IEEE PES T&D Conference and Exposition***, Abril de 2014, Chicago, Estados Unidos.
4. *"Cuckoo Search Optimization technique applied to capacitor placement on distribution system problem"*, ARCANJO, D. N., PEREIRA, J. L. R., PERES, W., DE OLIVEIRA, L. W. e SILVA JUNIOR, I. C., ***10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2012***, Novembro de 2012, Fortaleza, Brasil.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento é composto por cinco capítulos e três apêndices além desse capítulo introdutório:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão objetiva das técnicas de otimização baseadas em direção de busca e das técnicas metaheurísticas.

O capítulo 3 apresenta uma revisão do problema do projeto de controladores de sistemas de potência para o amortecimento de oscilações.

O capítulo 4 é dedicado à apresentação das metodologias propostas para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência.

Os resultados obtidos com as metodologias propostas são apresentados no Capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões do trabalho bem como as propostas de desenvolvimentos futuros.

O Apêndice A apresenta uma revisão detalhada dos conceitos de Estabilidade à Pequenas Perturbações, o qual é o foco do presente trabalho.

O Apêndice B apresenta uma revisão dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada que fornecem os sinais remotos utilizados em algumas estruturas de controle.

O Apêndice C apresenta os dados de alguns sistemas utilizados no Capítulo 5.

Por fim no Apêndice D é apresentado um estudo de caso tutorial com o objetivo de ilustrar a avaliação de soluções nos métodos bioinspirados.

2 Técnicas de Otimização baseadas na Direção de Busca e Metaheurísticas

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta uma revisão geral sobre os métodos de otimização contínua mono-objetivo. São revisados os métodos de otimização baseados na direção de busca, bem como os métodos denominados de Metaheurísticas. Atenção especial é devotada aos métodos bioinspirados híbridos, que acoplam diferentes técnicas de otimização para melhorar seus desempenhos. No próximo capítulo será apresentada uma revisão detalhada da aplicação dos métodos aqui descritos no problema de projeto de controladores de amortecimento.

2.2 CONCEITOS PRELIMINARES

Nessa parte são apresentados alguns conceitos necessários à avaliação dos métodos de otimização. Uma definição matemática rigorosa pode ser obtida em (TAKAHASHI, 2007).

Para o estudo dos métodos de otimização, torna-se necessário o conhecimento prévio a respeito das características das funções objetivo: (i) convexidade e (ii) suavidade. Esses conceitos são apresentados a seguir (TAKAHASHI, 2007):

- i. *Suavidade*: uma função $f(x)$ é suave sempre que suas derivadas de qualquer ordem são definidas e contínuas;
- ii. *Conjunto convexo*: um subconjunto $S \in \mathbb{R}^n$ é convexo se e somente se $\forall x, y \in S, \alpha \in [0,1]$, se verifica que $\alpha \cdot x + (1 - \alpha) \cdot y \in S$;
- iii. *Convexidade*: uma função $f(x)$ é convexa em S se e somente se, para $\forall x, y \in S$, se verifica que $f(\alpha \cdot x + (1 - \alpha) \cdot y) \leq \alpha \cdot f(x) + (1 - \alpha) \cdot f(y)$.

Além disso, definições de mínimo local e global também são necessárias: (i) um dado ponto de mínimo caracteriza-se como o mínimo global de uma função em um determinado

domínio caso não exista nenhum outro ponto no domínio que tenha um valor menor que ele. Caso contrário, (ii) o ponto será um mínimo local.

Define-se a bacia de atração ao redor de um mínimo local, a maior região tal que a função se caracterize como unimodal (função com um único mínimo).

Os métodos de otimização podem ser avaliados de acordo com o seu comportamento diante problemas de não-diferenciabilidade e não-convexidade. Nesse caso, tais conceitos são apresentados a seguir (TAKAHASHI, 2007):

- a) **Não-Diferenciabilidade:** uma função não diferenciável (não-suave) pode causar problemas para a execução dos métodos de direção de busca. Uma dificuldade está associada à determinação da direção de busca, que fica inviabilizada com a não-diferenciabilidade em determinado ponto. Entretanto, esta dificuldade pode ser contornada com a simples substituição do ponto de singularidade por outro ponto não singular arbitrariamente próximo.
- b) **Não-Convexidade:** de acordo com a teoria de otimização multidimensional, a *condição necessária* de otimalidade é que o vetor gradiente da função objetivo no ponto sob análise seja nulo. A *condição suficiente* requer que o vetor gradiente da função objetivo seja nulo e que a matriz Hessiana seja positiva definida (todos os autovalores devem ser positivos). Para funções não convexas, podem existir pontos que garantem a nulidade do vetor gradiente (condição necessária), mas não satisfazem à segunda condição (matriz Hessiana definida positiva)¹. Com isso, problemas numéricos podem ocorrer no momento de inversão da matriz Hessiana.

2.3 FORMULAÇÃO GERAL DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO CONTÍNUA

Seja $x \in \mathbb{R}^n$ o vetor de parâmetros que devem ser escolhidos em um determinado problema e $f(\cdot): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ uma função que avalia a adequação de cada vetor x

¹ Pontos de inflexão (pontos nas quais as funções mudam de convexa para côncava ou vice-versa), possuem a derivada segunda nula. Nesses pontos a matriz Hessiana não é inversível.

(TAKAHASHI, 2007). O problema de otimização restrita pode ser formulado conforme apresentado nas equações (2.1) e (2.2).

$$x^* = \arg \min_x f(x) \quad (2.1)$$

$$\text{sujeito a: } \begin{cases} g_1(x) \leq 0 \\ \vdots \\ g_r(x) \leq 0 \\ h_1(x) = 0 \\ \vdots \\ h_p(x) = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

A equação (2.1) denota que objetiva-se determinar o valor de x que minimiza a função $f(x)$. As r restrições de desigualdade ($g_j(x) \leq 0$) e as p restrições de igualdade ($h_p(x)$) são apresentadas na equação (2.2).

2.4 REVISÃO GERAL DOS MÉTODOS PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVO

2.4.1 Classificação Geral

De forma geral, é possível classificar os métodos de otimização mono-objetivos em duas categorias principais²:

1. **Métodos de Direção de Busca:** são a base de vários pacotes comerciais de otimização. Tais métodos foram desenvolvidos a partir da idéia básica de "fazer o algoritmo evoluir encontrando novos pontos situados em direções para as quais a função decresça, em relação ao ponto corrente". Tais métodos podem ser subdivididos em:

² Referências sobre outras classes de métodos mais específicos podem ser obtidas em (TAKAHASHI, 2007).

- i. *Métodos Baseados em Derivadas (Métodos de Descida)*: utilizam os valores das derivadas da função objetivo de primeira e/ou segunda ordem para direcionar a busca. Como exemplo pode-se citar: Método do Gradiente (LUENBERGER, 2003) e Método Quasi-Newton (LEWIS e OVERTON, 2012);
- ii. *Métodos de Busca Direta*: são aqueles que não utilizam o valor de derivadas para direcionar a busca pela solução ótima. Tais métodos utilizam somente o valor da função objetivo. Como exemplo cita-se: Método de Hooke-Jeeves (HOOKE e JEEVES, 1961), Método de Nelder-Mead (NELDER e MEAD, 1965) e Método de Busca Multi-direcional (TORCZON, 1989).

2. ***Metaheurísticas***: esses métodos podem ser definidos "*como um processo iterativo que combina heurísticas com conceitos de inteligência para realizar a exploração e intensificação no espaço de busca, visando a obtenção de soluções de boa qualidade*"³. Conforme (BLUM e ROLI, 2003), pode-se subdividir essa classe de métodos como (i) bioinspirados ou não bioinspirados e (ii) métodos que utilizam uma única solução (métodos de trajetória) e métodos baseados em população. Com base nessa última classificação, divide-se a classe de metaheurísticas em:

- i. *Métodos de Trajetória* (BLUM e ROLI, 2003): são metaheurísticas que utilizam um único ponto (solução) para o processo de busca pelo ótimo. Como exemplo têm-se as técnicas: Busca Tabu (GLOVER, 1986), Recozimento Simulado (KIRKPATRICK, GELATT e VECCHI, 1983; INGBER, 1993) e GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) (FEO e RESENDE, 1995);
- ii. *Métodos Baseados em População* (YANG, 2010a): são metaheurísticas que utilizam um grupo de soluções no processo de busca pelo ótimo.

³ Essa definição foi adaptada de uma definição mais geral apresentada em (OSMAN e LAPORTE, 1996). De fato, existem várias definições para o termo *metaheurísticas*.

Nesses algoritmos a população é evoluída utilizando operadores evolutivos ou equações que associam a posição dos indivíduos no espaço de busca. O objetivo é que a qualidade das soluções seja melhorada em cada geração. Na literatura tais métodos também são denominados de algoritmos evolutivos (ou evolucionários) e algoritmos bioinspirados.

Entre tais métodos encontram-se: Algoritmos Genéticos (AGs) (HOLLAND, 1975; GOLDBERG, 1989), Evolução Diferencial (ED) (STORN e PRICE, 1997), Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*) (DORIGO, MANIEZZO e COLORNI, 1996), Sistemas Imunológicos Artificiais (CASTRO e TIMMIS, 2002) e Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*) (KENNEDY e EBERHART, 1995). Outros métodos populacionais recentemente propostos são: Busca Harmônica (*Harmony Search*) (LEE e GEEM, 2005), Otimização baseada no Movimento do Vagalume (*Firefly Algorithm*) (YANG, 2009), Otimização baseada na Ecolocalização de Morcegos (*Bat Algorithm*) (YANG, 2010b) e Otimização baseada na Reprodução de Cucos (*Cuckoo Search*) (YANG e DEB, 2009).

- iii. *Métodos Populacionais Híbridos (Metaheurísticas Híbridas)*: nessa classe de métodos, diferentes algoritmos são combinados com o objetivo de se obter um melhor desempenho através da agregação das vantagens e superação das desvantagens individuais: a essa cooperação dá-se o nome de *Sinergia* (BLUM e PUCHINGER, 2011). Dependendo da forma que a hibridização é realizada, tem-se diferentes subclasses.

2.5 MÉTODOS DE DIREÇÃO DE BUSCA PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVOS

2.5.1 Filosofia dos Métodos de Direção de Busca

Conforme (TAKAHASHI, 2007), os métodos de direção de busca possuem as seguintes características em comum:

- i.* cada novo ponto é obtido a partir de um processo de otimização unidimensional, que tem como ponto de partida o ponto anterior;
- ii.* a direção na qual é feita a busca unidimensional é uma função das avaliações anteriores da função objetivo.

2.5.2 Métodos de Busca Direta

Conforme anteriormente mencionado, os métodos de busca direta são aqueles que não utilizam informações de derivadas no processo de otimização, sendo também denominados (em conjunto com as metaheurísticas) de métodos de ordem zero.

Entre esses métodos, pode-se citar os seguintes (maiores informações podem ser obtidas nas referências):

- a) *Método de Hooke-Jeeves*: proposto na década de 60 em (HOOKE e JEEVES, 1961), o método baseia-se em perturbações do ponto corrente na direção de cada eixo coordenado, de forma que um novo ponto seja gerado visando decrescer o valor da função objetivo.
- b) *Método Multi-Direcional (MDS)*: proposto em (TORCZON, 1989) o método MDS é adequado para o emprego de computação paralela. O método inicia-se com um conjunto de pontos que representam as possíveis soluções para o

problema. Esses pontos formam os vértices de um polítopo⁴ denominado simplex, e a cada iteração são aplicados processos de reflexão, expansão ou contração e classificação dos vértices com o objetivo de decrescer o valor da função objetivo (DOTTA, 2009).

2.5.3 Métodos de Busca Baseados em Derivadas

Esses métodos utilizam derivadas de primeira e/ou segunda ordem para proceder com a busca da solução ótima. O algoritmo mais simples dessa família de métodos é o Método do Gradiente. Ao longo das décadas de 50 e 60 o método do gradiente foi aperfeiçoado, dando origem aos métodos Quasi-Newton, que utilizam a informação da curvatura da função através das derivadas de segunda ordem (matriz Hessiana). Tais métodos são bem comportados para funções convexas e suaves. No caso de funções convexas e não suaves, métodos específicos foram propostos, tais como o Método do Feixe. Para funções não convexas e não suaves, métodos tais como o do Gradiente Amostrado fornecem resultados satisfatórios. É importante ressaltar que tais métodos são sensíveis às condições iniciais e podem ser ineficientes em funções com múltiplos mínimos. Nesse sentido, um método Híbrido foi recentemente proposto para contornar esses problemas, entretanto possui a desvantagem do elevado custo computacional para problemas de grande porte. Tais métodos são apresentados com detalhes em (TAKAHASHI, 2007) e são revisados nessa parte do capítulo.

2.5.3.1 *Método do Gradiente Descendente e Método Quasi-Newton*

O método mais simples de direção de busca baseado em derivada é o Método do Gradiente, cuja formulação detalhada será apresentada adiante, uma vez que é utilizado nessa tese de doutorado. Esse método baseia-se no seguinte princípio: "dado um ponto inicial no espaço de busca, obtém-se um novo ponto situado sobre a reta definida por esse ponto e pelo gradiente da função". A direção de busca é a da direção contrária à do gradiente, uma vez que,

⁴ Conforme (TROFINO, 2000; HINDI, 2004), um polítopo é um conjunto convexo fechado que pode ser representado pela combinação convexa dos vértices.

localmente, essa é a direção na qual a função objetivo decresce mais rapidamente (LUENBERGER, 2003).

Nas décadas de 50 e 60, foram propostas melhorias no método de direção de busca utilizando informações da curvatura da função, obtendo uma convergência mais rápida que o método do gradiente. Essas informações de curvatura são estimadas através de algum método de aproximação da inversa da matriz Hessiana da função objetivo. Um dos métodos que faz essa aproximação é o Quasi-Newton *BFGS* (*Broyden Fletcher Goldfarb Shanno*) (LEWIS e OVERTON, 2012).

De forma geral, para funções suaves e convexas, os métodos de busca baseados em derivadas da função objetivo (tais como o Método do Gradiente e Método Quasi-Newton) são eficientes, convergindo para o ótimo global. No caso de funções suaves e não convexas a convergência vai ocorrer para um ponto situado na bacia de atração do ponto de partida, uma vez que tais métodos apresentam sensibilidade ao ponto inicial (TAKAHASHI, 2007).

2.5.3.2 Método dos Feixes

No caso de funções convexas e não-suaves (não diferenciáveis), algoritmos foram propostos para a solução do problema de otimização. O Método dos Feixes (*Bundle Methods*), baseado no conceito de ε -*subdiferencial*⁵ é atualmente o método que apresenta os melhores resultados para esse tipo de problema (TOMASTIK, LUH e ZHANG, 1996). O conceito de ε -*subdiferencial* é definido como uma configuração de subgradientes, nos pontos da vizinhança do ponto x , em que ε define o tamanho da vizinhança. De posse deste conjunto de gradientes este método seleciona o gradiente de maior valor como direção de descida. Dessa forma, no caso de falha do gradiente em um ponto, o algoritmo pode fazer uso

⁵ Para compreender o conceito de *subdiferencial* considere a função $f(x) = |x|$. Essa função é convexa porém não é diferenciável na origem $x = 0$: à esquerda ($x < 0$) a subderivada vale -1 e à direita ($x > 0$) a subderivada vale 1. O conjunto de todas as subderivadas neste ponto $[-1,1]$ é definido como o subdiferencial da função no ponto.

Considerando uma função convexa definida em um conjunto convexo, um vetor g é chamado de **subgradiente** em um ponto $x^0 \in \mathbb{R}^n$ se para $\forall x \in \mathbb{R}^n$: $f(x) \geq f(x^0) + g^T \cdot (x - x^0)$.

da informação da vizinhança para escolher a sua direção de descida e encontrar o ponto de mínimo.

2.5.3.3 Método do Gradiente Amostrado

Quando se trabalha com funções não-convexas e não-suaves, a informação do gradiente só é importante localmente. Com o objetivo de contornar esse problema, em (BURKE, HENRION e LEWIS, 2003)⁶ é proposto um algoritmo denominado de Método do Gradiente Amostrado (*Gradient Sampling*). O princípio básico é o mesmo do Método do Feixe, diferenciando-se no cálculo da direção de descida (de busca). Nesse método, a direção de descida é calculada como uma combinação convexa dos gradientes com a minimização da norma-2 via um algoritmo de minimização quadrática. O parâmetro ε define o tamanho da vizinhança para amostragem dos gradientes na vizinhança de um determinado ponto. Assim, em vez de calcular um gradiente por iteração, o *Gradient Sampling* considera o conjunto de pontos amostrados na vizinhança da melhor solução corrente. Quando as iterações se aproximam de pontos nos quais o Método do Gradiente Descendente estaciona, o Método do Gradiente Amostrado usa a informação de um conjunto de gradientes amostrados para direcionar a busca. Como o método foi proposto para a solução de problemas na área de Teoria de Controle, para pontos de não suavidade são utilizadas informações dos autovalores à esquerda e à direita da matriz de estados para a estimação da derivada.

2.5.3.4 Método Híbrido

Com o objetivo de melhorar o desempenho do Método do Gradiente Amostrado para problemas na área de Teoria de Controle, em (BURKE, HENRION e LEWIS, 2006) é proposto um método híbrido que utiliza elementos de diversos algoritmos: Quasi-Newton BFGS, Feixe e Gradiente Amostrado.

Inicialmente o Método Híbrido faz uso do Método Quasi-Newton BFGS para a obtenção de um ponto no espaço de busca. A otimalidade deste ponto é testada pelo Método

⁶ O método do Gradiente Amostrado foi proposto com o objetivo de solucionar problemas na área de Sistemas de Controle.

do Feixe, que compara o mínimo obtido na primeira etapa com os gradientes na sua vizinhança. Caso a solução possa ser melhorada, o método do Gradiente Amostrado é utilizado para o refinamento da solução.

Embora seja um método específico para a solução de problemas não suaves e não convexos, esse método possui algumas desvantagens: (i) o tempo computacional para a amostragem dos gradientes é elevado e (ii) os problemas associados à sensibilidade às condições iniciais ainda persistem, isto é, em alguns casos deve-se variar a condição inicial para a obtenção de bons resultados (DILL, 2013).

2.5.4 Método do Gradiente Descendente

O Método do Gradiente Descendente (*Steepest Descent Method*) é apresentado com detalhes nessa parte do capítulo, por ser utilizado na presente tese.

2.5.4.1 Algoritmo

Conforme anteriormente citado, esse método baseia-se no seguinte princípio: "dado um ponto inicial no espaço de busca, obtém-se um novo ponto situado sobre a reta definida por esse ponto e pelo gradiente da função". A direção de busca é a da direção contrária à do gradiente, uma vez que, localmente, essa é a direção na qual a função objetivo decresce mais rapidamente (TAKAHASHI, 2007), vide equação (2.3):

$$d_k = -\nabla f(x_k) \quad (2.3)$$

O Algoritmo 2.1 apresenta a estrutura do Método do Gradiente Descendente. O método consiste em um processo iterativo que possui como passos principais: (i) obtenção do gradiente da função objetivo no ponto corrente no **passo 4**, (ii) execução de uma otimização unidimensional no **passo 6** (na literatura conhecida como *Line Search*) para a determinação do ponto de mínimo da função na direção de busca definida pelo gradiente e (iii) atualização do ponto corrente no **passo 7**. Todos esses passos bem como os critérios de parada são descritos na sequência.

<u>Algoritmo do Método do Gradiente Descendente</u>	<u>Passo</u>
Início	1
$k \leftarrow 0$	2
Repita	3
$g_k \leftarrow \text{gradiente}(f_{ob}(\cdot), x_k)$	4
$d_k \leftarrow -g_k$	5
$\alpha_k \leftarrow \arg \min_{\alpha} (x_k + \alpha \cdot d_k)$	6
$x_{k+1} \leftarrow x_k + \alpha_k \cdot d_k$	7
$k \leftarrow k + 1$	8
Até critério de parada atingido	9
Fim	10

Algoritmo 2.1- Método do Gradiente Descendente.

2.5.4.2 Determinação do Gradiente

Em problemas de otimização, a suposição mais geral que se faz em relação ao sistema que está sendo otimizado é que se tenha um algoritmo que receba o valor das variáveis de otimização $x \in \mathbb{R}^n$ e que forneça o valor da função objetivo $f(x)$ associado à esse conjunto de variáveis de entrada (modelo caixa preta ou *black box*). Dessa forma, não é possível obter funções matemáticas analíticas que representem o gradiente da função objetivo.

Entretanto, é possível estimar o valor do gradiente da função objetivo em um determinado ponto através de Diferenças Finitas, através da avaliação da função em $(n + 1)$ pontos⁷ conforme apresentado no Algoritmo 2.2.

⁷ São feitas $(n + 1)$ avaliações da função objetivo: no ponto atual e em n pontos perturbados.

<u>Algoritmo de Cálculo do Gradiente</u>	<u>Passo</u>
Início	1
Para $i \leftarrow 1$ até n faça	2
$g_i \leftarrow \frac{f(x + \delta \cdot e_i) - f(x)}{\delta}$	3
Fim-Para	4
$g \leftarrow \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}$	5
Fim	6

Algoritmo 2.2 - Cálculo do Gradiente.

No algoritmo do cálculo do gradiente, o vetor e_i ($i = 1, \dots, n$) é dado pela equação (2.4). O termo δ é uma pequena perturbação infinitesimal positiva ($\delta > 0$ e $\delta \approx 0$).

$$e_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow i - \text{ésima posição} \quad (2.4)$$

2.5.4.3 Busca Unidimensional

Uma vez conhecidos o ponto corrente x_k e a direção de busca d_k , deve-se determinar o tamanho do passo na direção de busca, isto é, o valor ótimo para α . Logo o problema de otimização da função $f(x)$ que originalmente seria de n variáveis, torna-se agora um problema de otimização de uma função $\theta(\alpha)$ de uma única variável α a cada iteração do Método do Gradiente: $\theta(\alpha) = x_k + \alpha \cdot d_k$.

A estratégia a ser adotada para a solução desse problema consiste em duas etapas (TAKAHASHI, 2007):

1. Cercar o ponto de mínimo de α_k , correspondente a $x_{k+1} = x_k + \alpha_k \cdot d_k$, construindo um intervalo $[a, b]$ tal que o valor ótimo de α esteja nesse intervalo: $\alpha^* \in [a, b]$;
2. Reduzir o intervalo $[a, b]$ até a precisão desejada ou até que $|\alpha - \alpha^*| < \xi$.

Considere o seguinte Teorema (TAKAHASHI, 2007):

Teorema 2.1: Seja uma função $f(\cdot): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Seja um domínio $[a, b] \subset \mathbb{R}$, no qual a função f possui um único mínimo local x^* . Sejam ainda dois pontos x_a e x_b tais que:

$$a < x_a < x_b < b \quad (2.5)$$

Se ocorrer :

$$f(x_a) < f(x_b) \quad (2.6)$$

então a solução minimizante x^* não se encontra no intervalo $[x_b, b]$. Por outro lado, se ocorrer:

$$f(x_a) > f(x_b) \quad (2.7)$$

então a solução minimizante x^* não se encontra no intervalo $[a, x_a]$.

Com base nesse teorema, é possível construir um algoritmo que se fundamenta na lógica de se excluir, a cada passo, um trecho do segmento considerado, de forma a fazê-lo contrair-se. Entre os algoritmos que podem ser utilizados, o *Algoritmo da Seção Áurea* é empregado: esse algoritmo visa escolher os pontos x_a e x_b dentro do intervalo $[a, b]$ com o objetivo de maximizar o comprimento do intervalo a ser excluído (TAKAHASHI, 2007). O algoritmo é apresentado no Algoritmo 2.3.

<u>Algoritmo da Seção Áurea</u>	<u>Passo</u>
Início	1
$x_a \leftarrow b - 0,618.(b - a)$	2
$x_b \leftarrow a + 0,618.(b - a)$	3
$\theta_a \leftarrow \theta(x_a)$	4
$\theta_b \leftarrow \theta(x_b)$	5
Repita Enquanto $(b - a) > \xi$	6
Se $(\theta_a < \theta_b)$ então	7
$b \leftarrow x_b$	8
$x_b \leftarrow x_a$	9
$x_a \leftarrow b - 0,618.(b - a)$	10
$\theta_b \leftarrow \theta_a$	11
$\theta_a \leftarrow \theta(x_a)$	12
Senão	13
$a \leftarrow x_a$	14
$x_a \leftarrow x_b$	15
$x_b \leftarrow a + 0,618.(b - a)$	16
$\theta_a \leftarrow \theta_b$	17
$\theta_b \leftarrow \theta(x_b)$	18
Fim-Se	19
Fim-Repita	20
$x_f \leftarrow (a + b)/2$	21
Fim	22

Algoritmo 2.3 - Seção Áurea.

Deve-se ressaltar que no algoritmo da figura anterior a variável de otimização é α , nesse caso x_f é o valor ótimo α^* que minimiza a função $f(x)$ na direção considerada.

2.5.4.4 Critérios de Parada

Como critérios de parada para o método do Gradiente Descendente, cita-se (TAKAHASHI, 2007):

- a) número máximo de iterações;
- b) se não ocorrem melhorias na função objetivo entre um determinado número de iterações;
- c) se o valor das variáveis de otimização não variar mais que uma determinada tolerância;
- d) se a norma do gradiente for menor que uma determinada tolerância (o gradiente se anula nos pontos de mínimos);
- e) se o valor de α for menor que uma determinada tolerância.

2.5.5 Tratamento de Restrições

Conforme (TAKAHASHI, 2007), dois métodos podem ser utilizados para o tratamento de restrições nos algoritmos baseados em direção de busca:

- i. Método de barreira:* nessa formulação, a função objetivo é modificada de tal forma que tenda a infinito quando as variáveis de otimização atinjam a fronteira da região factível. As variáveis devem ser inicializadas dentro da região viável;
- ii. Método de Penalidade:* nessa formulação, a função objetivo é penalizada quando ocorrem violações de restrições, conforme a equação (2.8). Nesta formulação não existe a necessidade de inicializar as variáveis dentro da região factível.

$$F(x) = f(x) + \beta \cdot \max\left(0, \sum_{i=1}^p g_i(x)\right) \quad (2.8)$$

Observa-se que quando ocorrem violações nas restrições $g(x) \leq 0$, o segundo termo é maior que zero e a função objetivo original é penalizada (β é um escalar grande).

Os métodos de direção de busca foram revisados nessa parte do texto e compartilham uma desvantagem: sensibilidade à condição inicial. Em geral, os métodos que utilizam informações das derivadas para direcionar a busca possuem convergência mais rápida que aqueles que não utilizam tais informações (métodos de busca direta). Além disso, métodos de busca direta possuem baixa velocidade de convergência. Entretanto, nos casos que não for possível obter boas soluções com métodos baseados em derivadas, métodos de busca direta podem ser uma boa opção, contanto que o problema não seja de grande dimensão.

Ao contrário dos métodos de direção de busca, as metaheurísticas baseadas em população possuem um bom comportamento diante de funções com múltiplos pontos de mínimo. Por não utilizarem informações de gradientes, possuem bom comportamento para funções não suaves. Entretanto, não possuem garantia de convergência para o ponto ótimo; podem ficar estagnadas em mínimos locais e podem requerer grande esforço computacional por trabalharem com um conjunto de soluções. Esses métodos são revisados na sequência.

2.6 MÉTODOS POPULACIONAIS BIOINSPIRADOS PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVOS

2.6.1 Métodos Populacionais Bioinspirados

Os métodos de otimização mono-objetivos baseados em população fazem parte da classe de Metaheurísticas. O princípio fundamental desses métodos consiste em, partindo de uma população inicial, aplicar técnicas de busca com o objetivo de melhorar a solução considerando que os indivíduos são evoluídos de acordo com regras específicas que consideram o intercâmbio de informações entre os mesmos (SERAPIÃO, 2009).

Estes são métodos estocásticos (não-determinísticos) que procuram balancear estratégias de busca local (intensificação ao redor da melhor solução corrente) com estratégias de busca global (exploração do espaço de busca) com o objetivo de melhorar a aptidão dos indivíduos da população.

O estudo de tais métodos foi iniciado nos anos 50. Um dos mais antigos registros de uma família de técnicas conhecida atualmente como Algoritmos Evolutivos, é o trabalho de Bremermann publicado em 1962 e intitulado "*Optimization through Evolution and Recombination*", onde é proposto um otimizador evolutivo utilizando elementos de cruzamento e mutação (BREMERMANN, 1962). Grandes avanços nessa área foram obtidos nas décadas de 70 e 80, nas quais importantes trabalhos foram publicados (HOLLAND, 1975) (GOLDBERG, 1989). Baseados em mecanismos de seleção natural, cruzamento e mutação, os Algoritmos Genéticos (AGs) se tornaram populares para a solução de diversos problemas práticos de engenharia. Entretanto, foi observado que os AGs possuem algumas desvantagens, como convergência lenta e estagnação da solução em pontos de qualidade não tão boa em algumas situações. Em outros casos foi observada a perda da diversidade da população devido ao fato dos AG descartarem o conjunto das soluções piores no processo de seleção.

Nesse sentido, a partir da década de 90, vários métodos baseados em população foram propostos visando a obtenção de soluções de boa qualidade em um tempo computacional razoável. Muitos desses métodos foram inspirados em comportamentos observados na natureza, sendo agrupados em uma classe mais abrangente denominada de Métodos Bioinspirados.

Embora tais métodos não garantam o alcance do ponto ótimo, soluções viáveis de boa qualidade podem ser obtidas em um tempo computacional razoável. Cita-se ainda, a possibilidade da solução de problemas computacionais complexos que não podem ser resolvidos por métodos determinísticos (tais como os de direção de busca baseados em gradiente).

Algumas vantagens dos métodos populacionais são abaixo citadas (BLUM e ROLI, 2003):

- ao trabalharem com um conjunto de soluções, pode-se explorar o espaço de busca de uma forma mais eficiente. Tal característica é benéfica para a otimização de funções multimodais (com múltiplos mínimos);
- tais métodos não fazem uso de derivadas, sendo benéficos para a otimização de funções não diferenciáveis.

Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados ao utilizar os métodos baseados em população:

- tais métodos podem sofrer de convergência prematura para soluções de má qualidade. Isso ocorre quando a diversidade da população não é mantida, isto é, existe um movimento rápido dos indivíduos da população para um determinado ponto do espaço de busca. Estratégias para a manutenção de diversidade da população (diversificação) serão apresentadas adiante;
- uma vez que uma região com soluções de boa qualidade é encontrada, pode ocorrer que o algoritmo não consiga fazer uma exploração local dessa região, devido à natureza estocástica dos métodos populacionais. Nesse sentido, estratégias de busca local devem ser realizadas para intensificar a busca em uma região satisfatória (bacias de atração). A esse processo dá-se o nome de intensificação.

Além das etapas de diversificação e intensificação, com o objetivo de se evitar a perda de soluções de boa qualidade, os algoritmos populacionais possuem uma etapa denominada de *Elitismo*, que é definida como uma seleção determinística de parte da solução corrente (usualmente os melhores) para integrar a nova população.

Conforme apresentado em (BLUM e ROLI, 2003), pode-se classificar os métodos populacionais em (i) bioinspirados e (ii) não bioinspirados (entretanto, fazer essa classificação é uma tarefa difícil). Nesse trabalho de doutorado será feito o uso de dois métodos populacionais bioinspirados: Otimização baseada no Exame de Partículas ou *Particle Swarm Optimization - PSO* (KENNEDY e EBERHART, 1995) e Otimização baseada na Eco-localização de Morcegos ou *Bat Algorithm* (YANG, 2010b). Esses dois métodos serão apresentados detalhadamente nesse capítulo.

Embora os métodos *PSO* e *BAT* sejam utilizados nesse trabalho, existem outros métodos populacionais citados na literatura para a solução de problemas de otimização mono-objetivos:

- Algoritmos Genéticos (HOLLAND, 1975)(GOLDBERG, 1989);
- Colônia de Formigas (DORIGO, MANIEZZO e COLORNI, 1996; DORIGO e STUTZLE, 2004);
- Evolução Diferencial (STORN e PRICE, 1997);
- Sistema Imunológico Artificial (CASTRO e TIMMIS, 2002);
- Colônia de Bactérias (PASSINO, 2002);
- Colônia de Abelhas (NAKRANI e TOVEY, 2003);
- Busca Harmônica (LEE e GEEM, 2005);
- Otimização baseada no movimento dos Vaga-Lumes (*Firefly Algorithm*) (YANG, 2009);
- Busca Gravitacional (RASHEDI, POUR e SARYAZDI, 2009);
- Otimização baseada na Reprodução dos Cucos (*Cuckoo-Search*) (YANG e DEB, 2009);
- Otimização baseada na Polinização de Flores (*Flower Pollination Optimization*) (YANG, 2013a);
- Otimização baseada na Mobilização Militar (COELHO, SILVA JUNIOR e DIAS, 2015).

Apesar de tais métodos terem sido propostos e validados em uma filosofia de superar o desempenho dos demais métodos, sabe-se que, sob certas suposições, nenhum algoritmo de otimização é melhor do que o outro: isto significa que um algoritmo A pode superar um algoritmo B em um problema e não superá-lo em outro. Tal conceito é baseado em um teorema denominado "*The No Free Lunch Theorem for Optimization*", introduzido para

problemas mono-objetivos por Wolpert e Macready em 1997 (WOLPERT e MACREADY, 1997) (HO e PEPYNE, 2001).

2.6.2 Tratamento de restrições em Algoritmos Populacionais

No caso de algoritmos baseados em população, as seguintes técnicas são comumente utilizadas para o tratamento de restrições (TAKAHASHI, 2007):

- *Penalidade de Soluções*: consiste em acrescentar uma penalização às soluções que violam os limites;
- *Eliminação de Soluções*: consiste em descartar as soluções que não estejam dentro da região factível;
- *Reparo ou Correção de Soluções*: consiste em deslocar as soluções infactíveis para dentro da região factível. Uma opção seria fixar as variáveis nos seus limites violados.

2.6.3 Otimização baseada em Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*)

2.6.3.1 Bioinspiração

O método de Otimização baseado em Enxames de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*) foi proposto em (KENNEDY e EBERHART, 1995) e baseia-se no comportamento social de bandos de pássaros e cardumes de peixes na busca por alimentos. Os indivíduos (pássaros/peixes) da população (bando/cardume) se movimentam no espaço sofrendo influência das suas melhores experiências anteriores (fator cognitivo) e das melhores experiências de suas vizinhas (fator social).

Dessa forma, pode-se fazer uma analogia onde: (i) a procura pelo alimento é associada à busca por soluções de boa qualidade para um problema de otimização, (ii) cada partícula (ou

indivíduo) da população está associada a um vetor solução (N-dimensional), (iii) o fator cognitivo (melhor experiência individual) está associado à melhor solução encontrada por cada partícula e (iv) o fator social (melhor experiência do grupo) está associado à melhor solução encontrada pela população. À cada partícula está associada uma função aptidão ou *Fitness*.

Em (DEL VALLE, VENAYAGAMOORTHY e MOHAGHEGHI, 2008) são citadas algumas vantagens do *PSO* em relação aos Algoritmos Genéticos:

- i. a implementação do *PSO* é mais fácil e existem poucos parâmetros para serem ajustados;
- ii. no *PSO* cada partícula se lembra da sua melhor posição bem como a melhor posição dos seus vizinhos. Logo o *PSO* possui maior capacidade de memória;
- iii. o *PSO* é mais eficiente em manter a diversidade da população. Isso porque todas as partículas são mantidas na população durante o processo de busca e são evoluídas com base no comportamento cognitivo e social. Em contrapartida, nos Algoritmos Genéticos, as piores soluções são descartadas a cada geração e a busca é realizada com base em um grupo de melhores posições.

2.6.3.2 Equações de Movimento

Em uma determinada geração t , a cada partícula i está associada: (i) uma velocidade v_i^t , (ii) uma posição x_i^t e (iii) uma memória da sua melhor posição durante o processo de busca $pbest_i$. Essas grandezas são vetores N-dimensionais (mesma dimensão do espaço de busca). As coordenadas da melhor posição corrente de toda a população⁸ (aquela que fornece o menor valor para a função aptidão entre todas as partículas) são armazenadas em um vetor $gbest$.

⁸ Algumas variantes são propostas na literatura (DEL VALLE, VENAYAGAMOORTHY e MOHAGHEGHI, 2008), nas quais pode-se trabalhar com a melhor solução de toda a população ou a melhor posição de um grupo vizinho à partícula em questão.

A cada geração, a velocidade v_i^{t+1} de cada partícula é atualizada conforme a equação (2.9) (SHI e EBERHART, 1998). O vetor de velocidades v_i possui a mesma dimensão do vetor de posições (ou soluções) x_i .

$$v_i^{t+1} = w^t \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i^t) \quad (2.9)$$

em que:

- c_1 e c_2 são constantes de aceleração positivas associadas aos fatores cognitivo e social;
- r_1 e r_2 são números aleatórios obtidos de uma distribuição uniforme;
- w^t é uma constante de inércia na geração t que controla a capacidade de busca global e local do método. Essa constante pode ser um valor fixo ou um valor que varia ao longo das iterações, conforme apresentado na equação (2.10).

$$w^t = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{t_{max}} \right) \cdot t \quad (2.10)$$

em que:

- w_{max} e w_{min} representam os valores máximos e mínimos da constante de inércia;
- t_{max} é o número máximo de gerações.

De forma a reduzir a probabilidade das partículas abandonarem o espaço de busca, a velocidade v_i^{t+1} é limitada conforme a equação (2.11).

$$v_i^{t+1} = \begin{cases} v_i^{t+1} & \text{se } -v_{max} \leq v_i^{t+1} \leq v_{max} \\ -v_{max} & \text{se } v_i^{t+1} < -v_{max} \\ v_{max} & \text{se } v_i^{t+1} > v_{max} \end{cases} \quad (2.11)$$

O deslocamento de uma partícula no espaço de busca é dado pela equação (2.12).

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2.12)$$

Analogamente, a nova posição x_i^{t+1} de cada indivíduo deve satisfazer aos limites das variáveis de otimização, conforme apresentado na equação (2.13)⁹.

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^{t+1} & \text{se } x_{min} \leq x_i^{t+1} \leq x_{max} \\ x_{min} & \text{se } x_i^{t+1} < x_{min} \\ x_{max} & \text{se } x_i^{t+1} > x_{max} \end{cases} \quad (2.13)$$

Para cada partícula atualizada, um valor de aptidão é calculado. Caso o valor da aptidão associada à x_i^{t+1} for melhor que a aptidão de $pbest_i$, faz-se $pbest_i = x_i^{t+1}$. Analogamente se a aptidão associada à x_i^{t+1} for melhor que a aptidão de $gbest$, faz-se $gbest = x_i^{t+1}$.

2.6.3.3 Análise de Parâmetros

Sabe-se que qualquer algoritmo de otimização, seja determinístico ou estocástico, possui um conjunto de parâmetros que devem ser ajustados para que o problema de otimização seja resolvido de forma eficiente. No caso dos algoritmos populacionais, como o *PSO*, um ajuste incorreto de tais parâmetros pode deteriorar a eficiência do processo de busca.

O primeiro parâmetro a ser ajustado é o número de partículas a serem utilizadas na população. Conforme (DEL VALLE, VENAYAGAMOORTHY e MOHAGHEGHI, 2008) esse valor pode ser escolhido na faixa de 20 a 50 indivíduos.

De acordo com a equação de atualização de velocidade das partículas dada na equação (2.9), pode-se identificar três componentes:

- i. *Componente de Inércia* dada por $w^t \cdot v_i^t$: fornece uma memória da direção dos vãos anteriores da partícula e impede que esta mude drasticamente de direção.

⁹ Observa-se que é aplicado um tratamento de restrições baseado em correção ou reparo de soluções.

Pode ser interpretada como uma energia (impulso) de uma partícula e é importante para que esta escape de soluções de má-qualidade;

- ii. *Componente Cognitivo* dado por $c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^t)$: representa uma tendência dos indivíduos regressarem as suas melhores posições passadas;
- iii. *Componente Social* dado por $c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i^t)$: direciona a partícula para a melhor posição corrente do enxame.

A constante de inércia w^t influencia na ponderação entre as habilidades de exploração global e local das partículas (DEL VALLE, VENAYAGAMOORTHY e MOHAGHEGHI, 2008). Quando w^t é pequeno, o algoritmo *PSO* é mais propício a realizar uma busca local. Em contrapartida, quando w^t é grande o *PSO* tende a explorar novas áreas do espaço de busca (busca global). O ideal é começar com uma constante de inércia grande (na faixa de 0,8 a 1,2) para permitir uma busca global no início e ir reduzindo gradativamente o valor dessa constante (até 0,4, por exemplo) com o objetivo de se efetuar uma busca local nas melhores regiões previamente identificadas.

Com relação às constantes de aceleração c_1 e c_2 tem-se os seguintes casos (SHI e EBERHART, 1998) (VALLE, 2014):

- $c_1 = 0$ e $c_2 = 0$: nesse caso as partículas voam aleatoriamente no espaço de busca e provavelmente irão atingir rapidamente os seus limites e não vão encontrar soluções de boa qualidade;
- $c_1 > 0$ e $c_2 = 0$: nesse caso todas as partículas buscarão por soluções de boa qualidade baseadas em sua própria experiência, fazendo uma busca local ao redor das suas melhores soluções individuais;
- $c_1 = 0$ e $c_2 > 0$: nesse caso as partículas serão atraídas para um único ponto, que é a melhor solução do enxame. Portanto será realizada uma busca local ao redor da melhor solução corrente;
- $c_1 = c_2$: nesse caso as partículas são atraídas em direção à média de $pbest_i$ e $gbest$;

- quando $c_1 \gg c_2$ cada partícula é mais fortemente influenciada por sua melhor posição individual, o que pode levar a uma convergência lenta do algoritmo. Em contrapartida, quando $c_2 \gg c_1$ as partículas tenderão a seguir a melhor posição global o que pode ocasionar à uma convergência prematura do algoritmo devido a perda da diversidade da população.

Conforme (SHI e EBERHART, 1998), para uma vasta gama de problemas, $c_1 = c_2 = 2$ representa uma boa escolha.

O método de otimização *PSO* tem sido aplicado em uma grande variedade de problemas na área de engenharia. Uma revisão das aplicações na área de sistemas elétricos de potência pode ser obtida em (DEL VALLE, VENAYAGAMOORTHY e MOHAGHEGHI, 2008) (ALRASHIDI e EL-HAWARY, 2009).

2.6.3.4 Algoritmo

O algoritmo do método de otimização baseado em Enxame de Partículas é apresentado no Algoritmo 2.4. O critério de parada é baseado no número máximo de gerações.

<u>Algoritmo do Particle Swarm Optimization</u>	<u>Passo</u>
Início	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo.	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 0$	3
Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todas as partículas dentro dos limites permitidos	4
Calcular a função aptidão associada à cada partícula	5
Para todas as partículas fazer: $pbest_i = x_i^t$ e encontrar a melhor posição global $gbest$	6
Repita	7
Para Todas as Partículas Faça	8
Atualizar a velocidade v_i^{t+1} através da equação (2.9) e testar a factibilidade usando a equação (2.11)	9
Atualizar a posição x_i^{t+1} através da equação (2.12) e testar a factibilidade usando a equação (2.13)	10
Calcular a função aptidão associada à partícula	11
Se o valor da função aptidão for menor que a da melhor posição individual corrente, fazer: $pbest_i = x_i^{t+1}$	12
Fim-Para	13
Encontrar a melhor solução corrente $gbest$	14
$t \leftarrow t + 1$	15
Fim-Repita	16
Fim	17

Algoritmo 2.4 - Método *PSO*.

2.6.4 Otimização baseada na Eco-localização de Morcegos (*Bat Algorithm*)

2.6.4.1 Bioinspiração

O processo de otimização bioinspirada na eco-localização de morcegos (do inglês *Bat Algorithm*) é uma recente metodologia proposta em (YANG, 2010b)¹⁰. A eco-localização é a capacidade dos morcegos detectarem suas presas e evitarem obstáculos através da emissão de sons e da recepção dos ecos, mesmo estando na escuridão. Com base no tempo gasto para que o som emitido alcance o alvo e retorne à fonte (eco), o morcego identifica a distância em que se encontra do obstáculo ou presa.

Existem diferentes tamanhos de morcegos, sendo que os de menores tamanhos, denominados de *microbats*, usam extensivamente a eco-localização para caçar suas presas (mesmo estando na completa escuridão e as presas em movimento).

Os morcegos emitem sons modulados de acordo com a estratégia de caça. Estudos mostraram que os *microbats* emitem sons na faixa de 20 kHz à 150 kHz. O volume do som emitido diminui durante o processo de caça, atingindo um valor mínimo quando a presa é alcançada. Já a taxa de emissão de pulsos sonoros aumenta durante o processo até um valor alto quando o objetivo (presa) é alcançado.

Baseado na eco-localização dos morcegos, o método de otimização proposto em (YANG, 2010b) faz uso de três regras básicas:

1. todos os morcegos do grupo fazem uso da eco-localização para a identificação e alcance das presas;
2. os morcegos se deslocam no espaço de busca com velocidade v_i na posição x_i variando a frequência do som emitido f_{r_i} , o volume do som emitido A_i e a taxa de emissão de pulsos r_i de acordo com a estratégia de caça;
3. o volume do som A_i diminui de um valor alto A_0 até um valor baixo A_{min} durante o processo de busca. Em contrapartida a taxa de emissão de pulsos r_i aumenta de um valor mínimo até r_i^0 .

¹⁰ O algoritmo do *Bat* pode ser agrupado junto com o *PSO* em uma subclasse de algoritmos populacionais baseados na experiência de enxames.

Algumas aplicações recentes do *Bat Algorithm* em engenharia elétrica podem ser obtidas em (LEMMA e BIN MOHD HASHIM, 2011), (BORA, COELHO e LEBENSZTAJN, 2012), (COELHO, 2013), (ARCANJO, 2014) e (MORAES, 2015), onde se verificam resultados promissores. Uma revisão sobre as aplicações desse método pode ser obtida em (YANG, 2013b).

2.6.4.2 Equações de Movimento

Em uma geração t um morcego (indivíduo) i se desloca no espaço de busca atualizando os seguintes parâmetros: velocidade v_i^t , posição x_i^t , frequência $f_{r\ i}$, volume do som A_i^t e taxa de emissão dos pulsos r_i^t .

A frequência do som emitido $f_{r\ i}$ é atualizada considerando um limite mínimo $f_{r\ min}$ e máximo $f_{r\ max}$ de acordo com a equação (2.14).

$$f_{r\ i} = f_{r\ min} + (f_{r\ max} - f_{r\ min}) \cdot \beta \quad (2.14)$$

em que:

- $\beta \in [0,1]$ é um escalar randômico.

Uma vez atualizada a frequência, a velocidade de cada indivíduo também é atualizada de acordo com a equação (2.15). O vetor de velocidades v_i possui a mesma dimensão do vetor de posições (ou soluções) x_i .

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x^*) \cdot f_{r\ i} \quad (2.15)$$

em que x^* é a melhor posição (ou solução) corrente.

A atualização da posição de cada indivíduo é realizada conforme a equação (2.16):

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (2.16)$$

A nova posição x_i^t de cada indivíduo deve satisfazer aos limites das variáveis de otimização, conforme apresentado na equação (2.17).

$$x_i^t = \begin{cases} x_i^t & \text{se } x_{min} \leq x_i^t \leq x_{max} \\ x_{min} & \text{se } x_i^t < x_{min} \\ x_{max} & \text{se } x_i^t > x_{max} \end{cases} \quad (2.17)$$

Como anteriormente mencionado, a cada indivíduo está associado um valor para o volume do som emitido A_i^t e outro para a taxa de emissão dos pulsos r_i . Quando o indivíduo está próximo de soluções de boa qualidade (na analogia de um morcego estar próximo de sua presa), o volume do som é reduzido e a taxa de emissão de pulsos é incrementada.

Dessa forma, para cada indivíduo, pode-se avaliar a proximidade das soluções de boa qualidade com base na taxa de emissão de pulsos r_i através do seguinte procedimento: amostra-se um número *rand*. Se o número randômico for maior que a taxa de emissão de pulsos, significa que provavelmente o morcego está distante da sua presa (solução ótima). Dessa forma é executada uma busca local ao redor da melhor solução corrente, conforme a equação (2.18)¹¹.

$$x_i^t = x^* + \varepsilon \quad (2.18)$$

em que ε é um vetor de números randômicos reais de baixa magnitude.

Diferentemente do método *PSO*, as novas soluções não são automaticamente aceitas. Para que uma nova solução x_i^t seja aceita, deve-se satisfazer os seguintes critérios: (i) a solução do indivíduo deve melhorar, isto é $f(x_i^t) < f(x_i^{t-1})$ ¹², e (ii) um número *rand* deve ser menor que o volume do som A_i^t . A motivação para esse procedimento está associada ao fato de que o volume do som é reduzido a medida que o morcego se aproxima da presa (ou o algoritmo se aproxima das soluções de boa qualidade): dessa forma, se o *rand* for menor que o volume do som, significa que esse morcego está se aproximando das boas soluções.

¹¹ Pode-se ainda fazer a busca local considerando $x_i^t = x^* + \varepsilon \cdot \langle A^t \rangle$, em que $\varepsilon \in [-1,1]$ e $\langle A^t \rangle$ é a média do som de todos os morcegos na geração t . Nesse caso, quanto mais perto da melhor solução, menor é a média do som e mais refinada é a busca local.

¹² Em (COELHO, 2013) é apresentada um passo adicional com o objetivo de aumentar a diversidade da população: é permitido que uma porcentagem dos piores indivíduos (ordenados de acordo com sua função de aptidão) se desloque livremente (de acordo com as equações de movimento) independentemente da sua nova função aptidão e volume do som.

Quando uma solução nova é aceita, o volume do som A_i e a taxa de pulsos r_i devem ser atualizados, conforme as equações (2.19) e (2.20).

$$A_i^{t+1} = \mu \cdot A_i^t \quad (2.19)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \cdot [1 - e^{-\gamma \cdot t}] \quad (2.20)$$

em que μ e γ são parâmetros cujos valores são comumente ajustados em 0,9 conforme (YANG, 2010b).

Observa-se que a posição ótima será obtida quando:

$$A_i^t \rightarrow 0 \text{ e } r_i^t \rightarrow r_i^0 \text{ quando } t \rightarrow \infty \quad (2.21)$$

Os seguintes valores são geralmente adotados (YANG, 2010b): (i) o valor inicial para o volume do som foi de 0,25 ($A_i^t = 0,25$); (ii) a taxa de emissão de pulsos $r_i^0 = 0,5$ e faixa de frequência $[f_{r \text{ min}} \quad f_{r \text{ max}}] = [0 \quad 2]$ Hz.

2.6.4.3 Análise de Parâmetros

Como no método *PSO*, o primeiro parâmetro a ser ajustado é o número de indivíduos a serem utilizados na população. Conforme (YANG, 2010b) (CORDEIRO, PARPINELLI e LOPES, 2012) (YANG, 2013b) esse valor pode ser escolhido na faixa de 20 a 50 indivíduos.

Conforme (YANG, 2010b), o *Bat Algorithm* é baseado em uma combinação entre busca global e busca local intensa controlada pelo volume do som e taxa de emissão de pulsos. Em comparação com o *PSO*, pode-se fazer as seguintes observações:

- a velocidade de uma partícula no *PSO* (equação (2.9)) é atualizada levando em consideração a componente de inércia (proporcional a v_i^{t-1}), cognitiva (proporcional a $pbest_i$) e social (proporcional a $gbest$). No algoritmo *Bat* original (usado nessa tese) a componente cognitiva não é levada em consideração. Nesse caso é conferida a cada indivíduo um maior grau de liberdade no movimento em busca pelas melhores soluções. Entretanto, em (JADDI, ABDULLAH e HAMDAN, 2015), é proposta a inclusão da componente cognitiva na equação de movimento visando aumentar a capacidade de exploração local das melhores experiências individuais;

- enquanto que no *PSO* existe um coeficiente multiplicativo na componente de inércia ($w^t \cdot v_i^{t-1}$), no algoritmo original do *BAT* não se utiliza essa constante. Uma vez que o algoritmo do *BAT* apresenta uma etapa de busca local controlada pela taxa de emissão de pulsos, no algoritmo original a constante de inércia é considerada unitária (no *PSO* ela é reduzida durante as gerações);
- por fim cita-se que, enquanto a velocidade do *PSO* é limitada, esse procedimento não é aplicado no algoritmo do *Bat* original devido ao fato da componente $(x_i^{t-1} - x^*) \cdot f_{r_i}$ geralmente assumir valores pequenos. Caso a velocidade fosse limitada, o método poderia ter sua capacidade exploratória deteriorada.

Com relação aos parâmetros μ e γ , utilizados para redução do volume ($A_i^{t+1} = \mu \cdot A_i^t$) do som e aumento da taxa de emissão de pulsos ($r_i^{t+1} = r_i^0 \cdot [1 - e^{-\gamma \cdot t}]$), deve-se ter: $0 < \mu < 1$ e $\gamma > 0$.

As seguintes análises são válidas:

- $\mu = 0$: o volume do som seria nulo $A_i^{t+1} = 0$, fazendo com que as novas soluções não fossem aceitas e as soluções ficariam estagnadas em suas condições iniciais;
- $\gamma = 0$: a taxa de emissão de pulsos seria nula $r_i^{t+1} = 0$, aumentando a probabilidade de que a busca fosse feita ao redor da melhor solução corrente. Isso conduziria à perda de diversidade da população, pois os indivíduos se aglomerariam ao redor de uma única solução;
- valores muito elevados para γ fazem com que a taxa de emissão de pulsos seja aumentada rapidamente. Isso reduziria a probabilidade da busca ao redor da melhor solução, deteriorando a capacidade da busca local do método.

2.6.4.4 Algoritmo

O algoritmo do método de Otimização baseado na eco-localização de morcegos é apresentado no Algoritmo 2.5. O critério de parada é baseado no número máximo de gerações.

<u>Algoritmo do Bat</u>	<u>Passo</u>
Início	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 1$	3
Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todos os indivíduos (morcegos) dentro dos limites permitidos	4
Calcular a função aptidão $f(x_i^t)$ associada a cada indivíduo x_i^t	5
Encontrar a melhor posição global x^*	6
Repita	7
Para Todos os Indivíduos Faça	8
Gerar uma nova solução ajustando-se a frequência e atualizando a velocidade e a posição do morcego: equações (2.14)-(2.16)	9
Se $rand > r_i^t$ Faça	10
Gerar uma solução ao redor da melhor solução corrente (busca local) através da equação (2.18)	11
Fim-Se	12
Avaliar a viabilidade da solução de acordo com a equação (2.17) e calcular a função aptidão associada $f(x_i^t)$	13
Se $(rand < A_i^t)$ e $f(x_i^t) < f(x_i^{t-1})$ Faça	14
Aceitar a nova solução	
Aumentar r_i^t e reduzir A_i^t : equações (2.19)-(2.20)	15
Fim-Se	16
Fim-Para	17
Encontrar a melhor posição global x^*	18
$t \leftarrow t + 1$	19
Fim-Repita	20
Fim	21

Algoritmo 2.5 - Bat Algorithm.

2.7 DIVERSIFICAÇÃO E INTENSIFICAÇÃO EM ALGORITMOS POPULACIONAIS MONO-OBJETIVOS

2.7.1 Conceituação

Um dos principais requisitos para a obtenção de soluções de boa qualidade utilizando-se os métodos de otimização baseados em população é que exista um equilíbrio entre as estratégias de diversificação e intensificação durante o processo de busca. Conforme (BLUM e ROLI, 2003), tem-se as seguintes definições:

- *Diversificação (Diversification)*: também referenciada na literatura como *Exploration*, consiste na estratégia de exploração global do espaço de busca;
- *Intensificação (Intensification)*: também referenciada na literatura como *Exploitation*, consiste em intensificar a busca através de uma exploração local ao redor das melhores soluções.

Sabe-se que uma das métricas para medir a qualidade de um algoritmo de otimização é a sua característica de convergência. Conforme (CHENG e SHI, 2012), no caso de algoritmos baseados em população, "*Convergência não significa que todos os indivíduos devem se manter próximos em uma pequena região do espaço de busca, mas sim que a função de aptidão do melhor indivíduo seja a melhor possível*". Essa definição é importante para a minimização de funções multimodais (com múltiplos pontos de mínimos), onde a manutenção da diversidade da população deve ser garantida. Algumas técnicas para a manutenção da diversidade da população serão apresentadas adiante.

Outra característica é a etapa de intensificação ao redor das melhores soluções, presente na maioria dos algoritmos populacionais (RAIDL, 2006). De forma geral, tais algoritmos realizam um somatório randômico de baixa escala à melhor solução corrente, conforme apresentado na equação (2.22).

$$x_{t+1} = g_* + \varepsilon \cdot d \quad (2.22)$$

onde g_* é a melhor solução corrente, ε é um número randômico e d é um fator de escala. Entretanto, explorações locais mais eficientes podem ser realizadas através da hibridização de algoritmos conforme será visto adiante: uma vez que a busca global tenha posicionado os

indivíduos em bacias de atração favoráveis, técnicas que requerem um menor esforço computacional e são mais eficientes podem ser aplicadas.

Um exemplo do balanceamento entre as estratégias de diversificação e intensificação é apresentado em (DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000) (CÁRDENAS, 2011), onde um algoritmo genético é utilizado para resolver o problema de ajuste coordenado de controladores de sistemas de potência: a busca é realizada através de conceitos de redução, deslocamento e expansão do espaço de busca visando a obtenção de soluções de boa qualidade.

2.7.2 Técnicas para a Manutenção da Diversidade da População

A manutenção da diversidade da população é importante para evitar que os indivíduos se aglomerem prematuramente em pontos do espaço de busca caracterizados por soluções de má-qualidade. Quando os indivíduos se aglomeram prematuramente em uma região, o esforço computacional nas gerações (ou iterações) seguintes será para explorar somente uma região limitada, fazendo com que o método populacional perca sua característica exploratória (o que degrada sua eficiência) (OJIMA e THEODORO, 2002).

Para contornar esse problema, existem algumas estratégias específicas na literatura para garantir a diversidade da população, tais como as técnicas de *Niching* (entre as quais cita-se *Fitness Sharing* e *Crowding*) e os algoritmos cooperativos.

- i. *Fitness Sharing* (Compartilhamento de *Fitness*): proposto no campo dos Algoritmos Genéticos este método é baseado na premissa de compartilhamento de recursos, onde o objetivo é reduzir o valor de aptidão dos indivíduos que são similares dentro da população¹³. A modificação ocorre no cálculo da função de aptidão: cada indivíduo possui o seu valor de aptidão reduzido de acordo com a quantidade de indivíduos idênticos ou similares na população. Assim, o algoritmo possui uma menor probabilidade de que muitos

¹³ Essa similaridade pode ser medida tanto no espaço solução de otimização (comparação das variáveis) quanto no espaço de objetivos (comparação das funções objetivos).

indivíduos do mesmo nicho sejam selecionados. Entretanto, existe uma grande dificuldade na escolha da função de escala (que penaliza a função aptidão dos indivíduos similares) (GOLDBERG e RICHARDSON, 1987).

- ii. *Crowding* (Aglomeração): proposto para manter a diversidade da população em Algoritmos Genéticos (DE JONG, 1975), a técnica *Crowding* insere novos indivíduos na população no lugar de elementos que apresentam alto grau de similaridade. A comparação de similaridade é feita através de medidas no espaço solução ou objetivo e tenta espalhar os indivíduos pelos pontos de ótimo da função.
- iii. *Algoritmos Cooperativos (ou Colaborativos)*: esta estratégia consiste em tratar a solução do problema com uma abordagem similar a um ecossistema, consistindo de duas ou mais espécies (subpopulações) que evoluem ao longo do processo iterativo (BLUM e ROLI, 2003) e (RAIDL, 2006). Essas estratégias serão apresentadas adiante.

Em (SORENSEN e SEVAUX, 2006) é proposta uma metodologia para a manutenção da diversidade das partículas no método *PSO*: para cada nova partícula gerada, a distância no espaço solução é calculada em relação ao conjunto de partículas a ser atualizado. Se a menor distância entre a nova partícula e um determinado indivíduo original da população for maior que uma tolerância, o indivíduo original é substituído (a nova partícula é incluída na população).

Além dessas estratégias, cita-se aquela baseada na decomposição do espaço de busca: nesse caso, diferentes sub-populações são utilizadas para otimizar de forma cooperativa diferentes componentes do vetor de solução. Algumas aplicações dessa estratégia foram propostas para os Algoritmos Genéticos (POTTER e JONG, 2000), *PSO* (VAN DEN BERGH e ENGELBRECHT, 2004) e Evolução Diferencial (TRUNFIO, 2015).

2.7.3 Métodos Cooperativos ou Colaborativos

Conforme anteriormente mencionado, a otimização colaborativa consiste em tratar a solução do problema com uma abordagem similar a um ecossistema, consistindo de duas ou mais espécies (subpopulações) que evoluem ao longo do processo iterativo. Estas subpopulações podem interagir entre si (troca de informações das melhores soluções) ou enviar suas melhores soluções para serem processadas em um domínio (em uma configuração onde o domínio seria o mestre e as subpopulações seriam escravos). As subpopulações podem ser evoluídas por um mesmo algoritmo (utilizando condições iniciais diferentes, por exemplo) ou algoritmos distintos. Aplicações recentes dessa estratégia de manutenção da diversidade da população, foram propostas para o métodos *PSO* (NIU, ZHU e HE, 2007) e *Bat Algorithm* (JADDI, ABDULLAH e HAMDAN, 2015).

Em (NIU, ZHU e HE, 2007) é proposta uma metodologia de otimização colaborativa para o método *PSO* baseada em uma estrutura mestre-escravo. Nesse método, a cada geração, diferentes subpopulações baseadas no método *PSO* original otimizam a função sob análise (escravos). Após a solução de cada população, os melhores indivíduos de cada uma são passados para uma segunda instância denominada mestre, que é um método *PSO* modificado que atualiza a posição das partículas com base em quatro componentes: (i) componente de inércia, (ii) componente cognitiva baseada nas suas melhores soluções individuais, (iii) componente social baseada na sua melhor solução global e (iv) componente social baseada na melhor solução dos indivíduos enviados pelos escravos. Essa estratégia é representada na Figura 2.1.

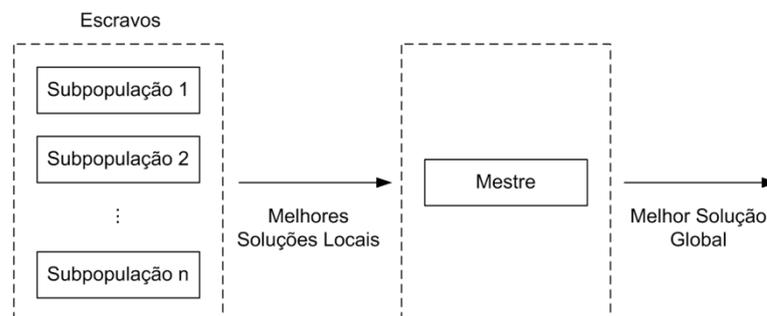


Figura 2.1 - Estrutura do algoritmo Cooperativo *PSO*.

Em (JADDI, ABDULLAH e HAMDAN, 2015), diferentes estruturas de algoritmos são aplicadas à Otimização Cooperativa baseada na Eco-localização de Morcegos (*Bat Algorithm*), sendo utilizadas ferramentas de computação paralela. Algumas dessas estruturas são:

- a) *Estratégia em Anel (Ring Strategy)*: nessa configuração, diferentes populações evoluem seus indivíduos em cada geração. Se a melhor solução de todas as populações não melhorar sua qualidade em um determinado número de iterações, as melhores soluções individuais são trocadas entre as populações. Essa estratégia é ilustrada na Figura 2.2 (a).
- b) *Estratégia Mestre-Escravo*: analogamente ao método cooperativo apresentado para o *PSO* em (NIU, ZHU e HE, 2007), a cada geração, diferentes subpopulações denominadas escravos evoluem seus indivíduos e passam suas melhores soluções para uma segunda instância denominada de mestre. Essa estrutura é ilustrada na Figura 2.2 (b).

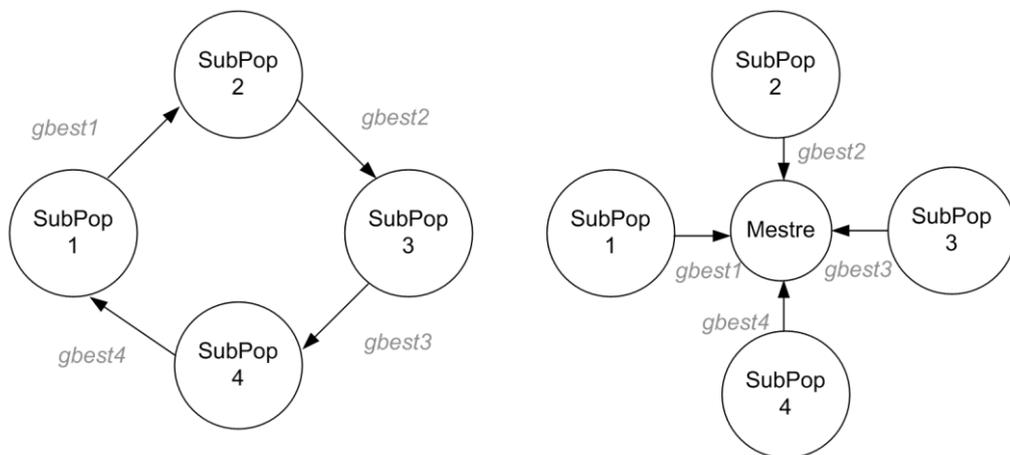


Figura 2.2 - Estrutura do algoritmo Cooperativo *Bat*: (a) Anel, (b) Mestre-Escravo.

- c) *Estrutura Anel-Mestre-Escravo*: consiste em um acoplamento entre as metodologias anteriores: a cada geração, diferentes subpopulações passam suas melhores soluções para o mestre. Caso a melhor solução global não seja melhorada em um número pré-determinado de iterações, ocorre a troca entre as melhores soluções das subpopulações. Essa estrutura é ilustrada na Figura 2.3.

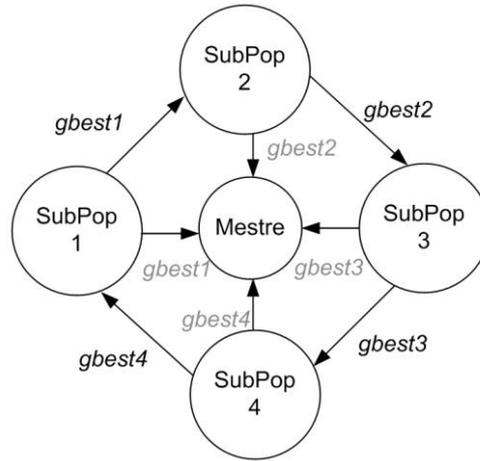


Figura 2.3 - Estrutura do algoritmo Cooperativo *Bat*: Anel-Mestre-Escravo.

Adicionalmente cita-se que é possível reiniciar a subpopulação caso a solução não melhore (convergência pré-matura por perda da diversidade da população).

2.8 THE NO FREE LUNCH THEOREM FOR OPTIMIZATION

Durante muitos anos a comunidade de pesquisa na área de otimização esteve focada na tentativa de desenvolver algoritmos universais, isto é, algoritmos robustos que resolveriam vários tipos diferentes de problemas com desempenho satisfatório.

Em 1997, Wolpert e Macready publicaram um artigo denominado "*No Free Lunch Theorems for Optimization*". Nessa publicação foi demonstrado para problemas mono-objetivos que: se um algoritmo A possui melhor desempenho que o algoritmo B para a solução de um dado problema, o algoritmo B possui um melhor desempenho que o algoritmo A em problemas diferentes. Em outras palavras, considerando vários tipos de problemas, os algoritmos A e B possuem, em média, o mesmo desempenho (WOLPERT e MACREADY, 1997) e (HO e PEPYNE, 2001).

Considerando que não existe um algoritmo universal que supere os demais para todos os problemas, os pesquisadores na área de otimização mudaram o foco de suas pesquisas: o objetivo passou a ser o desenvolvimento de algoritmos robustos para resolver um problema específico, com base no conhecimento prévio e nas características peculiares do problema sob análise.

Nesse sentido, uma linha de pesquisa que tem recebido bastante atenção na área de otimização tem sido o desenvolvimento de algoritmos populacionais híbridos, de forma a superar as desvantagens de cada algoritmo e unir as suas vantagens. A próxima seção trata do desenvolvimento de algoritmos híbridos para a solução de problemas mono-objetivos.

2.9 MÉTODOS BIOINSPIRADOS HÍBRIDOS PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MONO-OBJETIVOS

2.9.1 Classificação dos Algoritmos Híbridos

A hibridização de algoritmos populacionais possui o objetivo de superar as desvantagens e agrupar as vantagens individuais inerentes a cada algoritmo. A essa cooperação entre os algoritmos dá-se o nome de *Sinergia* (RAIDL, 2006).

Conforme (RAIDL, 2006), existem diferentes formas de classificar a hibridização. Algumas dessas formas são abaixo citadas:

- a) *Em relação ao tipo de Hibridização*: (i) dois algoritmos populacionais diferentes (ou um método populacional com uma metaheurística baseada em trajetória), (ii) um algoritmo populacional com um algoritmo específico associado ao problema que está sendo resolvido ou (iii) um algoritmo populacional com outro tipo de método de otimização (métodos de direção de busca, por exemplo);
- b) *Ordem da Execução*: (i) sequencial ou (ii) paralela;
- c) *Estratégia de Controle*: (i) integrativo ou (ii) colaborativo.

A classificação (c) se baseia nas seguintes definições:

- *Algoritmos Integrativos*: nessa classe, um algoritmo é considerado como subordinado (para execução de uma busca local na etapa de intensificação) e é

executado dentro de uma instância maior. Dentro dessa classe tem-se os *Algoritmos Meméticos*, que serão revisados adiante;

- *Algoritmos Colaborativos*: nessa classe, diferentes algoritmos trocam informações entre si. Entretanto, não existe uma relação de subordinação entre eles.

Em geral um algoritmo híbrido pode ser classificado de várias formas. Por exemplo, os *Algoritmos Meméticos*, que são algoritmos populacionais com um método específico interno para executar a busca local de uma forma mais eficiente, podem ser classificados como: Métodos Híbridos Populacionais Integrativos que podem usar tanto uma metaheurística quanto um método baseado em direção de busca para executar a busca local.

2.9.2 Visão Geral dos Algoritmos Híbridos

No item anterior, foi apresentada uma classificação geral dos algoritmos populacionais híbridos, conforme consta na literatura. Todavia, com base no levantamento bibliográfico feito pelo autor dessa tese, os algoritmos serão agrupados nas seguintes classes:

- a) *Classe 1*: Algoritmos Colaborativos que utilizam diferentes métodos baseados em população;
- b) *Classe 2*: Algoritmos Híbridos Integrativos que utilizam algoritmos baseados em população para executar uma busca global (exploração) e algoritmos baseados em direção de busca (direta ou usando derivadas) para a etapa de intensificação. A aplicação de métodos de trajetória para a intensificação também se enquadra nessa classe.
- c) *Classe 3*: Algoritmos Híbridos Integrativos que utilizam diferentes algoritmos baseados em população para executar uma busca global (exploração) e busca local (intensificação).

A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 apresentam uma revisão de algumas publicações focadas em métodos híbridos de otimização.

Tabela 2.1: Algoritmos híbridos das Classes 1 e 2.

	ALGORITMO 1	ALGORITMO 2		REFERÊNCIA
Colaborativo <i>Classe 1</i>	PSO	AG		(KAO e ZAHARA, 2008) (SHI, LIANG e LEE, 2005)
Integrativo <i>Classe 2</i>	<i>Exploração</i>	<i>Intensificação</i>		
	AG	Gradiente Descendente	Derivadas	(HANDOKO, KWOH e ONG, 2008)
	AG	Métodos dos Pontos Interiores		(KELNER, CAPITANESCU, <i>et al.</i> , 2008)
	PSO	Gradiente Descendente		(NOEL, 2012)
	PSO	Recozimento Simulado	Trajatória	(DA e XIURUN, 2005)
	AG	Hooke-Jeeves Nelder-Mead	Busca Direta	(CAPONIO, CASCELLA e NERI, 2007)
	PSO	Nelder-Mead		(FAN, LIANG e ZAHARA, 2004)

Tabela 2.2: Algoritmos híbridos da Classe 3.

	ALGORITMO 1	ALGORITMO 2	REFERÊNCIA
	<i>Exploração</i>	<i>Intensificação</i>	
Integrativo <i>Classe 3</i>	AG	micro-AG	(TAKAHASHI e MARTINS, 2004) (KAZARLIS, PAPADAKIS, <i>et al.</i> , 2001)

As Classes 2 e 3 podem ser agrupadas com o nome de *Algoritmos Meméticos*. Conforme (NERI e COTTA, 2012): "*Algoritmos Meméticos são metodologias de otimização baseadas em população que utilizam um método específico para o processo de busca local (intensificação)*".

De forma geral, em relação os métodos da *Classe 2*, baseados no uso de derivadas para a intensificação (busca local), deve-se citar que:

- i. os algoritmos bioinspirados possuem a vantagem de fornecer soluções de boa qualidade através de uma busca global, porém podem ter a convergência mais lenta;
- ii. os algoritmos baseados em derivadas da função objetivo possuem a vantagem de convergirem para ótimos locais com rapidez e a desvantagem de serem altamente sensíveis às condições iniciais e não fazerem uma busca global.

Embora possam apresentar resultados promissores, o desenvolvimento dos *Algoritmos Meméticos* deve seguir um processo criterioso. Na etapa de desenvolvimento as seguintes questões devem ser respondidas (KRASNOGOR e SMITH, 2005)(MOLINA, LOZANO e HERRERA, 2010) (LOZANO e GARCIA-MARTINEZ, 2010):

- i. qual o momento de se iniciar a busca local através de um algoritmo específico?;
- ii. quantas soluções do método populacional serão exploradas pela busca local?;

iii. por quanto tempo deve ser executada a busca local?

De forma geral, deve-se executar algumas gerações para que a população seja evoluída e bacias de atração (que possam ser exploradas em uma busca local) sejam identificadas. Depois deve-se acionar o processo de busca local (i) com base em um critério probabilístico ou (ii) com base em um número pré-especificado de gerações (BLUM e PUCHINGER, 2011) (NERI e COTTA, 2012) (BOSMAN, 2012). O processo *Busca Global & Busca Local* continua até que o número máximo de gerações seja alcançado.

Adicionalmente, questões associadas à manutenção da diversidade da população devem ser levadas em consideração, tal como é proposto em (SORENSEN e SEVAUX, 2006).

Por fim, de acordo com (BLUM e PUCHINGER, 2011) (BOSMAN, 2012), a pesquisa na área de algoritmos híbridos de otimização é um campo fértil para novas investigações. Observa-se que o acoplamento de métodos populacionais baseados em enxames com algoritmos baseados em derivadas foi pouco explorado na literatura.

2.10 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO

Esse capítulo apresentou importantes conceitos na área de otimização mono-objetivo. Diferentes classes de métodos foram tratados: algoritmos baseados na direção de busca (que usam derivadas e os de busca direta) e metaheurísticas (baseadas em trajetória e em população). Uma revisão dos algoritmos híbridos de otimização foi apresentada: foi constatado que esse campo de pesquisa é frutífero para novas investigações e que tem recebido atenção crescente da comunidade de pesquisa.

Adicionalmente foi feita uma apresentação detalhada dos métodos a serem utilizados nessa tese de doutorado: um método baseado em direção de busca (gradiente descendente) e dois métodos populacionais baseados na experiência de enxames: Otimização baseada em Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*) e Otimização baseada na Eco-localização de Morcegos (*Bat Algorithm* ou Algoritmo do *Bat*).

3 Controle para o Amortecimento de Oscilações

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta uma breve revisão dos principais conceitos relacionados ao problema de Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas Elétricos de Potência, os principais equipamentos de controle visando o amortecimento dos modos de oscilação críticos e as estruturas de controle empregadas na literatura técnica. Adicionalmente são apresentadas as técnicas de ajuste de controladores baseadas em controle clássico, controle robusto (ou moderno) e métodos de otimização paramétrica.

3.2 ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES

3.2.1 Conceituação

Nessa seção são apresentados, de forma sucinta, os conceitos básicos de estabilidade a pequenas perturbações, necessários ao entendimento desse capítulo. No Apêndice A são apresentados os principais aspectos sobre este tópico de uma forma mais aprofundada (incluindo as formulações matemáticas que foram utilizadas neste trabalho). Optou-se pela inclusão através de um apêndice por se tratar de um tema difundido na literatura.

A Estabilidade a Pequenas Perturbações (ou a Pequenos Sinais) corresponde à habilidade do SEP em manter-se em sincronismo depois de uma pequena perturbação (de carga ou geração). A análise desse tipo de estabilidade é realizada utilizando-se equações linearizadas considerando-se um determinado ponto de operação (KUNDUR, 1994).

3.2.2 Modelagem Dinâmica do Sistema Elétrico de Potência

A dinâmica de um SEP pode ser descrita por um conjunto de equações não lineares algébricas e diferenciais conforme apresentado a seguir:

$$\dot{x} = f(x, z, u) \quad (3.1)$$

$$0 = g(x, z, u) \quad (3.2)$$

$$y = h(x, z, u) \quad (3.3)$$

em que $x \in \mathfrak{R}^n$ é o vetor de variáveis de estado, $z \in \mathfrak{R}^m$ é o vetor de variáveis algébricas, $u \in \mathfrak{R}^p$ é o vetor de variáveis de entrada do sistema e $y \in \mathfrak{R}^q$ é o vetor de variáveis de saídas. A equação (3.1) denota as equações diferenciais associadas aos geradores, controladores, cargas e dispositivos dinâmicos. A equação (3.2) corresponde às equações algébricas que definem o sistema de transmissão. As equações que definem as variáveis de saída do sistema (potência elétrica, corrente elétrica, frequência, tensão nas barras, etc) são dadas em (3.3).

As equações anteriores podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio (x_0, z_0, u_0) e, após manipulações algébricas para a eliminação das variáveis z , tem-se um novo sistema de equações definido em (3.4)¹⁴.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.4)$$

em que A é a matriz de estados ($n \times n$), B é a matriz de entrada ($n \times p$), C é a matriz de saídas ($q \times n$) e D é a matriz de transmissão direta ($q \times p$).

As matrizes A , B , C e D representam o sistema linearizado em torno de um ponto de equilíbrio, na forma de espaço de estados e no domínio do tempo.

Conforme apresentado no Apêndice A, as técnicas de Análise Modal são empregadas para a análise da estabilidade a pequenas perturbações. A estabilidade do sistema pode ser avaliada a partir dos autovalores da matriz de estados A . Cada autovalor λ_i possui autovetores à direita (ϕ_i) e à esquerda (ψ_i) (vide seção A.6 do Apêndice A).

Também denominados de *mode-shapes*, os autovetores à direita ϕ_i fornecem informações importantes na participação de uma máquina ou grupo de máquinas em um modo de oscilação específico. Por exemplo, quando se estuda os desvios de velocidade do rotor ($\Delta\omega$) de todos os geradores, e concentramos a atenção no comportamento de determinado modo de oscilação, tem-se o que se denomina *mode-shape de velocidade*.

¹⁴ Considerando as equações linearizadas, uma notação matematicamente rigorosa seria: $\Delta\dot{x}(t) = A\Delta x(t) + B\Delta u(t)$ e $\Delta y(t) = C\Delta x(t) + D\Delta u(t)$. Entretanto, por questões de simplicidade o índice Δ será desconsiderado e a indicação do domínio do tempo (t) será omitida.

Um autovalor complexo λ_i é um número com parte real e imaginária conforme a equação (3.5). Cada autovalor está associado a um determinado modo de oscilação e possui um fator de amortecimento ξ_i e uma frequência de oscilação f_i , conforme apresentado na equação (3.6) e (3.7).

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (3.5)$$

$$\xi_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3.6)$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (3.7)$$

3.2.3 Modos de Oscilação

Cada autovalor λ_i corresponde a um modo de oscilação específico. A natureza do modos de oscilação (eletromecânico, excitação, etc) pode ser identificada através dos *fatores de participação* definidos no Apêndice A. Quando os maiores fatores de participação relativos a um modo λ_i estão associados aos ângulos dos geradores e velocidades angulares, diz-se que o modo é de natureza eletromecânica. Caso contrário, se estiverem associados às tensões internas e tensões de campo, diz-se que o modo de oscilação é de excitação.

Os modos de oscilação podem ser avaliados de acordo com a frequência de oscilação f_i (PAL e CHAUDHURI, 2005): intra-planta, local, inter-área, modos de controle e modos torsionais.

Abaixo são descritos os modos de interesse dessa tese:

- **modos intra-planta** (2 a 3 Hz): um ou mais geradores oscilam contra outro de uma mesma planta;
- **modos locais** (1 a 2 Hz): um gerador (ou grupo de geradores) oscila contra o resto do sistema. Também é caracterizado como um modo local as oscilações entre unidades geradoras pertencentes à mesma área do sistema;
- **modos inter-área** (0,1 a 0,7 Hz): são observados quando um grupo de geradores localizados em uma área oscila contra outro grupo de geradores localizados em outra área do sistema.

3.2.4 Torques de Sincronismo e de Amortecimento

Na ocorrência de um distúrbio, alguns geradores irão acelerar ou desacelerar, devido ao desequilíbrio entre os torques elétrico e mecânico nas máquinas síncronas. O torque elétrico total desenvolvido pela máquina pode ser decomposto em duas parcelas: o torque de sincronização $\Delta T_s = K_s \cdot \Delta\delta$ (em fase com o desvio angular) e o torque de amortecimento $\Delta T_d = K_d \cdot \Delta\omega$ (em fase com o desvio de velocidade), conforme a equação (3.8).

$$\Delta T_e = K_s \cdot \Delta\delta + K_d \cdot \Delta\omega \quad (3.8)$$

Na equação (3.8) K_s é referido como coeficiente de *torque sincronizante* e K_d é referido como coeficiente de *torque de amortecimento*. Para que ocorra a estabilidade é necessário que ambos os coeficientes de torque sejam positivos:

- a) A ausência de torque de amortecimento conduz a um problema de instabilidade oscilatória, sendo solucionado com o uso de estabilizadores de sistemas de potência;
- b) A ausência de torque sincronizante conduz a um problema de instabilidade monotônica (aperiódica).

No passado, com o objetivo de reforçar os torques de sincronização e melhorar a estabilidade transitória dos sistemas elétricos, foram empregados os sistemas de excitação estáticos de alto ganho e baixa constante de tempo. Entretanto, os altos ganhos dos sistemas de excitação deterioraram os torques de amortecimento nos geradores síncronos (DEMELLO e CONCORDIA, 1969).

Nesse contexto, em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969) foi proposto o uso de Estabilizadores de Sistemas de Potência - ESP (*Power System Stabilizer- PSS*) com o objetivo de se inserir torque de amortecimento para amortecer as oscilações. Naquela publicação, os estabilizadores consistiam de um controlador com blocos de ganho e de compensação de fase cuja entrada era a velocidade angular do gerador e a saída do controlador era um sinal de tensão a ser inserido na entrada do sistema de excitação (tensão de referência). Dessa forma, a função do *PSS* é modular a tensão de referência do sistema de excitação visando o amortecimento de oscilações eletromecânicas (ROGERS, 2000).

3.3 AMORTECIMENTO DOS MODOS DE OSCILAÇÃO

Nas seções anteriores foi visto que os sistemas elétricos estão sujeitos às oscilações eletromecânicas que devem ser devidamente amortecidas, uma vez que não podem ser eliminadas. Caso contrário, essas oscilações podem causar desgastes mecânicos nas unidades geradoras, limitar a potência elétrica transferida entre áreas e em situações extremas, causar a interrupção do fornecimento de energia, como relatado em (PAL e CHAUDHURI, 2005).

Também foi relatado que as oscilações podem ser amortecidas através de controladores de amortecimento. Entretanto, considerando-se as naturezas distintas das oscilações (locais e inter-área), diferentes controladores e filosofias de projeto devem ser empregadas.

3.3.1 Modos de Oscilação Local

São modos na faixa de 1 a 2 Hz e consistem em um gerador (ou grupo de geradores) oscilando contra o resto do sistema. Também pode ser caracterizado como um modo local, as oscilações entre unidades geradoras pertencentes à mesma área do sistema.

Para o amortecimento de oscilações locais, os estabilizadores de sistemas de potência são bastante efetivos e diferentes sinais de entrada (amostrados localmente) podem ser usados no controlador, como será visto adiante.

Conforme apresentado em (MARTINS, TARANTO e HAUER, 2000) e (OLIVEIRA, 2006), em grande parte dos casos, o procedimento adotado na indústria consiste em um ajuste sequencial baseado no modelo *Máquina Barra Infinita* (SMBI). Dessa forma é feito o ajuste não simultâneo dos estabilizadores, o que pode provocar interações indesejadas entre estes.

Assim, os estabilizadores projetados de forma não simultânea são efetivos no amortecimento dos modos de oscilação local associados às unidades geradoras onde estão instalados.

De acordo com (LARSEN e SWANN, 1981a; LARSEN e SWANN, 1981b), o amortecimento dos modos inter-área também pode ser melhorado através dos estabilizadores instalados nos geradores que participem da oscilação associada a esses modos.

3.3.2 Modos de Oscilação Inter-área

São modos de oscilação na frequência de 0,1 a 0,7 Hz e são observados quando um grupo de geradores localizados em uma área oscila contra outro grupo de geradores localizados em outra área do sistema.

O projeto de estabilizadores usando o modelo *Máquina Barra Infinita* não captura os efeitos dos modos inter-área. Assim, o ajuste de controladores para o amortecimento desses modos deve ser realizado utilizando-se a modelagem multimáquinas do sistema elétrico.

Uma das razões pelas quais os estabilizadores baseados somente nos sinais locais não serem eficientes para o amortecimento de modos inter-área é a baixa observabilidade desses modos nesses sinais.

Existem algumas estratégias específicas para o amortecimento dos modos inter-área, entre as quais cita-se:

- a. *Projeto Coordenado (simultâneo) de estabilizadores*: nesse caso consegue-se projetar os controladores de forma que tanto os modos de oscilação locais quanto os inter-área sejam corretamente tratados;
- b. *Uso de dispositivos FACTS¹⁵ equipados com estabilizadores (Power Oscillation Damper- POD)*: através desses dispositivos consegue-se amortecer as oscilações eletromecânicas de natureza inter-área. A localização desses equipamentos no sistema pode ser determinada através dos resíduos da função de transferência conforme (MARTINS e LIMA, 1989a). No caso de dispositivos série como o *TCSC (Thyristor Control Series Compensators)* o sinal local de entrada do controlador pode ser, por exemplo, a potência elétrica no ramo em que o equipamento será instalado, isto porque tal sinal possui maior observabilidade do modo inter-área em questão;

¹⁵ Dispositivos *FACTS (Flexible AC Transmission Systems)* são equipamentos baseados em eletrônica de alta potência. Podem ser equipamentos série, shunt ou uma composição entre eles. A função principal desses equipamentos é o controle de tensão em barras e do fluxo de potência em ramos do sistema. Entretanto, pode-se instalar controladores de amortecimento (denominados de *Power Oscillation Damper- POD*) nesses equipamentos com o objetivo de amortecer as oscilações (MONDAL, CHAKRABARTI e SENGUPTA, 2014).

- c. *Estrutura de Controle Hierárquico*: consiste em uma estrutura de controle que utiliza sinais locais e remotos para modular a tensão de referência dos geradores. O uso de sinais remotos, com maior observabilidade em relação aos modos inter-área, permite o projeto de controladores mais eficientes para atuarem nesses modos.

Uma observação deve ser feita quanto à afirmação de que a metodologia baseada no sistema *Máquina Barra Infinita* não é adequada para o projeto de controladores visando o amortecimento de modos inter-área. Esta afirmação é associada à modelagem clássica desse sistema (parâmetros fixos). Recentemente, em (DE MARCO, MARTINS e FERRAZ, 2013), foi proposta uma metodologia baseada no sistema *Máquina Barra Infinita*, a qual utiliza um *sistema sintético* para conectar o gerador à barra infinita. Os parâmetros desse *sistema sintético* são ajustados para capturar os efeitos dos modos de oscilação de natureza local, intra-planta e inter-área. Entretanto, os autores citam a necessidade de melhorar a metodologia, incluindo-se os limites físicos dos parâmetros de controle.

Nesse ponto, torna-se necessário revisar o conceito de *Caminhos Dominantes associados aos modos de oscilação Inter-área (Dominant Inter-Area Oscillation Paths)* (VANFRETTI e CHOW, 2010). Esse conceito vem do termo "Caminhos de Interação", definidos como um grupo de linhas de transmissão, barras e controladores que os geradores utilizam para trocar energia durante as oscilações.

Quando o modo de oscilação sob análise é do tipo inter-área, tem-se os *Dominant Inter-Area Oscillation Paths*, definidos como caminhos no sistema que contém as maiores informações sobre o modo analisado. Conforme (CHOMPOOBUTRGOOL e VANFRETTI, 2013), os sinais associados a esses caminhos possuem maior observabilidade de um modo inter-área e podem ser utilizados como entrada nos controladores para o amortecimento das oscilações associadas. Em (CHOMPOOBUTRGOOL e VANFRETTI, 2013) são propostos algoritmos para a identificação desses caminhos: (i) a partir do modelo matemático do sistema e (ii) a partir de medições provenientes de Unidades de Medição Fasorial Sincronizada - UMFS¹⁶ (fasores de tensão e corrente). Em (CHOMPOOBUTRGOOL e VANFRETTI, 2014;

¹⁶ Uma Unidade Medição Fasorial Sincronizada - UMFS (do inglês *Phasor Measurement Unit - PMU*) é o equipamento responsável por medir fasores de tensão e corrente em pontos geograficamente distantes considerando uma referência de tempo comum. As UMFS são as componentes principais dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS), cujos conceitos são apresentados em (PHADKE, 2002) e no Apêndice B dessa tese.

CHOMPOOBUTRGOOL, 2015) são investigadas estruturas de controle que utilizam sinais remotos medidos pelas UMFS instaladas nos *Dominant Paths*.

3.4 REQUISITOS ASSOCIADOS AOS CONTROLADORES

Nessa seção são apresentados alguns requisitos que devem ser observados durante a fase de projeto dos controladores de amortecimento para sistemas de potência.

3.4.1 Ganho Nulo em Regime Permanente

O ganho nulo em regime permanente para os controladores de amortecimento é um requisito que deve ser atendido para evitar que os controladores atuem após o amortecimento das oscilações (OLIVEIRA, 2006). Caso ocorra a atuação do controlador em regime permanente, a tensão de referência do regulador de tensão será modificada. Uma forma de garantir o ganho nulo em regime permanente é a inclusão de um filtro denominado *washout* na função de transferência do estabilizador conforme apresentado na equação (3.9).

$$Wash(s) = \frac{s \cdot T_w}{1 + s \cdot T_w} \quad (3.9)$$

A escolha do valor da constante de tempo T_w não é crítica e pode ser feita conforme indicado em (KUNDUR, 1994; PAL e CHAUDHURI, 2005): 1 a 2 segundos para amortecimento de modos locais e 10 a 20 segundos para o amortecimento de modos inter-área.

3.4.2 Realimentação Dinâmica de Saídas

De forma geral, o projeto de controladores considerando realimentação pode ser feito considerando a seguinte classificação:

- i. realimentação de estados ou de saídas;
- ii. realimentação estática ou dinâmica.

O projeto de controladores utilizando a realimentação de estados necessita que todos os estados do sistema estejam disponíveis (por medição ou estimação), o que não é viável em plantas de grande porte como os sistemas elétricos de potência. Uma das desvantagens é que deve-se projetar controladores cuja ordem é igual a da planta.

Nesse contexto, a realimentação utilizando as variáveis de saída (variáveis mensuráveis) do modelo de espaço de estados é a mais empregada.

A realimentação de saída pode ser estática ou dinâmica. A realimentação estática de saídas consiste em determinar um ganho estático para estabilizar o sistema, o que é, em muitos casos, insuficiente para a estabilização.

Dessa forma, utiliza-se a realimentação dinâmica de saídas que, de forma geral, pode ser entendida como uma associação entre estágios de ganho e de compensação de fase. Essa abordagem é a mais robusta, pois acompanha as variações de frequência do sistema. Adicionalmente, nas aplicações práticas (DILL, 2013), empregam-se controladores cuja ordem é menor que a da planta.

Os controladores cuja ordem é menor que a da planta possuem uma vantagem em relação à implementação prática. Em contrapartida, conforme verificado na literatura (TROFINO, 2000), o projeto de tais controladores utilizando-se métodos de controle robusto (ou moderno) corresponde a um problema de otimização não convexo de difícil solução.

3.4.3 Esforço do Controle

O problema do projeto de controladores visando a estabilização do SEP pode ser entendido como encontrar um controlador que mova os pólos (autovalores) para o semi-plano esquerdo complexo. Adicionalmente, quanto mais distante os pólos estiverem do eixo imaginário, mais rápida será a resposta transitória.

O projeto de controladores visando mover os pólos para uma posição mais distante do eixo imaginário pode ser feito considerando a *minimização da abscissa espectral* (BURKE, LEWIS e OVERTON, 2002; DILL, 2013). A *abscissa espectral* é definida como sendo a maior parte real de todos os autovalores da matriz de estados em malha fechada (que considera a planta e o controlador). Nesse caso, pode-se dizer que os pólos (ou modos ou autovalores) estão sendo acelerados (TROFINO, 2000).

A energia despendida pelo controlador para acelerar os modos do sistema pode ser interpretada como o esforço do controle. Quanto maior a distância entre os modos e o eixo

imaginário, maior será o esforço realizado pelo controlador. Nesse sentido, deve-se encontrar um compromisso entre o esforço do controle e a aceleração dos modos de oscilação, tendo em vista a melhoria da resposta transitória.

Na teoria de controle, a minimização do esforço de controle está associada à minimização da norma H_2 (PAL e CHAUDHURI, 2005), "*definida como a energia de saída de um sistema em resposta a um distúrbio na entrada desse*". De forma geral, ganhos baixos para o controlador estão associados a um esforço de controle reduzido.

A norma H_2 pode ser alternativamente definida como a energia da resposta ao impulso, que é a energia do sinal da saída. Dessa forma, a norma H_2 só é definida para sistemas estáveis (sistemas instáveis apresentam resposta impulsiva infinita) (TROFINO, 2000).

A seguir é apresentada uma formulação matemática da norma H_2 . Entretanto, o leitor interessado em uma formulação matemática mais formal e rigorosa deve verificar a referência (PAL e CHAUDHURI, 2005).

Considere uma matriz de transferência do sistema $G_H(s)$ em malha fechada. A norma H_2 do sistema $\|G_H\|_2$ é definida como apresentado na equação (3.10).

$$\|G_H\|_2 \triangleq \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \text{Traço}([G_H(j\omega)]^* \cdot [G_H(j\omega)]) \cdot d\omega} \quad (3.10)$$

em que $[G_H(j\omega)]^*$ denota a transposta conjugada da matriz $G_H(j\omega)$ e *Traço* corresponde ao traço de uma matriz, definido como a soma dos elementos da diagonal principal.

Na literatura existem várias formas de calcular computacionalmente a norma H_2 . As plataformas computacionais comumente usadas no projeto e análise de sistemas de controle, como o MATLAB[®], possuem funções para o cálculo da norma H_2 .

3.4.4 Redução de Ordem

Um sistema elétrico de potência representado em espaço de estados, possui muitas variáveis de estados. Embora não seja um requisito a ser atendido em todas as metodologias de projeto, a redução de ordem do sistema possui vantagens e desvantagens (MOORE, 1981).

Como vantagens cita-se:

- i. no caso de metodologias que utilizem informações dos autovalores em malha fechada (como a otimização do fator de amortecimento nas metodologias baseadas em otimização paramétrica usando os algoritmos bioinspirados), calcula-se um número menor de autovalores, reduzindo o esforço computacional, como sugerido em (MARTINS, TARANTO e HAUER, 2000);
- ii. quando o objetivo é o amortecimento dos modos inter-área, pode-se usar um modelo de ordem reduzida que capture somente as dinâmicas associadas à esses modos (SANCHEZ-GASCA e CHOW, 1996);
- iii. no caso de metodologias baseadas em controle robusto (ou moderno) que serão definidas adiante (como *LMIs*), a redução de ordem permite a obtenção de controladores de ordem reduzida (DILL, 2013). No caso de outras metodologias baseadas em controle robusto (como *LQR*) as técnicas de redução de ordem permitem maior facilidade na determinação das matrizes de pesos (DOTTA, 2009);

Como desvantagem da redução de ordem da planta, pode-se perder informações importantes de alguns estados do sistema.

3.5 ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.5.1 Conceituação e Estrutura Física

Os Estabilizadores de Sistemas de Potência são controladores instalados nos geradores síncronos para atuar no circuito de campo e modular a tensão de saída com o objetivo de amortecer as oscilações (principalmente de natureza local). Os dispositivos *Power Oscillation Damper- POD* instalados nos equipamentos *FACTS* são controladores que fornecem uma ação suplementar de amortecimento para oscilações (principalmente de natureza inter-área). Nesta tese, os dispositivos *PSS* e *POD* são referidos como Controladores de Amortecimento de Sistemas de Potência.

A estrutura convencional de um ESP¹⁷ é apresentada na Figura 3.1.

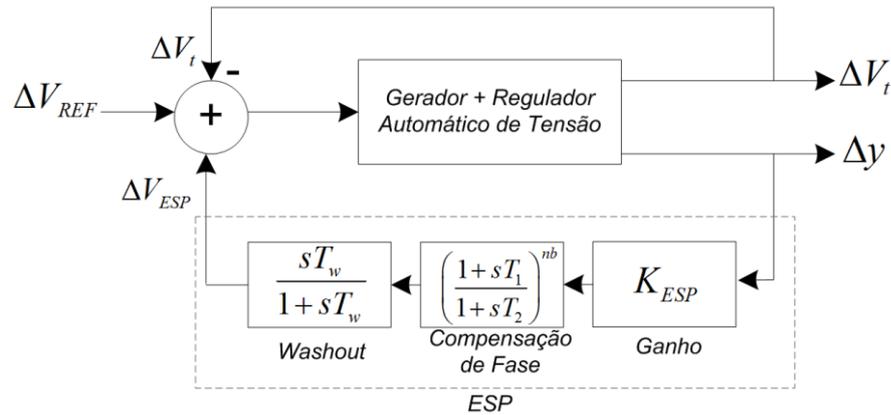


Figura 3.1 - Estrutura do ESP convencional.

Na Figura 3.1, tem-se uma representação esquemática de um gerador síncrono equipado com um regulador de tensão (que atua no sentido de manter a tensão terminal no valor de referência) e um estabilizador. As grandezas são: tensão terminal da máquina (V_t), tensão de referência do regulador de tensão (V_{REF}), o sinal adicional estabilizador (V_{ESP}) e um sinal terminal y utilizado como entrada do estabilizador. O ESP é composto por três estágios: (1) um ganho, (2) um estágio de compensação de fase (com nb blocos: cada bloco pode fazer uma compensação máxima de 60 graus conforme (OGATA, 2011)) e (3) um filtro *washout* para evitar que a tensão terminal seja modificada em regime permanente.

O objetivo do projeto de estabilizadores é ajustar os parâmetros K_{ESP} , T_1 , T_2 e nb com o objetivo de se amortecer as oscilações. Quanto ao sinal terminal y utilizado como entrada do estabilizador, existem várias opções que serão apresentadas a seguir.

3.5.2 Tipos de Sinais Físicos

Na literatura, os principais sinais usados na entrada do ESP são (MONDAL, CHAKRABARTI e SENGUPTA, 2014): (a) velocidade angular, (b) frequência terminal, (c) potência elétrica e (d) potência de aceleração. Com o advento dos Sistemas de Medição

¹⁷ Em (KAMWA, GRONDIN e TRUDEL, 2005) são apresentadas estruturas de estabilizadores modernos que estão fora do escopo dessa tese.

Fasorial Sincronizada, sinais de magnitude e ângulo de tensões nodais também podem ser utilizados (DOTTA, 2009; CHOMPOOBUTRGOOL, 2015).

A velocidade angular vem sendo largamente utilizada desde a década de setenta (LARSEN e SWANN, 1981b). A desvantagem do uso desse sinal está associada aos efeitos degradantes causados por oscilações torcionais. Esse efeito é importante quando unidades térmicas são consideradas. As unidades térmicas possuem uma complexa estrutura mecânica associada ao eixo do rotor. Para evitar problemas com modos torcionais, filtros são instalados. É o sinal mais citado na literatura técnica (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009).

Os estabilizadores baseados no sinal de frequência elétrica, tais como os baseados no sinal de velocidade angular, também possuem a desvantagem de necessitarem de filtros para os modos torsionais quando são utilizados em unidades térmicas. A grande vantagem, quando comparado com o sinal de velocidade, é uma maior sensibilidade às oscilações do rotor (KUNDUR, 1994; MONDAL, CHAKRABARTI e SENGUPTA, 2014).

O sinal baseado na potência elétrica é menos afetado pelos modos torsionais (logo o filtro pode ser eliminado). Ao contrário dos sinais anteriormente descritos, a realimentação do estabilizador é negativa. Como resultado de uma redução súbita de frequência do sistema e da consequente resposta rápida do regulador de velocidade, obtém-se um rápido aumento na potência de saída da unidade. Devido à realimentação negativa do ESP, a tensão do sistema tende a ser reduzida, agravando o problema de estabilidade (LARSEN e SWANN, 1981c).

Os estabilizadores baseados em potência acelerante são mais vantajosos quando comparados com os baseados nos sinais de velocidade e potência elétrica. Em relação ao sinal de velocidade, este é menos afetado pelos modos torsionais. Com relação à potência elétrica, estes possuem a informação adicional da potência mecânica, o que reduz os problemas anteriormente descritos.

3.6 DISPOSITIVOS *FACTS*

Embora não sejam de interesse específico dessa tese, os dispositivos *FACTS* são sucintamente apresentados. O conceito de dispositivos *FACTS* foi introduzido por Hingorani em 1988 (HINGORANI, 1988) e pode ser definido como "*um sistema baseado em eletrônica de potência e outros equipamentos estáticos que permite o controle de um ou mais parâmetros de um sistema em corrente alternada para aumentar a controlabilidade e a*

capacidade de transferência de potência " (MONDAL, CHAKRABARTI e SENGUPTA, 2014). Os dispositivos *FACTS* podem ser divididos em duas categorias: de primeira e segunda geração.

Os equipamentos *FACTS* de primeira geração são caracterizados por serem constituídos por reatores chaveados a tiristores. Através do controle adequado sobre os disparos dos tiristores de alta potência, obtém-se o valor necessário de injeção de potência reativa especificada para o sistema. Como exemplos de equipamentos *FACTS* da primeira geração cita-se:

- *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*;
- *Static Var Compensator (SVC)*.

Os dispositivos *FACTS* de segunda geração, em vez de utilizarem reatores chaveáveis, são compostos por conversores fonte de tensão. Como exemplos de equipamentos *FACTS* da segunda geração cita-se:

- *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*;
- *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)*;
- *Unified Power Flow Controller (UPFC)*;
- *Interline Power Flow Controller (IPFC)*.

Os dispositivos *FACTS* fazem o controle da tensão e/ou do fluxo de potência de uma forma flexível. Adicionalmente, estes equipamentos podem fornecer amortecimento para as oscilações eletromecânicas quando são equipados com dispositivos do tipo *Power Oscillation Damper (POD)*, que são controladores com a estrutura similar aos estabilizadores descritos anteriormente. Nesse caso, o dispositivo *POD* fornece um sinal adicional suplementar para a malha de controle dos dispositivos *FACTS* visando amortecer as oscilações (FURINI e ARAUJO, 2008).

Uma revisão detalhada da aplicação dos dispositivos *FACTS-POD* para o amortecimento de oscilações pode ser obtida em (MONDAL, CHAKRABARTI e SENGUPTA, 2014).

3.7 REQUISITOS DE PROJETO

3.7.1 Coordenação

Conforme (MARTINS, TARANTO e HAUER, 2000) a coordenação entre as diversas fontes de amortecimento evita a interação indesejada entre os controladores.

Como exemplo, suponha que o ganho de um estabilizador instalado em um dispositivo *FACTS* seja ajustado de forma a melhorar o amortecimento de um modo inter-área. Pode acontecer que, ao aumentar o ganho associado ao controlador do dispositivo *FACTS*, o amortecimento de algum outro modo seja deteriorado. Se o modo cujo amortecimento foi prejudicado estiver sendo amortecido por um estabilizador instalado em um determinado gerador, pode-se interpretar essa situação como uma interação entre os estabilizadores do dispositivo *FACTS* e do gerador em questão.

Para evitar as interações indesejadas, os controladores devem ser projetados de forma simultânea, em um procedimento denominado de *Ajuste Coordenado*.

Entretanto em (DOTTA, 2009) é ressaltado que existe uma restrição prática a ser considerada no problema de ajuste coordenado, pois é de difícil implementação prática. Isso se deve ao fato dos estabilizadores estarem distribuídos ao longo do sistema e serem de propriedade de diferentes empresas. No caso de um ajuste rápido (tempo real) ser necessário, a coordenação pode não ser possível, devido ao tempo para a solicitação de ajuste ao agente proprietário do gerador e a disponibilidade da equipe técnica para efetuar as alterações dos parâmetros de controle.

3.7.2 Robustez

3.7.2.1 Conceituação

Sabe-se que as condições operativas em um sistema elétrico de potência variam ao longo do dia: (i) devido às variações de carga e geração e (ii) devido às variações topológicas (como entrada e saída das linhas de transmissão e demais equipamentos).

Nesse sentido, o controlador projetado deve apresentar um desempenho satisfatório para as várias condições operativas. Essa característica denomina-se *robustez do controle*. Na

literatura técnica existem diferentes abordagens para o projeto robusto de controladores. Algumas dessas abordagens serão apresentadas a seguir:

- a. projeto considerando múltiplos cenários ou múltiplas condições operativas;
- b. projeto utilizando conceitos de pseudo-espectro;
- c. sensibilidade de autovalores.

Em geral o projeto de controladores robustos deve ser realizado considerando-se um critério de desempenho mínimo (fator de amortecimento ou tempo de resposta, por exemplo). Isso porque o projeto com maior robustez pode ser aquele com pior desempenho.

3.7.2.2 Projeto considerando Múltiplos Cenários

Essa abordagem consiste em considerar diferentes condições operativas na fase de projeto. Especifica-se uma lista de cenários nos quais o sistema possui maior probabilidade de operar (variações de carga, de geração e de topologia) e realiza-se o projeto considerando tais pontos de operação: o controlador deve apresentar desempenho satisfatório em todos eles.

Nesse caso, deseja-se projetar o controlador visando a otimização de um critério de desempenho (como o fator de amortecimento) considerando várias condições operativas (DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000; FERRAZ, 2002).

3.7.2.3 Projeto considerando conceitos de Pseudo-espectro

O uso do conceito de pseudo-espectro no projeto de controladores de amortecimento de sistemas elétricos de potência foi proposto em (DILL e SILVA, 2012).

O pseudo-espectro pode ser interpretado como uma medida da variação dos autovalores quando um sistema é perturbado. Conforme (DILL, 2013), o pseudo-espectro é derivado do espectro¹⁸ de matrizes. Na teoria de controle robusto é importante saber se uma matriz de estados A é robusta, isto é, se mantém-se estável para um conjunto de perturbações e variações paramétricas. Neste caso o espectro dos autovalores de A pode não ser um indicador suficiente para avaliar as propriedades dinâmicas da matriz A (mesmo que essa

¹⁸ O espectro é definido como o conjunto de todos os autovalores.

esteja associada a um sistema estável). Outras matrizes próximas de A , obtidas a partir de perturbações de máxima magnitude igual a ε , podem apresentar autovalores instáveis. No pseudo-espectro consideram-se as máximas perturbações admissíveis ε para se avaliar a estabilidade.

Uma função que pode ser utilizada é a *abscissa pseudo-espectral* (a ser minimizada) definida pela maior parte real de todos os elementos do pseudo-espectro da matriz de estados em malha fechada, considerando perturbações de máxima magnitude igual a ε .

3.7.2.4 Sensibilidade de Autovalores

A robustez de um controlador pode ser avaliada em função da sensibilidade dos autovalores em malha fechada diante de perturbações. Conforme (DILL, 2013), sistemas mal condicionados tendem a ser mais sensíveis às variações paramétricas e perturbações; são, portanto, menos robustos. A sensibilidade dos autovalores do espectro (conjunto dos autovalores) é definida pelo condicionamento numérico¹⁹ da matriz de estados em malha fechada. Autovalores com baixa sensibilidade apresentam melhores propriedades de robustez.

Assim, pode-se minimizar a sensibilidade dos autovalores com o objetivo de se obter controladores robustos. Ressalta-se que o projeto deve ser realizado considerando-se um critério de desempenho mínimo.

3.8 MODELAGEM DO CONTROLE

Considere a modelagem do sistema de potência em malha aberta (sem a incorporação dos controladores) dada pela equação (3.4). Considere ainda que o controlador possa ser representado por uma modelagem em espaço de estados dada pela equação (3.11).

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c u_c \\ y_c &= C_c x_c + D_c u_c \end{aligned} \tag{3.11}$$

¹⁹ Matrizes normais são mais robustas, pois apresentam um número de condicionamento próximo da unidade. Quanto mais mal condicionado um sistema é, maior é o seu número de condicionamento.

em que $x_c \in \mathfrak{R}^{n_c}$ é o vetor de variáveis de estado do controlador, $u_c \in \mathfrak{R}^q$ é o vetor de entradas dos controladores (saídas da planta) e $y_c \in \mathfrak{R}^p$ é o vetor de saídas dos controladores (entradas da planta). As matrizes da formulação em espaço de estados são A_c , B_c , C_c e D_c .

Após a incorporação dos controladores, a matriz de estados em malha fechada será dada pela equação (3.12).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B \cdot D_c \cdot C & B \cdot C_c \\ B_c \cdot C & A_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.9 ESTRUTURAS DE CONTROLE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Nessa seção são apresentadas as estruturas de controle em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) comumente citadas na literatura técnica. De forma geral, as estruturas são divididas de acordo com o sinal utilizado na entrada do controle: local ou remoto.

3.9.1 Controle Descentralizado

Nesse tipo de estrutura cada controlador é alimentado por um sinal local, coletado nos terminais da máquina síncrona na qual está alocado. O sinal de controle é processado localmente (CHOW e SANCHEZ-GASCA, 2000). O ajuste desse tipo de controle pode ser coordenado (quando todos os controladores são simultaneamente ajustados) e não coordenado (o ajuste de cada controlador é feito separadamente).

Bastante utilizada na indústria, essa estrutura é efetiva para o amortecimento de modos de oscilação local. Quando o ajuste coordenado é realizado, essa estrutura pode amortecer alguns modos de oscilação inter-área.

3.9.2 Controle Centralizado

Em geral, o controle centralizado é situado em um centro de operação ou subestação e consiste de uma estrutura de controle capaz de otimizar o desempenho do sistema de forma global. O controle centralizado utiliza sinais remotos (um sinal ou múltiplos sinais) e tem o objetivo de amortecer os modos inter-área bem como os locais (WU, TSAKALIS e HEYDT,

2004). Uma vez processados, os sinais são enviados às plantas (geradores). Ressalta-se que os tempos de atraso dos sinais (na recepção e no envio) devem ser considerados na etapa do projeto.

A desvantagem dessa estrutura é que se um canal de transmissão de dados for perdido, o gerador associado fica sem o sinal de controle, degradando a estabilidade do sistema (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009).

3.9.3 Controle Quase-Descentralizado

Nesse tipo de estrutura de controle, sinais locais e remotos são utilizados para alimentar os controladores. Uma característica dessa estrutura é que os sinais locais e remotos são processados localmente, isto é, na usina do gerador associado (MARINI, 2005; DILL e SILVA, 2012). Na presença de sinais remotos, os tempos de atraso na recepção do sinal devem ser considerados no projeto.

3.9.4 Controle Hierárquico

A estrutura de controle hierárquico é uma combinação da estrutura descentralizada com a centralizada e visa o amortecimento de modos locais e inter-área. Os sinais remotos obtidos por Unidades de Medição Fasorial Sincronizadas alimentam os estabilizadores centrais e os sinais estabilizantes são enviados para a planta. Na planta, os sinais do controle central são combinados com os sinais do controlador local e enviados ao sistema de excitação da máquina (ZHANG e BOSE, 2008; DOTTA, SILVA e DECKER, 2009; CÁRDENAS, 2011).

Essa estrutura apresenta maior robustez, uma vez que no caso de perda do canal de transmissão do sinal central, a planta possui o controle local que garante um amortecimento mínimo para o sistema.

Outra vantagem desse tipo de controle é que se empresas diferentes operarem as diferentes plantas do sistema, cada empresa pode ajustar seu controle local de forma

independente. Por fim, o controle central seria ajustado por um agente independente visando obter um amortecimento de oscilações benéfico para todas as empresas.

A Figura 3.2 ilustra as estruturas de controle anteriormente citadas, onde o bloco *RAT* representa o Regulador Automático de Tensão.

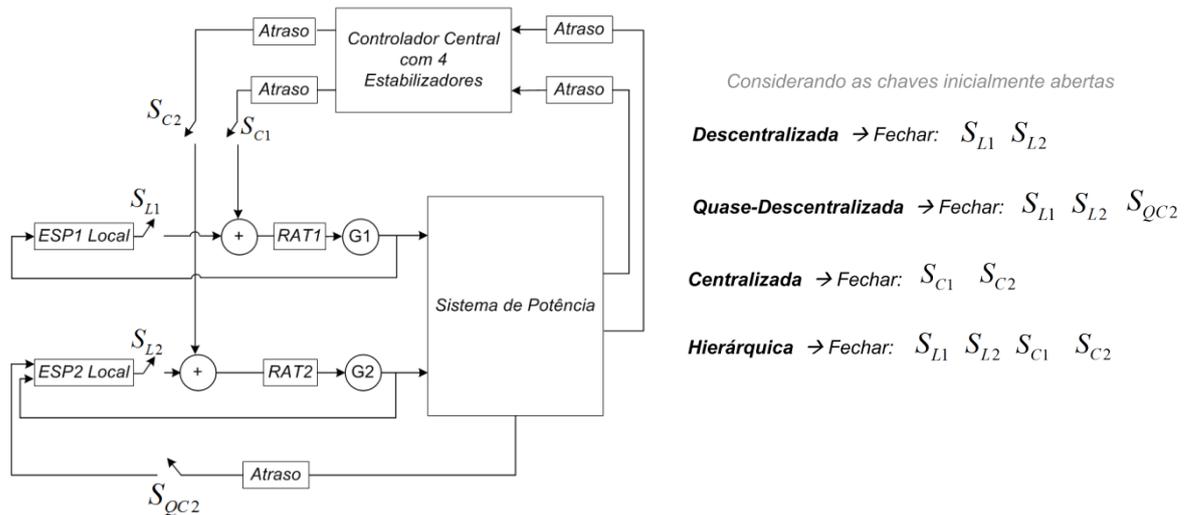


Figura 3.2 - Ilustração das estruturas de controle. Adaptado de (DOTTA, 2009).

3.9.5 Tempos de Atraso na Transmissão do Sinal

Define-se o tempo de atraso como o intervalo de tempo entre o instante da medição do sinal e a ação do controlador na planta. Quando são utilizados somente sinais obtidos localmente (controle descentralizado), os tempos de atraso podem ser desconsiderados.

Em contrapartida, quando são utilizados sinais remotos (controle quase-descentralizado, centralizado e hierárquico), os tempos de atraso de recepção do sinal medido e de envio do sinal de controle devem ser considerados. Do ponto de vista do projeto de controladores, conforme descrito em (WU, TSAKALIS e HEYDT, 2004), a presença dos tempos de atraso associados à transmissão do sinal remoto podem causar um efeito desestabilizante na malha de controle, dificultando o projeto. Nesse sentido torna-se necessário o correto tratamento desses tempos de atraso no procedimento de ajuste dos controladores (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009).

O atraso de transporte de sinal pode ser representado por uma função não racional, conforme a equação (3.13).

$$G_{atraso}(s) = e^{-sT} \quad (3.13)$$

O atraso de transporte pode ser modelado pela aproximação de Padé (VAJTA, 2000), que faz uma aproximação de (3.13) por funções racionais (uma razão de polinômios). A ordem da função racional (grau do polinômio) é escolhida pelo projetista, devendo-se buscar um compromisso entre a qualidade da aproximação e o esforço computacional: quanto maior a ordem, melhor a modelagem dos atrasos. Porém, quanto maior a ordem, maior a dimensão do sistema devido ao número de estados inseridos pelo grau do polinômio.

A Tabela 3.1 apresenta duas aproximações (de primeira e segunda ordem) para o tempo de atraso utilizadas em (DOTTA, 2009). A resposta ao degrau dessas funções de transferência é apresentada na Figura 3.3. Observa-se que a aproximação de primeira ordem $R_{1,1}(s)$ apresenta uma resposta não nula em $t = 0$, o que é uma característica indesejável em um sistema com atraso. Em contrapartida, a aproximação de segunda ordem $R_{1,2}(s)$ é mais adequada para a modelagem do tempo de atraso (pois apresenta uma resposta nula em $t = 0$), sendo utilizada nas estruturas baseadas em sinais remotos empregadas em (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009; CÁRDENAS, 2011; DILL e SILVA, 2012).

Tabela 3.1: Funções de Transferência - Aproximações de Padé.

1ª Ordem	2ª Ordem
$R_{1,1}(s)$	$R_{1,2}(s)$
$\frac{1 - \frac{T}{2} \cdot s}{1 + \frac{T}{2} \cdot s}$	$\frac{-(2T) \cdot s + 6}{(T^2) \cdot s^2 + (4T) \cdot s + 6}$

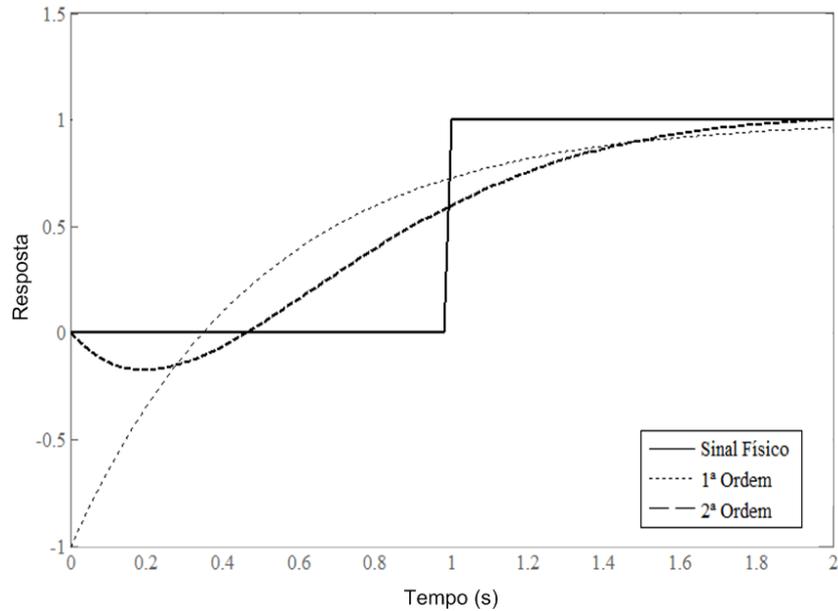


Figura 3.3 - Resposta ao degrau para as aproximações de Padé ($T = 1s$).

3.10 METODOLOGIAS DE PROJETO

3.10.1 Classificação Geral das Metodologias de Projeto

Nessa seção são apresentadas as metodologias comumente empregadas na literatura técnica para o projeto de controladores de amortecimento em sistemas elétricos de potência. Basicamente pode-se fazer o agrupamento em metodologias baseadas:

- i. em controle clássico;
- ii. no resíduo da função de transferência;
- iii. metodologias analíticas de alocação de pólos;
- iv. em controle robusto: *LQR*;
- v. em controle robusto: *LMIs* e *BMIs*;
- vi. em otimização paramétrica.

De acordo com (OLIVEIRA, 2006), as técnicas *LQR*, *LMIs* e *BMIs* também são denominadas de técnicas de controle moderno. Essas técnicas se diferenciam das técnicas de controle clássico por adotarem abordagens no domínio do tempo baseadas em representações no espaço de estados e modelos com múltiplas entradas e múltiplas saídas. Na presente tese, tais técnicas foram agrupadas sob o termo "controle robusto". Entretanto, ressalta-se que o

projeto de controladores robustos se caracteriza por considerar as incertezas existentes nos modelos matemáticos adotados nas metodologias de projeto.

Tais metodologias são revisadas brevemente a seguir e, na próxima seção, é apresentado o resumo do levantamento bibliográfico realizado.

3.10.2 Metodologias Baseadas em Controle Clássico

As técnicas de controle clássico estão bem fundamentadas, fazem parte do currículo dos cursos de engenharia elétrica (OGATA, 2011) e estão bastante difundidas, o que fez com que fossem empregadas para o projeto de controladores de amortecimento desde a década de 70.

Conforme (OLIVEIRA, 2006) as técnicas de controle clássico são, em geral, caracterizadas por abordagens no domínio da frequência, envolvendo modelos com uma única entrada e única saída. As metodologias baseadas em controle clássico consistem no projeto sequencial de controladores (projeto não coordenado) e requerem que o projetista tenha sólido conhecimento em teoria de controle clássico.

A primeira metodologia para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência foi proposta em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969). Baseado no modelo de *Heffron-Phillips* (vide Apêndice A), que é o modelo linearizado de um gerador conectado a uma barra infinita, a metodologia consistia: (i) na compensação do atraso de fase, na frequência do modos de oscilação local, associado a função $GEP(s)$ e (ii) na determinação do ganho necessário para alcançar o coeficiente de amortecimento desejado. Esse procedimento é apresentado na equação (3.14).

$$\begin{aligned} |GEP(s)| \cdot |PSS(s)| &= D_{desejado} \\ \angle GEP(s) + \angle PSS(s) &= 0 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Outras técnicas de controle clássico foram propostas na literatura:

- a técnica *Lugar das Raízes* foi aplicada no projeto de estabilizadores em (LARSEN e SWANN, 1981b);
- técnicas baseadas em resposta em frequência foram propostas para o projeto de estabilizadores em (BOLLINGER, WINSOR e CAMPBELL, 1979; MARTINS, 1986);

- em (GUIMARÃES, TARANTO e GOMES JUNIOR, 2000) são apresentadas metodologias para o posicionamento de pólos no semi-plano complexo;
- em (MARTINS e LIMA, 1989a; MARTINS, MACEDO e LIMA, 1993; MARTINS, PINTO, *et al.*, 1994), metodologias baseadas em controle clássico são empregadas para o projeto de controladores suplementares de dispositivos *FACTS*.

3.10.3 Metodologias Baseadas no Resíduo da Função de Transferência

Conforme (ARCIDIACONO, FERRARI e MARCONATO, 1980; MARTINS e LIMA, 1989a), o resíduo da função de transferência em malha aberta de um gerador pode ser interpretado como a sensibilidade de um modo de oscilação a uma realimentação incremental do ganho de um controlador instalado nesse gerador (3.15). É possível concluir que para se obter um maior deslocamento do modo de oscilação em análise $\Delta\lambda_i$ com menor esforço de controle (ganho do estabilizador reduzido) os geradores com maiores valores de resíduos devem ser escolhidos. Na equação (3.15), K representa o ganho e $H(\lambda_i)$ representa a compensação de fase do controlador.

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_i &= R_i \cdot K \cdot H(\lambda_i) \\ |\Delta\lambda_i| &= |R_i| \cdot |K \cdot H(\lambda_i)|\end{aligned}\tag{3.15}$$

Em (ABOUL-ELA, SALLAM e MCCALLEY, 1996) é proposta uma metodologia para a alocação de pólos baseada nos resíduos da função de transferência, sintetizada na equação (3.16). Observa-se que projeta-se a compensação de fase $H(\lambda_i)$ de modo que se tenha um movimento direto para o lado esquerdo do semi-plano complexo e que o ganho K é determinado com o objetivo de mover o pólo instável ou pouco amortecido λ_i da posição original para a desejada. As constantes de tempo do numerador T_1 e do denominador T_2 do bloco de compensação de fase são também apresentadas. O número de blocos de compensação é representado por nb .

$$\begin{aligned}
\phi &= 180^\circ - \arg(R_i) \\
\alpha &= \frac{1 - \text{sen}(\phi/nb)}{1 + \text{sen}(\phi/nb)} \\
K &= \frac{|\lambda_{des\ i} - \lambda_i|}{|R_i \cdot H(\lambda_i)|} \\
T_1 &= \alpha T_2 \\
T_2 &= \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \\
H(\lambda) &= \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^{nb}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Em (FEBRES, ARAUJO e FURINI, 2008; FURINI e ARAUJO, 2008) a metodologia descrita no parágrafo anterior é aplicada para o projeto de dispositivos *FACTS-POD (TCSC)*.

Outra metodologia que utiliza os resíduos da função de transferência para a alocação de pólos é proposta em (FERRAZ, MARTINS e TARANTO, 2001), onde o ajuste é feito de forma coordenada baseada no método de *Newton-Raphson*.

3.10.4 Metodologias Analíticas de Alocação de Pólos

Outras metodologias são baseadas em técnicas de alocação de pólos, que consiste em mover os pólos em regiões inadequadas para uma região estável que satisfaça um critério de mínimo amortecimento (CHOW e SANCHEZ-GASCA, 1989; PAL e CHAUDHURI, 2005).

Uma técnica analítica para essa finalidade é o método *Decentralized Modal Control* que possibilita o deslocamento coordenado de n modos de oscilação para posições pré-determinadas através de um processo iterativo (ARAUJO e ZANETTA JUNIOR., 2001; FURINI, PEREIRA e ARAUJO, 2011).

3.10.5 Metodologias Baseadas em Controle Robusto: *LQR*

O controle Regulador Linear Quadrático (*Linear Quadratic Regulator - LQR*) consiste em um controlador com realimentação que visa a obtenção de uma solução ótima através da minimização de um índice de desempenho quadrático dado pela equação (3.17).

$$J(x, u) = \frac{1}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) \cdot dt \quad (3.17)$$

onde x e u são as variáveis de estado e entrada do sistema aumentado (malha fechada). A matriz de peso positiva semi-definida Q pondera os estados e a matriz de peso positiva definida R pondera o esforço do controle. Observa-se que o índice quadrático depende fortemente dos fatores de ponderação. Adicionalmente, cita-se que o ajuste das matrizes de peso é uma tarefa laboriosa e não trivial. Nesse contexto, técnicas de redução de ordem podem ser utilizadas para facilitar a escolha da matriz Q (DOTTA, 2009).

Em (DOTTA, 2009) é enfatizado que não há garantia que o amortecimento em malha fechada seja efetivamente melhorado, pois o fator de amortecimento não é explicitamente otimizado.

De forma geral o sistema aumentado (em malha fechada) possui a incorporação dos controladores. Os pólos dos controladores são fixados previamente por um processo de tentativa e erro como em (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009) e o ganho e os zeros são determinados pela solução de uma equação do tipo $F(K) = 0$. A forma dessa equação vai depender da estrutura do controle (descentralização e realimentação de saídas ou estados).

A solução do problema de controle ótimo com relações estruturais de realimentação de saídas é obtida por meio da *Equação Generalizada de Riccati* (GEROMEL, 1987).

O projeto de controladores de amortecimento de sistemas de potência utilizando o método *LQR* foi bem explorado na literatura técnica. Pode-se citar a aplicação do *LQR*:

- para o projeto descentralizado de estabilizadores de sistemas de potência de grande porte: (SIMOES COSTA, FREITAS e SILVA, 1997; FREITAS e COSTA, 1999);
- uma estrutura quase-descentralizada é projetada em (MARINI, 2005);
- para o projeto centralizado de estabilizadores de sistemas de potência em uma estrutura hierárquica: (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009).

3.10.6 Metodologias Baseadas em Controle Robusto: *LMIs* e *BMIs*

3.10.6.1 Conceituação

Considere a modelagem do sistema de potência em malha aberta dada pela equação (3.18), em um dado ponto de operação.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \\ x(0) &= x_0\end{aligned}\tag{3.18}$$

A condição necessária e suficiente para que toda trajetória do sistema da equação anterior convirja para zero (sistema assintoticamente estável) com $t \rightarrow \infty$ ($\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0 \forall x(0) \neq 0$) é que exista uma matriz $P^T = P > 0$ tal que as desigualdades a seguir sejam satisfeitas:

$$V(x) = x^T P x > 0\tag{3.19}$$

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} = x^T (A^T P + P A)x < 0\tag{3.20}$$

A equação (3.19) é denominada de função quadrática de Lyapunov. Existindo uma matriz $P^T = P > 0$ que satisfaça as equações (3.19) e (3.20), diz-se que o sistema dado pela equação (3.18) é quadraticamente estável (que é um caso específico da estabilidade assintótica) (BOYD, GHAOVI e FERON, 1994; OLIVEIRA, 2006).

A condição necessária e suficiente para se provar a estabilidade quadrática de um sistema pode ser colocada de acordo com a equação (3.21).

$$P^T = P > 0, \quad A^T P + P A < 0\tag{3.21}$$

As equações (3.21) estão na forma de uma desigualdade matricial linear *LMI* (*Linear Matrix Inequalities*).

Desejando-se projetar um controlador baseado em realimentação estática de estados (somente para exemplificação) utilizando-se uma lei do tipo, equação (3.22):

$$u = K x\tag{3.22}$$

tem-se um sistema que, em malha fechada, será dado pela equação (3.23).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + BKx \\ \dot{x} &= (A + BK)x\end{aligned}\tag{3.23}$$

A determinação de um ganho K que estabilize o sistema em malha fechada dado pela equação (3.23) pode ser colocada como um problema de controle na forma de *LMI*. A

condição necessária e suficiente para a estabilização é que a desigualdade matricial a seguir seja satisfeita:

$$\begin{aligned} P^T &= P > 0 \\ (A + BK)^T P + P(A + BK) &< 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Observa-se que os termos K e P são multiplicados, fazendo com que (3.24) seja não-linear. Formalmente, diz-se que (3.24) é uma desigualdade matricial bilinear *BMI* (*Bilinear Matrix Inequality*) (VANANTWERP e BRAATZ, 2000). Entretanto os termos não-lineares das *BMI* podem ser eliminados através de uma mudança de variáveis, o que pode acarretar em problemas numéricos (DILL, 2013).

3.10.6.2 Definição Matemática de uma LMI

A estrutura de uma *LMI* é definida matricialmente como:

$$F(x_i) \triangleq F_0 + \sum_{i=1}^m x_i \cdot F_i > 0 \quad (3.25)$$

em que $x_i \in \mathbb{R}^m$ é o vetor linha de variáveis de decisão, $F_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ são matrizes simétricas e $i = 0, \dots, m$. A restrição $F(x_i) > 0$ é uma restrição convexa em x_i .

O problema de controle formulado como *LMI* pode levar em consideração as restrições de descentralização, realimentação de saídas e índices de desempenho (tais como o fator de amortecimento através do posicionamento de pólos (RAMOS, ALBERTO e BRETAS, 2004; RAMOS, MARTINS e BRETAS, 2005)). Por ser um problema convexo, pode ser resolvido por vários pacotes comerciais disponíveis (TROFINO, 2000).

O projeto robusto utilizando-se *LMIs* pode ser realizado através da *modelagem politópica* que considera vários pontos de operação como vértices de um politopo (assim a metodologia de projeto considera os pontos pré-especificados em conjunto com os pontos dentro da região *politópica*). Maiores informações podem ser obtidas em (OLIVEIRA, 2006).

Entretanto, conforme relatado em (DOTTA, 2009; DILL, 2013) a ordem do controlador está associada à ordem da planta. Nesse sentido, controladores de baixa ordem podem ser obtidos a partir da redução da ordem da planta, o que gera um problema não convexo de difícil solução.

Aplicações de *LMI*s foram propostas para o projeto de controladores de amortecimento:

- em uma estrutura descentralizada considerando estabilizadores (RAMOS, ALBERTO e BRETAS, 2004; RAMOS, MARTINS e BRETAS, 2005; OLIVEIRA, 2006; CAMPOS, DA CRUZ e ZANETTA JUNIOR., 2014a);
- em uma estrutura descentralizada considerando estabilizadores e dispositivos *FACTS-POD* (TCSC): (KUIAVA, RAMOS e BRETAS, 2009);
- em uma estrutura de controle centralizada (hierárquica) em (ZHANG e BOSE, 2008).

3.10.6.3 Definição Matemática de uma BMI

Conforme (DILL, 2013), uma alternativa para contornar problemas da convexidade é representar as *LMI*s por *BMI*s, que lidam com um conjunto de desigualdades matriciais não necessariamente convexo.

A estrutura de uma *BMI* é definida matricialmente como:

$$F(x_i, y_j) \triangleq F_0 + \sum_{i=1}^m x_i \cdot F_i + \sum_{j=1}^n y_j \cdot G_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_i \cdot y_j \cdot H_{ij} > 0 \quad (3.26)$$

em que $x_i \in \mathbb{R}^m$ e $y_j \in \mathbb{R}^n$ são os vetores linhas de variáveis de decisão F_i , G_j e H_{ij} são matrizes simétricas.

Uma *BMI* é uma *LMI* em x_i para um y_j fixo e uma *LMI* em y_j para um x_i fixo. É portanto um problema convexo em x_i e y_j separadamente.

As *BMI* podem ser utilizadas para representar um número muito maior de problemas de otimização que as *LMI*. Entretanto, conforme (VANANTWERP e BRAATZ, 2000), problemas formulados como *BMI* possuem maior complexidade.

Aplicações recentes de *BMI* no projeto de estabilizadores em uma estrutura descentralizada podem ser obtidas em (CAMPOS, DA CRUZ e ZANETTA JUNIOR, 2014b).

3.10.7 Metodologias Baseadas em Otimização Paramétrica

3.10.7.1 Conceituação

Os métodos de projeto paramétricos são aqueles baseados na otimização de índices explícitos de desempenho e robustez para o sistema em malha fechada. Dessa forma é possível otimizar os parâmetros dos controladores visando a otimização de uma função objetivo explícita.

Uma vantagem da utilização dessa abordagem é a variedade de métodos de otimização para a solução do problema, incluindo métodos de otimização não suave e não convexa. Além disso, controladores de baixa ordem podem ser facilmente obtidos, sem a necessidade da redução de ordem da planta como nas *LMIs*.

Dessa forma, pode-se utilizar os métodos descritos no Capítulo 2, baseados em (i) direção de busca usando derivada ou busca direta (sem derivadas) e (ii) metaheurísticas baseadas em trajetória (única solução) ou em população (múltiplas soluções).

Entretanto, deve-se citar que os métodos baseados em direção de busca usando derivadas apresentam o problema de serem sensíveis à condição inicial, embora possuam convergência rápida para o ponto de mínimo da bacia de atração na qual a condição inicial está situada.

Estudos anteriores usando métodos de busca direta no projeto de controladores (DOTTA, 2009; DILL, 2013) alertaram para a sensibilidade desses métodos à condição inicial utilizada.

Nesse contexto, métodos de otimização baseados em população apresentam melhores resultados, embora requeiram um esforço computacional maior. Entretanto, a habilidade desses métodos em trabalhar com um conjunto de soluções torna-os atrativos. Em contrapartida, problemas como a perda da diversidade da população, convergência prematura, balanceamento correto entre busca local (intensificação) e global (exploração), devem ser considerados.

Enquanto os algoritmos de controle robusto tais como *LQR*, *LMI* e *BMI* apresentam uma única solução ou divergem, os métodos paramétricos baseados em população apresentam um conjunto de soluções entre as quais o projetista poderá escolher a mais adequada.

Adicionalmente, cita-se que a aplicação de algoritmos híbridos à solução desse problema foi pouco explorada, sendo um campo fértil para novas investigações.

3.10.7.2 Parâmetros de Desempenho

Alguns índices de desempenho são abaixo listados (DILL e SILVA, 2012):

- i. *Fator de Amortecimento*: corresponde ao menor coeficiente de amortecimento do sistema em malha fechada. O fator de amortecimento de um autovalor $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ é dado pela equação (3.27). Nesse caso o fator de amortecimento deve ser maximizado.

$$\xi_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3.27)$$

- ii. *Abscissa Espectral*: definida pela maior parte real de todos os autovalores da matriz de estados. Nesse caso a abscissa espectral deve ser minimizada.

Em geral, o projeto de controladores usando-se somente índices de desempenho não é adequado. A razão para isso é a ausência de robustez do controlador projetado frente às variações paramétricas ou perturbações. Nesse sentido, pode-se adotar o projeto considerando a otimização do critério de desempenho em conjunto com múltiplos cenários. Outra solução seria a combinação de índices de desempenho com os índices de robustez (que serão apresentada adiante) através de uma formulação multi-objetivo (DILL e SILVA, 2012).

3.10.7.3 Parâmetros de Robustez

Os parâmetros de robustez foram revisados na seção 3.7.2 e consistem basicamente em (DILL e SILVA, 2012):

- i. maximizar o fator de amortecimento pseudoespectral e minimizar a abscissa pseudoespectral;
- ii. minimizar a sensibilidade dos autovalores dada pelo número de condicionamento da matriz de estados em malha fechada;
- iii. minimizar a norma H_2 que está associada ao esforço do controle.

Conforme (DILL e SILVA, 2012), a solução que representa a maior robustez pode estar associada ao menor fator de amortecimento. Nesse contexto, fica clara a necessidade de

se acoplar os índices de robustez com os de desempenho (como o fator de amortecimento) para que se tenha um projeto adequado para o controlador.

3.10.8 Outras Metodologias

Embora não tenham sido revisadas de forma aprofundada, deve-se ressaltar a existência de outras metodologias propostas para o projeto de controladores de amortecimento:

- controle H_∞ para o projeto de estabilizadores: (YANG, 1997a; YANG, 1997b);
- controle H_∞ para o projeto de uma estrutura centralizada e descentralizada usando estabilizadores e dispositivos *FACTS-POD (TCSC)*: (CHAUDHURI e PAL, 2004);
- controlador *Linear Quadrático Gaussiano* para o amortecimento de oscilações inter-área via dispositivos *FACTS-POD (TCSC)*: (ZOLOTAS, CHAUDHURI, *et al.*, 2007);
- projeto de controladores utilizando-se redes neurais artificiais (MENEZES, ARAUJO e PUPIN, 2011) e lógica nebulosa (SUN, WANG e SRINIVASAN, 2014).

Uma revisão sobre essas metodologias pode ser obtida em (PAL e CHAUDHURI, 2005).

3.11 RESUMO DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.11.1 Agrupamento das Metodologias de Projeto Paramétricas

Nessa seção é apresentado um resumo da revisão bibliográfica realizada a respeito dos métodos de projeto de controladores de amortecimento baseados em otimização paramétrica.

As metodologias propostas na literatura serão agrupadas de acordo com o tipo de abordagem: (i) Otimização Paramétrica baseada em Direção de Busca (com e sem o uso de derivadas), (ii) Otimização Paramétrica Metaheurística baseada em Trajetória e População (mono e multi-objetivo) e (iii) Otimização Paramétrica Metaheurística Híbrida baseada em População.

Adicionalmente as metodologias propostas na literatura são avaliadas quanto:

- i.* à estrutura de controle: descentralizada, quase-descentralizada, centralizada e hierárquica;
- ii.* aos controladores projetados: estabilizadores (*PSS*) e dispositivos *FACTS* equipados com *POD* (primeira e segunda geração);
- iii.* ao tipo de ajuste: coordenado ou não;
- iv.* ao critério de desempenho: se considera ou não algum critério de desempenho (amortecimento mínimo, por exemplo), pois existem metodologias que visam somente mover os pólos instáveis para o semi-plano esquerdo (estabilização);
- v.* à robustez: se considera ou não esse critério na fase de projeto (via múltiplos pontos de operação (*PO*), pseudoespectro, sensibilidade de autovalores, etc.);
- vi.* parâmetro de otimização: (*i*) desempenho (amortecimento e abscissa espectral), (*ii*) robustez (pseudoespectro, sensibilidade de autovalores) ou (*iii*) desvio da posição desejada para pólos instáveis ou pouco amortecidos (cuja posição é pré-especificada);
- vii.* se empregam ou não técnicas de redução de ordem.

3.11.2 Metodologias de Projeto

Na Tabela 3.2 são apresentadas algumas metodologias propostas na literatura baseadas em Otimização Paramétrica .

De forma geral (a menos que se indique o contrário): (*i*) tais metodologias não utilizam técnicas de redução de ordem, (*ii*) utilizam realimentação dinâmica da saída e (*iii*) fazem o ajuste coordenado (simultâneo) dos controladores.

Tabela 3.2a: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.

Metodologia	Método (s)	Estrutura de Controle	Tipo de Controlador	Parâmetro de Otimização	Robustez	(Observação) Referência
Direção de Busca (Derivadas)	Quasi-Newton (BFGS)	Descentralizado	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Não	<i>Redução de Ordem</i> (SIMO, KAMWA e TRUDEL, 1996)
	Programação Cônica Sequencial	Descentralizado	<i>PSS</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Sim Múltiplos PO	(JABR, PAL e MARTINS, 2010a)
	Programação Linear Sequencial	Descentralizado	<i>PSS</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Sim Múltiplos PO	<i>Parâmetros de Fase fixos (Ajuste dos Ganhos)</i> (JABR, PAL e MARTINS, 2010b)
	Programação Cônica Sequencial	Descentralizado	<i>PSS + FACTS (TCSC + SVC)</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Sim Múltiplos PO	<i>Projeto em 2 estágios: (1) fase e (2) ganho</i> (PAL, JABR e MARTINS, 2012)
	(1) Programação Linear Sequencial e (2) Programação Quadrática	Descentralizado	<i>PSS</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Não	(CRUZ e ZANETTA JUNIOR., 1997)

Tabela 3.2b: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.

Metodologia	Método	Estrutura de Controle	Tipo de Controlador	Parâmetro de Otimização	Robustez	(Observação) Referência
Direção de Busca (Derivadas)	(1) Programação Linear Sequencial e (2) Programação Quadrática	Descentralizado	<i>PSS</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Sim Múltiplos PO	(ZANETTA JUNIOR e CRUZ, 2005)
	Híbrido (vide seção 2.5.3.4)	Nível Centralizado do Controle Hierárquico	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Não	(DOTTA, 2009)
	Híbrido (vide seção 2.5.3.4)	(1) Descentralizado e (2) Quase-Descentralizado	<i>PSS</i>	São usados vários índices de desempenho e robustez	Sim (1) Sensibilidade de Autovalor (2) Pseudoespectro (3) H_∞ e H_2	(DILL e SILVA, 2011; DILL, 2013)

Tabela 3.2c: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.

Metodologia	Método	Estrutura de Controle	Tipo de Controlador	Parâmetro de Otimização	Robustez	(Observação) Referência
Direção de Busca (Direta)	Multi-Direcional	Descentralizado	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Não	(PELLANDA, APKARIAN e MARTINS, 2006)
	Multi-Direcional	Nível Centralizado do Controle Hierárquico	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Não	<i>Realimentação Estática de Saídas e Técnicas de Redução de Ordem</i> (DOTTA, 2009)
	(1) Multi-Direcional (2) Hooke-Jeeves	(1) Descentralizado e (2) Quase-Descentralizado	<i>PSS</i>	São usados vários índices de desempenho e robustez	Sim (1) Sensibilidade de Autovalor (2) Pseudoespectro (3) H_∞ e H_2	(DILL e SILVA, 2011; DILL, 2013)
Métodos de Trajetória	Recozimento Simulado	Descentralizado	<i>PSS</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Sim Múltiplos PO	(ABIDO, 2000)

Tabela 3.2d: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.

Metodologia	Método	Estrutura de Controle	Tipo de Controlador	Parâmetro de Otimização	Robustez	(Observação) Referência
Métodos de População Mono-objetivos	Algoritmos Genéticos	Descentralizado	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Sim Múltiplos PO	(DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000)
	Colônia de Formigas	Descentralizado	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Sim Múltiplos PO	(PERES, PASSOS FILHO e DA SILVA JUNIOR, 2015)
	Algoritmos Genéticos	Descentralizado e Centralizado (Hierárquico)	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Sim Múltiplos PO	(CÁRDENAS, 2011)
	<i>PSO</i>	(1) Descentralizado e (2) Quase-Descentralizado	<i>PSS</i>	São usados vários índices de desempenho e robustez	Sim (1) Sensibilidade de Autovalor (2) Pseudoespectro (3) H_∞ e H_2	(DILL e SILVA, 2011; DILL, 2013)

Tabela 3.2e: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.

Metodologia	Método	Estrutura de Controle	Tipo de Controlador	Parâmetro de Otimização	Robustez	(Observação) Referência
Métodos de População Mono-objetivos	<i>Bat Algorithm</i>	Sistema Máquina Barra Infinita	<i>PSS</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Sim Múltiplos PO	(SAMBARIYA e PRASAD, 2014)
	<i>Bat Algorithm</i>	Descentralizado	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Sim Múltiplos PO	(PERES, PASSOS FILHO e DA SILVA JUNIOR, 2015)
	<i>Cuckoo-Search</i>	Descentralizado	<i>PSS</i>	Fator de Amortecimento	Sim Múltiplos PO	(PERES, PASSOS FILHO e SILVA, 2013)

Tabela 3.2f: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.

Metodologia	Método	Estrutura de Controle	Tipo de Controlador	Parâmetro de Otimização	Robustez	(Observação) Referência
Métodos de População Híbridos	<i>PSO</i> + Colônia de Bactérias	Descentralizado	<i>PSS</i> + <i>TCSC</i>	Baseado em Alocação de Pólos	Não	(MENEZES, 2014)
	<i>PSO</i> + Colônia de Bactérias	Descentralizado	<i>PSS</i> + <i>SVC</i>	Baseado na Área de Integração da Resposta da Velocidade	Não	(ESMAILI, HOOSHMAND e PARASTEGARI, 2013)
	<i>PSO</i> + Busca Gravitacional	Quase-Descentralizado	<i>PSS</i> + <i>SSSC</i>	Baseado na Área de Integração da Resposta da Velocidade	Não	(KHADANGA e SATAPATHY, 2015)
	AG + Gradiente Descendente (<i>em uma abordagem desacoplada</i>)	Descentralizado	<i>PSS</i> + <i>TCSC</i>	Fator de Amortecimento	Sim Múltiplos PO	(CASTOLDI, 2011; CASTOLDI, BRETAS e RAMOS, 2014)

Tabela 3.2g: Metodologias baseadas em Otimização Paramétrica.

Metodologia	Método	Estrutura de Controle	Tipo de Controlador	Parâmetro de Otimização	Robustez	(Observação) Referência
Métodos de População Multi-Objetivos	(1) AG e (2) <i>PSO</i> (<i>Fronteira de Pareto e Agregação de Pesos</i>)	Descentralizado	<i>PSS</i> e Reguladores de Tensão (RAT)	Área de Integração de um SMBI (RAT) e Fator de Amortecimento (<i>PSS</i>)	Sim Múltiplos PO	(VIVEROS, 2007)
	(1) Algoritmo Genético NSGA_II (2) <i>PSO</i> Multi-objetivo (<i>Fronteira de Pareto</i>)	(1) Descentralizado e (2) Quase-Descentralizado	<i>PSS</i>	São usados vários índices de desempenho e robustez	Sim (1) Sensibilidade de Autovalor (2) Pseudoespectro (3) H_∞ e H_2	(DILL e SILVA, 2012)
	Algoritmo <i>Strength Pareto</i>	Descentralizado	<i>PSS</i>	Baseados em alocação de pólos	Não	(YASSAMI, DARABI e RAFIEL, 2010)
	(1) Algoritmo Genéticos NSGA_II	Descentralizado	<i>PSS</i>	Baseados em alocação de pólos	Não	(VERDEJO, GONZALEZ e DELPIANO, 2015)

3.11.3 Otimização Paramétrica usando Algoritmos Populacionais Híbridos

De grande interesse para essa tese, os trabalhos baseados na hibridização de métodos populacionais com métodos de direção de busca são revisados nessa seção. Conforme (BLUM e PUCHINGER, 2011; BOSMAN, 2012), a pesquisa na área de algoritmos híbridos é um campo fértil para novas investigações. Uma revisão da literatura mostrou que existem poucas aplicações dessas abordagens na área de projeto de controladores de amortecimento de sistemas de potência.

O trabalho mais recente nessa área foi proposto em (CASTOLDI, 2011). Nessa publicação, é proposta uma metodologia híbrida baseada em algoritmos genéticos e algoritmo do gradiente descendente para o projeto coordenado de estabilizadores e dispositivos *FACTS-POD (TCSC)*. A metodologia considera múltiplas condições operativas bem como a descentralização e coordenação dos controles.

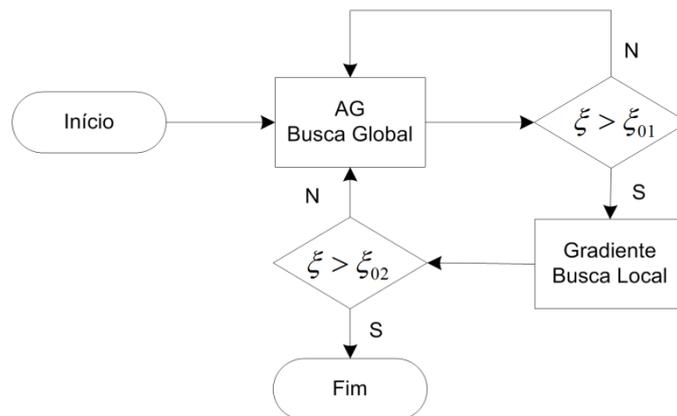


Figura 3.4 - Algoritmo híbrido proposto em (CASTOLDI, 2011).

Em (CASTOLDI, 2011), a metodologia híbrida consiste em duas etapas (Figura 3.4): inicialmente é realizada uma busca global usando os Algoritmos Genéticos com o objetivo de se obter um fator de amortecimento mínimo ($\xi > (\xi_{01} = 5,5\%)$) através do ajuste de fase e ganho. Uma vez finalizado o primeiro estágio, a segunda etapa consiste em uma busca local através do refinamento dos ganhos²⁰ da melhor solução anterior através do método do gradiente com o objetivo de se obter o amortecimento mínimo especificado

²⁰ Nesse caso o ajuste de fase é mantido fixo na melhor solução obtida pelo AG.

($\xi \geq (\xi_{02} = 6,0\%)$) na fase do projeto. Caso ξ_{02} não seja alcançado, o procedimento é reiniciado na primeira etapa.

A metodologia proposta em (CASTOLDI, 2011) foi recentemente aperfeiçoada com a aplicação de computação paralela e os resultados foram publicados em (CASTOLDI, BRETAS e RAMOS, 2014).

Deve-se observar que a metodologia híbrida proposta em (CASTOLDI, 2011; CASTOLDI, BRETAS e RAMOS, 2014) é baseada no desacoplamento do algoritmo genético e do algoritmo do gradiente descendente. Outra alternativa seria a inclusão do algoritmo do gradiente descendente dentro do algoritmo genético em uma etapa de busca local (algoritmos meméticos). Dessa forma, o desempenho do algoritmo populacional evolutivo seria melhorado. Essa constatação é o ponto de partida para a proposição dos algoritmos híbridos populacionais inspirados na inteligência de enxames nessa tese.

3.12 ÁREAS PROPÍCIAS PARA NOVAS INVESTIGAÇÕES

Com base na extensa revisão bibliográfica realizada, cita-se duas áreas propícias para novas investigações na área de projeto de controladores de amortecimento de SEP usando algoritmos de otimização populacionais:

1. *Algoritmos híbridos mono-objetivos*: desenvolvimento de algoritmos específicos para o procedimento de ajuste, incluindo estratégias de busca local (baseada em direção de busca) nos algoritmos populacionais.
2. *Algoritmos multi-objetivos para o projeto de uma estrutura hierárquica de controle*: o projeto da estrutura de controle hierárquica foi bastante explorada usando técnicas de controle robusto (ZHANG e BOSE, 2008; DOTTA, SILVA e DECKER, 2009). Em (CÁRDENAS, 2011) o projeto dessa estrutura foi realizada usando-se algoritmo genético mono-objetivo. Observa-se que a aplicação de algoritmos populacionais multi-objetivos é um tópico aberto para novas investigações. Nesse caso, índices de desempenho poderiam ser combinados com índices de robustez.

3.13 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO

Esse capítulo apresentou uma revisão sobre o problema de projeto de controladores de amortecimento em sistemas de potência. Inicialmente os conceitos básicos de estabilidade a pequenas perturbações foram apresentados bem como as estratégias para o amortecimento de oscilações locais e inter-área. Também foram revisados os requisitos associados aos controladores, requisitos a serem preenchidos na fase do projeto e as estruturas de controle comumente usadas, incluindo os estabilizadores e os dispositivos *Power Oscillation Damper* instalados em equipamentos *FACTS*. O estado da arte no projeto de controladores foi devidamente apresentado, incluindo metodologias de controle clássico, controle robusto (moderno) e otimização paramétrica. Por fim, o procedimento de ajuste de controladores de amortecimento baseado em algoritmos populacionais híbridos foi identificado como um campo promissor e será objeto de investigação dessa tese nos próximos capítulos.

4 Metodologia Proposta

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse capítulo apresenta as metodologias desenvolvidas para o projeto de controladores em sistemas de potência. Inicialmente é apresentada a modelagem do problema de projeto de controladores (estruturas de controle utilizadas, modelagem em malha aberta e fechada, estrutura dos estabilizadores e atendimento aos requisitos de projeto). Em seguida, a formulação do procedimento de ajuste como um problema de otimização e sua solução por métodos de otimização bioinspirados baseados em população são apresentadas.

Na sequência, as metodologias desenvolvidas são apresentadas. Tais metodologias são baseadas nos métodos de otimização populacionais bioinspirados: Enxame de Partículas (*PSO*) e Otimização Bioinspirada na Eco-localização de Morcegos (*Bat Algorithm*). A contribuição do trabalho consiste em hibridizar tais métodos populacionais com o Método do Gradiente Descendente (baseado na direção de busca com derivadas) de forma a melhorar a capacidade de busca local. Abordagens baseadas em multipopulações (tais como nos métodos colaborativos) também são apresentadas. As metodologias multipopulacionais visam manter a diversidade da população.

Finalizando, as características da implementação computacional realizada são devidamente ilustradas.

4.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

4.2.1 Estruturas de Controle

Nesse trabalho, um conjunto de estabilizadores de sistemas de potência serão projetados considerando duas estruturas típicas de controle: (i) controle descentralizado e (ii) controle centralizado. A Figura 4.1 apresenta as estruturas de controle.

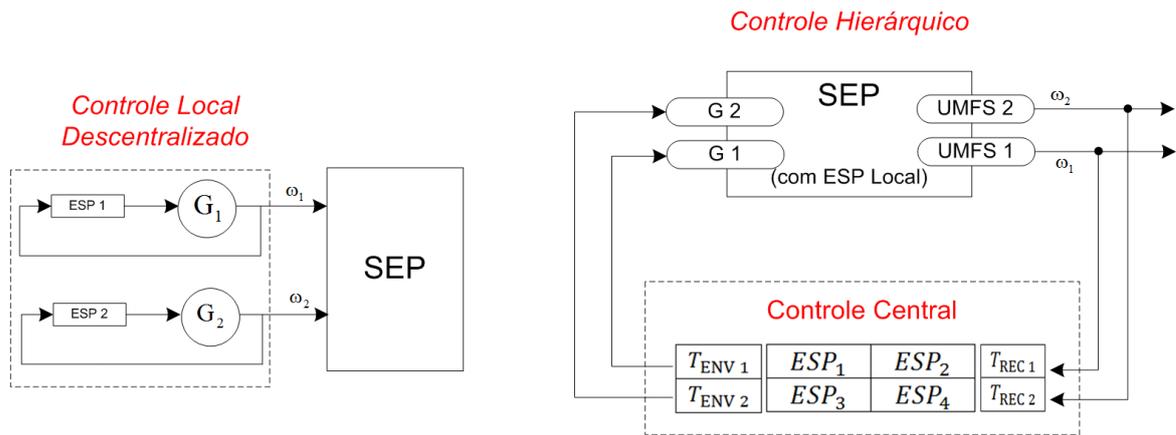


Figura 4.1 - Estrutura de controle hierárquico (exemplo para dois geradores).

- *Controle descentralizado (ou local)*: essa estrutura é apresentada à esquerda na Figura 4.1 e consiste somente no uso de sinais locais (cada gerador possui um ESP que recebe o sinal terminal da própria máquina). Considerando q estabilizadores, pode-se representar essa estrutura de controle por uma matriz diagonal $K(s)$, conforme a equação (4.1).

$$K(s) = \begin{bmatrix} ESP_1(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & ESP_q(s) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

- *Controle hierárquico*: conforme anteriormente revisado, esta estrutura de controle consiste em dois níveis: local e central. O nível local está associado ao controle descentralizado, onde cada estabilizador utiliza o sinal do gerador no qual está instalado.

O nível central consiste em uma malha adicional de controle e utiliza sinais remotos enviados por Unidades de Medição Fasorial Sincronizada UMFS. Os sinais obtidos remotamente da planta são processados em um controlador central (no centro de operação do sistema, por exemplo) e o sinal de controle é enviado novamente à planta.

No caso do uso de sinais remotos, deve-se considerar os tempos de atraso de transporte. Ressalta-se a consideração de duas constantes de tempos de atraso diferentes: (i) T_{ENV} que denota o tempo de envio do sinal do controlador

central para os geradores e (ii) T_{REC} que denota o tempo de envio do sinal das UMFS para o controlador central.

Conforme a equação (4.2), para o controle central, tem-se uma matriz retangular de ordem $(q \times p)$ onde q é o número de saídas do controlador central e p é o número de entradas no controlador central.

$$K(s) = \begin{bmatrix} ESP_{11}(s) & \dots & ESP_{1p}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ESP_{q1}(s) & \dots & ESP_{qp}(s) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

4.2.2 Sistema em Malha Aberta e Fechada

Conforme descrito no Apêndice A, o modelo dinâmico de um sistema elétrico de potência (considerando os geradores e os reguladores de tensão) é representado em espaço de estados em cada ponto de operação j . Desconsiderando-se os estabilizadores, tem-se o sistema em malha aberta para cada ponto de operação conforme a equação (4.3).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{aj} x + B_{aj} u \\ y &= C_{aj} x + D_{aj} u \end{aligned} \quad (4.3)$$

em que x são as variáveis de estado, u representa as variáveis de entrada (tais como os sinais de controle: tensão de referência dos reguladores de tensão) e y são as variáveis de saída (como a velocidade terminal das máquinas). As matrizes em malha aberta em uma condição operativa j são: estados (A_{aj}), entrada (B_{aj}), saída (C_{aj}) e transmissão direta (D_{aj}).

As estruturas de controle descritas nas equações (4.1) e (4.2) podem ser representadas em espaço de estados conforme a equação (4.4).

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c u_c \\ y_c &= C_c x_c + D_c u_c \end{aligned} \quad (4.4)$$

em que x_c são as variáveis de estados dos controladores, u_c são os sinais de desvio de velocidade e y_c são as variáveis com os sinais adicionais estabilizantes ou sinais atuadores (tensões).

Para cada ponto de operação j é realizada a realimentação de estados considerando o controlador da equação (4.4). Observe que os controladores projetados são únicos para todos

os pontos de operação considerados. Diz-se que o sistema com os controladores está operando em malha fechada, conforme a equação (4.5).

$$\begin{aligned}\dot{x}_f &= A_{fj} x_f + B_{fj} u_f \\ y_f &= C_{fj} x_f + D_c u_f\end{aligned}\tag{4.5}$$

O sistema em malha aberta ou fechada pode ser avaliado a partir dos coeficientes de amortecimento ξ_i associados aos autovalores (modos de oscilação) da matriz de estados, conforme apresentado nas equações (4.6) e (4.7).

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i\tag{4.6}$$

$$\xi_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}}\tag{4.7}$$

Os autovalores estáveis (localizados no semi-plano esquerdo $\sigma_i < 0$) possuem coeficientes de amortecimento positivos ($\xi_i > 0$). Em contrapartida, sistemas instáveis possuem alguns autovalores localizados no semi-plano direito associados a coeficientes de amortecimento negativos ($\xi_i < 0$). O objetivo do procedimento de ajuste é estabilizar o sistema através da otimização dos coeficientes de amortecimento em malha fechada.

4.2.3 Estrutura dos Estabilizadores

Na presente tese foram utilizados estabilizadores baseados no sinal de velocidade por serem os mais citados na literatura. Cada estabilizador p do sistema (seja na estrutura descentralizada quanto na centralizada) possui a função de transferência descrita na equação (4.8). Essa estrutura foi obtida das referências (DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000; CÁRDENAS, 2011; DILL, 2013).

$$ESP_p(s) = K_p \times \frac{(s \cdot T_w)}{(1 + s \cdot T_w)} \times \frac{\left(1 + s \frac{\sqrt{\alpha_p}}{\omega_p}\right)^{nb}}{\left(1 + s \frac{1}{\omega_p \cdot \sqrt{\alpha_p}}\right)^{nb}}\tag{4.8}$$

em que T_w é a constante de tempo do filtro *washout*, usado para que o estabilizador atue somente no regime transitório (essa constante é conhecida). O parâmetro nb corresponde ao número de blocos do estágio de compensação (esse parâmetro também é conhecido). Os parâmetros a serem ajustados para o controlador são: o ganho K_p , o parâmetro de compensação de fase α_p e a frequência onde ocorre a máxima compensação de fase ω_p .

4.2.4 Modelagem dos Tempos de Atraso

O tempo de atraso na transmissão de sinais remotos foi modelado usando a Aproximação de Padé conforme descrito na seção 3.9.5. Utilizou-se a aproximação de segunda ordem considerando-se um tempo de atraso T , conforme a equação (4.9).

$$e^{-sT} = \frac{-(2T).s + 6}{(T^2).s^2 + (4T).s + 6} \quad (4.9)$$

4.2.5 Coordenação e Robustez

Conforme descrito na seção 3.7, a coordenação dos controladores e a robustez são requisitos de projeto e foram considerados nesse trabalho.

a) *Coordenação*: o atendimento a esse critério foi satisfeito através da consideração simultânea de todos os estabilizadores na fase de projeto;

b) *Robustez*: o atendimento a esse critério foi satisfeito através da consideração de múltiplos cenários de operação. Nesse caso, para cada estrutura de controle projetada, o desempenho do sistema em malha fechada foi avaliado em todas as condições operativas pré-especificadas pelo projetista.

O conjunto de pontos de operação foram pré-especificados através de variações de carga e geração e de contingências (saída de linhas de transmissão, por exemplo).

4.2.6 Localização dos Controladores

Conforme revisado no Apêndice A, para identificar os geradores mais propícios para receberem os estabilizadores visando o amortecimento dos modos críticos, deve-se analisar os fatores de observabilidade e controlabilidade (cujo produto fornece o valor do resíduo da função de transferência ω/V_{ref} de cada gerador) (KUNDUR, 1994; PAL e CHAUDHURI, 2005).

Os fatores de observabilidade fornecem a medida da atividade de um modo λ_i , em um ponto de operação j , em uma m -ésima variável de saída ω . Os fatores de controlabilidade fornecem a medida da excitação de um modo λ_i induzida por um distúrbio na k -ésima variável de entrada V_{ref} . Os fatores de observabilidade e controlabilidade são descritos nas equações (4.10) e (4.11).

$$\text{Obser} = C_{aj} \cdot \phi_i \quad (4.10)$$

$$\text{Cont} = \psi_i \cdot B_{aj} \quad (4.11)$$

em que ϕ_i e ψ_i representam os autovetores à direita e à esquerda associados ao autovalor λ_i no ponto de operação j .

4.3 FORMULAÇÃO COMO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

4.3.1 Formulação Geral

O problema de ajuste é formulado como um problema de otimização com o objetivo de otimizar o coeficiente de amortecimento dos autovalores do sistema em malha fechada considerando um conjunto de pontos de operação pré-definidos. Uma ilustração do problema de ajuste é apresentada na seção 4.5.

Considerando que a constante de tempo do filtro *washout* e o número de blocos de compensação são parâmetros conhecidos para os p estabilizadores (vide seção 4.2.3), os parâmetros a serem ajustados são aqueles associados aos estágios de ganho (K_p) e de

compensação de fase (α_p e ω_p). Portanto, o vetor de variáveis de decisão $[var]$ do problema de otimização corresponde ao ajuste de ganho e fase para todos os p estabilizadores do sistema, conforme apresentado na equação (4.12).

$$[var] = [K_1 \quad \dots \quad K_p \mid \alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_p \mid \omega_1 \quad \dots \quad \omega_p] \quad (4.12)$$

O ajuste da equação (4.12) é avaliado para todos os pontos de operação j considerados na fase de projeto. Para cada ponto de operação, é realizado o fechamento da malha de controle (com o ajuste $[var]$ em questão) e são calculados os autovalores da matriz de estados em malha fechada. O conjunto de todos os autovalores para todas as condições operativas é denominado de *Espectro*. Em seguida, são calculados os fatores de amortecimento para todos os autovalores do *Espectro*, conforme as equações (4.6) e (4.7). Caso algum coeficiente de amortecimento seja negativo o sistema será instável (o ajuste proposto por $[var]$ não é adequado). Em contrapartida, se todos os coeficientes forem positivos, o sistema será estável e o coeficiente de amortecimento mínimo ξ_{\min} (o menor do conjunto) será utilizado para avaliar o ajuste proposto por $[var]$.

Dessa forma, a função objetivo do problema corresponde ao mínimo amortecimento obtido ξ_{\min} considerando todos os autovalores em malha fechada em todas as condições de operação j . A equação (4.13) apresenta a função objetivo:

$$f = \begin{cases} 0 & \text{se algum } (\xi_i)_j < 0 \text{ (instável)} \\ \xi_{\min} & \text{se todos os } (\xi_i)_j \geq 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

em que $(\xi_i)_j$ denota o coeficiente de amortecimento do autovalor i no ponto de operação j .

Ressalta-se que a função objetivo da equação (4.13) não faz distinção entre dois sistemas instáveis (com amortecimento negativo). Dessa forma, duas soluções que conduzam o sistema à instabilidade recebem um mesmo valor de amortecimento: zero. Na solução por métodos populacionais como o *PSO* e *Bat Algorithm*, isso evita que os indivíduos façam distinção entre soluções que conduzem o sistema à instabilidade. No método do gradiente, a função deve ser modificada para eliminar a descontinuidade.

A formulação do problema de otimização é apresentada na equação (4.14).

$$\begin{cases} Max & f \\ sa & K_p \min \leq K_p \leq K_p \max \\ & \alpha_p \min \leq \alpha_p \leq \alpha_p \max \\ & \omega_p \min \leq \omega_p \leq \alpha_p \max \end{cases} \quad (4.14)$$

em que as restrições de canalização representam o espaço de busca considerando os limites dos parâmetros a serem ajustados para cada estabilizador.

Deve-se ressaltar que os algoritmos de otimização apresentados nesse trabalho são formulados para problemas de minimização. Nesse sentido, será considerada a minimização do negativo da função descrita na equação (4.13), uma vez que a seguinte relação é válida: $max(f) = \min(-f)$.

4.3.2 Projeto do Controle Hierárquico

Embora não seja objetivo específico desse trabalho estudar com profundidade a estrutura de controle hierárquica, as metodologias propostas serão aplicadas ao projeto do segundo nível desta estrutura (controle centralizado). Nesse caso, o primeiro nível (controle local ou descentralizado) será ajustado com valores obtidos da literatura. Em seguida, o segundo nível (controle central) será projetado utilizando-se os algoritmos propostos nesse trabalho.

4.4 SOLUÇÃO POR MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADOS

Na seção anterior foi apresentada a formulação geral do problema de ajuste de controladores como um problema de otimização. A solução desse problema pode ser feita utilizando-se os métodos populacionais bioinspirados (vide seção 3.10.7). Nesse caso, torna-se necessário definir dois parâmetros: a estrutura dos indivíduos da população e a função aptidão associada à cada indivíduo.

4.4.1 Estrutura dos Indivíduos

No problema de ajuste de estabilizadores, cada indivíduo $[ind_k]$ é representado por um vetor de números reais que contém o ajuste para os p estabilizadores do sistema, conforme mostrado na equação (4.15).

$$[ind_k] = [K_1 \quad \dots \quad K_p \mid \alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_p \mid \omega_1 \quad \dots \quad \omega_p] \quad (4.15)$$

A dimensão do vetor de números reais é igual à três vezes o número de estabilizadores a serem ajustados, uma vez que são considerados três parâmetros de ajuste por estabilizador.

4.4.2 Função Aptidão

Com o ajuste proposto por cada indivíduo, são calculados os autovalores do sistema em malha fechada associados a cada ponto de operação pré-especificado j . A função aptidão de cada indivíduo k , definida na equação (4.16), é baseada na função objetivo do problema de otimização (maximização) definida na equação (4.13).

$$F_k = f = \begin{cases} 0 & \text{se algum } (\xi_i)_j < 0 \text{ (instável)} \\ \xi_{\min} & \text{se todos os } (\xi_i)_j \geq 0 \end{cases} \quad (4.16)$$

Conforme relatado na seção 4.3.1, ressalta-se que os algoritmos de otimização apresentados nessa tese são formulados para problemas de minimização. Portanto, será considerada a minimização do negativo da função descrita na equação (4.13), uma vez que a seguinte relação é válida: $\max(f) = \min(-f)$.

4.5 ILUSTRAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE AJUSTE

Conforme anteriormente mencionado, o procedimento de ajuste é formulado como um problema de otimização com o objetivo de maximizar os coeficientes de amortecimento do sistema em malha fechada em um conjunto pré-especificado de pontos de operação.

Nessa seção é ilustrado o cálculo da função aptidão de um indivíduo apresentado na Figura 4.2. O indivíduo representa o ajuste para dois estabilizadores. O primeiro passo é a construção das funções de transferência a partir dos dados dos indivíduos, considerando que os parâmetros T_w e nb são conhecidos.

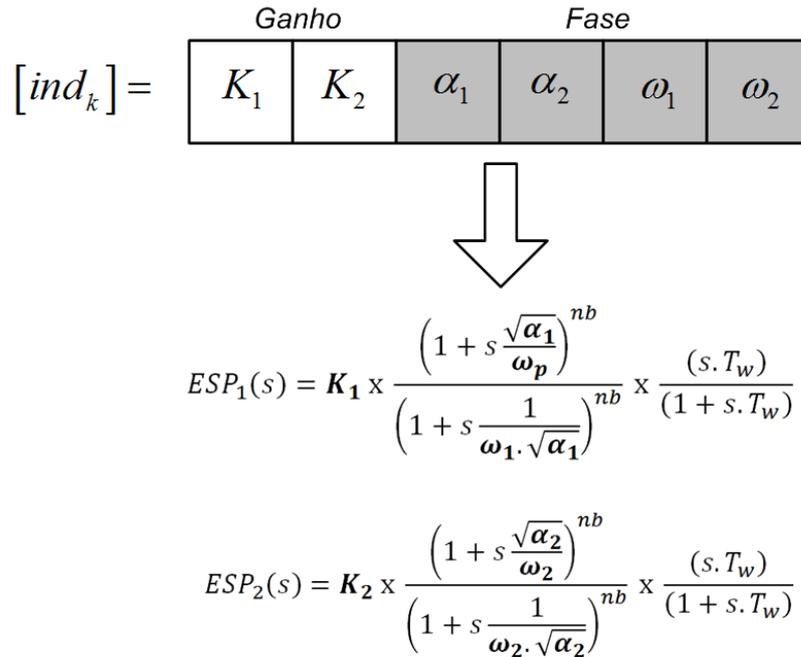


Figura 4.2 - Indivíduo representando o ajuste de dois estabilizadores.

Considerando três pontos de operação, o próximo passo é proceder com a inclusão dos controladores no sistema (processo de realimentação), obtendo as matrizes de estado em malha fechada para cada um dos pontos de operação. Em seguida, são calculados os coeficientes de amortecimento dos autovalores dominantes (mais próximos do eixo imaginário) para todos os pontos de operação.

Para o primeiro ponto de operação, a Figura 4.3 ilustra o cálculo do coeficiente de amortecimento mínimo associado ao indivíduo k em duas situações possíveis (somente a parte superior do plano complexo é representada). Na primeira situação, Figura 4.3(a), o ajuste não é satisfatório e o sistema é instável em malha fechada: nesse caso adota-se $\xi_{\min} = 0$. Na segunda situação, Figura 4.3(b), o ajuste é adequado para a estabilização do sistema: nesse caso $\xi_{\min} = \xi_{\min 1}$, que é o coeficiente de amortecimento do autovalor mais próximo do eixo imaginário (dominante).

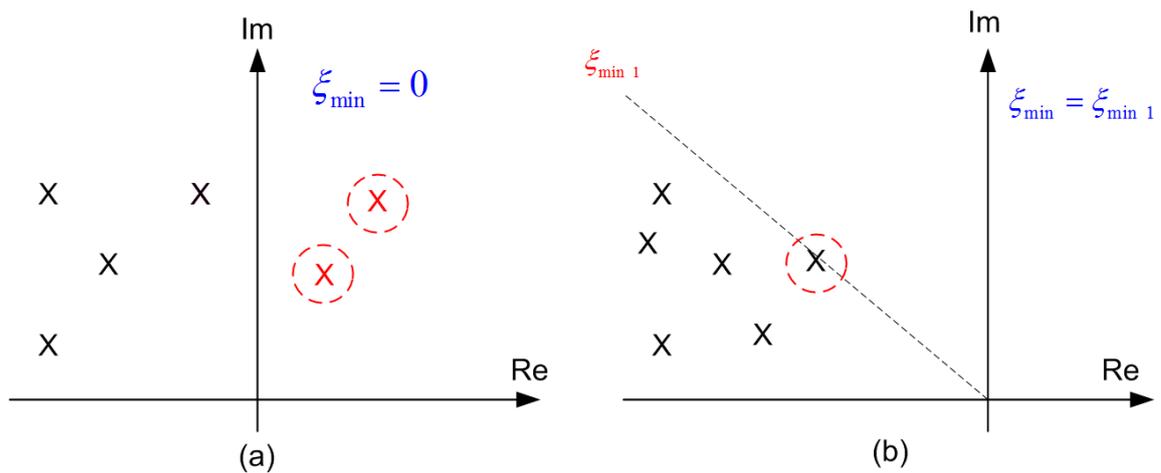
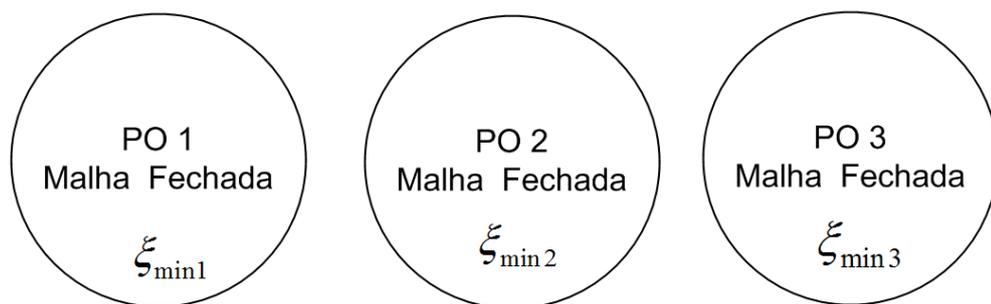


Figura 4.3 - Ilustração do cálculo do coeficiente de amortecimento mínimo para o ponto de operação 1:
 (a) Sistema instável em malha fechada. (b) Sistema estável em malha fechada.

O procedimento de realimentação é realizado para todos os três pontos de operação. A função de aptidão será igual ao menor coeficiente de amortecimento dentre os três pontos de operação (PO), conforme ilustrado na Figura 4.4.



$$F_k = \xi_{\min} = \min(\xi_{\min 1}, \xi_{\min 2}, \xi_{\min 3})$$

Figura 4.4 - Ilustração do cálculo da função aptidão.

O Apêndice D apresenta um estudo de caso tutorial com resultados numéricos com o objetivo de clarear o procedimento ilustrado nessa seção.

4.6 CONCEITUAÇÃO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS

4.6.1 Conceitual Geral

As principais contribuições desse trabalho de doutorado fundamentam-se em quatro pilares principais:

- a) o projeto de estabilizadores através da aplicação de métodos de otimização populacionais bioinspirados no comportamento de enxames: Enxame de Partículas (*PSO*) e Algoritmo dos Morcegos (*Bat Algorithm*);
- b) a hibridização de métodos populacionais com métodos de busca direta baseados em derivadas (método do gradiente descendente) para melhorar a busca local: propõem-se portanto Algoritmos Meméticos aplicados ao problema de ajuste de controladores;
- c) o desenvolvimento de metodologias baseadas no conceito de multipopulação com o objetivo de melhorar a diversidade da população dos métodos bioinspirados, reduzindo a probabilidade de que ocorra a convergência prematura do algoritmo para soluções de má-qualidade;
- d) desenvolvimento de métodos multipopulacionais hibridizados com métodos de direção de busca baseados em derivadas (método do gradiente descendente), visando manter a diversidade da população e melhorar a busca local.

Os algoritmos originais do *PSO* e do *Bat* e suas características de convergência foram devidamente revisados no Capítulo 2. Nesse sentido, o presente capítulo não apresentará as equações associadas a esses algoritmos. A aplicação desses métodos para a solução do projeto de estabilizadores serão referenciados como:

- **Método 1- *PSO*-Comum:** metodologia baseada no algoritmo *PSO* original;
- **Método 5- *BAT*-Comum:** metodologia baseada no algoritmo *BAT* original.

4.6.2 Algoritmos Meméticos baseados em uma Única População

No Capítulo 2 foi visto que, em geral, um algoritmo híbrido pode ser classificado de várias formas. De interesse especial dessa tese, os *Algoritmos Meméticos* são algoritmos populacionais com um método específico interno para executar a busca local de uma forma

mais eficiente. Estes podem utilizar tanto uma metaheurística baseada em trajetória (Recozimento Simulado, por exemplo) quanto um método baseado em direção de busca (baseado em derivada ou não) para executar a busca local.

Uma das propostas desse trabalho consiste em incluir nos métodos de otimização populacionais *PSO* e *Bat Algorithm*, uma etapa adicional baseada no método do gradiente descendente. Com isso, pretende-se fazer uma busca local direcionada pelo vetor gradiente da função objetivo a partir do ponto de boa qualidade fornecido pelos métodos populacionais.

Essa etapa é realizada internamente a cada *nlocal* iterações (que é um valor empírico) dos métodos originais. Entretanto, somente os ganhos dos estabilizadores são ajustados e os parâmetros de compensação de fase são fixados nos valores correspondentes à melhor solução corrente dos algoritmos populacionais. Essas estratégias são baseadas nas seguintes considerações:

- i. redução do esforço computacional adicional requerido pelo Método do Gradiente;
- ii. a compensação de fase não sofre grandes variações para uma certa faixa de condições operativas (FERRAZ, 2002; PAL e CHAUDHURI, 2005; CASTOLDI, 2011);

Dessa forma, tem-se a combinação das vantagens e a superação das desvantagens de cada um dos métodos:

- a) os algoritmos populacionais bioinspirados possuem a vantagem de fornecer soluções de boa qualidade através de uma busca global, porém podem ter a convergência mais lenta;
- b) os algoritmos baseados no gradiente da função objetivo possuem a vantagem de convergirem para ótimos locais com rapidez e a desvantagem de serem altamente sensíveis às condições iniciais e não fazerem uma busca global.

Dessa forma, quando os algoritmos populacionais posicionarem suas melhores soluções em uma região satisfatória, é executado o Método do Gradiente para explorar tal região mais eficientemente.

A Figura 4.5 ilustra os parâmetros a serem otimizados pelo método do gradiente (ganhos) e os parâmetros fixos nessa etapa (ajuste de fase). As melhores soluções correntes de cada método são g_{best} (*PSO*) e x^* (*Bat Algorithm*).

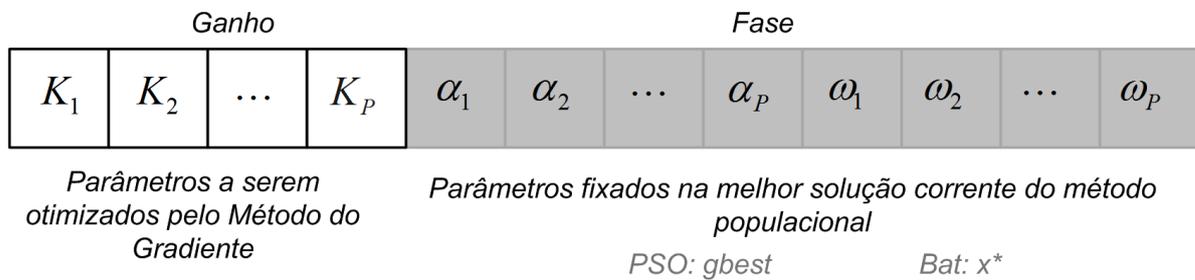


Figura 4.5 - Estrutura do ajuste do controlador na etapa do Método do Gradiente do Método Híbrido.

Deve ser ressaltado que a presente tese está alinhada com a premissa proposta no trabalho de (WOLPERT e MACREADY, 1997), denominado de *The no Free Lunch Theorem for Optimization* (seção 2.8). Considerando que, em média, nenhum algoritmo é melhor do que o outro, torna-se necessário o desenvolvimento de algoritmos que levem em consideração as características específicas do problema que se quer resolver.

Ressalta-se que, conforme visto na seção 3.11.3, em (CASTOLDI, 2011; CASTOLDI, BRETAS e RAMOS, 2014) é proposta uma metodologia híbrida para o projeto de controladores de sistemas de potência usando algoritmos genéticos e método do gradiente descendente (seção 3.11.3). Entretanto as etapas são desacopladas: executa-se o AG para obter um mínimo amortecimento (5,5% por exemplo) e depois refina-se os ganhos, através do método do gradiente, para obter o fator de amortecimento desejado (6%). O trabalho proposto na presente tese de doutorado, diferencia-se ao incluir o método do gradiente de forma interna, tal como feito nos Algoritmos Meméticos (NERI e COTTA, 2012).

Os algoritmos propostos através da hibridização dos métodos populacionais *PSO* e *Bat Algorithm* com o método do Gradiente Descendente, com base em uma única população, serão referenciados como:

- **Método 2-** *PSO* + Gradiente: metodologia baseada no algoritmo *PSO* com etapa de Gradiente;
- **Método 6-** *BAT* + Gradiente: metodologia baseada no algoritmo *BAT* com etapa de Gradiente.

4.6.3 Algoritmos baseados no Conceito de Multipopulação

Conforme revisado na seção 2.7, o bom desempenho dos métodos de otimização populacionais está condicionado ao correto balanceamento entre as etapas de diversificação e intensificação. Também referenciada na literatura como *Exploration*, a diversificação consiste na estratégia de exploração global do espaço de busca.

Deseja-se que os indivíduos estejam distribuídos da melhor forma possível no espaço de busca, de forma a se evitar problemas de convergência prematura para soluções de má-qualidade. Dentre as alternativas para se manter a diversidade da população, cita-se o emprego dos algoritmos cooperativos (ou colaborativos). Nessa classe de algoritmos, a população é dividida em subpopulações e a melhor solução de cada uma é enviada para uma população elite a cada geração. Aplicações de métodos cooperativos baseados no *PSO* e *Bat Algorithm* foram recentemente propostas na literatura (NIU, ZHU e HE, 2007; JADDI, ABDULLAH e HAMDAN, 2015).

Conforme relatado em (NOEL, 2012), o emprego de muitas subpopulações pode deteriorar a convergência dos algoritmos: (i) se o número total de indivíduos for mantido, o número de indivíduos por subpopulação será reduzido, deteriorando a capacidade de busca global das subpopulações e (ii) se cada subpopulação empregar o mesmo número inicial de indivíduos (aumentando o número total), o tempo computacional será aumentado. Nesse sentido, a população é dividida em duas subpopulações neste trabalho.

Na presente tese de doutorado, uma estratégia mais simples é empregada para o projeto de controladores. As subpopulações não interagem entre si e são evoluídas de forma independente ao longo das gerações. Assim, cada uma mantém a sua melhor solução corrente individual. Após o término de todas as gerações, a melhor solução é apresentada ao usuário, conforme ilustrado na Figura 4.6.

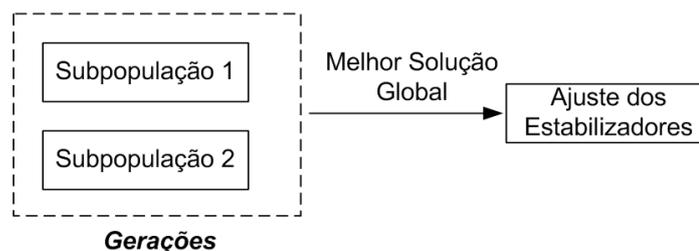


Figura 4.6 - Estrutura dos Métodos Populacionais.

Uma estratégia adicional foi incluída na tentativa de melhorar as soluções de uma subpopulação. Se após um número pré-especificado de gerações (15, por exemplo) a solução não melhorar e for menor que certo limiar (amortecimento menor que 5%, por exemplo), a subpopulação correspondente é reiniciada aleatoriamente.

Neste trabalho, os algoritmos propostos com base no conceito de multipopulações são referenciados como:

- **Método 3-** *PSO* Multipopulacional : metodologia baseada no algoritmo *PSO* multipopulacional;
- **Método 7-** *BAT* Multipopulacional: metodologia baseada no algoritmo *BAT* multipopulacional.

4.6.4 Algoritmos Meméticos Multipopulacionais

Com o objetivo de efetuar uma busca local mais eficiente ao redor das melhores soluções correntes de cada subpopulação, o método do Gradiente Descendente é aplicado para o refinamento dos ganhos a cada *nlocal* iterações. Esse procedimento é ilustrado na Figura 4.7.

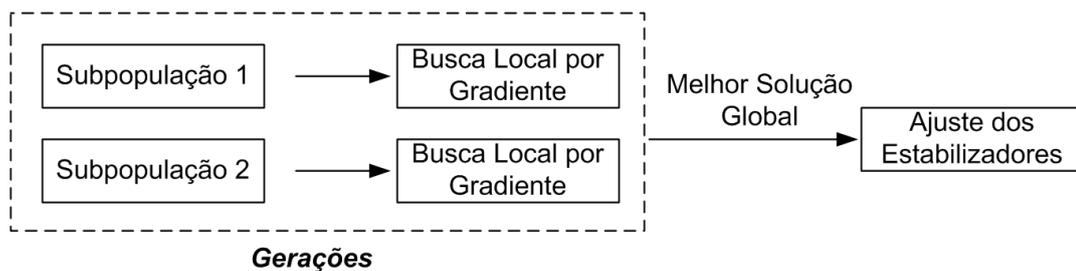


Figura 4.7 - Estrutura dos Métodos Populacionais Híbridos.

Os algoritmos híbridos multipopulacionais propostos nesse trabalho são referenciados como:

- **Método 4-** *PSO* Multipopulacional + Gradiente: metodologia baseada no algoritmo *PSO* multipopulacional com etapa de Gradiente;

- **Método 8-** *BAT* Multipopulacional + Gradiente: metodologia baseada no algoritmo *BAT* multipopulacional com etapa de Gradiente.

Na próxima seção são apresentados os algoritmos das metodologias propostas nesse trabalho.

4.7 ALGORITMOS DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS

4.7.1 Refinamento dos Ganhos usando o Método do Gradiente Descendente

Conforme já mencionado na seção anterior, o presente trabalho faz uso do Método do Gradiente Descendente para o refinamento dos ganhos. Esse método foi revisado no Capítulo 2 (vide seção 2.5.4) e baseia-se na seguinte premissa: "*dado um ponto inicial no espaço de busca, obtém-se um novo ponto situado sobre a reta definida por esse ponto e pelo gradiente da função*". Nesse trabalho, os gradientes são estimados por diferenças finitas e a busca unidimensional é realizada pelo algoritmo da seção áurea (TAKAHASHI, 2007).

Uma vez que esse algoritmo é muito simples e foi proposto para otimização irrestrita, a função objetivo do problema deve ser modificada para considerar as restrições de canalização associadas aos ganhos dos controladores, conforme descrito na equação (4.17a).

$$K_p \min \leq K_p \leq K_p \max \quad (4.17a)$$

$$K_p \min \leq K_p \quad (4.17b)$$

$$K_p \leq K_p \max$$

$$K_p \min - K_p \leq 0 \quad (4.17c)$$

$$K_p - K_p \max \leq 0$$

As restrições de canalização da equação (4.17a) podem ser colocadas na forma $g(x) \leq 0$. A fim de penalizar as soluções infactíveis, pode-se modificar a função objetivo (4.13) conforme apresentado na equação (4.18). São consideradas $2 \cdot nc$ restrições (nc é o número de estabilizadores).

$$F = \xi_{\min} - \beta \cdot \max\left(0, \sum_{i=1}^{2.nc} g_i(x)\right) \quad (4.18)$$

em que $\beta = 10^8$ foi adotado.

Ressalta-se que a equação (4.18) foi definida para a maximização do coeficiente do amortecimento. Considerando que o Algoritmo do Gradiente foi apresentado para problemas de minimização, torna-se necessário considerar a minimização do negativo da função descrita na equação (4.13), uma vez que a seguinte relação é válida: $\max(F) = \min(-F)$.

Nessa tese, o Algoritmo do Método do Gradiente (vide seção 2.5.4) é interrompido:

- i. se um total de 7 iterações é atingido ou;
- ii. se o valor do passo fornecido pela busca unidimensional for menor que 0,002.

Essas condições de parada foram definidas empiricamente: foi observado (para o problema sob análise) que o Método do Gradiente pode empregar bastante esforço computacional para aumentar pouco o coeficiente de amortecimento através do refinamento dos ganhos (em geral aumentos inferiores à 0,1% em valores absolutos são desnecessários). Nesse sentido, as condições de parada adotadas foram consideradas satisfatórias para esse tipo de problema.

4.7.2 Algoritmos Meméticos baseados em uma Única População

Os algoritmos dos métodos populacionais bioinspirados *PSO* e *BAT* foram apresentados detalhadamente no Capítulo 2. O algoritmo do método híbrido baseado no algoritmo *PSO* e no Método do Gradiente é apresentado no Algoritmo 4.1. A etapa baseada no Método do Gradiente está destacada. O critério de parada é baseado no número máximo de gerações.

<u>Algoritmo do PSO com Etapa de Gradiente</u>	<u>Passo</u>
Início	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo.	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 0$	3
Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todas as partículas dentro dos limites permitidos. Calcular a função aptidão associada a cada partícula.	4
Para todas as partículas fazer: $pbest_i = x_i^t$ e encontrar a melhor posição global $gbest$	5
Repita	6
Para Todas as Partículas Faça	7
Atualizar a velocidade v_i^{t+1} e testar a factibilidade	8
Atualizar a posição x_i^{t+1} e testar a factibilidade	9
Calcular a função aptidão associada a partícula. Se o valor da função aptidão for menor que da melhor posição individual corrente, fazer: $pbest_i = x_i^{t+1}$	10
Fim-Para	11
Encontrar a melhor solução corrente $gbest$	12
A cada n_{local} gerações fazer a busca local pelo Método do Gradiente para refinamento dos ganhos. O ajuste de fase é fixo no valor da melhor solução corrente $gbest$	13
$t \leftarrow t + 1$	14
Até critério de parada atingido	15
Fim	16

Algoritmo 4-1- PSO com etapa baseada no Método do Gradiente.

O algoritmo do método híbrido baseado no *Bat Algorithm* e no Método do Gradiente é apresentado no Algoritmo 4.2. A etapa baseada no Método do Gradiente está destacada.

<u>Algoritmo do Bat com Etapa de Gradiente</u>	<u>Passo</u>
Início	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 1$	3
Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todos os indivíduos (morcegos) dentro dos limites permitidos. Calcular a função aptidão $f(x_i^t)$ associada a cada indivíduo x_i^t	4
Encontrar a melhor posição global x^*	5
Repita	6
Para Todos os Indivíduos Faça	7
Gerar uma nova solução ajustando-se a frequência e atualizando a velocidade e a posição do morcego	8
Se $rand > r_i^t$ Faça	9
Gerar uma solução ao redor da melhor solução corrente (busca local)	10
Fim-Se	11
Avaliar a viabilidade da solução e calcular a função aptidão associada $f(x_i^t)$	12
Se $(rand < A_i^t)$ e $f(x_i^t) < f(x_i^{t-1})$ Faça	13
Aceitar a nova solução. Aumentar r_i^t e reduzir A_i^t	14
Fim-Se	15
Fim-Para	16
Encontrar a melhor posição global x^*	17
A cada n_{local} gerações fazer a busca local pelo Método do Gradiente para refinamento dos ganhos. O ajuste de fase é fixo no valor da melhor solução corrente x^*	18
$t \leftarrow t + 1$	19
Até critério de parada atingido	20
Fim	21

Algoritmo 4-2- Bat com etapa baseada no Método do Gradiente.

4.7.3 Algoritmos Multipopulacionais

O algoritmo do método multipopulacional baseado no método *PSO* é apresentado no Algoritmo 4.3. O algoritmo baseado no *Bat Algorithm* é apresentado no Algoritmo 4.4.

<i>Algoritmo do PSO Multipopulacional</i>	<u>Passo</u>
<i>Início</i>	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo.	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 1$	3
Para cada subpopulação: Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todas as partículas dentro dos limites permitidos. Calcular a função aptidão associada a cada partícula.	4
Para todas as partículas fazer: $pbest_i = x_i^t$ e encontrar a melhor posição global $gbest$ (de cada subpopulação)	5
<i>Repita</i>	6
<i>Para</i> as DUAS Populações <i>Faça</i>	7
<i>Para</i> Todas as Partículas da Subpopulação <i>Faça</i>	8
Atualizar a velocidade v_i^{t+1} e testar a factibilidade	9
Atualizar a posição x_i^{t+1} e testar a factibilidade	10
Calcular a função aptidão associada à partícula. Se o valor da função aptidão for menor que a da melhor posição individual corrente, fazer: $pbest_i = x_i^{t+1}$	11
<i>Fim-Para</i>	12
Encontrar a melhor solução corrente da subpopulação $gbest$	13
Se a solução não for superior a um amortecimento mínimo após $nreinic$ iterações: reiniciar a subpopulação	14
<i>Até critério de parada atingido</i>	15
$t \leftarrow t + 1$	16
<i>Fim-Repita</i>	17
<i>Fim</i>	18

Algoritmo 4-3- *PSO* Multipopulacional.

<i>Algoritmo do Bat Multipopulacional</i>	<u>Passo</u>
<i>Início</i>	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 1$	3
Para cada subpopulação: Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todos os indivíduos (morcegos) dentro dos limites permitidos. Calcular a função aptidão $f(x_i^t)$ associada a cada indivíduo x_i^t	4
Encontrar a melhor posição global x^* (de cada subpopulação)	5
<i>Repita</i>	6
<i>Para</i> as DUAS Populações <i>Faça</i>	7
<i>Para</i> Todos os Indivíduos da Subpopulação <i>Faça</i>	8
Gerar uma nova solução ajustando-se a frequência e atualizando a velocidade e a posição do morcego	9
<i>Se</i> $rand > r_i^t$ <i>Faça</i>	10
Gerar uma solução ao redor da melhor solução corrente (busca local)	11
<i>Fim-Se</i>	12
Avaliar a viabilidade da solução e calcular a função aptidão associada $f(x_i^t)$	13
<i>Se</i> $(rand < A_i^t)$ e $f(x_i^t) < f(x_i^{t-1})$ <i>Faça</i>	14
Aceitar a nova solução. Aumentar r_i^t e reduzir A_i^t	15
<i>Fim-Se</i>	16
<i>Fim-Para</i>	17
Encontrar a melhor posição global da subpopulação x^*	18
Se a solução não for superior a um amortecimento mínimo após n_{reinic} iterações: reiniciar a subpopulação	19
<i>Fim-Para</i>	20
$t \leftarrow t + 1$	21
<i>Até critério de parada atingido</i>	22
<i>Fim</i>	23

Algoritmo 4-4- Bat Multipopulacional.

4.7.4 Algoritmos Meméticos Multipopulacionais

Os algoritmos são apresentados no Algoritmo 4.5 e no Algoritmo 4.6.

<u><i>Algoritmo do PSO Multipopulacional com Gradiente</i></u>	<u>Passo</u>
<i>Início</i>	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo.	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 1$	3
Para cada subpopulação: Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todas as partículas dentro dos limites permitidos. Calcular a função aptidão associada a cada partícula.	4
Para todas as partículas fazer: $pbest_i = x_i^t$ e encontrar a melhor posição global $gbest$ (de cada subpopulação)	5
<i>Repita</i>	6
<i>Para</i> as DUAS Populações <i>Faça</i>	7
<i>Para</i> Todas as Partículas da Subpopulação <i>Faça</i>	8
Atualizar a velocidade v_i^{t+1} e testar a factibilidade	9
Atualizar a posição x_i^{t+1} e testar a factibilidade	10
Calcular a função aptidão associada à partícula. Se o valor da função aptidão for menor que a da melhor posição individual corrente, fazer: $pbest_i = x_i^{t+1}$	11
<i>Fim-Para</i>	12
Encontrar a melhor solução corrente da subpopulação $gbest$	13
A cada $nlocal$ gerações fazer a busca local pelo Método do Gradiente para refinamento dos ganhos. O ajuste de fase é fixo no valor da melhor solução corrente $gbest$	14
Se a solução não for superior a um amortecimento mínimo após $nreinic$ iterações: reiniciar a subpopulação	15
<i>Fim-Para</i>	16
$t \leftarrow t + 1$	17
<i>Até critério de parada atingido</i>	18
<i>Fim</i>	19

Algoritmo 4-5- PSO Multipopulacional com Gradiente.

<i>Algoritmo do Bat Multipopulacional com Gradiente</i>	Passo
<i>Início</i>	1
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo	2
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 1$	3
Para cada subpopulação: Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todos os indivíduos (morcegos) dentro dos limites permitidos. Calcular a função aptidão $f(x_i^t)$ associada a cada indivíduo x_i^t	4
Encontrar a melhor posição global x^*	5
<i>Repita</i>	6
<i>Para</i> as DUAS Populações <i>Faça</i>	7
<i>Para</i> Todos os Indivíduos da Subpopulação <i>Faça</i>	8
Gerar uma nova solução ajustando-se a frequência e atualizando a velocidade e a posição do morcego	9
<i>Se</i> $rand > r_i^t$ <i>Faça</i>	10
Gerar uma solução ao redor da melhor solução	11
<i>Fim-Se</i>	12
Avaliar a viabilidade da solução e calcular a função aptidão associada $f(x_i^t)$	13
<i>Se</i> $(rand < A_i^t)$ e $f(x_i^t) < f(x_i^{t-1})$ <i>Faça</i>	14
Aceitar a nova solução. Aumentar r_i^t e reduzir A_i^t	15
<i>Fim-Se</i>	16
<i>Fim-Para</i>	17
Encontrar a melhor posição global da subpopulação x^*	18
A cada n_{local} gerações fazer a busca local pelo Método do Gradiente para refinamento dos ganhos. O ajuste de fase é fixo no valor da melhor solução corrente x^*	19
Se a solução não for superior a um amortecimento mínimo após n_{reinic} iterações: reiniciar a subpopulação	20
<i>Fim-Para</i>	21
$t \leftarrow t + 1$	22
<i>Até critério de parada atingido</i>	23
<i>Fim</i>	24

Algoritmo 4-6- *Bat* Multipopulacional com Gradiente.

4.8 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Nessa seção são apresentados detalhes a respeito da implementação computacional realizada na plataforma MATLAB[®].

4.8.1 Plataforma de Simulação

A plataforma de simulação utilizada nesse trabalho para o ajuste de controladores faz uso das versões acadêmicas dos programas desenvolvidos pelo CEPEL²¹: Anarede (CEPEL, 2009a), Pacdyn (CEPEL, 2009b), Anatem (CEPEL, 2010) e PlotCepel (CEPEL, 2009c), conforme apresentado na Figura 4.8.

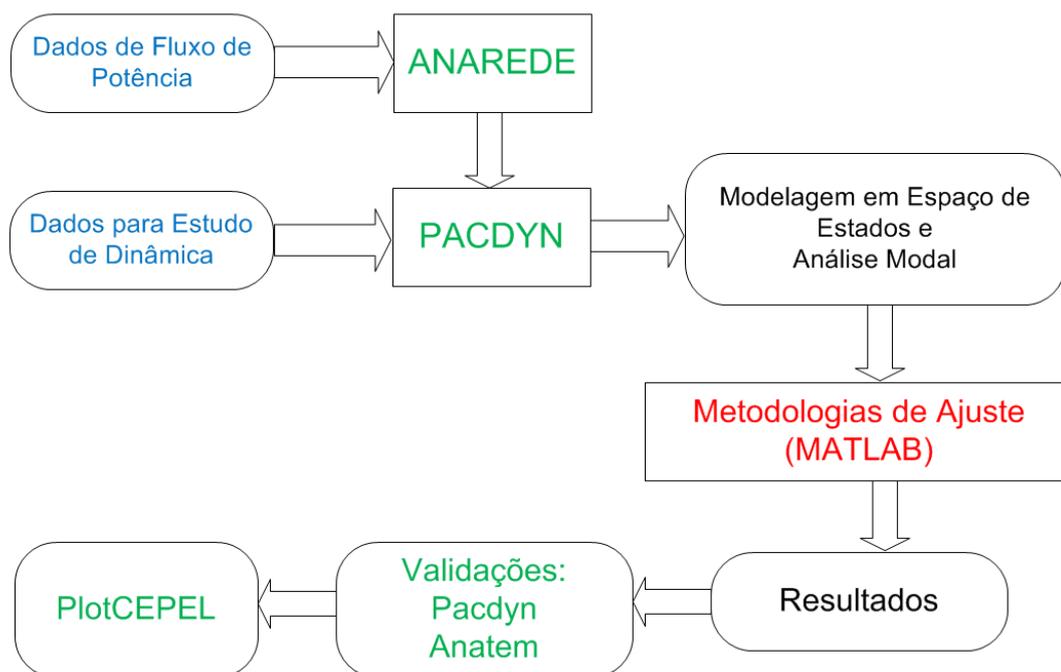


Figura 4.8 - Plataforma computacional de simulação.

²¹ Versões licenciadas à Universidade Federal de Juiz de Fora e à Universidade Federal de São João del-Rei.

A solução do fluxo de potência fornecida pelo programa Anarede é combinada com os dados dinâmicos dos sistemas no programa PacDyn. O programa PacDyn gera as matrizes em espaço de estados para cada ponto de operação e as exporta para o ambiente MATLAB[®] (as variáveis de entrada são as tensões de referência e as variáveis de saída são as velocidades dos geradores).

Adicionalmente no programa PacDyn é realizada a análise modal para cálculo dos *mode-shapes*, fatores de participação e os fatores de controlabilidade e observabilidade. No ambiente MATLAB[®] é realizado o ajuste dos controladores através das metodologias propostas nesse capítulo. Por fim, os controladores projetados são validados nos programas PacDyn e Anatem. O programa PlotCepel é usado para a elaboração dos gráficos.

Ressalta-se que os controladores projetados são validados no programa Anatem através de simulações no domínio do tempo, que consiste na aplicação de curto circuitos ou perturbações na entrada dos reguladores de tensão.

4.8.2 Implementação Computacional

São apresentados alguns detalhes sobre a implementação computacional realizada na plataforma MATLAB[®]. O foco está na modelagem do sistema de controle e foram usadas funções já implementadas no ambiente MATLAB[®].

Para cada solução dos métodos populacionais (associada a um indivíduo) a função de aptidão é calculada através dos seguintes passos:

- i. Os passos (ii) até (v) são executados para todos os pontos de operação;
- ii. Para cada estabilizador, calcular a função de transferência considerando todos os blocos (compensação de fase, ganho e filtro *washout*): a função utilizada é a *conv*;
- iii. Para cada estabilizador obter a representação em espaço de estados através da função *tf2ss*;
- iv. Para cada estabilizador efetuar o fechamento da malha de controle através da função *feedback*;

- v. Com o sistema em malha fechada (que considera todos os controladores), calcular os autovalores através da função *eig*. Em seguida, calcular os coeficientes de amortecimento associados aos autovalores através da função *damp*;
- vi. Com os coeficientes de amortecimento do sistema em malha fechada em todos os pontos de operação, a função aptidão será o fator de amortecimento com o menor valor.

Deve-se ressaltar que a solução proposta por um indivíduo pode não estabilizar o sistema. Nesse caso a função aptidão é feita igual a zero.

4.9 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO

Esse capítulo apresentou a formulação do procedimento de ajuste de controladores de sistemas de potência como um problema de otimização. Em seguida foram apresentadas as metodologias propostas para o projeto de estabilizadores. Tais metodologias são baseadas em técnicas de hibridização dos métodos populacionais bioinspirados na experiência de enxames (*Particle Swarm Optimization* e *Bat Algorithm*) com o Método do Gradiente. Métodos baseados no conceito de multipopulações também foram desenvolvidos e hibridizados.

Adicionalmente foi apresentada a plataforma de simulação que será utilizada para o projeto de controladores de sistemas testes no próximo capítulo.

5 Resultados

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos com as metodologias de projeto propostas no capítulo anterior. Os sistemas utilizados nesse estudo são:

- i. Sistema Equivalente Sul-Sudeste do Brasil (MARTINS e LIMA, 1989b);
- ii. Sistema *New England* (PAI, 1989);
- iii. Sistema com 2 Áreas e 4 Geradores (KUNDUR, 1994);

Recentemente, no ano de 2015, uma Força Tarefa para Estudos de Dinâmica de SEP do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) publicou um relatório com seis sistemas testes para estudos de Dinâmica e Controle de Sistemas Elétricos de Potência. Nesse conjunto de sistemas testes, encontram-se os três sistemas utilizados nessa tese e os dados podem ser obtidos em (IEEE, 2015).

Para cada sistema é realizado o projeto descentralizado de controladores utilizando-se as metodologias híbridas e multipopulacionais propostas no capítulo anterior. Adicionalmente, para o Sistema Equivalente Sul-Sudeste do Brasil, é realizado o ajuste de uma estrutura hierárquica de controle visando mostrar a flexibilidade dos algoritmos implementados.

As validações dos controladores projetados são realizadas através de simulações não lineares (domínio do tempo). Os resultados obtidos são analisados do ponto de vista da qualidade da solução considerando um conjunto de três simulações para cada método. Com isso pretende-se analisar a confiabilidade dos algoritmos implementados, isto é, qual a capacidade de se obter, em média, soluções de boa qualidade.

As análises modais conduzidas para os sistemas deste capítulo são realizadas utilizando-se o programa PacDyn (CEPEL, 2009b). As simulações não lineares são realizadas utilizando-se o programa ANATEM (CEPEL, 2010). Os dados dos sistemas no formato dos programas ANAREDE e PacDyn são apresentados no Apêndice C.

Os testes foram realizados utilizando-se um computador Intel Core i7, 2,93GHz com 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7-64 bits.

5.2 PARÂMETROS COMUNS DE SIMULAÇÃO

5.2.1.1 Nomenclatura

A nomenclatura utilizada para fazer referência às metodologias de projeto é apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Metodologias de projeto.

<i>Metodologia</i>	<i>Descrição</i>	<i>Sigla</i>
1	Metodologia baseada no algoritmo <i>PSO</i> original	<i>PSO-Comum</i>
2	Metodologia baseada no algoritmo <i>PSO</i> com etapa de Gradiente	<i>PSO+Gradiente</i>
3	Metodologia baseada no algoritmo <i>PSO</i> Multipopulacional	<i>PSO-Multipopulacional</i>
4	Metodologia baseada no algoritmo <i>PSO</i> Multipopulacional com etapa de Gradiente	<i>PSO Multipopulacional+Gradiente</i>
5	Metodologia baseada no algoritmo <i>BAT</i> original	<i>BAT-Comum</i>
6	Metodologia baseada no algoritmo <i>BAT</i> com etapa de Gradiente	<i>BAT+Gradiente</i>
7	Metodologia baseada no algoritmo <i>BAT</i> Multipopulacional	<i>BAT-Multipopulacional</i>
8	Metodologia baseada no algoritmo <i>BAT</i> Multipopulacional com etapa de Gradiente	<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>

5.2.1.2 Parâmetros Comuns dos Métodos Bioinspirados

Os parâmetros associados aos métodos bioinspirados utilizados nesse capítulo são descritos na Tabela 5.2. Os valores desses parâmetros foram obtidos da literatura técnica, tanto para os algoritmos baseados no *PSO* (DEL VALLE, VENAYAGAMOORTHY e MOHAGHEGHI, 2008) quanto para os baseados no *Bat Algorithm* (YANG, 2013b).

Tais valores são considerados adequados para a solução de vários problemas de otimização na área de engenharia elétrica (DEL VALLE, VENAYAGAMOORTHY e MOHAGHEGHI, 2008; YANG, 2013b). Embora não se tenha conduzido um estudo aprofundado para determinar os melhores valores para a solução do problema do ajuste de controladores nessa tese, os valores da Tabela 5.2 também foram adotados em (DILL, 2013) e (SAMBARIYA e PRASAD, 2014) para o projeto de estabilizadores utilizando os métodos *PSO* e *Bat Algorithm* respectivamente.

Tabela 5.2: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados.

	<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
BAT	Constante de redução do som	$\mu = 0,9$
	Constante de aumento da taxa de emissão de pulsos	$\gamma = 0,9$
	Volume Inicial	$A_0 = 0,25$
	Taxa de emissão de pulsos inicial	$r_0 = 0,50$
	Limite da frequência do som	$f_{r \min} = 0$ $f_{r \max} = 2$
PSO	Limite de velocidade	$v_{max} = 4,0$
	Limites da constante de inércia	$w_{min} = 0,4$ $w_{max} = 0,9$
	Constantes de Aceleração c_1 (parcela cognitiva) e c_2 (parcela social)	2,0

5.3 SISTEMA SUL-SUDESTE (CONTROLE DESCENTRALIZADO)

5.3.1 Descrição do Sistema

O sistema equivalente Sul-Sudeste, representado na Figura 5.1 (MARTINS e LIMA, 1989b), é composto por cinco geradores, sendo que o gerador da barra 7 é um equivalente da região Sudeste do Brasil.

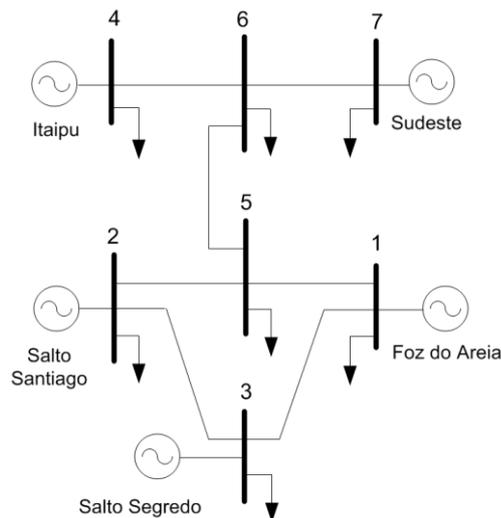


Figura 5.1 - Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Na Figura 5.1 tem-se a usina de Itaipu na barra 4, o sistema equivalente do Sudeste na barra 7 e o Sistema Sul (composto pelas usinas de Foz do Areia, Salto Santiago e Salto Segredo nas barras 1, 2 e 3).

Os geradores são representados por um modelo de 5ª ordem, que considera os efeitos transitórios no eixo d e os efeitos subtransitórios nos eixos q e d (modelo 4 da seção A.5 do apêndice A). Os reguladores de tensão são representados por um modelo de primeira ordem (vide seção A.3.2 do Apêndice A).

5.3.2 Desempenho em Malha Aberta

Para o projeto de controladores desse sistema são considerados seis cenários ou condições operativas (BOUKARIM, CHOW e MARTINS, 2000): o caso base mais cinco pontos de operação obtidos do caso base através de variações de carga e variações paramétricas (valor de algumas reatâncias). Essas alterações são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Cenários para o Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Cenário	Reatância X_{5-6}	Reatância X_{6-7}	Carregamento
1 (Caso Base)	0,39	0,57	Nominal
2	0,50	0,57	
3	0,80	0,57	
4	0,39	0,63	
5	0,39	0,70	
6	0,39	0,57	Redução de 2,4 % na carga ativa das barras 1, 2, 3 e 5

A análise dos *mode-shape* de velocidade em todos os cenários (em malha aberta) indica que existem dois modos de oscilação críticos: (i) um modo instável associado à oscilação entre o equivalente Sudeste e Itaipu e (ii) um modo estável pouco amortecido associado à oscilação entre o sistema Sul (Foz do Areia, Salto Santiago e Salto Segredo) e o sistema Sudeste e Itaipu juntos. Os modos de interesse são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Característica dos Pontos de Operação do Sistema Equivalente Sul-Sudeste (Malha Aberta).

Modos de Oscilação Eletromecânica de Interesse					
	Cenário	Autovalor	Freq (Hz)	ξ (%)	Natureza
λ_1	1	$\lambda_1 = 0,65 \pm j5,39$	0,86	-11,90	Sudeste x Itaipu
	2	$\lambda_1 = 0,66 \pm j5,38$	0,86	-12,10	
	3	$\lambda_1 = 0,68 \pm j5,35$	0,85	-12,66	
	4	$\lambda_1 = 0,74 \pm j5,22$	0,83	-14,04	
	5	$\lambda_1 = 0,84 \pm j5,00$	0,80	-16,59	
	6	$\lambda_1 = 0,69 \pm j5,37$	0,85	-12,68	
λ_2	1	$\lambda_2 = -0,23 \pm j5,88$	0,93	3,84	Sul x (Sudeste +Itaipu)
	2	$\lambda_2 = -0,20 \pm j5,77$	0,92	3,50	
	3	$\lambda_2 = -0,15 \pm j5,51$	0,88	2,77	
	4	$\lambda_2 = -0,24 \pm j5,85$	0,93	4,04	
	5	$\lambda_2 = -0,24 \pm j5,82$	0,93	4,18	
	6	$\lambda_2 = -0,21 \pm j5,86$	0,93	3,59	

A análise gráfica dos *mode shapes* de velocidade para os dois modos críticos em cada ponto de operação é apresentada nas figuras seguintes. A análise dos *mode shapes* determina a atividade das variáveis de estado (no caso velocidade) quando os modos críticos são excitados.

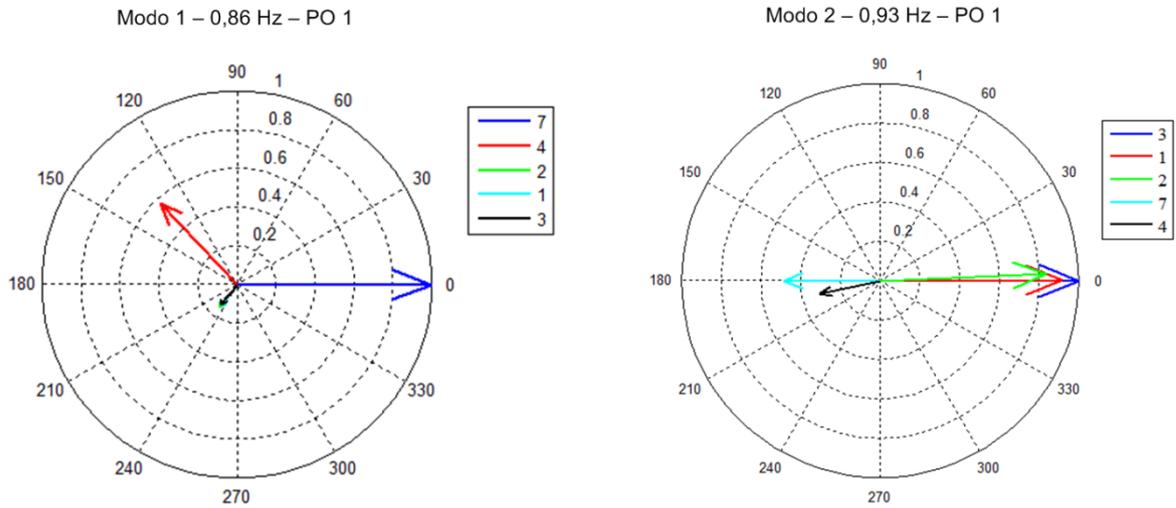


Figura 5.2 - *Mode shapes* de velocidade - Cenário 1.

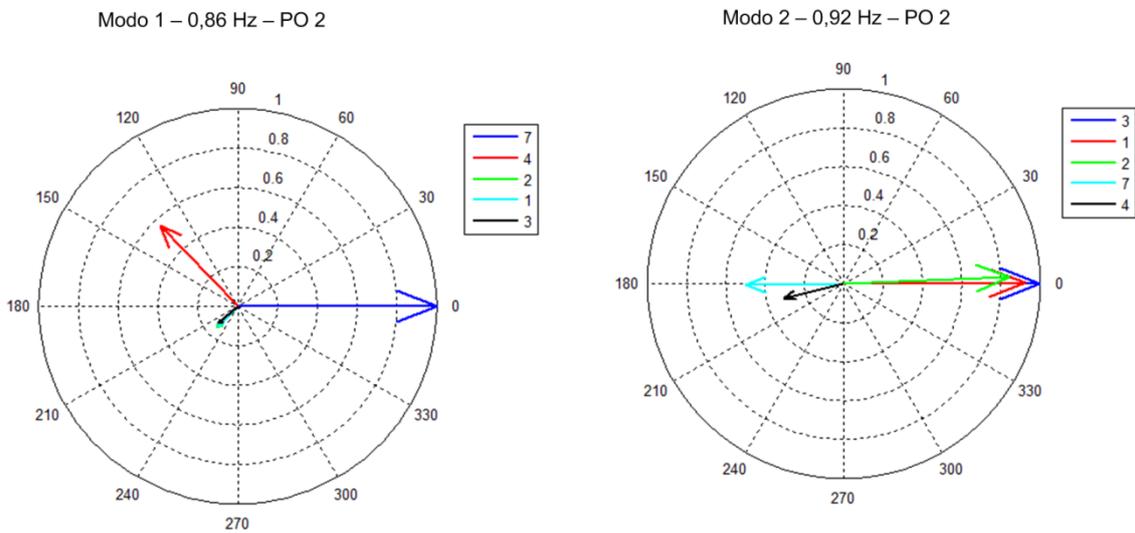


Figura 5.3 - *Mode shapes* de velocidade - Cenário 2.

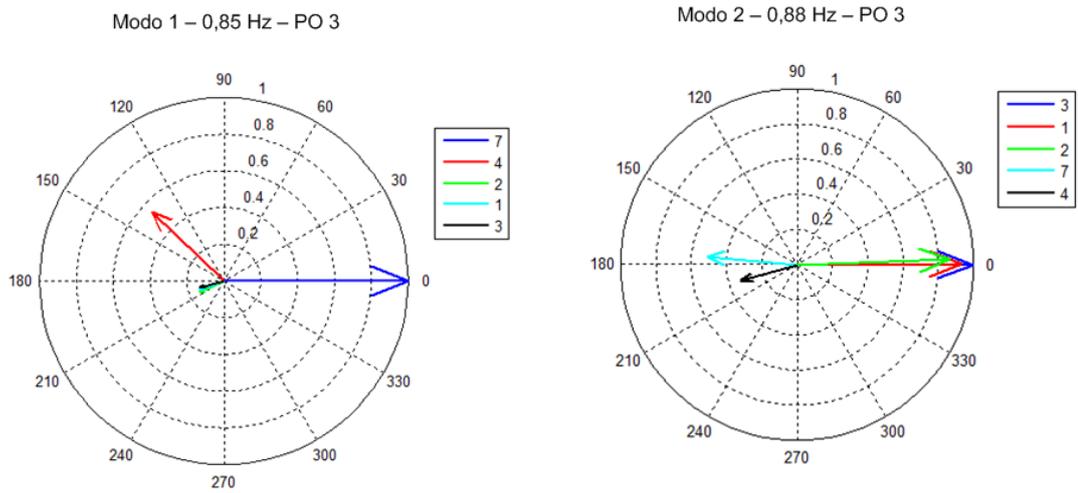


Figura 5.4 - *Mode shapes* de velocidade - Cenário 3.

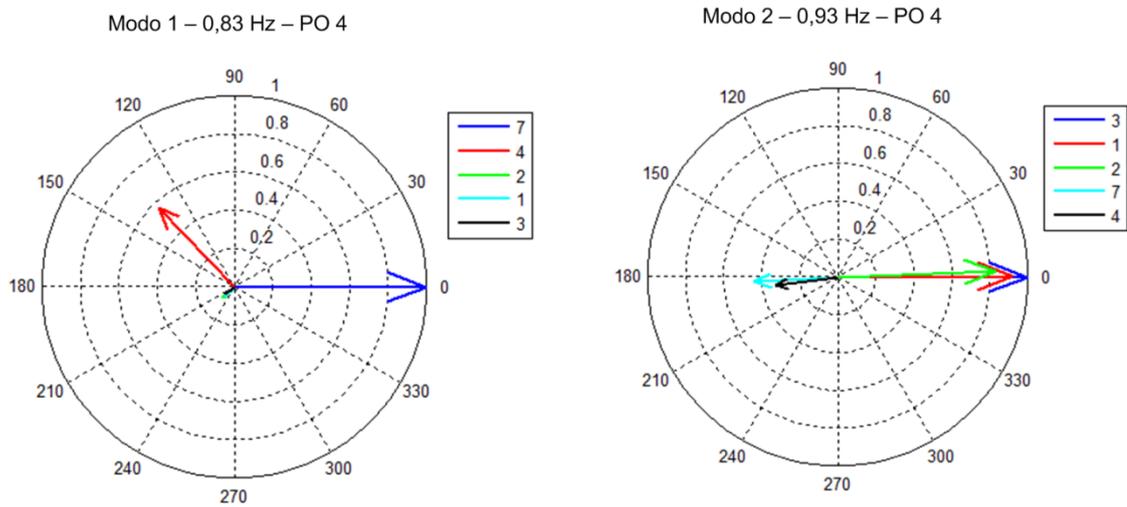


Figura 5.5 - *Mode shapes* de velocidade - Cenário 4.

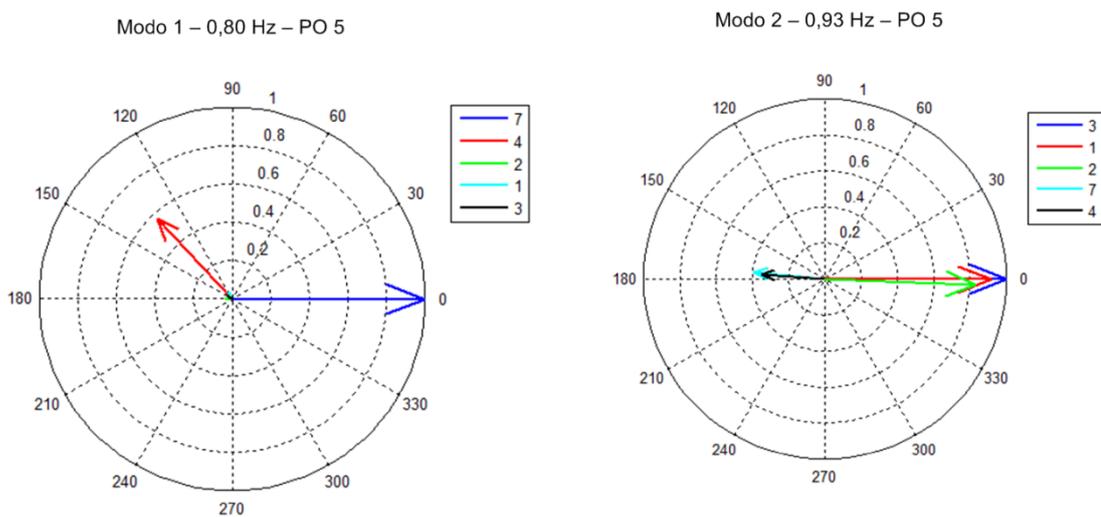


Figura 5.6 - *Mode shapes* de velocidade - Cenário 5.

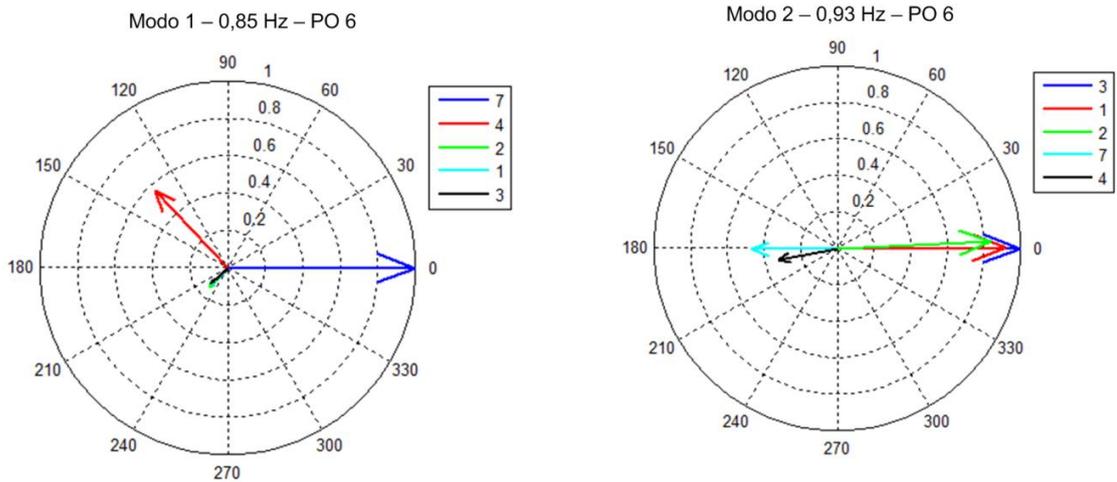


Figura 5.7 - *Mode shapes* de velocidade - Cenário 6.

Observa-se que o sistema sob análise é instável em malha aberta, sendo o cenário 5 o mais instável de acordo com a Tabela 5.4. Nesse sentido, torna-se necessária a instalação de estabilizadores nos geradores síncronos com o objetivo de se estabilizar o sistema.

Para identificar os geradores mais propícios para receberem os estabilizadores visando o amortecimento dos modos críticos, deve-se analisar os fatores de observabilidade e controlabilidade (cuja multiplicação fornece o valor do resíduo da função de transferência ω/V_{ref} de cada gerador).

Os fatores de observabilidade fornecem a medida da atividade de um modo na variável de saída ω de um gerador. Em contrapartida, os fatores de controlabilidade fornecem a medida da excitação de um modo provocada por um distúrbio em um gerador de entrada V_{ref} (variável de entrada).

Os fatores de controlabilidade da entrada V_{ref} no quinto cenário, para cada gerador, são apresentadas na Figura 5.8.

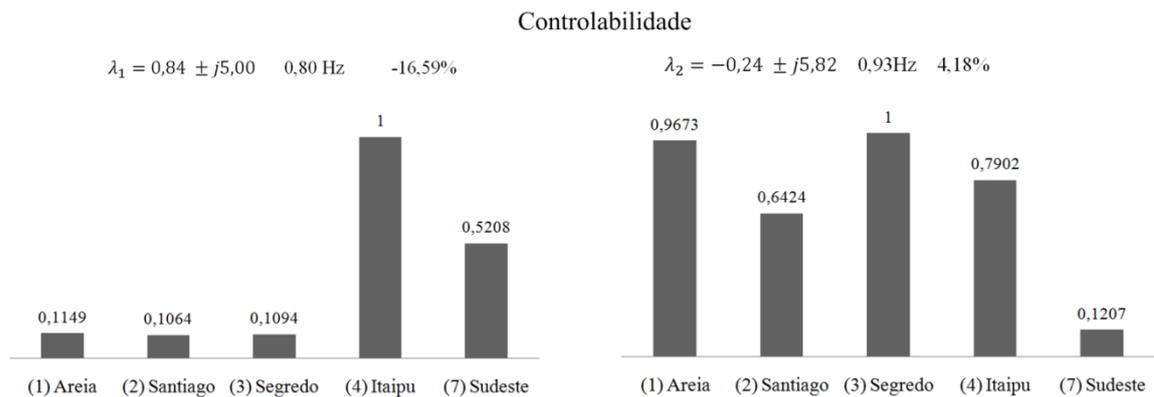


Figura 5.8 - Índices de controlabilidade de V_{ref} - Cenário 5.

Os fatores de observabilidade da entrada ω no quinto cenário, para cada gerador, são apresentadas na Figura 5.9.

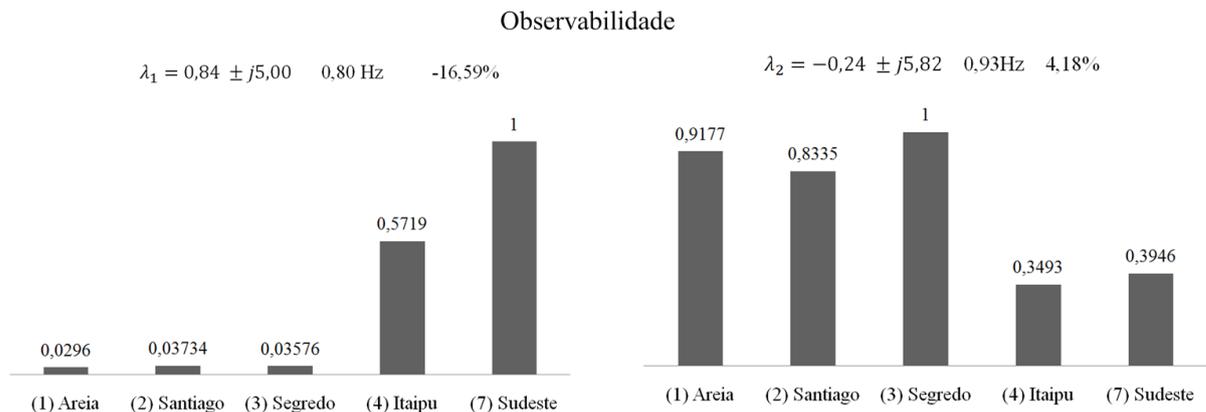


Figura 5.9 - Índices de observabilidade de ω - Cenário 5.

Inicialmente deve-se considerar que o gerador da barra 7 não receberá um estabilizador por ser um equivalente do Sistema Sudeste. Observando os fatores de controlabilidade e observabilidade para os modos críticos no quinto cenário apresentados nas figuras anteriores, conclui-se que os geradores nas barras de Itaipu (4) e de Salto Segredo (3) são os mais indicados para receberem os estabilizadores.

A necessidade dos dois estabilizadores (requisito mínimo) se deve ao fato da função de transferência de malha aberta da barra de Itaipu apresentar um problema de controlabilidade, pois existe a presença de dois zeros e dois pólos complexos próximos no semi-plano direito (CHOW e SANCHEZ-GASCA, 2000). Como se sabe, a existência dos zeros críticos muito próximos do pólo que se deseja amortecer sugere a impossibilidade de se estabilizar este modo através do fechamento da malha de controle. Nesse caso, o sistema só é

estabilizado com a instalação mínima de dois estabilizadores, sendo um em Itaipu e outro em Salto Segredo (MARTINS e LIMA, 1989b; DILL e SILVA, 2012).

Nas seções seguintes será realizado o projeto da estrutura de controle descentralizada do sistema equivalente Sul-Sudeste brasileiro utilizando-se as diversas metodologias descritas no capítulo anterior.

5.3.3 Definição de Parâmetros de Simulação

Na seção 5.3.2 foi identificado que o requisito mínimo para a estabilização do sistema sob análise é a instalação de dois estabilizadores: (i) um em Itaipu e outro em (ii) Salto Segredo. Entretanto, com o objetivo de aumentar o porte do problema de otimização, considera-se que todos os geradores (com exceção do equivalente do Sudeste) possuem estabilizadores a serem ajustados.

Os parâmetros do sistema de controle são apresentados na Tabela 5.5, sendo que dois deles são obtidos da literatura técnica (FERRAZ, 2002): número de blocos de compensação e constante de tempo do filtro *washout*.

Tabela 5.5: Parâmetros do sistema de controle usados para o Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
Geradores considerados no controle	Foz do Areia (barra 1) Salto Santiago (barra 2) Salto Segredo (barra 3) Itaipu (barra 4)
Constante de tempo do Filtro <i>Washout</i> (seg)	$T_{\omega} = 3$
Número de blocos no estágio de compensação	$nb = 2$
Número de cenários	6
Limite das variáveis	$0,01 \leq K_p \leq 20$ $0,1 \leq \alpha_p \leq 10$ $1,25 \leq \omega_p \leq 30$

Para o sistema sob análise, a Tabela 5.6 apresenta os parâmetros dos algoritmos bioinspirados: número de indivíduos e de geração.

Tabela 5.6: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

<i>Parâmetros</i>	<i>Descrição</i>
Total de indivíduos	25 26 (métodos multipopulacionais)
Números de sub-populações nas metodologias multipopulacionais	2 (cada sub-população com 13 indivíduos)
Total de gerações	50

Em relação ao intervalo de gerações para a realização da busca local por gradiente para refinamento de ganhos (metodologias 2, 4, 6 e 8) e reinicialização da população (metodologias 3, 4, 7 e 8):

- i. foi adotado um intervalo de 10 gerações para a execução do gradiente;
- ii. se após 15 gerações o fator de amortecimento mínimo for menor que 7 %, a população é reiniciada aleatoriamente.

5.3.4 Resultados

Com o objetivo de fazer um estudo comparativo sistemático, foi utilizada a mesma população inicial (posição e velocidade dos indivíduos) para todas as metodologias. A melhor solução da população inicial corresponde à um amortecimento de 5,2 % em malha fechada considerando-se todos os seis cenários operativos.

Foram executadas três simulações para cada metodologia e os resultados (mínimo amortecimento em malha fechada) são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Mínimo amortecimento obtido: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

<i>Método</i>		<i>3º Melhor (%)</i>	<i>2º Melhor (%)</i>	<i>1º Melhor (%)</i>	<i>Tempo Médio (min)</i>
1	<i>PSO-Comum</i>	12,63	12,87	13,42	2,40
2	<i>PSO+Gradiente</i>	13,62	13,63	13,82	3,30
3	<i>PSO-Multipopulacional</i>	13,57	13,72	14,11	2,58
4	<i>PSO Multipopulacional+Gradiente</i>	13,88	13,96	14,04	4,00
5	<i>BAT-Comum</i>	12,36	12,80	12,82	2,53
6	<i>BAT+Gradiente</i>	13,20	13,66	14,31	3,28
7	<i>BAT-Multipopulacional</i>	12,40	12,48	12,62	2,72
8	<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>	12,87	13,69	13,98	4,05

Com base na Tabela 5.7, a Figura 5.10 apresenta um comparativo da 1ª melhor solução obtida por cada um dos métodos.

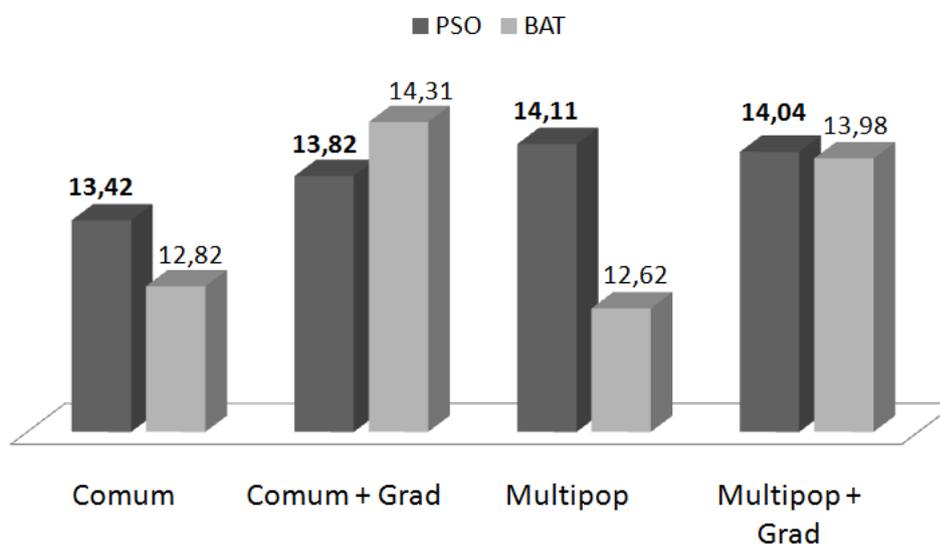


Figura 5.10 - 1ª melhor solução (%) - Sistema Sul Sudeste.

A partir dos resultados da Tabela 5.7 e da Figura 5.10 é possível obter as seguintes conclusões:

1. Para o sistema Sul Sudeste, ambas as metodologias apresentaram fatores de amortecimento na faixa de 12,40% à 14,30%. Entretanto ressalta-se que os

fatores de amortecimento podem variar em uma faixa mais ampla para outros sistemas;

2. Embora a melhor solução tenha sido obtida pelo método *Bat Comum com Etapa de Gradiente* (14,31%) (contra o 14,11% do *PSO Multipopulacional*), os resultados apresentados pelas metodologias baseadas no *PSO* apresentaram melhores resultados para o sistema sob análise. Como a atualização das partículas no *PSO* não é realizada de forma brusca (pois considera a constante de inércia, o fator cognitivo e o social), a solução possui maior probabilidade de ser melhorada ao longo de todo o processo de otimização (o método do *BAT* possui uma tendência de encontrar as melhores soluções de uma forma mais rápida, uma vez que os indivíduos podem se movimentar bruscamente em direção à melhor solução). Além disso, cita-se que o *PSO* possui parâmetros tais como constante de inércia e limites de velocidade, que poderiam ser incluídas no método baseado no *Bat Algorithm* para melhorar as soluções;
3. Em relação às metodologias multipopulacionais (que dividiram a população original em duas), observa-se que aquelas baseadas no método *PSO* apresentaram melhores resultados que as metodologias baseadas em uma única população. A justificativa é que as metodologias multipopulacionais tendem a aumentar a diversidade da população. Em contrapartida, as metodologias multipopulacionais baseadas no *Bat Algorithm* apresentaram resultados inferiores às metodologias com uma única população (esse fato será avaliado adiante). Em relação ao uso do gradiente, observa-se que o refinamento dos ganhos aumenta a qualidade das soluções;
4. De uma forma geral, a inclusão da etapa do gradiente nos algoritmos propiciou uma melhoria nos resultados em comparação com as metodologias que não utilizam essa etapa de busca local. Entretanto, algumas observações são necessárias:
 - Deve-se ressaltar que a etapa do gradiente executa somente uma busca local na bacia de atração encontrada pela busca global. Em outras palavras, a obtenção das melhores soluções depende de ambas as

etapas: global e local. Logo, a aplicação do gradiente não é garantia de se obter melhores soluções. Ao se trabalhar com 2 populações nas metodologias multipopulacionais, o número de indivíduos é reduzido pela metade (cada sub-população possui metade do total de indivíduos), o que pode impactar na busca global, ocasionando soluções um pouco piores que as dos métodos que utilizam somente uma população. Uma alternativa seria o emprego de sub-populações com uma maior quantidade de indivíduos, o que elevaria o esforço computacional;

- uma melhora na faixa de 0,4 a 1,5% (em valores absolutos de amortecimento) foi obtida pelas metodologias que utilizam uma única população e a etapa de gradiente. Para os métodos multipopulacionais, em geral obteve-se melhorias da ordem 1,4 % (em valores absolutos de amortecimento) para algumas soluções.

5. Em relação ao esforço computacional, observa-se que:

- as metodologias baseadas no algoritmo do *PSO* e do *BAT* consumiram tempos computacionais relativamente próximos (por exemplo as metodologias 4 e 8 convergiram em 4,4 minutos na média);
- de forma geral as metodologias que não utilizam a etapa do gradiente convergiram em tempos computacionais equivalentes;
- os maiores tempos computacionais consumidos pelas metodologias multipopulacionais com gradiente estão justificados pelo fato dessas metodologias executarem 2 buscas locais com gradiente ao redor da melhor solução de cada sub-população a cada 10 gerações. Comparando-se somente as metodologias multipopulacionais, um aumento máximo de 55% foi observado ao se empregar o método do gradiente;
- comparando-se as metodologias que utilizam uma única população, um aumento máximo de 37,5% foi observado ao se incluir a busca local por gradiente.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.7 foi possível observar que as metodologias multipopulacionais baseadas no *Bat Algorithm* apresentaram resultados inferiores aos métodos que utilizam uma única população. Entretanto, esses resultados foram

obtidos considerando uma população de 26 indivíduos e 50 gerações. Os resultados podem ser melhorados através da variação do número de indivíduos da população (que reflete no número de indivíduos das subpopulações) e de gerações, conforme ilustrado na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9.

Tabela 5.8: Mínimo amortecimento obtido (*Bat Multipopulacional*): Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

<i>Indivíduos</i>	<i>Gerações</i>	
	<i>50</i>	<i>100</i>
26	<i>1^a - 12,62 %</i>	<i>1^a - 13,89 %</i>
	<i>2^a - 12,48 %</i>	<i>2^a - 13,54 %</i>
	<i>3^a - 12,40 %</i>	<i>3^a - 13,28 %</i>
	<i>2,72 min</i>	<i>4,77 min</i>
50	<i>1^a - 13,23 %</i>	<i>1^a - 14,03 %</i>
	<i>2^a - 13,16 %</i>	<i>2^a - 13,94 %</i>
	<i>3^a - 13,16 %</i>	<i>3^a - 13,60 %</i>
	<i>4,70 min</i>	<i>9,18 min</i>

Tabela 5.9: Mínimo amortecimento obtido (*Bat Multipopulacional com Gradiente*): Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

<i>Indivíduos</i>	<i>Gerações</i>	
	<i>50</i>	<i>100</i>
26	<i>1^a - 13,69 %</i>	<i>1^a - 13,90 %</i>
	<i>2^a - 13,98 %</i>	<i>2^a - 13,49 %</i>
	<i>3^a - 12,87 %</i>	<i>3^a - 13,31 %</i>
	<i>4,58 min</i>	<i>7,58 min</i>
50	<i>1^a - 13,83 %</i>	<i>1^a - 14,09 %</i>
	<i>2^a - 13,61 %</i>	<i>2^a - 13,84 %</i>
	<i>3^a - 13,05 %</i>	<i>3^a - 13,36 %</i>
	<i>5,98 min</i>	<i>12,04 min</i>

Com base na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9 é possível concluir que o aumento do número de indivíduos pode produzir melhores resultados, uma vez que aumenta o número de indivíduos das subpopulações. Em contrapartida o tempo computacional é aumentado. Nesse caso, deve-se buscar um compromisso entre a qualidade de solução e o esforço computacional.

5.3.5 Análise da Convergência

Nessa seção é apresentada uma análise da convergência dos métodos populacionais considerados nessa tese. Atenção especial é dada aos métodos populacionais híbridos que executam uma busca local através do método do gradiente descendente.

Os gráficos da Figura 5.11 à Figura 5.13 correspondem à evolução dos algoritmos considerando a 1ª melhor solução apresentada na Tabela 5.7 (e Figura 5.10). Os gráficos apresentam a evolução crescente do coeficiente de amortecimento.

A Figura 5.11 apresenta de forma gráfica a convergência dos métodos populacionais que utilizam uma única população, com ou sem a etapa de busca local baseada em gradiente. Observa-se que, partindo de uma mesma população inicial, o método híbrido baseado no *Bat Algorithm* alcança a melhor solução conforme discutido anteriormente. Adicionalmente, observa-se uma estagnação na solução, tanto para o método *PSO Comum* (a partir da 24ª iteração) quanto o *Bat Comum* (a partir da 30ª iteração).

Com o objetivo de reduzir o esforço computacional, uma estratégia poderia ter sido adotada para encerrar o processo no caso de estagnação da solução. Uma alternativa seria verificar se, em um intervalo de 10 gerações, a melhoria da função objetivo é menor que uma tolerância pré-especificada: caso seja, o processo é abortado.

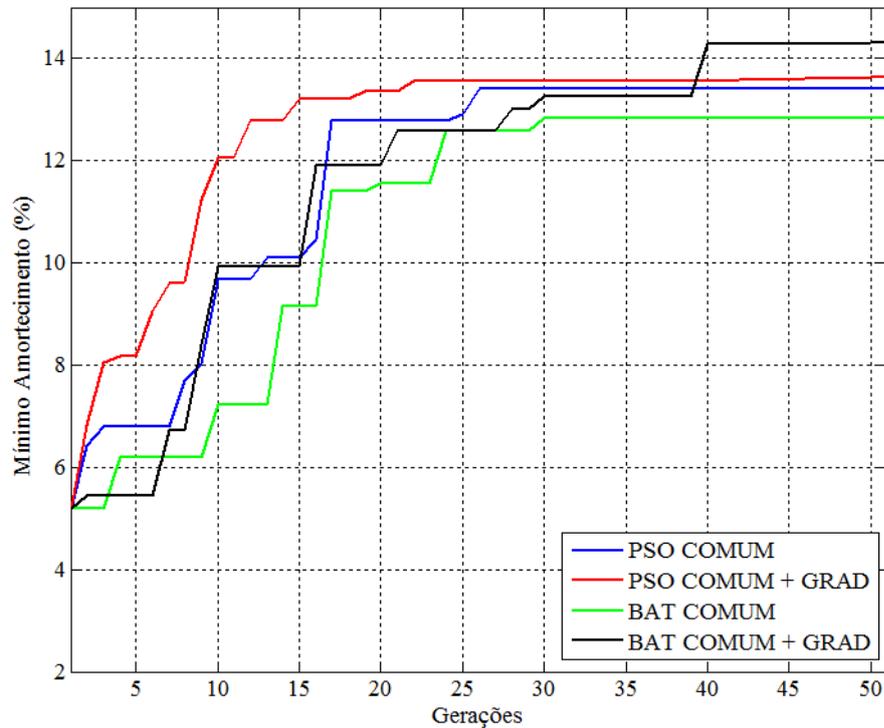


Figura 5.11 - Convergência dos métodos.

Conforme mencionado na revisão bibliográfica (Capítulo 2) e no Capítulo 4, o emprego de sub-populações permite manter a diversidade da população, reduzindo a possibilidade de convergência prematura (de maior parte da população) para um ponto do espaço de busca associado a uma solução de pior qualidade.

A convergência das metodologias multipopulacionais desse trabalho foi avaliada nas Figuras 5.12 e 5.13. Na Figura 5.12 observa-se a vantagem de se trabalhar com métodos multipopulacionais: embora uma subpopulação apresente o problema de convergência prematura para uma solução de pior qualidade (curva em azul tracejada), a outra apresenta melhores resultados (curva em azul contínua).

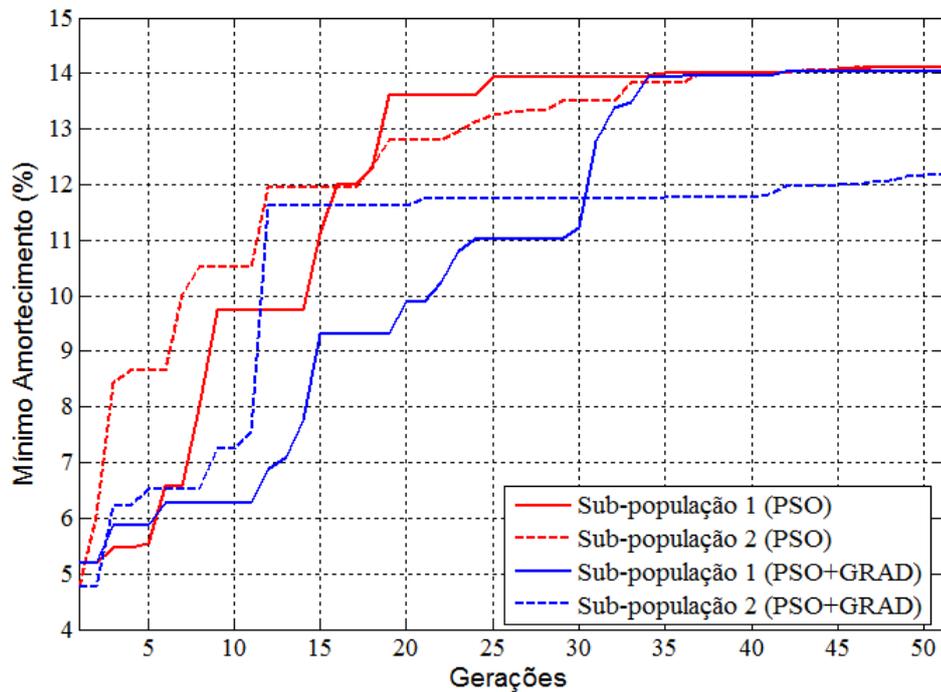


Figura 5.12 - Convergência do método *PSO Multipopulacional* (sem e com gradiente).

Os comentários realizados para os métodos *PSO* multipopulacionais são válidos para os métodos *BAT* multipopulacionais (Figura 5.13). A estratégia implementada nos métodos multipopulacionais consiste em reiniciar aleatoriamente uma subpopulação após a 15ª geração caso o amortecimento mínimo associado for menor que 7%. Observa-se que a curva em vermelho tracejada indica uma estagnação em um valor pouco acima de 8% (assim a reinicialização não ocorre). Nesse caso, uma estratégia mais elaborada poderia ter sido implementada para reinicializar essa sub-população.

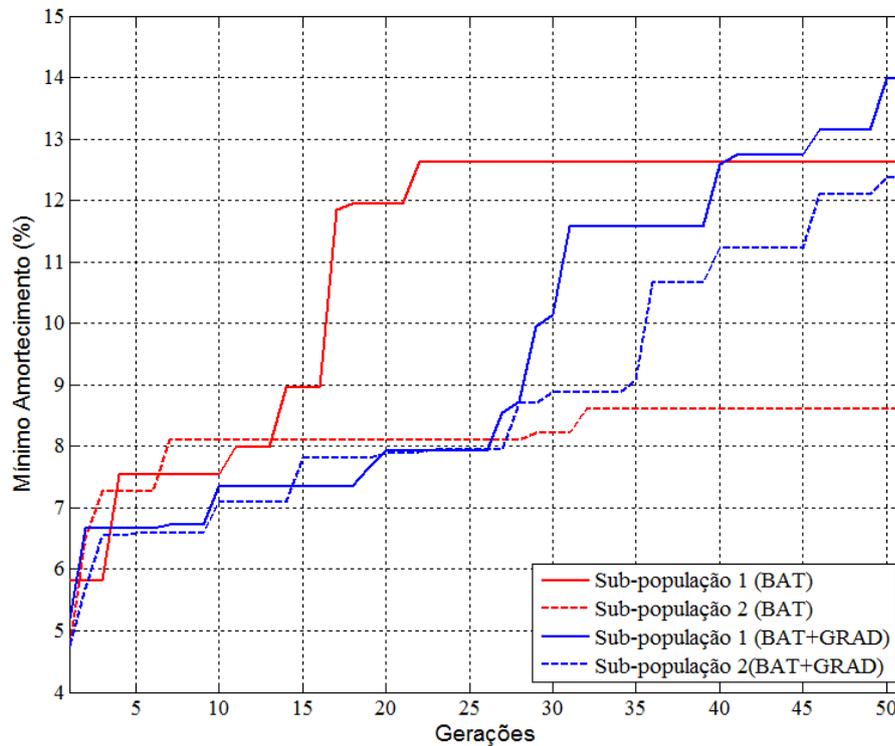


Figura 5.13 - Convergência do método *BAT Multipopulacional* (sem e com gradiente).

Por fim, de forma a verificar o efeito da busca local por gradiente para o refinamento de ganhos (mantendo fixo o ajuste de fase na melhor solução corrente do algoritmo populacional), são apresentados os valores de amortecimento antes e após a aplicação do método do gradiente a cada 10 gerações.

Para os métodos baseados em uma única população (*PSO* e *Bat Algorithm*), os resultados são apresentados na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11. Os casos onde se teve uma variação de amortecimento superior a 0,10 % são destacados nas tabelas. De forma geral, pode-se concluir que o método do gradiente, ao refinar os ganhos, permite um melhoramento na solução na faixa de 0,10% a 1,7% (valores absolutos de amortecimento). Ressalta-se que, quando a busca global não posiciona a solução em uma bacia de atração promissora, o método do gradiente tende a estagnar-se na sua solução anterior. Além disso, quando o ponto corrente está perto de um ponto de um mínimo (local ou global), os gradientes são próximos de zero, fazendo com que passos pequenos sejam dados).

Tabela 5.10: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: *PSO + Gradiente*.

<i>Geração</i>	<i>Amortecimento Pré e Pós Etapa do Gradiente (%)</i>			
	<i>1ª Melhor Solução</i>		<i>2ª Melhor Solução</i>	
	<i>Pré</i>	<i>Pós</i>	<i>Pré</i>	<i>Pós</i>
10	10,40	12,17	12,06	12,77
20	13,29	13,41	13,36	13,56
30	13,64	13,74	13,56	13,56
40	13,77	13,78	13,56	13,58
50	13,80	13,82	13,63	13,63

Tabela 5.11: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: *BAT + Gradiente*.

<i>Geração</i>	<i>Amortecimento Pré e Pós Etapa do Gradiente (%)</i>			
	<i>1ª Melhor Solução</i>		<i>2ª Melhor Solução</i>	
	<i>Pré</i>	<i>Pós</i>	<i>Pré</i>	<i>Pós</i>
10	8,39	9,92	11,96	12,00
20	11,90	11,91	12,00	12,05
30	13,02	13,27	12,46	12,49
40	14,28	14,29	12,49	12,52
50	14,29	14,31	12,91	13,66

A partir da Tabela 5.11 observa-se a importância do correto balanceamento entre as etapas de busca local (intensificação) e global (exploração). Na 10ª geração um aumento de 1,5% em valor absoluto de amortecimento foi alcançado através da busca local pelo Método do Gradiente: dificilmente a intensificação estocástica do *Bat Algorithm* convencional forneceria um aumento dessa magnitude. Caso a busca local por gradiente continuasse, a solução ficaria estagnada em torno de 9,9%. Em contrapartida, a exploração realizada pelo *Bat Algorithm* permite que a solução seja melhorada e alcance o valor de 11,90% na 20ª geração. A solução de 11,90% não está posicionada em uma bacia de atração promissora, o

que faz com que a intensificação por gradiente não melhore significativamente a solução (11,91%). Novamente, a etapa de busca global do *Bat Algorithm* é importante para a melhoria da solução (13,02% na 30ª geração). O processo de busca global e local continua até o fim das gerações: ressalta-se que a busca global é menos eficiente nas gerações finais, fazendo com que a busca local por gradiente não melhore significativamente a solução.

Adicionalmente, para efeitos de ilustração, considere o caso destacado na Tabela 5.11 (bordas em negrito). Os valores dos ganhos antes e após a etapa de gradiente são apresentados na Tabela 5.12. Com isso comprova-se que o simples refinamento dos ganhos é capaz de melhorar a solução.

Tabela 5.12: Refinamento dos Ganhos: Ilustração nas Etapas Pré e Pós Gradiente.

	<i>Ajuste</i>	<i>Amortecimento</i>
K_{ESP} (Pré)	$K_{ESP\ PRÉ} = [8,3330 \quad 16,6375 \quad 13,3475 \quad 18,9060]$	8,39 %
K_{ESP} (Pós)	$K_{ESP\ PÓS} = [8,3337 \quad 16,6410 \quad 13,3499 \quad 17,7388]$	9,92 %
α_{ESP}	$\alpha_{ESP} = [1,4574 \quad 7,0528 \quad 3,8511 \quad 10,0000]$	Ajuste de Fase Fixo
ω_{ESP}	$\omega_{ESP} = [14,5391 \quad 24,4421 \quad 17,4990 \quad 6,0326]$	

A partir da Tabela 5.12 é possível observar que a maior variação de ganho está associada ao estabilizador na usina de Itaipu. Esse comportamento está de acordo com o que foi visto: o gerador de Itaipu possui os maiores fatores de controlabilidade e observabilidade (vide Figura 5.8 e Figura 5.9) associados ao modo menos amortecido.

As Tabelas 5.13 e 5.14 apresentam o efeito do refinamento dos ganhos nas metodologias multipopulacionais baseadas nos métodos *PSO* e *Bat Algorithm*. Os casos onde se teve uma variação de amortecimento superior a 0,10 % são destacados. É possível concluir que o correto balanceamento entre as buscas global e local nas metodologias multipopulacionais forneceram resultados satisfatórios.

Tabela 5.13: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: *PSO Multipop. + Gradiente* - 1ª melhor solução.

<i>Geração</i>	<i>Sub-população 1 Amortecimento (%)</i>		<i>Sub-população 2 Amortecimento (%)</i>	
	<i>Pré-Gradiente</i>	<i>Pós-Gradiente</i>	<i>Pré-Gradiente</i>	<i>Pós-Gradiente</i>
10	6,26	6,49	7,56	11,62
20	9,89	10,17	11,74	11,75
30	12,77	12,98	11,75	11,75
40	13,96	14,03	11,82	11,96
50	14,03	14,04	12,20	12,21

Tabela 5.14: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: *BAT Multipop. + Gradiente* - 1ª melhor solução.

<i>Geração</i>	<i>Sub-população 1 Amortecimento (%)</i>		<i>Sub-população 2 Amortecimento (%)</i>	
	<i>Pré-Gradiente</i>	<i>Pós-Gradiente</i>	<i>Pré-Gradiente</i>	<i>Pós-Gradiente</i>
10	6,72	7,35	6,89	7,10
20	7,66	7,93	7,81	7,90
30	9,93	10,14	8,70	8,87
40	11,57	12,59	10,66	11,22
50	13,15	13,98	12,09	12,36

5.3.6 Parâmetros dos Controladores Projetados e Análise dos Cenários

A Tabela 5.15 apresenta os fatores de amortecimento mínimo em cada um dos seis cenários anteriormente apresentados. São apresentados os fatores de amortecimento para o sistema operando tanto em malha aberta quanto em malha fechada. Em malha fechada,

considera-se o melhor ajuste de cada método (1ª melhor solução) da Tabela 5.7. Para cada ajuste são destacados os cenários com o menor fator de amortecimento.

A partir da Tabela 5.15 é possível concluir que os controladores projetados são capazes de estabilizar o sistema, garantindo um fator de amortecimento de boa qualidade.

Os parâmetros dos controladores projetados por cada método (melhor solução das três executadas) são apresentados na Tabela 5.16 à Tabela 5.19.

Tabela 5.15: Fator de amortecimento por cenário (%): Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

		<i>Cenários</i>					
		1	2	3	4	5	6
<i>Malha Aberta</i>		-11,90	-12,11	-12,66	-14,04	-16,59	-12,68
<i>Malha Fechada</i>	<i>PSO-Comum</i>	13,43	13,56	13,71	13,93	13,42	13,43
	<i>PSO+Gradiente</i>	13,82	13,84	13,83	13,88	13,84	13,82
	<i>PSO-Multipop.</i>	14,13	14,27	14,59	14,60	14,11	14,12
	<i>PSO Multipop.+Gradiente</i>	14,05	14,19	14,51	14,52	14,04	14,05
	<i>BAT-Comum</i>	14,52	14,66	14,98	15,01	12,82	14,59
	<i>BAT+Gradiente</i>	14,54	14,68	14,76	14,81	14,31	14,51
	<i>BAT-Multipop.</i>	12,62	12,77	13,09	13,11	12,64	12,69
	<i>BAT Multipop.+Gradiente</i>	13,98	14,10	14,07	14,13	13,99	14,00

Tabela 5.16: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Gerador	<i>PSO-Comum (1)</i>			<i>PSO+Gradiente (2)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01 (Foz do Areia)	10,187	0,950	13,955	9,835	1,320	18,538
02 (Salto Santiago)	9,001	6,340	21,922	14,779	0,400	15,883
03 (Salto Segredo)	16,360	2,990	25,386	13,164	6,020	16,450
04 (Itaipu)	10,622	10,000	5,080	13,404	10,000	5,711
	Amortecimento mínimo de 13,42% no cenário 5			Amortecimento mínimo de 13,82% no cenário 1		

Tabela 5.17: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Gerador	<i>PSO-Multipop. (3)</i>			<i>PSO Multipop.+Gradiente (4)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01 (Foz do Areia)	9,659	5,590	25,316	9,669	2,340	18,392
02 (Salto Santiago)	10,223	3,270	17,091	13,683	2,410	30,000
03 (Salto Segredo)	15,966	0,980	27,664	15,174	1,670	15,898
04 (Itaipu)	18,835	10,000	6,716	16,376	10,000	6,291
	Amortecimento mínimo de 14,11% no cenário 5			Amortecimento mínimo de 14,04% no cenário 5		

Tabela 5.18: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Gerador	<i>BAT-Comum (5)</i>			<i>BAT+Gradiente (6)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01 (Foz do Areia)	9,200	1,050	15,556	7,360	1,630	16,768
02 (Salto Santiago)	18,417	6,780	23,982	10,981	7,050	26,999
03 (Salto Segredo)	13,140	1,560	14,922	19,373	1,480	17,376
04 (Itaipu)	16,577	9,860	6,351	20,000	10,000	6,956
	Amortecimento mínimo de 12,82% no cenário 5			Amortecimento mínimo de 14,31% no cenário 5		

Tabela 5.19: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Gerador	<i>BAT-Multipop. (7)</i>			<i>BAT Multipop.+Gradiente (8)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01 (Foz do Areia)	12,932	1,240	18,147	11,629	1,240	15,269
02 (Salto Santiago)	4,414	5,010	21,004	9,696	6,940	22,723
03 (Salto Segredo)	17,938	2,740	16,476	16,666	1,460	15,298
04 (Itaipu)	14,307	9,660	5,693	16,641	9,950	6,319
	Amortecimento mínimo de 12,62% no cenário 1			Amortecimento mínimo de 13,98% no cenário 1		

5.3.7 Validação não linear dos Controladores Projetados

Com o objetivo de validar o projeto de controle realizado, simulações não lineares foram conduzidas. Para essa finalidade, foi aplicado um curto circuito trifásico na barra 5. Esse curto circuito foi eliminado após 50ms através da abertura da linha 1-5 e logo após 50ms essa linha foi religada. Esse procedimento de validação foi o mesmo utilizado em (DILL e SILVA, 2012). A barra 5 e a linha 1-5 que estão associadas ao evento simulado são identificadas na Figura 5.14.

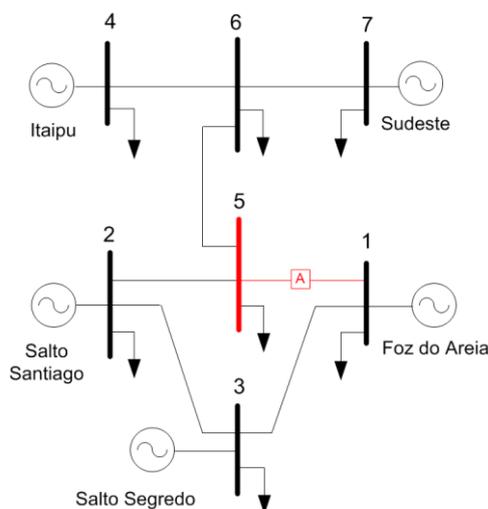


Figura 5.14 -Identificação dos elementos associados ao evento.

As simulações não lineares serão executadas para o quinto cenário, uma vez que neste cenário foram obtidos a maioria dos menores fatores de amortecimento (vide Tabela 5.15). Embora todos os controladores tenham sido validados, para efeitos de ilustração, serão apresentadas somente a validação dos controladores ajustados pelo método *BAT Comum + Gradiente* (amortecimento de 14,31 %) e *BAT Multipopulacional* (amortecimento de 12,62%). Os controladores ajustados pelos demais métodos estão na faixa compreendida entre esses dois extremos (12,62% e 14,31%).

Os gráficos dos ângulos dos geradores de Itaipu (4) e Foz do Areia (1) são apresentados na Figura 5.15 e na Figura 5.16, respectivamente. Como a faixa de variação da taxa de amortecimento é estreita (12,62% a 14,31%), as curvas são bastante similares.

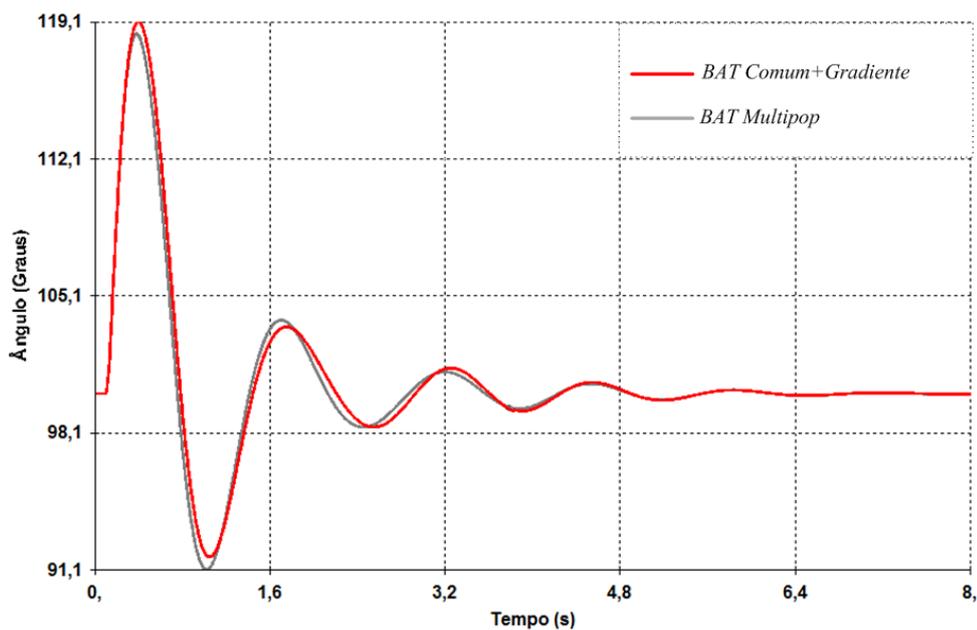


Figura 5.15 - Ângulo do gerador de Itaipu- Cenário 5.

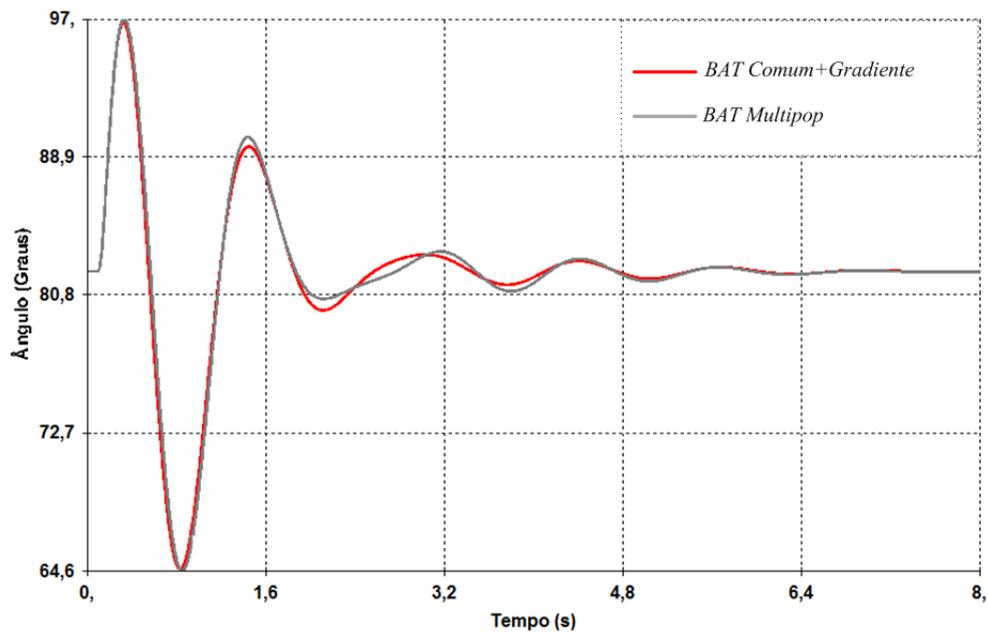


Figura 5.16 - Ângulo do gerador de Foz do Areia- Cenário 5.

5.3.8 Comparação com a Literatura

A partir do estudo comparativo apresentado na Tabela 5.20, observa-se que os valores obtidos com as metodologias propostas (baseadas no *PSO* e *Bat Algorithm*) estão na faixa de amortecimento que consta na literatura (para os mesmos cenários e modelagem dinâmica), fornecendo melhores resultados.

Tabela 5.20: Comparação com a Literatura: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

<i>Método</i>	ξ_{min} (%)	<i>Referência</i>
<i>PSO-Multipopulacional</i>	14,11	Proposta
<i>BAT+Gradiente</i>	14,31	Proposta
Algoritmos Genéticos	13,09	(CÁRDENAS, 2011)
Controle Clássico	2,95	(MARTINS e LIMA, 1989b)
Controle Moderno (<i>LMI</i>)	10,10	(BOUKARIM, CHOW e MARTINS, 2000)
Alocação de Pólos baseada no Resíduos das Funções de Transferência	10,10	(FERRAZ, 2002)

5.3.9 Análise Preliminar de Resultados

De forma geral, pode-se destacar as seguintes conclusões associadas ao projeto do controle descentralizado do sistema Sul Sudeste:

- as metodologias baseadas no método *PSO* apresentaram as melhores soluções, embora a melhor solução geral tenha sido obtida pelo método baseado no *Bat Comum* com etapa de gradiente;
- para as metodologias baseadas no *PSO* os métodos multipopulacionais apresentaram melhores resultados (quando comparados com métodos de uma única população), o que não foi obtido através daquelas baseadas no *BAT Algorithm*;
- as metodologias multipopulacionais possuem a vantagem de manterem a diversidade da população;
- a etapa do gradiente realiza uma busca local através do refinamento dos ganhos, fornecendo resultados satisfatórios. Como exemplo, cita-se que a inclusão da etapa de busca local por gradiente no *Bat Comum* melhorou a solução final em 1,5% (em valores absolutos de amortecimento em comparação com os métodos sem a etapa de gradiente). Comparando as metodologias multipopulacionais, baseadas no *Bat Algorithm*, a inclusão do gradiente implicou em um aumento de 1,4% em valores absolutos de amortecimento;
- o emprego da busca local por gradiente demandou um aumento no esforço computacional em relação às metodologias sem gradiente: 37,5% para os métodos com uma única população e 55% para os métodos multipopulacionais.

5.4 SISTEMA NEW-ENGLAND

5.4.1 Descrição do Sistema

O sistema *New-England*, representado na Figura 5.17, é composto por 39 barras e 10 unidades geradoras (PAI, 1989).

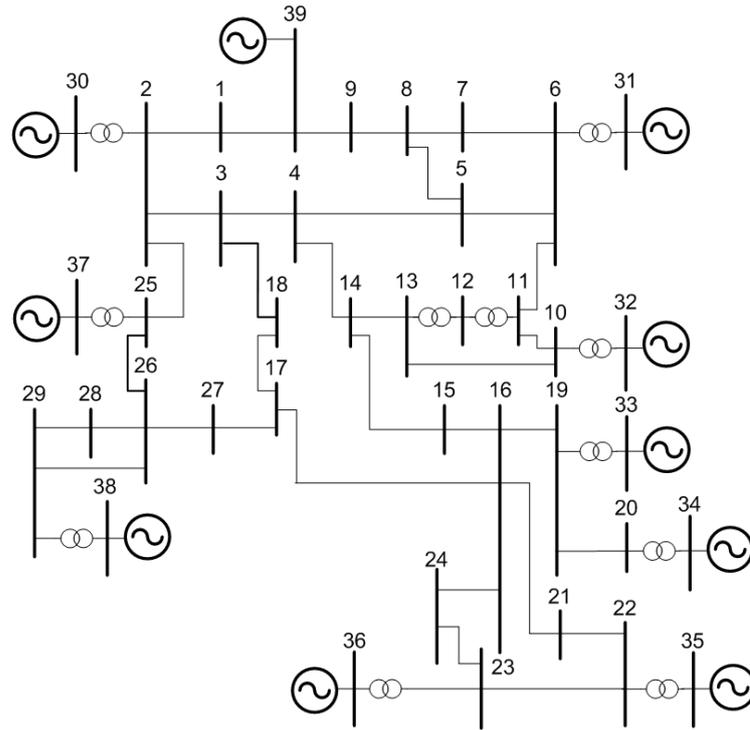


Figura 5.17 - Sistema *New England*.

Conforme (FERRAZ, 2002), o gerador 39 é modelado como uma barra infinita, o gerador 30 é representado por um modelo de terceira ordem (considerando os efeitos transitórios no eixo-d) e os demais geradores por um modelo de quarta ordem (considerando os efeitos transitórios nos eixos q e d). São considerados reguladores de tensão do Tipo 1, que estão associados aos ganhos baixos (vide seção A.3.2 do Apêndice A).

5.4.2 Desempenho em Malha Aberta

Para esse sistema, o procedimento de ajuste é realizado considerando quatorze pontos de operação pré-selecionados conforme (DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000; FERRAZ, 2002). Os cenários, descritos na Tabela 5.21, foram obtidos através de variações de carga e de alterações topológicas. Observa-se que o décimo cenário é o mais instável.

Tabela 5.21: Cenários pré-especificados de operação - Sistema *New-England*.

<i>Cenário</i>	<i>Configuração</i>	<i>Amortecimento Mínimo (%)</i>	<i>Freq. (Hz)</i>
1	Caso Base	1,53	1,12
2	LT 3-18 e 25-26 fora de serviço	-9,59	0,36
3	LT 17-16 e 4-14 fora de serviço	-10,41	0,32
4	LT 6-11 fora de serviço	1,68	1,13
5	Aumento de 360 MW no carregamento	1,52	1,14
6	LT 16-17, 4-14 e 25-26 fora de serviço	-10,96	0,32
7	LT 16-17, 4-14, 25-26 e 1-39 fora de serviço	-15,49	0,27
8	LT 21-22 fora de serviço	-1,61	0,39
9	LT 9-39 fora de serviço	0,25	0,34
10	Redução de 30% do carregamento	-31,07	0,28
11	Aumento de 15% do carregamento	1,53	1,13
12	Aumento de 20% do carregamento	-8,76	0,37
13	Redução de 20% do carregamento	1,57	1,12
14	Aumento de 50% do carregamento das barras 16 e 21. LT 21-22 fora de serviço	-0,23	0,39

LT: Linhas de Transmissão.

A Figura 5.18 apresenta o mapa de pólos para o Sistema *New-England* considerando todos os cenários em malha aberta. O par de pólos mais crítico do sistema em malha aberta está associado ao décimo cenário (vide Tabela 5.21) e está destacado na Figura 5.18.

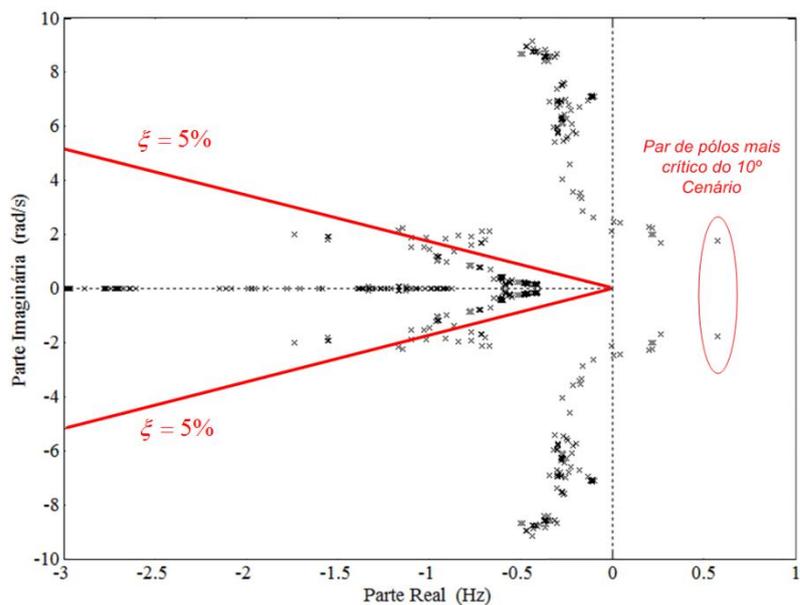


Figura 5.18 - Mapa de Pólos para todos os Cenários em Malha Aberta.

Para o décimo cenário, foram identificados sete modos de oscilação críticos (cujo fator de amortecimento é menor que 5 %): 1 instável e 6 estáveis pouco amortecidos. Esses modos são apresentados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22: Modos de Oscilação Críticos no 10º Cenário- Sistema *New England*.

<i>Modo</i>	<i>Autovalor</i>	<i>Amortecimento Mínimo (%)</i>	<i>Freq. (Hz)</i>
1	$0,57 \pm j 1,75$	-31,07	0,28
2	$-0,11 \pm j 7,13$	1,59	1,14
3	$-0,28 \pm j 7,55$	3,65	1,20
4	$-0,37 \pm j 8,59$	4,27	1,37
5	$-0,30 \pm j 6,93$	4,29	1,10
6	$-0,27 \pm j 6,16$	4,45	0,98
7	$-0,41 \pm j 8,80$	4,67	1,40

Conforme mencionado anteriormente os *mode-shapes* fornecem a medida da atividade de uma variável de estado quando um determinado modo é excitado. Com o objetivo de avaliar o comportamento dos geradores para cada um dos modos de oscilação descritos na Tabela 5.22, os *mode-shapes* são apresentados na Figura 5.19 à Figura 5.22.

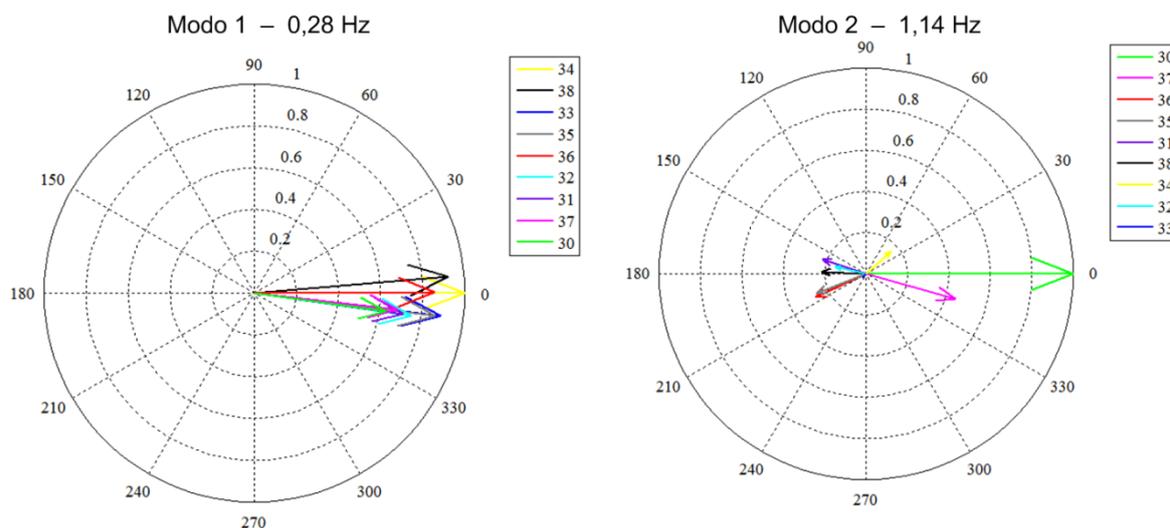


Figura 5.19 - *Mode shapes* de velocidade (*cenário 10*) - Modos 1 e 2.

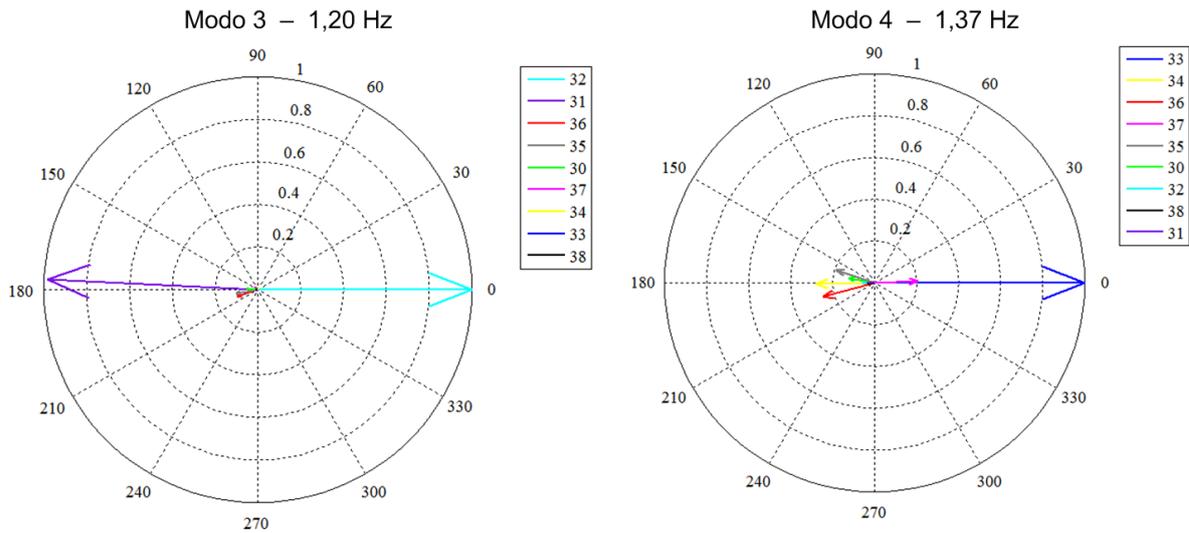


Figura 5.20 - *Mode shapes* de velocidade (*cenário 10*) - Modos 3 e 4.

Da Figura 5.19 e da Figura 5.20 é possível concluir que:

- o modo 1 (0,28 Hz) corresponde a uma oscilação de todos os geradores do sistema contra a barra infinita (barra 39);
- o modo 2 (1,14 Hz) corresponde a uma oscilação dos geradores 30 e 37 contra os demais geradores do sistema;
- o modo 3 (1,20 Hz) corresponde a uma oscilação entre os geradores 31 e 32;
- o modo 4 (1,37 Hz) corresponde a uma oscilação do gerador 33 contra os demais geradores do sistema.

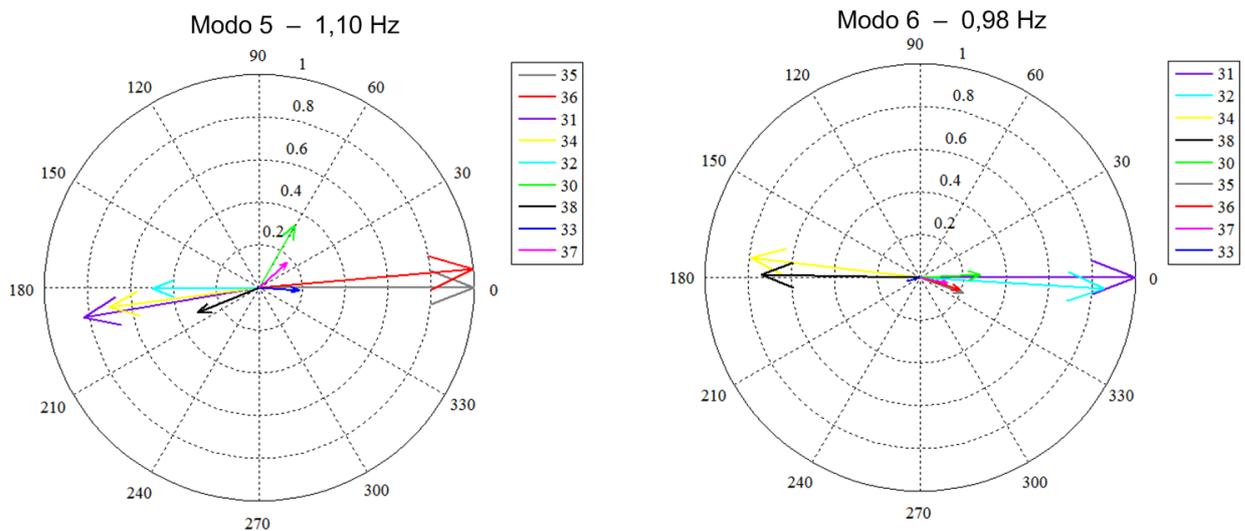


Figura 5.21 - *Mode shapes* de velocidade (*cenário 10*) - Modos 5 e 6.

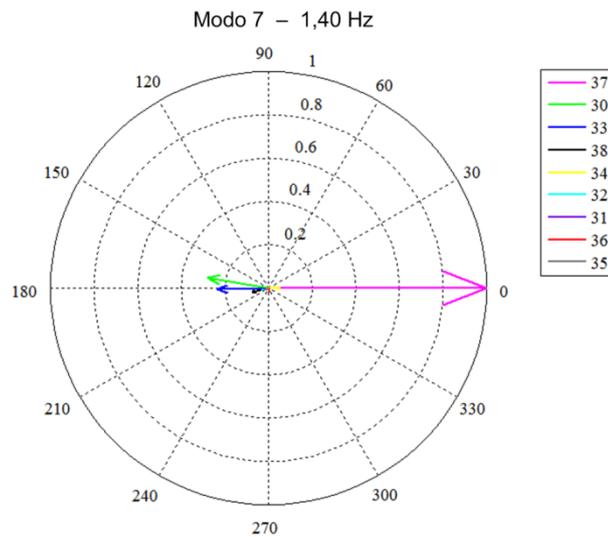


Figura 5.22 - *Mode shapes* de velocidade (*cenário 10*) - Modo 7.

Da Figura 5.21 e da Figura 5.22 é possível concluir que:

- o modo 5 (1,10 Hz) corresponde à uma oscilação entre os geradores 35 e 36 contra os geradores 31, 32 e 34;
- o modo 6 (0,98 Hz) corresponde à uma oscilação dos geradores 31 e 32 contra os geradores 34 e 38;
- o modo 7 (1,40 Hz) corresponde à uma oscilação do gerador 37 contra os demais geradores do sistema.

Considerando que o sistema é instável, torna-se necessária a instalação de estabilizadores nos geradores do sistema, exceto na barra 39 que foi modelada como uma barra infinita. Nesse caso, pode-se utilizar tanto os fatores de controlabilidade e observabilidade quanto os fatores de participação para identificar os geradores mais propícios para receberem os sinais adicionais estabilizadores.

Seguindo a mesma linha apresentada em (DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000; FERRAZ, 2002), será assumido que todos os geradores (exceto o 39) possuem estabilizadores no controle descentralizado. Dessa forma serão projetados nove estabilizadores para o sistema *New-England*.

5.4.3 Definição de Parâmetros de Simulação

Os parâmetros do sistema de controle são apresentados na Tabela 5.23. Os seguintes parâmetros foram obtidos da literatura técnica (FERRAZ, 2002): número de blocos de compensação e constante de tempo do filtro *washout*.

Tabela 5.23: Parâmetros do sistema de controle usados para o Sistema *New-England*.

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
Geradores considerados no controle	30 ao 38
Constante de tempo do Filtro <i>Washout</i> (seg)	$T_{\omega} = 5$
Número de blocos no estágio de compensação	$nb = 3$
Número de cenários	14
Limite das variáveis	$0,01 \leq K_p \leq 40$ $0,1 \leq \alpha_p \leq 10$ $0,4 \cdot \pi \leq \omega_p \leq 4,0 \cdot \pi$

Para o sistema sob análise, a Tabela 5.24 apresenta os parâmetros dos algoritmos bioinspirados: número de indivíduos e de geração.

Tabela 5.24: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados: Sistema *New-England*.

<i>Parâmetros</i>	<i>Descrição</i>
Total de indivíduos	50
Números de sub-populações nas metodologias multipopulacionais	2 (cada subpopulação com 25 indivíduos)
Total de gerações	100

Em relação ao intervalo de gerações para a realização da busca local por gradiente para refinamento de ganhos (metodologias 2, 4, 6 e 8) e reinicialização da população (metodologias 3, 4, 7 e 8):

- iii. foi adotado um intervalo de 20 gerações para a execução do gradiente;
- iv. se após 15 gerações o fator de amortecimento mínimo for menor que 12 %, a população é reiniciada aleatoriamente.

5.4.4 Resultados

Com o objetivo de se fazer um estudo comparativo sistemático, foi utilizada a mesma população inicial (posição e velocidade dos indivíduos) para todas as metodologias. A melhor solução da população inicial corresponde a um amortecimento de 8,57 % em malha fechada considerando todos os quatorze cenários operativos. Foram executadas três simulações para cada metodologia e os resultados (mínimo amortecimento em malha fechada) são apresentados na Tabela 5.25.

Tabela 5.25: Mínimo amortecimento obtido: Sistema *New-England*.

<i>Método</i>		<i>3º Melhor (%)</i>	<i>2º Melhor (%)</i>	<i>1º Melhor (%)</i>	<i>Tempo Médio (min)</i>
<i>1</i>	<i>PSO-Comum</i>	17,89	24,49	25,20	65,95
<i>2</i>	<i>PSO+Gradiente</i>	27,55	27,82	28,34	80,35
<i>3</i>	<i>PSO-Multipopulacional</i>	19,29	20,59	24,16	64,24
<i>4</i>	<i>PSO Multipopulacional+Gradiente</i>	26,42	28,32	29,69	82,41
<i>5</i>	<i>BAT-Comum</i>	18,45	20,60	23,19	60,24
<i>6</i>	<i>BAT+Gradiente</i>	21,92	23,12	23,28	70,41
<i>7</i>	<i>BAT-Multipopulacional</i>	21,49	22,06	23,12	60,84
<i>8</i>	<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>	23,23	23,82	27,18	78,92

De forma geral, a Tabela 5.25 permite concluir que as metodologias híbridas (com gradiente) podem melhorar as soluções: no caso do *PSO* com uma única população, ganhos de amortecimento de 10% (valor absoluto) foram observados (coluna da 3ª melhor solução). Os melhores resultados foram obtidos através das metodologias multipopulacionais híbridas.

Com base na Tabela 5.25, a Figura 5.23 apresenta um comparativo da 1ª melhor solução obtida por cada um dos métodos. O gráfico confirma a análise do parágrafo anterior.

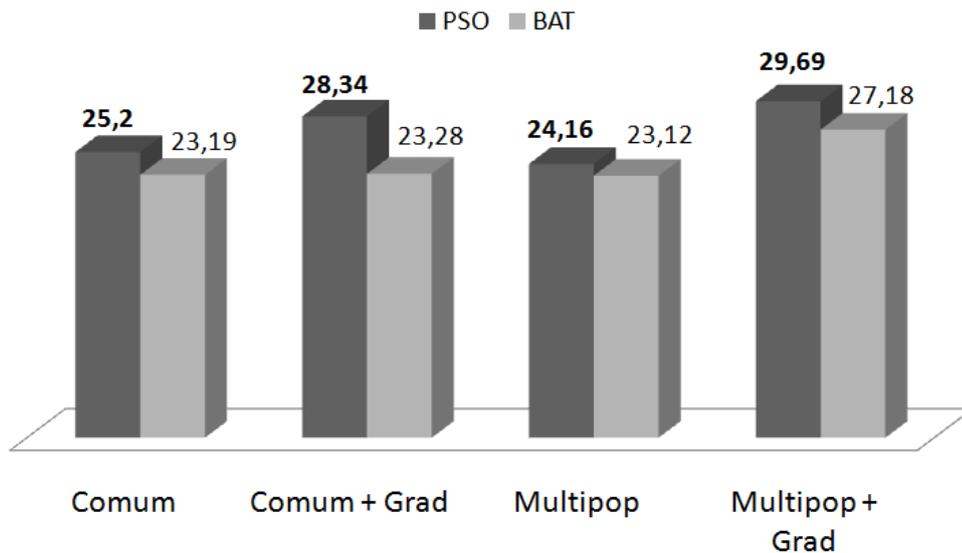


Figura 5.23 - 1ª melhor solução (%) - Sistema *New-England*.

A terceira melhor solução (pior solução) também é representada graficamente na Figura 5.24, confirmando a superioridade das metodologias híbridas de uma forma mais nítida.

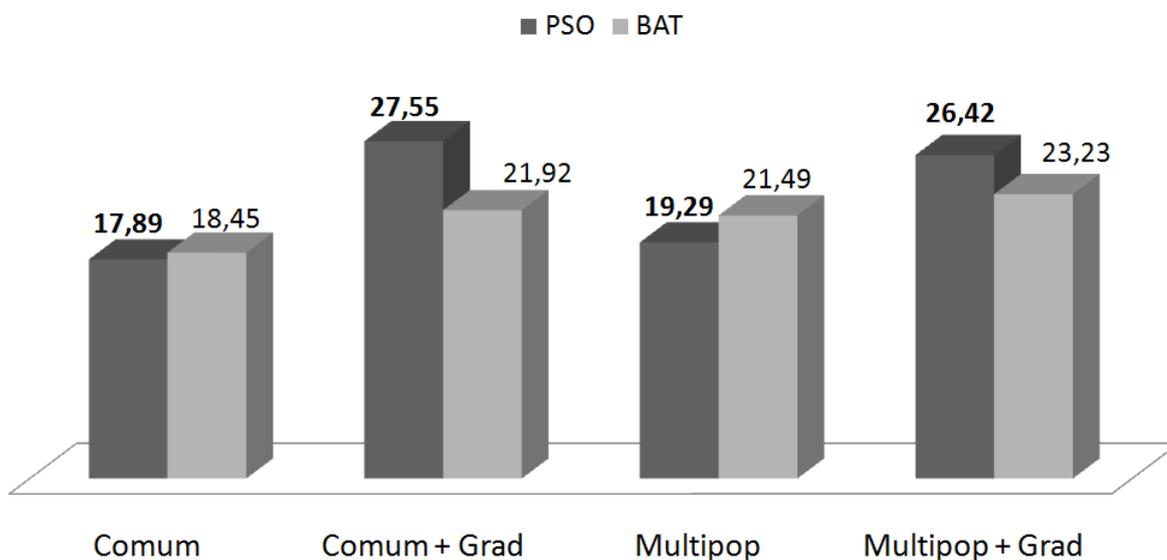


Figura 5.24 - 3ª melhor solução (%) - Sistema *New-England*.

Para a análise do esforço computacional, foi feito o cálculo da variação percentual dos tempos de processamento médios em relação ao demandado pela metodologia *PSO Comum* (65,95 min). O gráfico é apresentado na Figura 5.25. De forma geral, pode-se concluir que a inclusão da etapa do gradiente eleva o esforço computacional.

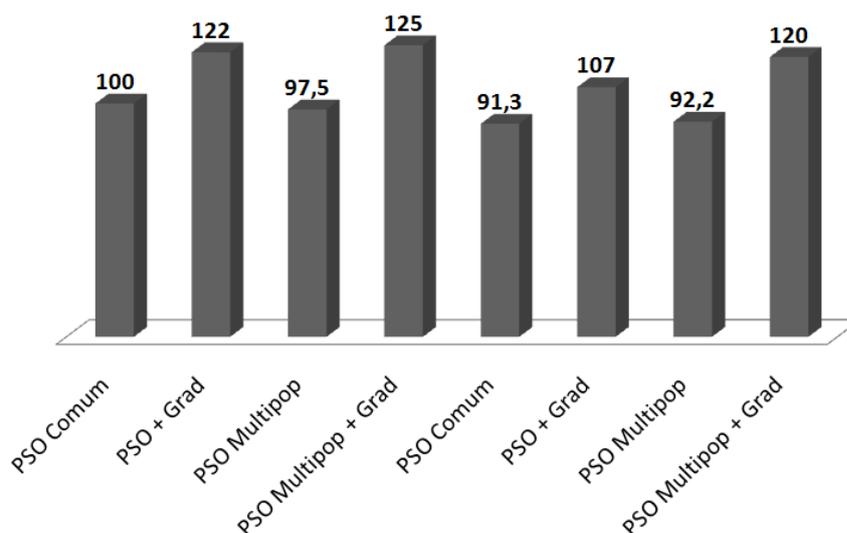


Figura 5.25 - Porcentagem de variação do tempo computacional (%) - Sistema *New-England*.

Deve ser observado, considerando que as simulações foram feitas em um mesmo computador pessoal, que no sistema Sul-Sudeste Brasileiro a inclusão do método de busca por gradiente implicou em um aumento de 30 a 60 % no tempo computacional. Em contrapartida, para o sistema *New-England*, esse aumento foi menor do que 30 %.

Ressalta-se que os métodos populacionais são probabilísticos e que foram adotados dois critérios de parada para o método do gradiente: (i) número de iterações e (ii) tamanho do passo calculado pela busca unidimensional. Com isso pode ocorrer que, em um mesmo estágio do algoritmo híbrido, o método do gradiente convirja em menos tempo para uma sub-população do que em outra: dessa forma o número de iterações do método do gradiente (limitado a 7) pode não ser exatamente o mesmo.

5.4.5 Análise da Convergência

Para as melhores soluções da Tabela 5.25, são apresentadas as trajetórias de convergência de cada método. Os gráficos estão na Figura 5.26 à Figura 5.28.

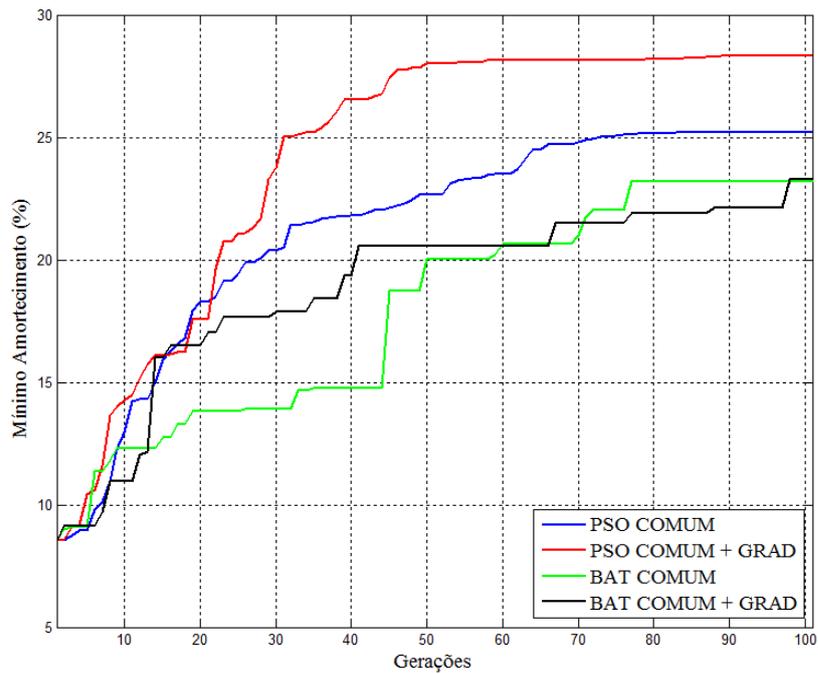


Figura 5.26 - Convergência dos métodos.

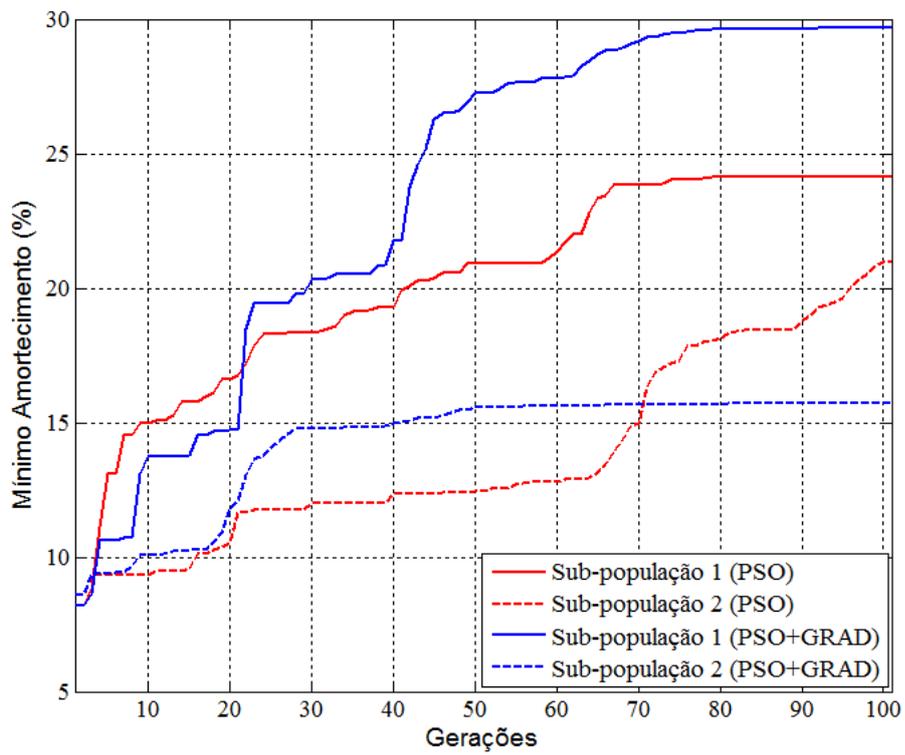


Figura 5.27 - Convergência do método *PSO* Multipopulacional (sem e com gradiente).

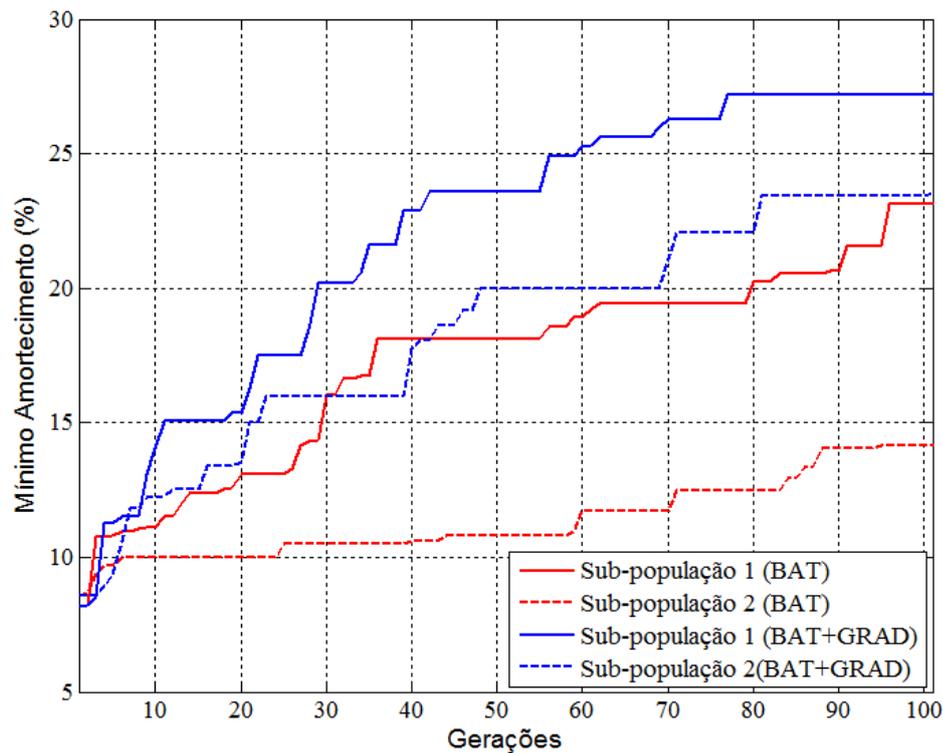


Figura 5.28 - Convergência do método BAT Multipopulacional (sem e com gradiente).

Deve ser mencionado que nos métodos multipopulacionais uma subpopulação iniciada com soluções piores pode evoluir de tal forma que esteja associada à melhor solução no final do processo. Esse comportamento aconteceu para as metodologias multipopulacionais híbridas baseadas no *PSO* e no *Bat Algorithm*: a subpopulação 1 foi iniciada com soluções de pior qualidade e apresentou o melhor resultado.

Por fim, observa-se que as metodologias híbridas apresentaram fatores de amortecimento maiores.

5.4.6 Parâmetros dos Controladores Projetados e Análise dos Cenários

Considerando as melhores soluções de cada método descritas na Tabela 5.25, a Tabela 5.26 apresenta o mínimo fator de amortecimento obtido por cada metodologia. Adicionalmente são apresentados os cenários associados ao menor amortecimento bem como a frequência do modo.

Tabela 5.26: Fator de amortecimento (%) e cenário associado: Sistema *New-England*.

		<i>Mínimo Amortecimento (%)</i>	<i>Cenário</i>	<i>Freq (Hz)</i>
<i>Malha Aberta</i>		-31,07	10	0,28
<i>Malha Fechada</i>	<i>PSO-Comum</i>	25,20	13	1,21
	<i>PSO+Gradiente</i>	28,34	10	0,19
	<i>PSO-Multipop.</i>	24,16	10	0,21
	<i>PSO Multipop.+Gradiente</i>	29,69	12	1,82
	<i>BAT-Comum</i>	23,19	13	1,19
	<i>BAT+Gradiente</i>	23,28	12	2,08
	<i>BAT-Multipop.</i>	23,12	7	1,17
	<i>BAT Multipop.+Gradiente</i>	27,18	10	0,19

Os dados dos parâmetros projetados são apresentados na Tabela 5.27 à Tabela 5.30.

Tabela 5.27: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema *New-England*.

Gerador	<i>PSO-Comum (1)</i>			<i>PSO+Gradiente (2)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
30	40,000	10,000	5,206	40,000	10,000	5,441
31	20,557	10,000	6,467	40,000	10,000	8,254
32	22,388	10,000	7,629	30,102	10,000	8,061
33	24,060	10,000	8,805	40,000	10,000	10,152
34	21,551	6,250	10,227	40,000	10,000	12,566
35	29,988	10,000	8,727	40,000	10,000	9,118
36	40,000	6,970	12,566	38,765	10,000	12,566
37	28,438	10,000	8,340	40,000	10,000	8,439
38	40,000	7,230	12,566	40,000	10,000	12,566
Mínimo Amortecimento:	25,20 % no 13º cenário			28,34 % no 10º cenário		

Tabela 5.28: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema *New-England*.

Gerador	<i>PSO-Multipop. (3)</i>			<i>PSO Multipop.+Gradiente (4)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
30	31,100	10,000	5,173	35,274	10,000	5,309
31	22,844	10,000	6,777	26,082	10,000	7,163
32	30,764	10,000	8,213	24,244	10,000	7,125
33	29,073	9,060	8,644	32,562	10,000	10,153
34	21,444	5,140	8,671	40,000	4,560	8,333
35	30,946	10,000	8,336	34,214	10,000	7,065
36	29,802	4,750	11,286	40,000	6,730	12,566
37	25,809	10,000	8,015	35,062	9,920	7,994
38	40,000	7,450	12,566	40,000	7,610	11,404
Mínimo Amortecimento:	24,16 % no 10º cenário			29,69 % no 12º cenário		

Tabela 5.29: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema *New-England*.

Gerador	<i>BAT-Comum (5)</i>			<i>BAT+Gradiente (6)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
30	27,391	10,000	5,207	38,828	9,970	5,388
31	31,492	8,690	8,245	26,735	7,310	6,619
32	25,081	7,700	6,007	40,000	7,430	7,256
33	25,102	9,620	6,966	14,856	10,000	6,767
34	39,941	3,740	7,797	40,000	6,830	8,681
35	28,230	7,540	7,168	38,654	6,00	5,972
36	21,071	7,210	8,940	32,603	4,920	10,277
37	35,846	8,880	8,236	36,201	10,000	7,818
38	39,334	7,390	11,782	38,104	8,850	12,566
Mínimo Amortecimento:	23,19 % no 13º cenário			23,28 % no 12º cenário		

Tabela 5.30: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema *New-England*.

Gerador	<i>BAT-Multipop. (7)</i>			<i>BAT Multipop. +Gradiente (8)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
30	30,785	10,000	5,121	39,029	10,000	5,865
31	35,406	6,620	5,979	29,078	10,000	8,229
32	33,615	10,000	9,350	21,540	10,000	5,839
33	37,198	8,030	7,652	33,865	9,450	9,401
34	21,991	7,080	8,531	39,895	5,790	9,222
35	17,802	7,650	6,291	40,000	9,640	6,487
36	40,000	5,180	11,526	32,930	6,540	12,566
37	40,000	10,000	9,742	38,407	8,410	7,834
38	35,779	6,600	10,904	40,000	5,890	9,089
Mínimo Amortecimento:	23,12 % no 7º cenário			27,18 % no 10º cenário		

5.4.7 Validação não linear dos Controladores Projetados

5.4.7.1 Validação não linear

Com o objetivo de validar o projeto de controle realizado, simulações não lineares foram conduzidas para o sétimo cenário (vide Tabela 5.26). Para essa finalidade, foi aplicado um curto circuito trifásico na barra 14. Esse curto circuito foi eliminado após 50ms. Esse procedimento de validação foi o mesmo utilizado em (CÁRDENAS, 2011).

Para efeitos de ilustração, são apresentadas as respostas transitórias em malha fechada considerando os controladores projetados pelos métodos *PSO Multipopulacional com Gradiente* e *BAT Multipopulacional*. Esses métodos estão associados à melhor (29,69 % no 12º cenário) e à pior solução (23,12 % no 7º cenário). Os controladores foram devidamente validados, conforme ilustrado nos gráficos dos ângulos dos geradores 31, 33 e 37 na Figura 5.29, na Figura 5.30 e na Figura 5.31.

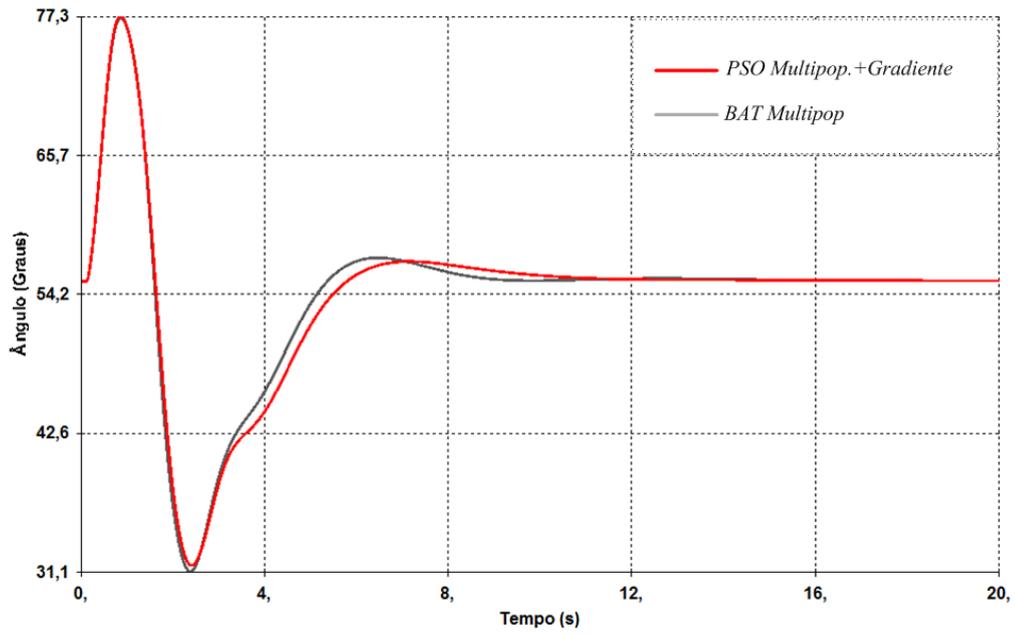


Figura 5.29 - Ângulo do gerador G31- Cenário 7.

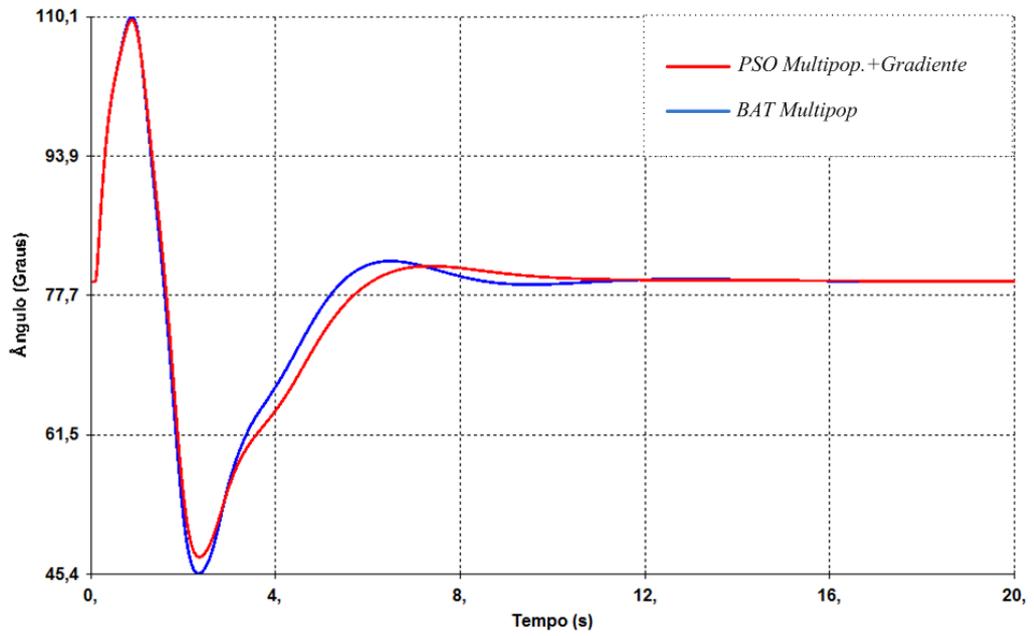


Figura 5.30 - Ângulo do gerador G33- Cenário 7.

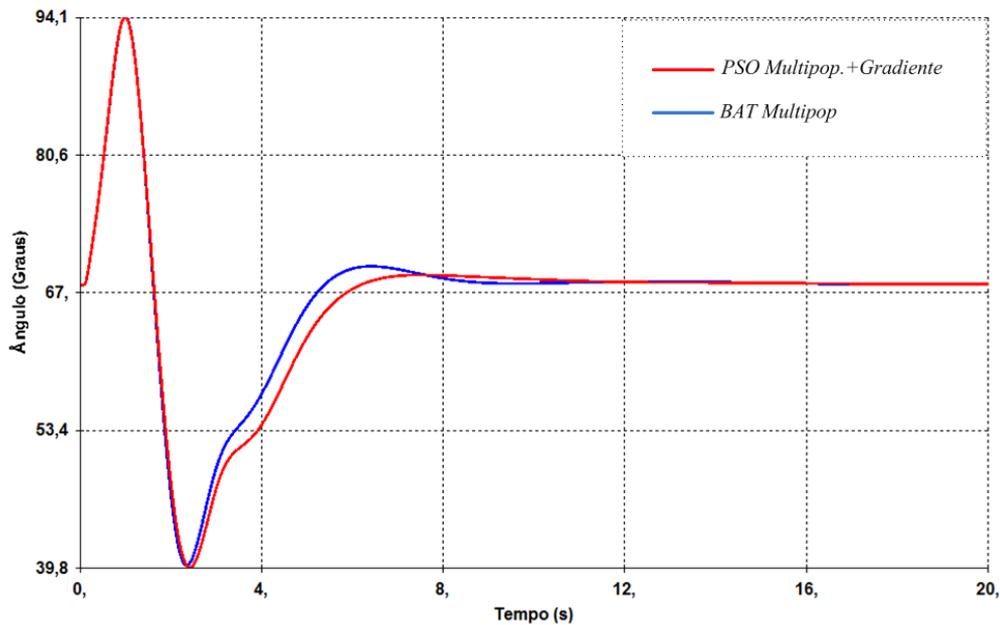


Figura 5.31 - Ângulo do gerador G37- Cenário 7.

A partir da constatação de que ambos os controladores tenham fornecido uma resposta transitória similar nas figuras anteriores, pode-se julgar que a otimização do amortecimento pelas metodologias propostas pode não ser significativo na prática (domínio do tempo). Entretanto, esse fato será analisado na subseção seguinte.

5.4.7.2 Esforço do Controle

Nas figuras anteriores, observa-se que a resposta transitória dos ângulos possuem um comportamento similar. Embora o método *PSO Multipopulacional com Gradiente* tenha fornecido uma solução com 6% de amortecimento acima da fornecida pelo método *BAT Multipopulacional*, essa diferença não é expressiva nas simulações não lineares.

Deve-se ressaltar que, nas simulações não lineares, o sinal de saída V_{ESP} dos estabilizadores é limitada fisicamente (DILL, 2013). Em geral, um limite de $\pm 0,05$ e $\pm 0,10$ pu é adotado (PAL e CHAUDHURI, 2005).

Neste trabalho, para esse sistema, adotou-se $-0,05 \leq V_{ESP} \leq 0,10$ pu para todos os geradores. A Figura 5.32 apresenta o sinal de saída do estabilizador do gerador 31 para os

dois controladores projetados. Observa-se que, nos primeiros instantes, o sinal adicional estabilizador atinge os limites para os dois controladores analisados (o comportamento é bastante semelhante). Essa observação justifica os comportamentos similares apresentados na Figura 5.29 à Figura 5.31. Ressalta-se que a saída dos outros controladores também atingiram seus limites, embora não sejam apresentadas nessa tese.

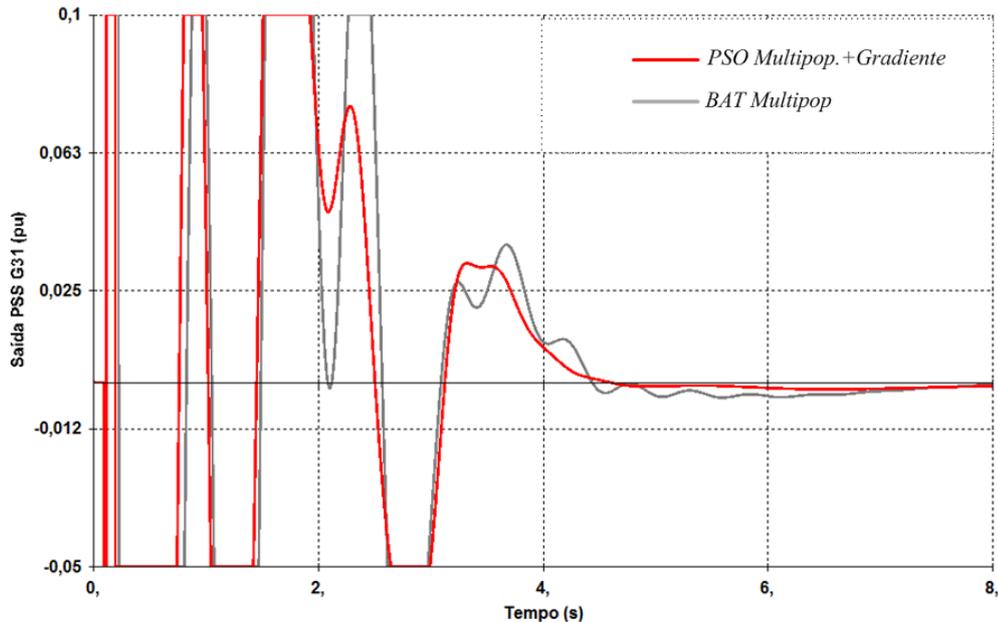


Figura 5.32 - Esforço do controle no G31: $-0,05 \leq V_{ESP} \leq 0,10 pu$ - Cenário 7.

Adicionalmente, através da Figura 5.32, é possível observar o efeito do filtro *Washout* que anula a saída do estabilizador em regime permanente (vide seção 3.4.1).

Como o objetivo do processo de otimização é a maximização do fator de amortecimento, necessita-se de elevada energia dos controladores para a redução das oscilações. Para reduzir a magnitude do sinal de saída do controle, uma solução seria considerar a minimização da norma H_2 como um segundo objetivo (formulação multi-objetivo). Como visto, a norma H_2 representa o esforço do controle (vide seção 3.4.3): com isso os sinais adicionais estabilizadores não iriam atingir os limites com tanta frequência.

Uma segunda análise não linear foi realizada considerando-se os limites $-0,1 \leq V_{ESP} \leq 0,1 pu$ para todos os geradores. A Figura 5.33 apresenta o sinal de saída do estabilizador do gerador 31 para os dois controladores projetados. Observa-se que os controladores projetados atingiram os limites por um período menor.

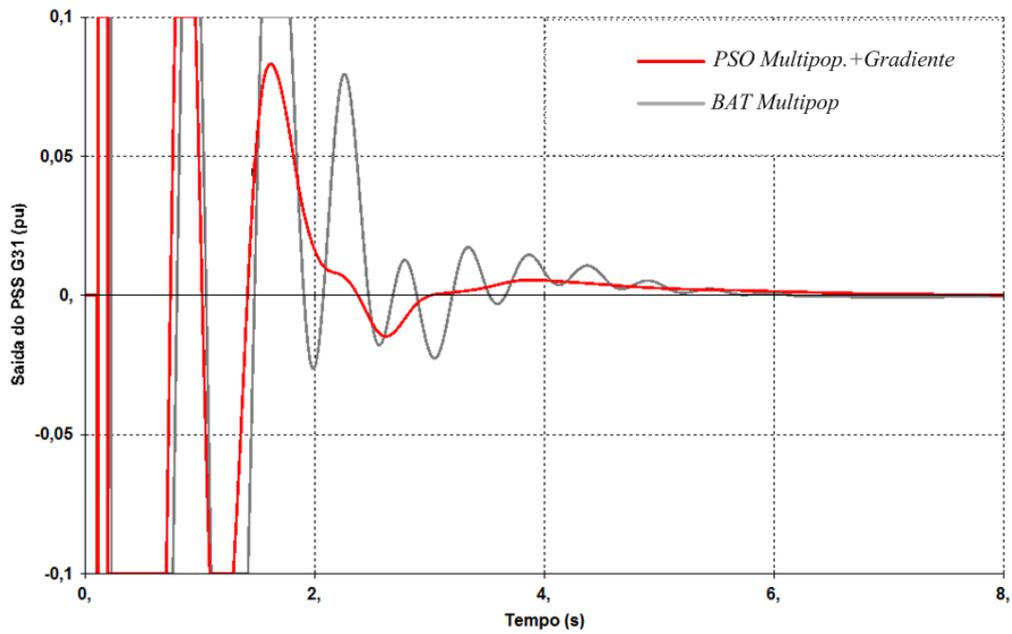


Figura 5.33 - Esforço do controle no G31: $-0,1 \leq V_{ESP} \leq 0,1 pu$ - Cenário 7.

Ressalta-se ainda que, na Figura 5.33, o sinal adicional estabilizante considerando o melhor projeto (29,69% - curva vermelha) foi mais efetivo, o que pode ser identificado na Figura 5.34: as diferenças entre as curvas foram mais expressivas.

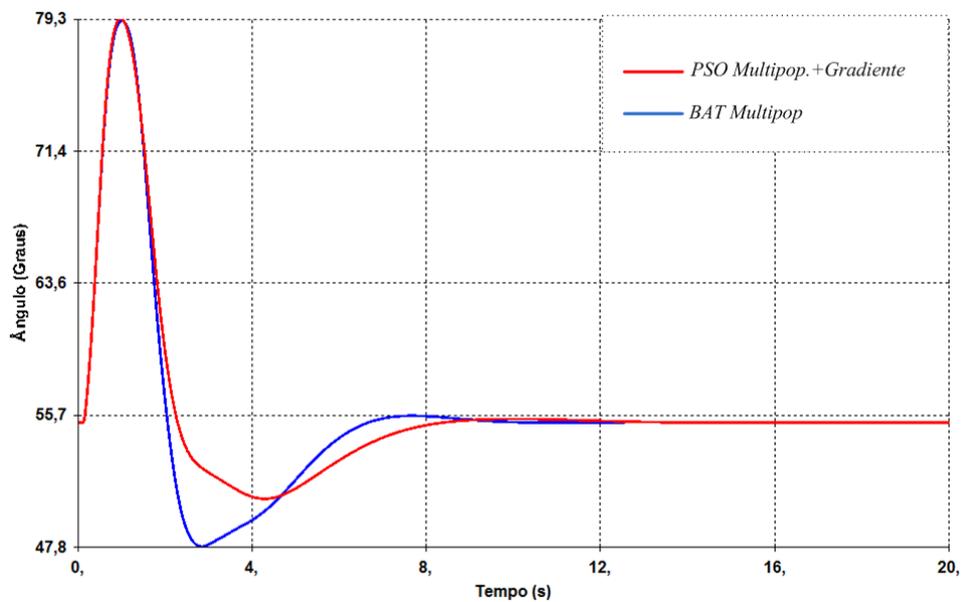


Figura 5.34 - Ângulo do gerador G31: $-0,1 \leq V_{ESP} \leq 0,1 pu$ - Cenário 7.

Ressalta-se ainda que os limites dos estabilizadores poderiam ter sido expandidos em uma faixa mais ampla $-6 \leq V_{ESP} \leq 6 pu$, conforme apresentado didaticamente em (DILL, 2013). Entretanto essa estratégia não foi adotada nessa tese.

5.4.8 Comparação com a Literatura

A partir do estudo comparativo apresentado na Tabela 5.31, observa-se que os valores obtidos com as metodologias propostas (baseadas no *PSO* e *Bat Algorithm*) fornecem melhores resultados dos que constam na literatura para o Sistema *New-England* (para os mesmos cenários e modelagem dinâmica).

Tabela 5.31: Comparação com a Literatura: Sistema *New-England*.

<i>Método</i>	ξ_{min} (%)	<i>Referência</i>
<i>PSO Multipopulacional+Gradiente</i>	29,69	Proposta
<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>	27,18	Proposta
Algoritmos Genéticos	15,00	(DO BOMFIM, TARANTO e FALCAO, 2000)
Alocação de Pólos baseada no Resíduos das Funções de Transferência	15,30	(FERRAZ, 2002)

5.4.9 Análise Preliminar de Resultados

Para o sistema *New-England* pode-se sintetizar que:

- os métodos híbridos baseados no *PSO* apresentaram ganhos de amortecimento (em valor absoluto) na faixa de 5 a 10%. No caso dos métodos baseados no *Bat Algorithm*, ganhos na faixa de 3% foram observados;
- as melhores soluções foram fornecidas pelo método *PSO Multipopulacional*;
- em relação ao esforço computacional, considerando o tempo médio demandado pelo método *PSO Comum*, um aumento menor que do que 30% foi observado para as metodologias híbridas (com uma população e multipopulacionais).

5.5 SISTEMA DE 2 ÁREAS E 4 GERADORES

5.5.1 Descrição do Sistema

O sistema ilustrado na Figura 5.35 é composto por 11 barras e 4 unidades geradoras (KUNDUR, 1994). O sistema é distribuído de forma simétrica em duas áreas que são interligadas por duas linhas de transmissão.

Os geradores são representados por um modelo de quarta ordem (considerando os efeitos transitórios nos eixos q e d) e os reguladores de tensão são do tipo estático. A modelagem foi a mesma utilizada em (IEEE, 2015).

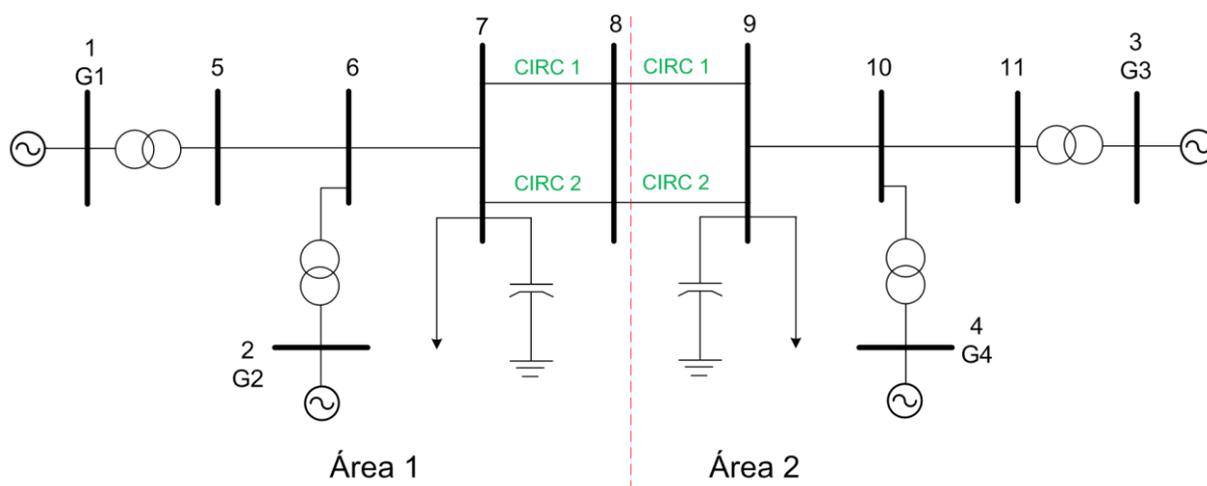


Figura 5.35 - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

5.5.2 Definição dos Cenários de Operação

Para o sistema de duas áreas foram definidos 14 pontos de operação através de variações de carga, de geração e de topologia. A partir do caso base (cenário 1) foram obtidos outros cinco pontos de operação através das variações de carga e de geração conforme apresentado na Tabela 3.32. Os valores de carga e/ou geração modificados são destacados e o terceiro gerador é considerado como a barra de referência.

Tabela 5.32: Variações de carga e de geração : Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

<i>Cenário</i>	<i>Potência Ativa em (MW)</i>					
	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>	<i>Carga 7</i>	<i>Carga 9</i>
1 (Nominal)	700,00	700,00	719,10	700,00	967,00	1767,00
2	700,00	700,00	495,10	200,00	967,00	1067,00
3	350,00	350,00	900,60	800,00	967,00	1367,00
4	400,00	400,00	695,50	700,00	367,00	1767,00
5	900,00	900,00	746,00	700,00	1367,00	1767,00
6	700,00	700,00	1050,40	700,00	967,00	2067,00

As alterações de carga e geração descritas na Tabela 5.32 são graficamente apresentadas na Figura 5.36. O objetivo foi variar a carga e/ou geração nas áreas do sistema (de forma individual ou simultânea). As modificações individuais nas áreas tem o objetivo de avaliar o comportamento dos modos locais de oscilação. A modificação no valor da potência de intercâmbio entre as áreas tem o objetivo de avaliar o comportamento do modo inter-área de oscilação.

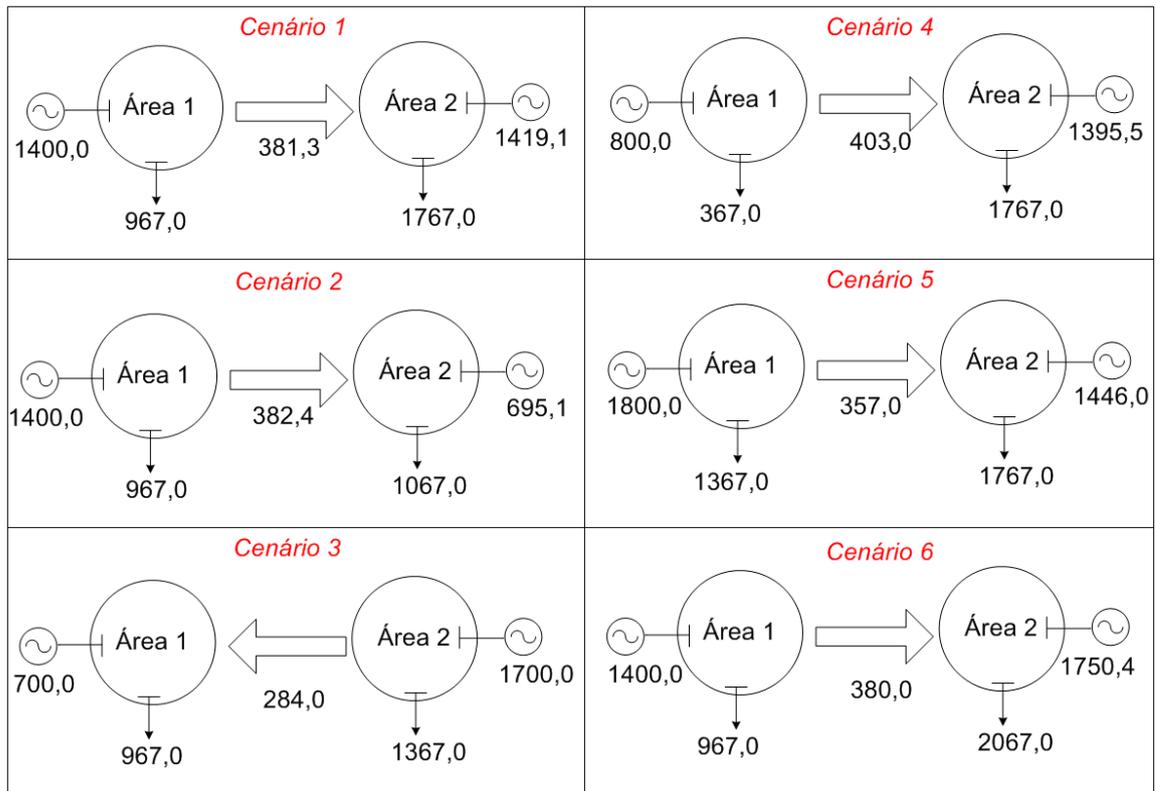


Figura 5.36 - Diferentes cenários de carga e geração: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

A partir dos cenários descritos na Tabela 5.32, foram obtidos mais 8 cenários através de variações de topologia conforme apresentado na Tabela 5.33. Ressalta-se que as alterações topológicas foram realizadas considerando os limites de capacidade das linhas de transmissão, conforme apresentado em (IEEE, 2015).

Tabela 5.33: Variações de topologia : Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

<i>Cenário</i>	<i>Descrição</i>
7	Cenário 1 sem a LT 7-8 - circuito 1
8	Cenário 2 sem a LT 7-8 - circuito 1
9	Cenário 3 sem a LT 7-8 - circuito 1
10	Cenário 4 sem a LT 7-8 - circuito 1
11	Cenário 5 sem a LT 7-8 - circuito 1
12	Cenário 6 sem a LT 7-8 - circuito 1
13	Cenário 2 sem a LT 7-8 (circuito 1) e sem a LT 8-9 (circuito 1)
14	Cenário 3 sem a LT 7-8 (circuito 1) e sem a LT 8-9 (circuito 1)

5.5.3 Desempenho em Malha Aberta

Para esse sistema, o procedimento de ajuste é realizado considerando quatorze pontos de operação pré-selecionados conforme descrito na seção 5.5.2. As características associadas ao modo de oscilação dominante em cada cenário (frequência e fator de amortecimento) são apresentadas na Tabela 5.34.

Tabela 5.34: Cenários - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

<i>Cenário</i>	ξ_{min} (%)	<i>Freq.</i> (Hz)	<i>Cenário</i>	ξ_{min} (%)	<i>Freq.</i> (Hz)
1	-0,58	0,61	8	0,82	0,47
2	2,80	0,61	9	-0,06	0,50
3	1,11	0,61	10	2,19	0,49
4	3,63	0,62	11	-2,90	0,42
5	-2,95	0,58	12	-2,13	0,44
6	-2,39	0,60	13	-3,20	0,24
7	-0,96	0,46	14	-1,31	0,39

Os *mode shapes* de velocidade para os cenários 1 a 6 e 13 (mais instável) são apresentados na Figura 5.37 à Figura 5.43. Com base nos *mode shapes* é possível sintetizar algumas considerações:

- em todos os cenários, incluindo os não ilustrados nas figuras, observa-se a existência de três modos de oscilação críticos:
 - ✓ um inter-área: oscilação dos geradores 1 e 2 (área 1) contra os geradores 3 e 4 (área 2);
 - ✓ um local: oscilação entre os geradores 1 e 2 da área 1;
 - ✓ um local: oscilação entre os geradores 3 e 4 da área 2;
- em todos os cenários, observa-se que o modo de oscilação mais crítico, que é estável pouco amortecido ou instável dependendo do cenário, é o inter-área;
- em relação ao modo local de oscilação da área 1 (geradores 1 e 2): a variação da potência de geração e carga impacta no amortecimento do modo. Considerando o caso base com um amortecimento de 8,99%, a redução do valor de potência no cenário 3 se traduz em um maior fator de amortecimento (21,5%). Em contrapartida, no cenário 5 onde o valor da geração é aumentado, o modo local tem um amortecimento de 3,72%.

- em relação ao modo local de oscilação da área 2 (geradores 3 e 4): a variação da potência de geração e carga impacta no amortecimento do modo. Considerando o caso base com um amortecimento de 8,76%, a redução do valor de potência no cenário 2 se traduz em um maior fator de amortecimento (21,19%). Em contrapartida, no cenário 3 onde o valor da geração é aumentado, o modo local tem um amortecimento de 4,62%.

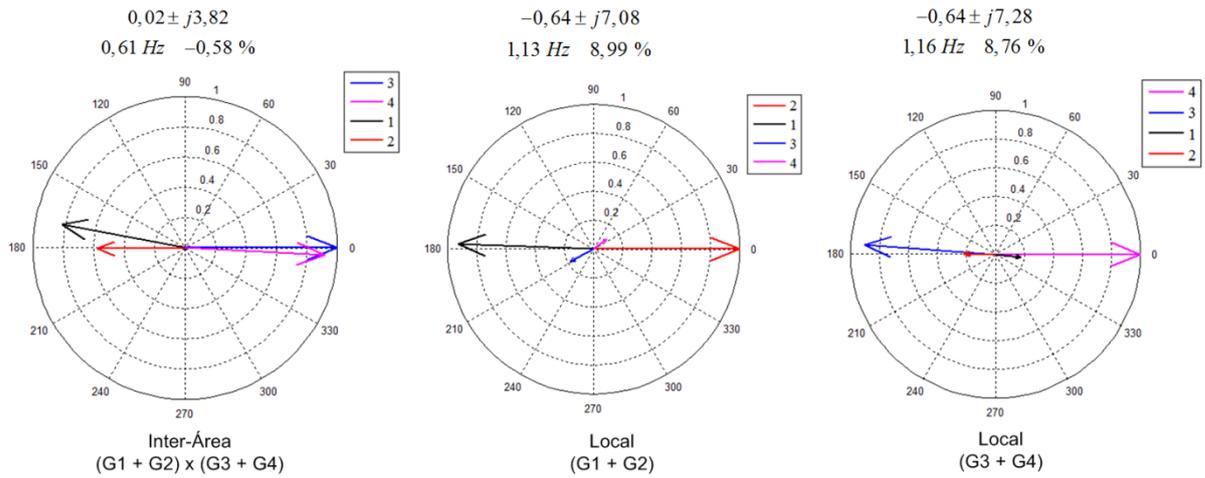


Figura 5.37 - Mode shapes de velocidade (cenário 1 - Caso Base).

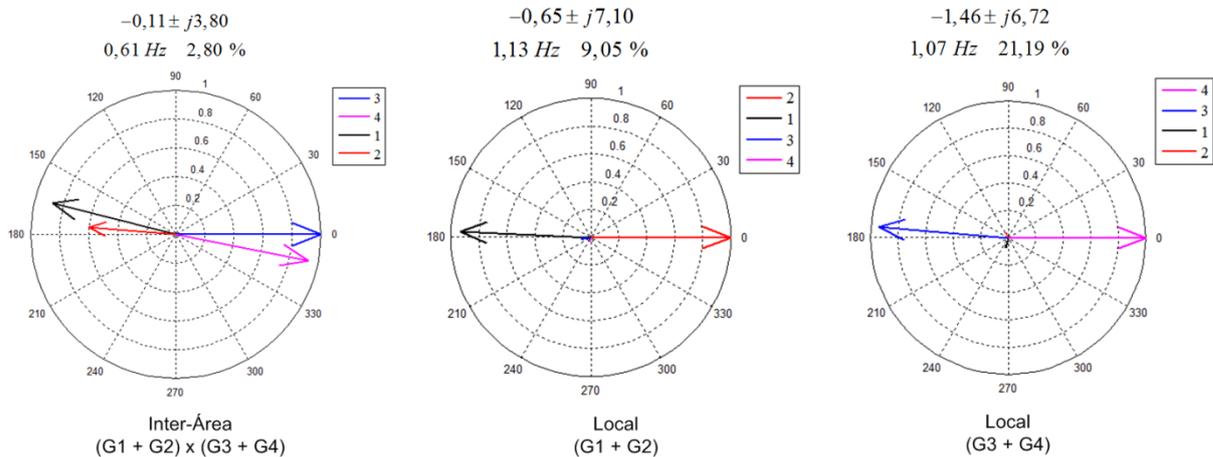


Figura 5.38 - Mode shapes de velocidade (cenário 2).

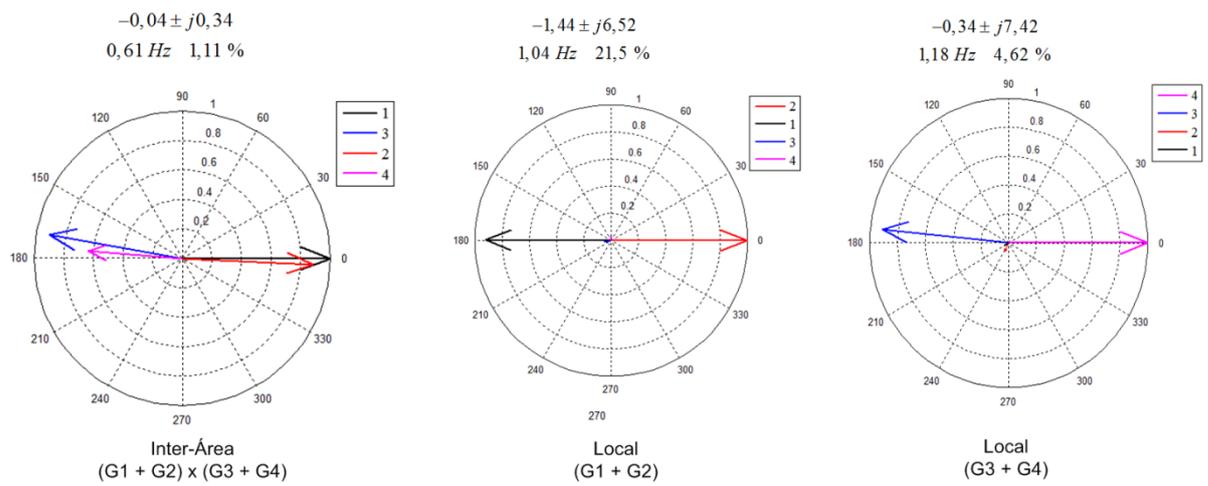


Figura 5.39 - Mode shapes de velocidade (cenário 3).

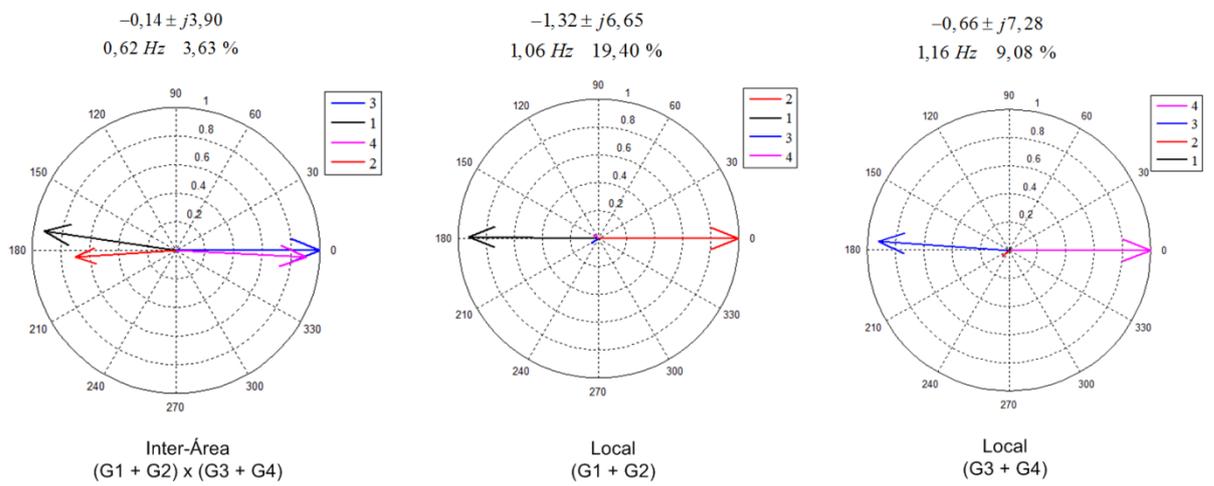


Figura 5.40 - Mode shapes de velocidade (cenário 4).

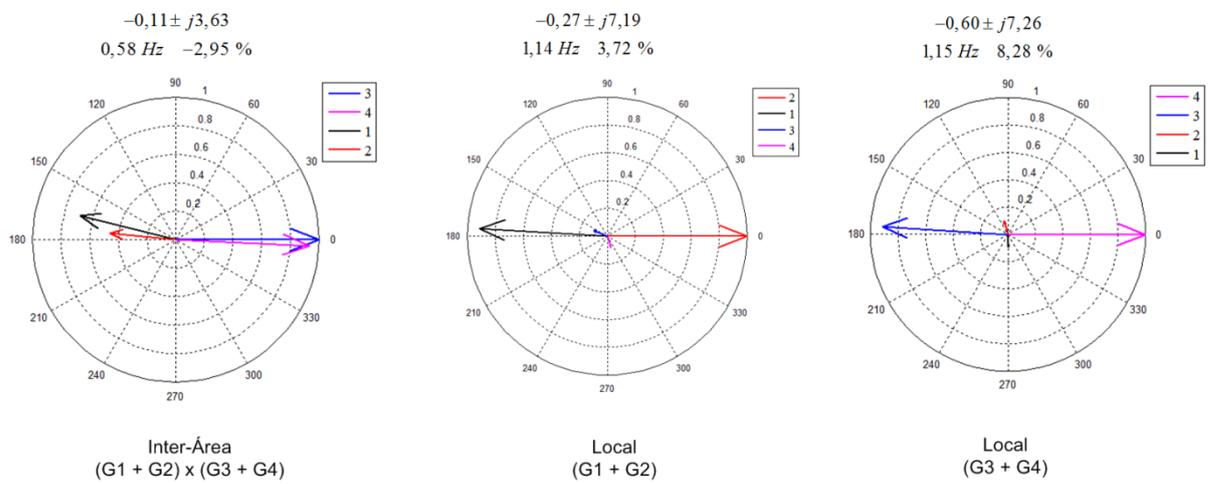


Figura 5.41 - Mode shapes de velocidade (cenário 5).

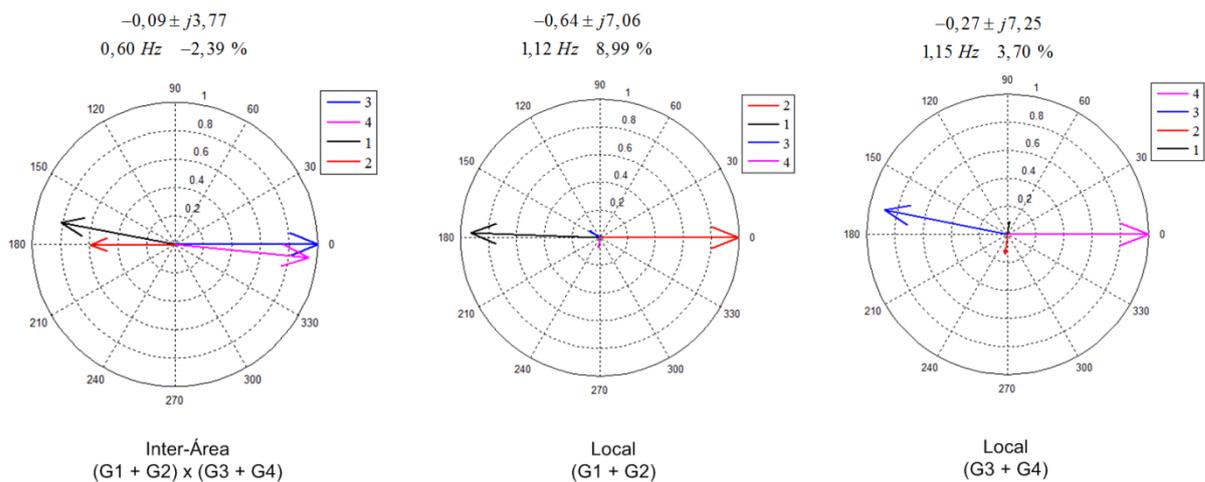


Figura 5.42 - Mode shapes de velocidade (cenário 6).

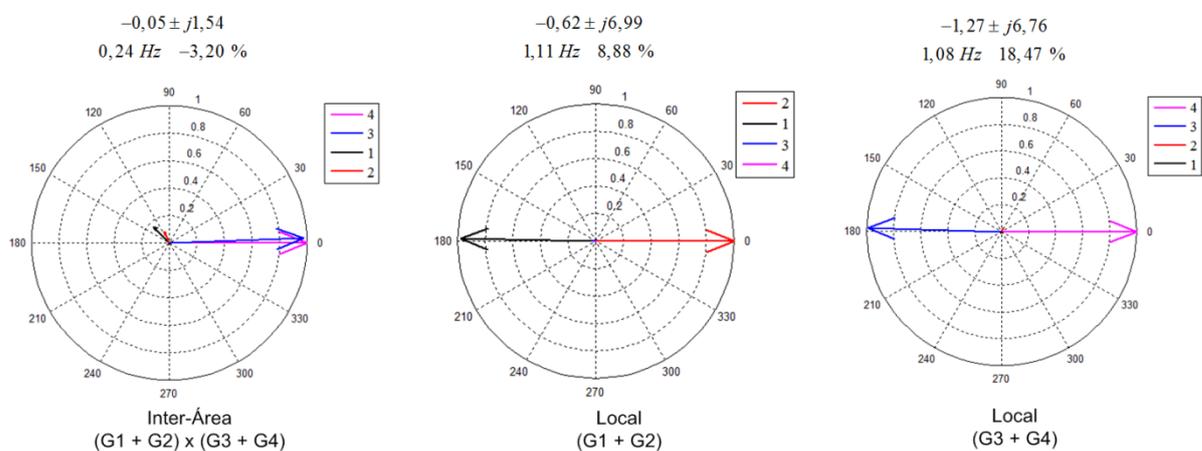


Figura 5.43 - Mode shapes de velocidade (cenário 13).

Com base na análise do sistema em malha aberta, observa-se a necessidade da instalação e sintonização dos controladores, o que será objeto de estudo a seguir.

5.5.4 Definição de Parâmetros de Simulação

Os parâmetros do sistema de controle são apresentados na Tabela 5.35. Os seguintes parâmetros foram obtidos da literatura técnica (IEEE, 2015): número de blocos de compensação e constante de tempo do filtro *washout*.

Tabela 5.35: Parâmetros do sistema de controle usados para o Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
Geradores considerados no controle	1 a 4
Constante de tempo do Filtro <i>Washout</i> (seg)	$T_{\omega} = 10$
Número de blocos no estágio de compensação	$nb = 2$
Número de cenários	14
Limite das variáveis	$0,01 \leq K_p \leq 40$ $0,1 \leq \alpha_p \leq 10$ $0,4 \cdot \pi \leq \omega_p \leq 4,0 \cdot \pi$

Para o sistema sob análise, a Tabela 5.36 apresenta os parâmetros dos algoritmos bioinspirados: número de indivíduos e de geração.

Tabela 5.36: Parâmetros dos algoritmos bioinspirados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

<i>Parâmetros</i>	<i>Descrição</i>
Total de indivíduos	26
Números de sub-populações nas metodologias multipopulacionais	2 (cada subpopulação com 13 indivíduos)
Total de gerações	25

Em relação ao intervalo de gerações para a realização da busca local por gradiente para refinamento de ganhos (metodologias 2, 4, 6 e 8) e reinicialização da população (metodologias 3, 4, 7 e 8):

- i. foi adotado um intervalo de 5 gerações para a execução do gradiente;
- ii. se após 15 gerações o fator de amortecimento mínimo for menor que 10 %, a população é reiniciada aleatoriamente.

5.5.5 Resultados

Conforme realizado para os sistemas anteriores, com o objetivo de se fazer um estudo comparativo sistemático, foi utilizada a mesma população inicial (posição e velocidade dos indivíduos) para todas as metodologias. A melhor solução da população inicial corresponde a um amortecimento de 4,67 % em malha fechada considerando todos os quatorze cenários operativos. Foram executadas três simulações para cada metodologia e os resultados (mínimo amortecimento em malha fechada) são apresentados na Tabela 5.37.

Tabela 5.37: Mínimo amortecimento obtido: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

	<i>Método</i>	<i>3º Melhor (%)</i>	<i>2º Melhor (%)</i>	<i>1º Melhor (%)</i>	<i>Tempo Médio (min)</i>
1	<i>PSO-Comum</i>	24,66	26,13	27,61	2,96
2	<i>PSO+Gradiente</i>	33,44	33,71	39,08	3,95
3	<i>PSO-Multipopulacional</i>	27,15	28,16	29,53	2,84
4	<i>PSO Multipopulacional+Gradiente</i>	30,94	31,83	32,50	4,67
5	<i>BAT-Comum</i>	27,24	29,23	29,57	2,71
6	<i>BAT+Gradiente</i>	29,10	30,33	33,22	3,80
7	<i>BAT-Multipopulacional</i>	19,56	19,70	19,99	3,15
8	<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>	33,41	35,30	35,98	3,92

A Figura 5.44 apresenta de forma gráfica as melhores soluções obtidas por cada método. Para o sistema sob análise, observa-se que os algoritmos híbridos apresentaram melhores soluções do que aqueles que não utilizam a etapa do gradiente. De forma geral, as metodologias multipopulacionais apresentaram melhores resultados. Conforme observado nos sistemas anteriormente estudados, a metodologia multipopulacional sem a etapa de gradiente baseada no *BAT Algorithm* apresentou resultados com qualidade inferior. Isso indica que tais métodos poderão apresentar melhores resultados se for considerado um número maior de indivíduos nas subpopulações.

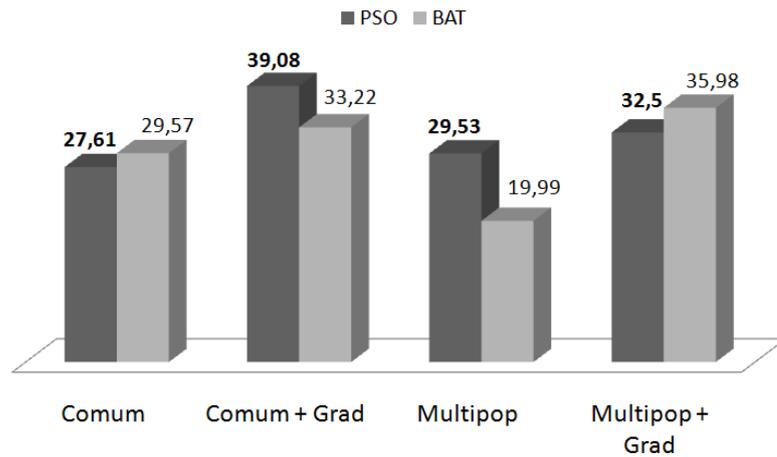


Figura 5.44 - 1ª melhor solução (%) - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

Para a análise do esforço computacional, foi feito o cálculo da variação percentual dos tempos de processamento médios em relação ao demandado pela metodologia *PSO Comum* (2,96 min). O gráfico é apresentado na Figura 5.45.

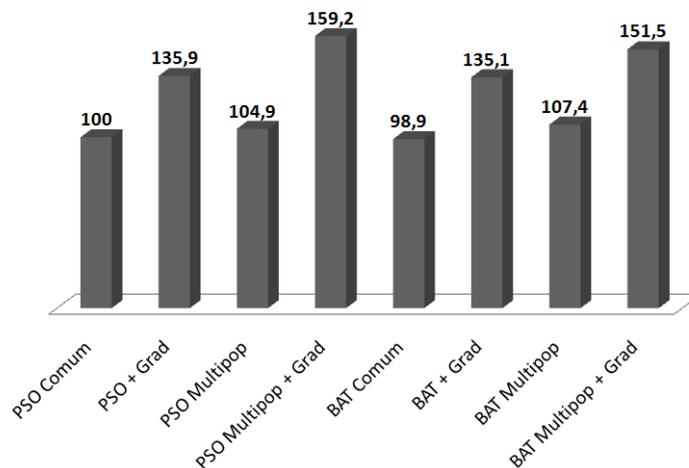


Figura 5.45 - Porcentagem de variação do tempo computacional (%) - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

Conforme anteriormente mencionado, a inclusão da etapa do gradiente eleva o esforço computacional. Para esse sistema, a variação foi em torno de 30 % para os métodos com uma única população e 60 % para os métodos multipopulacionais.

5.5.6 Análise da Convergência

As curvas de convergência dos métodos propostos aplicados ao projeto dos controladores do sistema de 2 áreas e 4 geradores são apresentadas na Figura 5.46 à Figura 5.48.

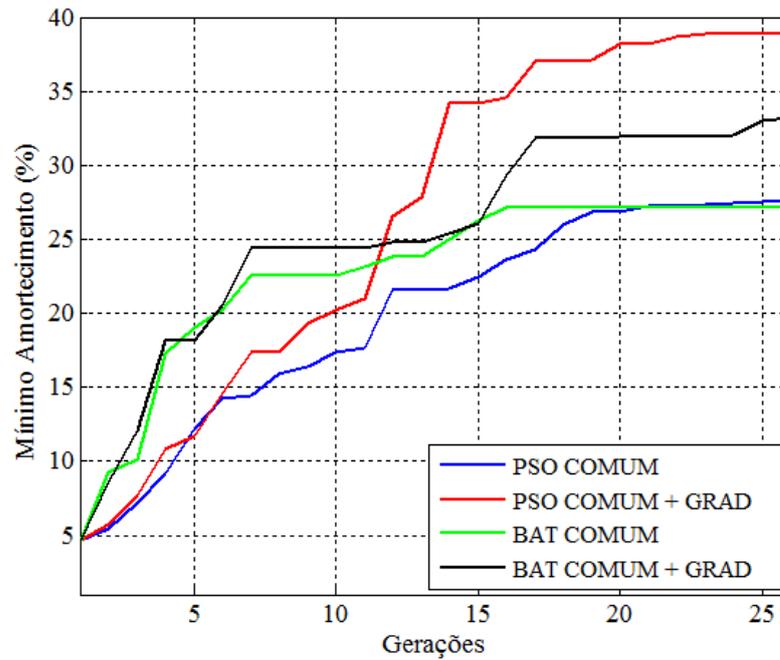


Figura 5.46 - Convergência dos métodos.

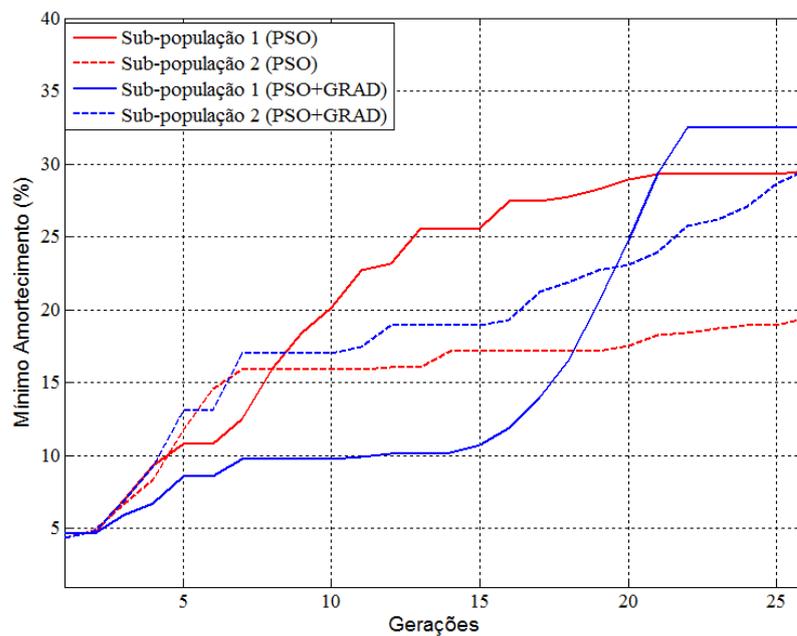


Figura 5.47 - Convergência do método *PSO* Multipopulacional (sem e com gradiente).

Na Figura 5.47 observa-se que subpopulação 1 do método *PSO Multipopulacional com Gradiente* apresentou a pior solução durante o início do processo de otimização e atingiu a posição de melhor solução no término, evidenciando os benefícios do uso dos métodos multipopulacionais e da hibridização destes com o método do gradiente. Tais benefícios também são observados para o método baseado no *Bat Algorithm*.

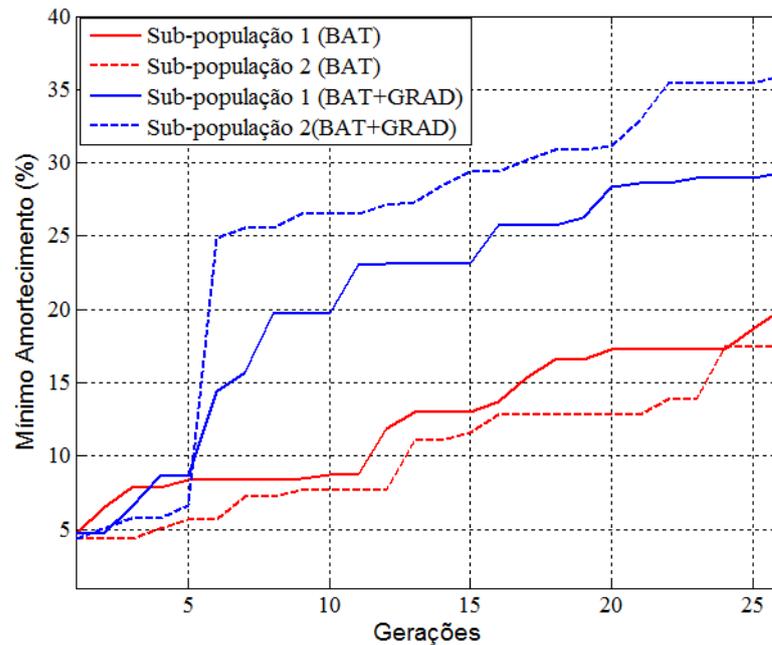


Figura 5.48 - Convergência do método *BAT* Multipopulacional (sem e com gradiente).

Para complementar a análise, a evolução do amortecimento a cada 5 gerações, após a aplicação da etapa do gradiente são apresentadas na Figura 5.49 e na Figura 5.50. As figuras estão associadas à 1ª e à 2ª melhores soluções do método *PSO Comum com Gradiente*, respectivamente.

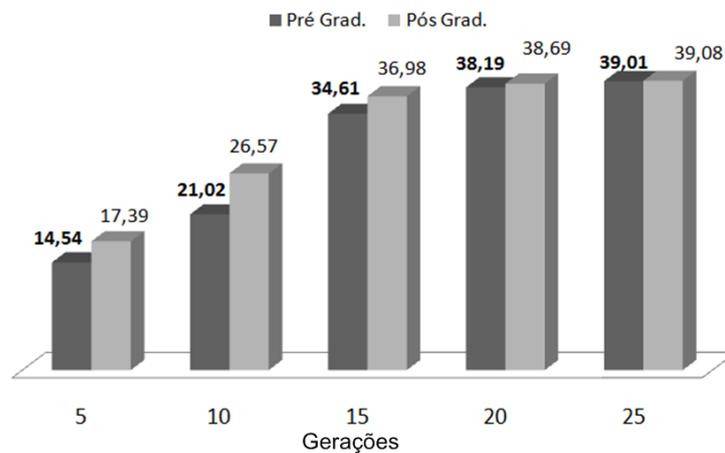


Figura 5.49 - Evolução do amortecimento após a etapa do gradiente: *PSO Comum + Grad.* - 1ª solução.

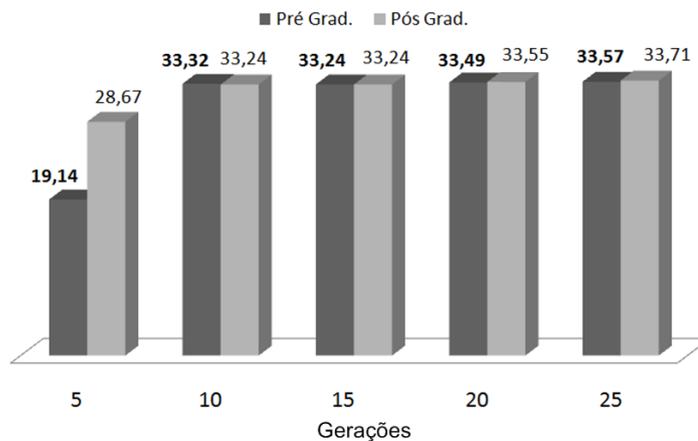


Figura 5.50 - Evolução do amortecimento após a etapa do gradiente: *PSO Comum + Grad.* - 2ª solução.

5.5.7 Parâmetros dos Controladores Projetados e Análise dos Cenários

Considerando as melhores soluções de cada método descritas na Tabela 5.37, a Tabela 5.38 apresenta o mínimo fator de amortecimento obtido por cada metodologia. Adicionalmente são apresentados os cenários associados ao menor amortecimento bem como a frequência do modo.

Tabela 5.38: Fator de amortecimento (%) e cenário associado: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

		<i>Mínimo Amortecimento (%)</i>	<i>Cenário</i>	<i>Freq (Hz)</i>
<i>Malha Aberta</i>		-3,20	13	0,24
<i>Malha Fechada</i>	<i>PSO-Comum</i>	27,61	3	13,06
	<i>PSO+Gradiente</i>	39,08	2	0,54
	<i>PSO-Multipop.</i>	29,53	2	0,59
	<i>PSO Multipop.+Gradiente</i>	32,50	8	0,40
	<i>BAT-Comum</i>	29,57	5	3,72
	<i>BAT+Gradiente</i>	33,22	8	0,42
	<i>BAT-Multipop.</i>	19,99	5	10,11
	<i>BAT Multipop.+Gradiente</i>	35,98	8	0,43

Os parâmetros dos controladores projetados associados às melhores soluções (Tabela 5.37) são apresentados na Tabela 5.39 à Tabela 5.42.

Tabela 5.39: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores

Gerador	<i>PSO-Comum (1)</i>			<i>PSO+Gradiente (2)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01	20,892	2,440	1,257	34,147	1,650	1,257
02	14,761	10,000	12,566	21,062	5,950	12,566
03	10,137	1,220	1,257	28,830	1,490	1,257
04	38,918	10,000	12,566	32,023	2,870	12,566
Amortecimento mínimo	27,61% no cenário 3			39,08% no cenário 2		

Tabela 5.40: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

Gerador	<i>PSO-Multipop. (3)</i>			<i>PSO Multipop.+Gradiente (4)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01	14,635	10,000	12,566	24,999	2,190	1,257
02	18,322	10,000	12,566	27,776	10,000	12,566
03	29,809	1,550	1,257	29,512	1,230	12,566
04	23,981	0,400	11,189	34,055	3,520	12,566
Amortecimento mínimo	29,53% no cenário 2			32,50% no cenário 8		

Tabela 5.41: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

Gerador	<i>BAT-Comum (5)</i>			<i>BAT+Gradiente (6)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01	30,619	2,240	3,387	40,000	2,200	10,140
02	13,629	6,150	12,052	24,965	5,200	12,302
03	40,000	2,470	8,741	36,100	2,200	11,436
04	22,772	1,070	9,976	38,564	0,960	12,566
Amortecimento mínimo	29,57% no cenário 5			33,22% no cenário 8		

Tabela 5.42: Parâmetros dos controladores projetados: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

Gerador	<i>BAT-Multipop. (7)</i>			<i>BAT Multipop.+Gradiente (8)</i>		
	K_p	α	ω	K_p	α	ω
01	18,971	5,580	7,413	34,319	1,490	8,755
02	21,567	10,000	7,825	33,678	2,730	12,411
03	17,773	0,720	4,459	34,004	2,460	11,002
04	34,636	3,780	9,445	37,815	1,190	4,838
Amortecimento mínimo	19,99% no cenário 5			35,98% no cenário 8		

5.5.8 Validação não linear dos Controladores Projetados

5.5.8.1 Sistema em Malha Aberta

Considerando que o cenário 13 é o mais instável, simulações não lineares para o sistema em malha aberta foram realizadas para esse cenário. Foram aplicadas perturbações (degraus) na tensão de referência do regulador de tensão de cada máquinas no instante 1 segundo, conforme a Tabela 5.43. Essas perturbações foram as mesmas utilizadas em (IEEE, 2015).

Tabela 5.43: Perturbações aplicadas.

<i>Gerador</i>	<i>Degrau em V_{ref}</i>
G1	+ 3%
G2	- 1%
G3	- 3%
G4	+ 1%

A potência elétrica terminal das unidades geradoras é apresentada na Figura 5.51 e na Figura 5.52. No 13º cenário, a frequência do modo de oscilação mais crítico é de 0,24 Hz (Tabela 5.34). O *mode shape* de velocidade associado a esse modo de oscilação é representado na Figura 5.51 (b). Com base no *mode shape* e nos resultados das simulações não lineares, observa-se que as maiores oscilações estão associadas aos geradores da área 2 (G3 e G4).

Deve ser ressaltado que, embora a ênfase tenha sido dada ao modo inter-área instável, as simulações não lineares capturam os efeitos de todos os modos de oscilação, incluindo os estáveis de natureza local, que possuem maior frequência e menor período (ROGERS, 2000).

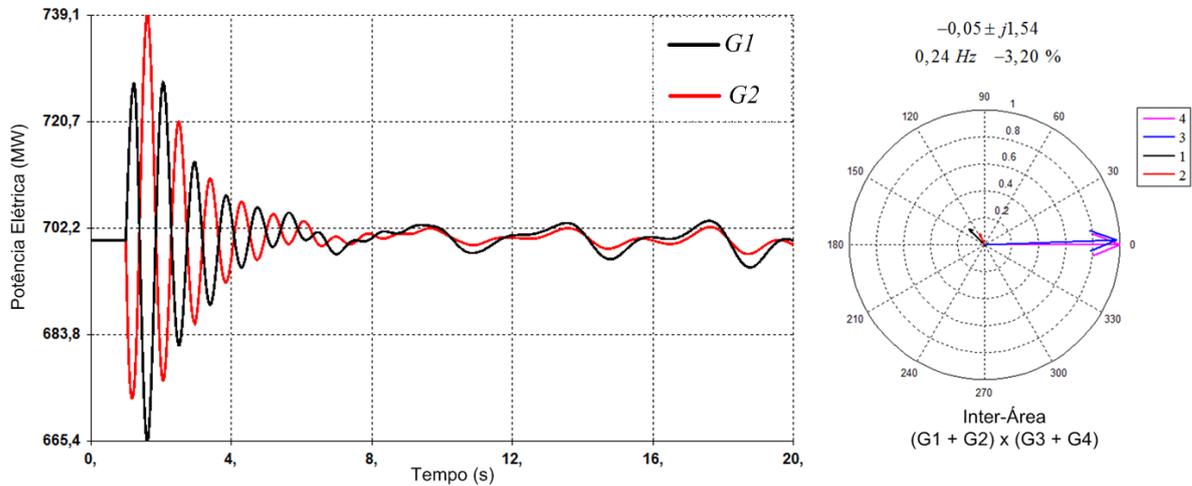


Figura 5.51 - (a) Potência elétrica terminal - G1 e G2. (b) *Mode shape* no 13º cenário.

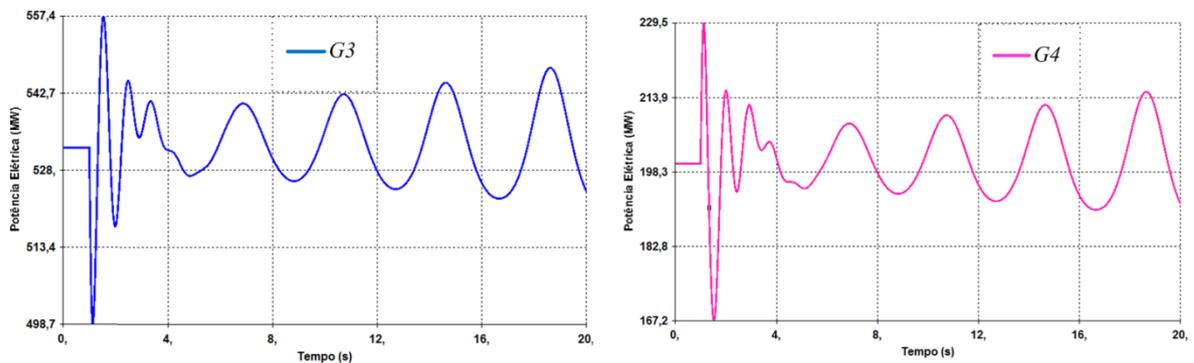


Figura 5.52 - Potência elétrica terminal: (a) G3. (b) G4

5.5.8.2 Sistema em Malha Fechada

Para as validações não lineares será considerado o 5º cenário, uma vez que nesse cenário foi obtido o menor fator de amortecimento para o sistema pelo método *BAT Multipopulacional* (19,99%). A comparação será realizada com a melhor solução geral obtida pelo *PSO Comum com Etapa de Gradiente* (39,08%). As perturbações são as mesmas da simulação não linear em malha aberta. A potência elétrica terminal de cada unidade geradora é apresentada na Figura 5.53 à Figura 5.56.

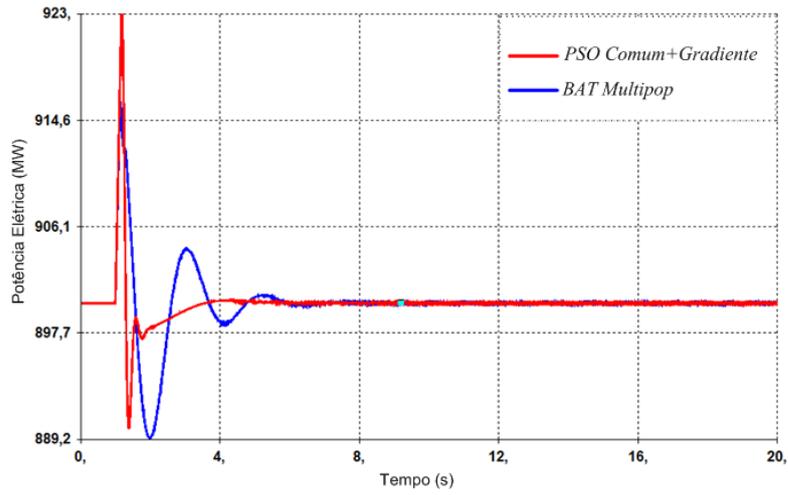


Figura 5.53 - Potência elétrica terminal - G1 - 5º cenário.

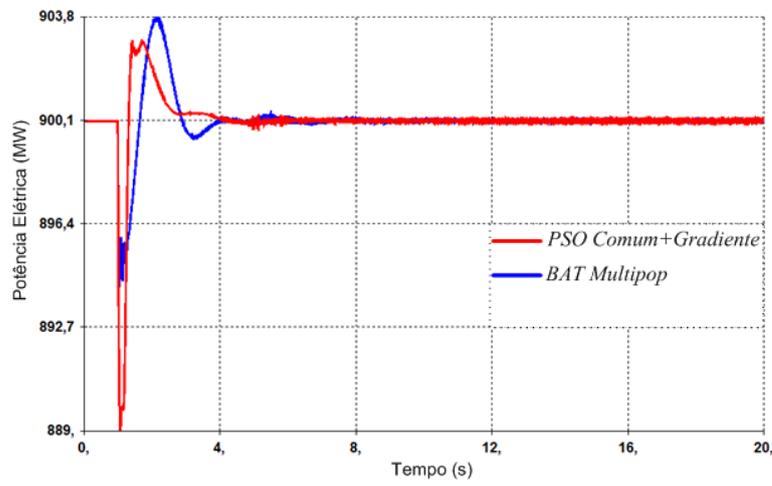


Figura 5.54 - Potência elétrica terminal - G2 - 5º cenário.

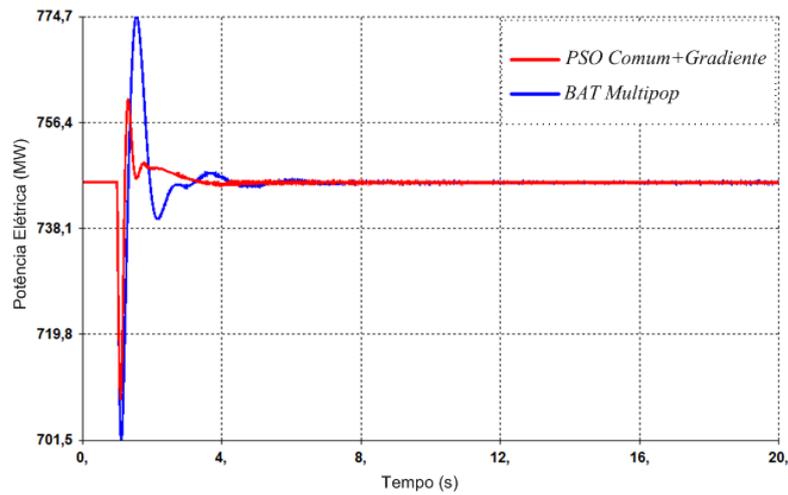


Figura 5.55 - Potência elétrica terminal - G3 - 5º cenário.

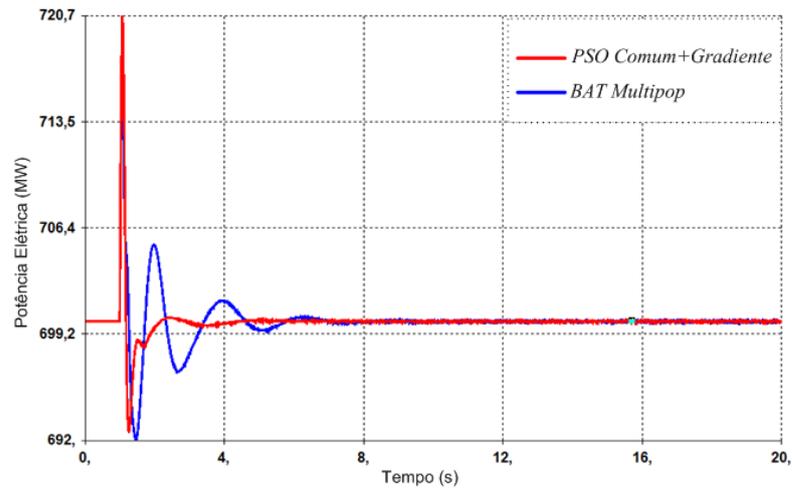


Figura 5.56 - Potência elétrica terminal - G4 - 5º cenário.

Uma vez que as simulações não lineares para o sistema em malha aberta foram realizadas para o 13º cenário, a Figura 5.57 apresenta as validações em malha fechada nesse cenário.

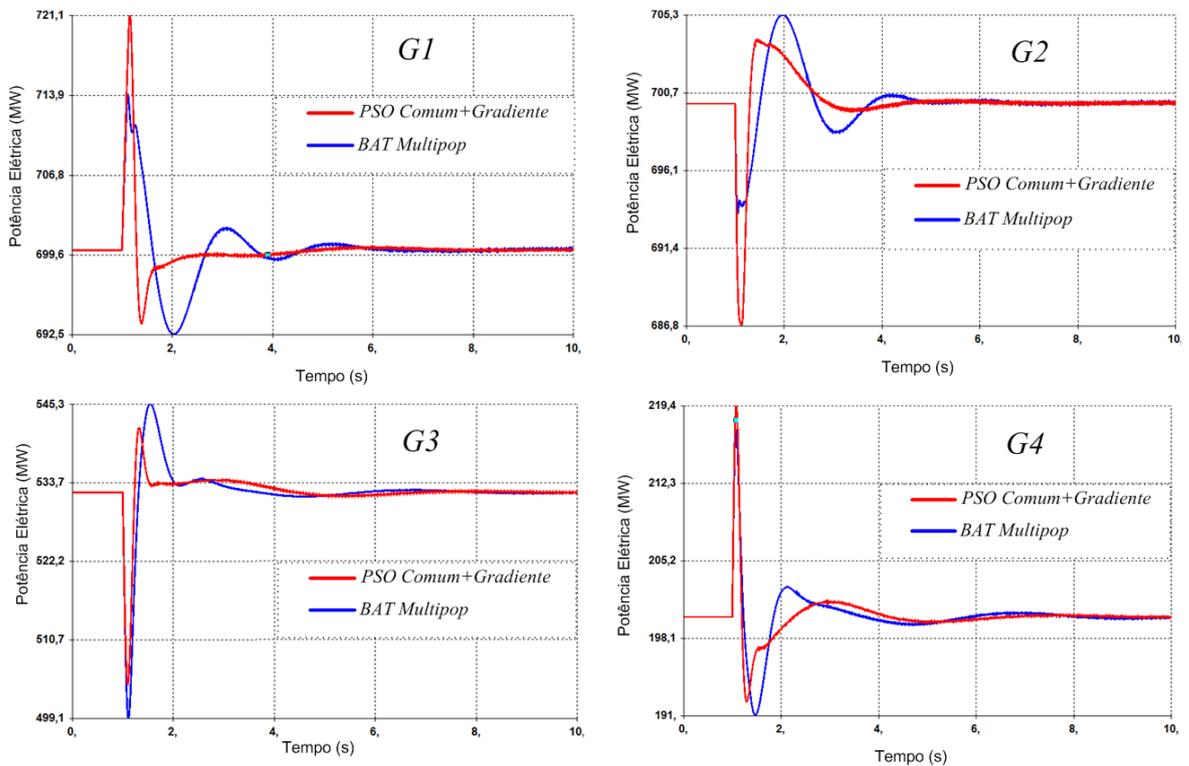


Figura 5.57 - Potência elétrica terminal - 13º cenário.

Das validações não lineares, observa-se a eficiência dos controladores projetados para o amortecimento de oscilações. Observa-se que o tempo que o sistema necessita para atingir o regime permanente é praticamente o mesmo para ambos os controladores. Ressalta-se que esse tempo não foi considerado na função objetivo: a minimização da abscissa espectral (maior parte real do conjunto de autovalores em malha fechada) é indicada para uma otimização multi-objetivo.

5.5.9 Comparação com a Literatura

A partir do estudo comparativo apresentado na Tabela 5.44, observa-se que os valores obtidos com as metodologias propostas (baseadas no *PSO* e *Bat Algorithm*) fornecem melhores resultados do que consta na literatura para o sistema sob análise (para os mesmos cenários e modelagem dinâmica).

Tabela 5.44: Comparação com a Literatura: Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

<i>Método</i>	ξ_{min} (%)	<i>Referência</i>
<i>PSO+Gradiente</i>	39,08	Proposta
<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>	35,98	Proposta
Controle Clássico	7,02	(IEEE, 2015)

5.5.10 Análise Preliminar de Resultados

Para o sistema de 2 áreas e 4 geradores pode-se sintetizar que:

- os métodos multipopulacionais baseados no *PSO* apresentaram melhores resultados quando comparados com aqueles que utilizam uma única população;
- no caso dos métodos baseados no *Bat Algorithm*, o uso de métodos multipopulacionais sem gradiente não apresentou bons resultados, indicando que tais métodos necessitam de um maior número de indivíduos nas subpopulações;
- a hibridização dos métodos baseados em *PSO* apresentou melhores resultados do que os métodos sem a etapa de gradiente. A mesma consideração é aplicada aos métodos baseados no *Bat Algorithm*;

- o aumento do tempo computacional com a inclusão da etapa do gradiente foi em torno de 30% para os métodos que utilizam uma única população e de 60% para os métodos multipopulacionais.

5.6 SISTEMA SUL SUDESTE (CONTROLE CENTRALIZADO)

5.6.1 Descrição do Caso

Com o objetivo de validar as metodologias propostas em um problema de controle com maior número de parâmetros de ajuste, nessa seção é realizado o projeto da estrutura de controle centralizada do Sistema Brasileiro Sul Sudeste. Esse sistema foi utilizado na seção 5.3 para o projeto de quatro estabilizadores (ajuste de doze parâmetros) em uma estrutura descentralizada de controle.

Na seção 5.3, o projeto de estabilizadores baseados no sinal de velocidade foi realizado de forma coordenada considerando seis cenários operativos visando atender o requisito de robustez. O ajuste coordenado de estabilizadores possui a vantagem de: (i) evitar interações indesejadas entre os controladores e (ii) prover o amortecimento aos modos de oscilação inter-área (vide seção 3.3.2).

Em contrapartida, a implementação prática de um ajuste coordenado exige o esforço de todas as empresas (associadas aos estabilizadores sob análise), o que pode ser inviável devido a dois fatores (DOTTA, 2009): (i) a impossibilidade de se ter uma equipe no exato momento em que se deseja reajustar os controladores (fator técnico) e (ii) a inviabilidade do ajuste para uma das empresas do ponto de vista econômico.

Considere um exemplo ilustrativo onde existem três empresas A, B e C em diferentes áreas de um sistema elétrico. A inviabilidade do ponto de vista econômico está associada ao fato de uma empresa da área A ter que importar energia a um custo maior da área B em detrimento de uma empresa na área C devido aos problemas causados por oscilações entre áreas A e C. Nesse caso, a importação de energia da área C seria mais barata, mas é limitada por um modo inter-área pouco amortecido. O problema de estabilidade em questão poderia ser resolvido pelo reajuste coordenado dos estabilizadores das unidades geradoras das áreas A, B e C. Entretanto, considerando as questões de mercado, o reajuste coordenado pode

reduzir o lucro da empresa da área B, que pode não ter interesse na sintonia de seus estabilizadores.

A consideração do controle hierárquico, composto por dois níveis, é uma alternativa para se superar as limitações descritas no parágrafo anterior. O primeiro nível corresponde ao controle descentralizado, onde cada empresa pode ajustar seus estabilizadores utilizando diferentes técnicas (como por exemplo, as de controle clássico). O segundo nível está associado a uma malha suplementar, sendo denominada de controle centralizado, onde são utilizados sinais remotos e o procedimento de ajuste deve ser realizado considerando-se os tempos de atraso de transporte.

Dessa forma têm-se as seguintes vantagens: (i) o controle descentralizado fornece um amortecimento mínimo para as oscilações no caso de falta do controle central e (ii) um operador independente pode ajustar o controle centralizado de forma a criar situações benéficas para todas as empresas do sistema.

O projeto de uma estrutura de controle hierárquica é apresentada nessa parte do texto para o sistema Sul-Sudeste Brasileiro. É considerada uma situação de observabilidade completa onde todos os quatro geradores (Foz do Areia, Salto Segredo, Salto Santiago e Itaipu) participam do controle hierárquico, totalizando em 16 estabilizadores a serem projetados e 48 parâmetros a serem otimizados. A modelagem do sistema e os seis cenários de operação são os mesmos descritos na seção 5.3. Por serem os mais citados na literatura, os estabilizadores são baseados no sinal de velocidade.

É importante ressaltar que na seção 3.3.2, o controle hierárquico foi apresentado como uma alternativa eficaz para o amortecimento dos modos inter-área de oscilação: os modos locais podem ser eficientemente amortecidos através dos estabilizadores locais. Em (CÁRDENAS, 2011), é proposta uma função objetivo que visa dar uma maior ponderação ao amortecimento dos modos inter-área durante o ajuste do controle centralizado. Entretanto, conforme relatado pelo autor, em alguns sistemas simulados, os amortecimentos dos modos locais e intra-planta tiveram o seu melhoramento deteriorado, devido à dificuldade de se escalonar a função objetivo para ponderar os modos de diferentes naturezas (local, inter-área e intra-planta).

Nesse contexto, o objetivo é projetar os estabilizadores visando a otimização do amortecimento de todos os modos de oscilação do sistema, independente de sua natureza. O

mesmo procedimento foi adotado em (DOTTA, 2009), em que o controlador central foi projetado utilizando-se métodos de otimização com e sem derivadas.

5.6.2 Ajuste do Controle Descentralizado

O ajuste do primeiro nível do controle foi realizado de forma coordenada na seção 5.3. Com o objetivo de elucidar a potencialidade do controlador central, o mesmo procedimento adotado em (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009) é considerado neste trabalho: parte-se do princípio que as empresas configuraram os seus respectivos estabilizadores de acordo com métodos de projeto normatizados pela concessionária.

Dessa forma, o ajuste do controle descentralizado proposto em (MARTINS e LIMA, 1989b) será utilizado. A Tabela 5.45 apresenta os parâmetros de ajuste considerados para o primeiro nível.

Tabela 5.45: Projeto do controle descentralizado.

Gerador	K_p	α	ω
01 (Foz do Areia)	10,000	4,000	6,667
02 (Salto Santiago)	10,000	4,000	6,667
03 (Salto Segredo)	10,000	4,000	6,667
04 (Itaipu)	16,000	8,000	5,439
São considerados dois blocos de compensação de fase e a constante de tempo do filtro <i>washout</i> é igual à 3 segundos			

Uma comparação do modo dominante em cada cenário, tanto para a operação em malha aberta quanto para a operação com o controle descentralizado é apresentada na Tabela 5.46. Observa-se que em malha aberta o sistema é instável. O modo dominante está associado a uma oscilação entre Itaipu e o Sistema Sudeste. O quinto cenário é o mais crítico em ambas as situações e está destacado nesta tabela.

Tabela 5.46: Modo de oscilação dominante - Controle Descentralizado.

Cenário	Malha Aberta			Malha Fechada Controle Descentralizado (Local)		
	Modo	ξ_{min} (%)	Freq. (Hz)	Modo	ξ_{min} (%)	Freq. (Hz)
1	$0,65 \pm j5,39$	-11,90	0,86	$-0,33 \pm j5,21$	6,39	0,83
2	$0,66 \pm j5,38$	-12,10	0,86	$-0,32 \pm j5,17$	6,13	0,82
3	$0,68 \pm j5,35$	-12,66	0,85	$-0,28 \pm j5,08$	5,58	0,81
4	$0,74 \pm j5,22$	-14,04	0,83	$-0,25 \pm j5,11$	4,83	0,81
5	$0,84 \pm j5,00$	-16,59	0,80	$-0,15 \pm j4,99$	2,95	0,79
6	$0,69 \pm j5,37$	-12,68	0,85	$-0,30 \pm j5,20$	5,69	0,83

Ressalta-se que o ajuste proposto em (MARTINS e LIMA, 1989b) foi realizado utilizando técnicas de controle clássico em um único cenário de operação (primeiro cenário: caso base). Nesse sentido, não foi garantida a robustez do controlador. Na Tabela 5.46 observa-se que, em malha fechada, o quarto e quinto cenário possuem um amortecimento mínimo menor que 5%.

5.6.3 Projeto do Controle Centralizado

Conforme anteriormente mencionado, são projetados 16 estabilizadores no controlador central, uma vez que todos os geradores participarão desse nível de controle.

A Tabela 5.47 apresenta os parâmetros do sistema de controle utilizados neste trabalho para o controlador central.

Tabela 5.47: Parâmetros do sistema de controle usados para o controlador central.

Parâmetro	Descrição
Constante de tempo do Filtro <i>Washout</i>	$T_\omega = 3$
Número de blocos no estágio de compensação	$nb = 2$
Número de cenários	6
Limite das variáveis	$0,01 \leq K_p \leq 20$ $0,1 \leq \alpha_p \leq 10$ $1,25 \leq \omega_p \leq 30$

A Figura 5.58 apresenta o esquema do controle centralizado projetado neste trabalho. Inicialmente os sinais remotos de velocidade são medidos pelas Unidades de Medição Fasorial Sincronizadas (UMFS) e enviados ao controlador central. Os tempos de recepção dos sinais remotos (T_{REC}) e de envio do sinal de controle (T_{ENV}) são considerados. Como exemplo, o sinal de controle a ser injetado no gerador 1 (Foz do Areia) é uma composição dos sinais remotos processados no controlador central conforme destacado na Figura 5.58.

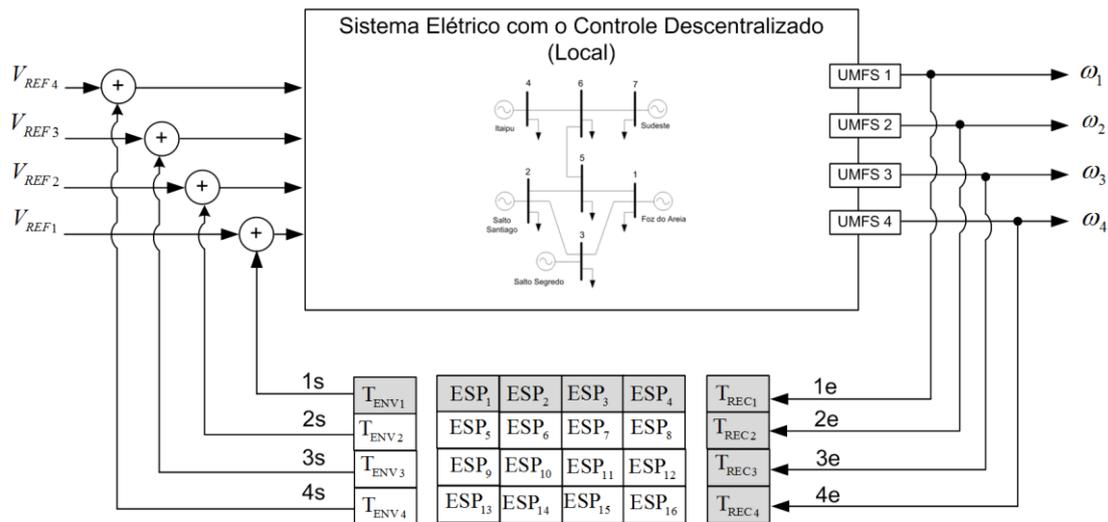


Figura 5.58 - Sistema equivalente Sul-Sudeste - controle central com 16 estabilizadores. Adaptado de (CÁRDENAS, 2011).

Na Figura 5.58 os índices (1s) e (1e) indicam, respectivamente, a primeira saída do controlador central (a ser injetada em G1) e a primeira entrada (sinal remoto medido em G1). A mesma notação é aplicada aos demais sinais.

5.6.4 Projeto do Controle Centralizado: Tempo de Atraso de 400ms

Para o projeto do controle centralizado, serão considerados atrasos de 200 ms na entrada e saída do controlador central (tempo de recepção e de envio do sinal de controle à planta), resultando em um atraso total de 400ms.

Para as simulações, foram considerados 30 indivíduos e 50 gerações. Os métodos multipopulacionais utilizaram duas subpopulações (com 15 indivíduos cada). Em relação ao intervalo de gerações para a realização da busca local por gradiente para refinamento de ganhos (metodologias 2, 4, 6 e 8) e reinicialização da população (metodologias 3, 4, 7 e 8):

- i. foi adotado um intervalo de 10 gerações para a execução do gradiente;
- ii. se após 15 gerações o fator de amortecimento mínimo for menor que 5 %, a população é reiniciada aleatoriamente.

5.6.4.1 Resultados

A melhor solução da população inicial corresponde a um amortecimento de 4,66 % em malha fechada considerando todos os seis cenários operativos. Foram executadas três simulações para cada metodologia e os resultados (mínimo amortecimento em malha fechada) são apresentados na Tabela 5.48.

Tabela 5.48: Mínimo amortecimento obtido: Sistema Equivalente Sul-Sudeste (Central).

	<i>Método</i>	<i>3º Melhor (%)</i>	<i>2º Melhor (%)</i>	<i>1º Melhor (%)</i>	<i>Tempo Médio (min)</i>
1	<i>PSO-Comum</i>	13,64	14,59	15,88	14,95
2	<i>PSO+Gradiente</i>	16,94	17,13	17,15	21,68
3	<i>PSO-Multipopulacional</i>	13,88	14,77	14,78	17,00
4	<i>PSO Multipopulacional+Gradiente</i>	13,63	14,60	15,39	27,93
5	<i>BAT-Comum</i>	10,83	11,03	13,09	14,77
6	<i>BAT+Gradiente</i>	11,45	12,42	12,81	20,23
7	<i>BAT-Multipopulacional</i>	10,70	10,87	11,70	14,19
8	<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>	11,01	11,67	11,99	24,87

Da Tabela 5.48 é possível observar que, conforme já constatado para os outros casos:

- i. a hibridização dos métodos populacionais com o método do gradiente melhorou a qualidade das soluções: entretanto o maior aumento do fator de amortecimento foi menor que 3% quando se compara as metodologias sem e com a etapa do gradiente;
- ii. uma vez que são usados 30 indivíduos (15 indivíduos em cada subpopulação), as metodologias multipopulacionais apresentaram piores resultados que os métodos baseados em uma população. Isso ilustra a necessidade de se trabalhar

com um número de indivíduos maior nas subpopulações, principalmente quando existem muitos parâmetros a serem otimizados;

- iii. a Figura 5.59 ilustra a variação do esforço computacional quando comparado com o método *PSO Comum*. Observa-se que os métodos populacionais aumentaram o esforço entre 60 a 90%. Entretanto, quando se compara as metodologias multipopulacionais sem e com gradiente (por exemplo, *PSO Multipopulacional com e sem Gradiente*, *Bat Algorithm Multipopulacional com e sem Gradiente*), o aumento no tempo computacional está na faixa dos 75%. Para os métodos que utilizam uma única população, o aumento do esforço é aproximadamente 40%.

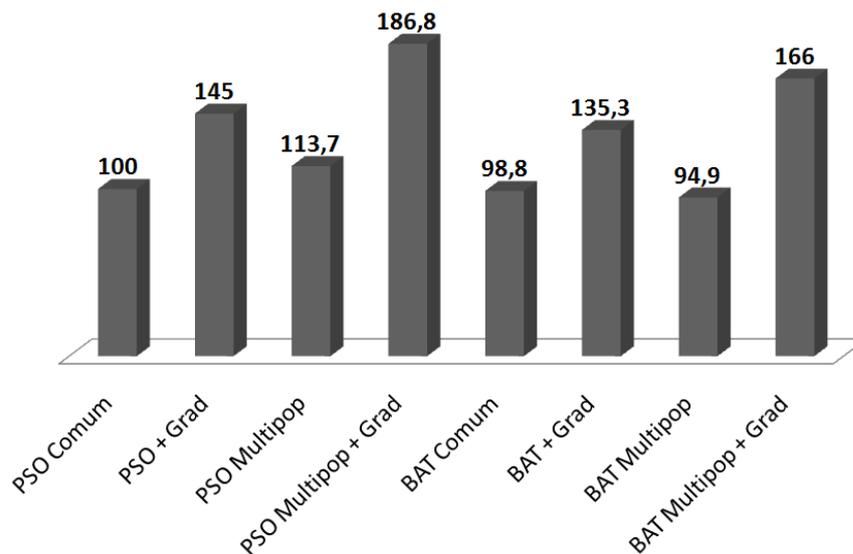


Figura 5.59 - Porcentagem de variação do tempo computacional (%) - Sistema Sul Sudeste - Centralizado.

5.6.4.2 Análise da Convergência

A convergência dos algoritmos bioinspirados são apresentados na Figura 5.60 à Figura 5.62. As seguintes conclusões podem ser obtidas: (i) o métodos baseados no *PSO* apresentaram os melhores resultados, (ii) os métodos com etapa de gradiente também apresentaram melhores resultados, (iii) nos métodos multipopulacionais, uma subpopulação

com uma pior solução pode ser evoluída de forma que esteja associada à melhor solução no final do processo iterativo.

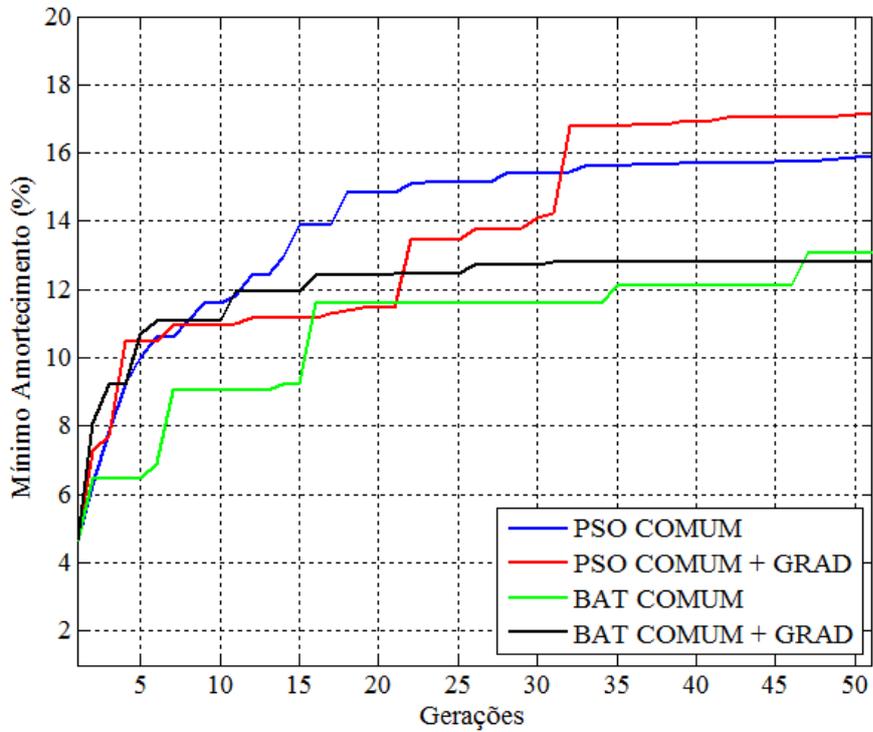


Figura 5.60 - Convergência dos métodos.

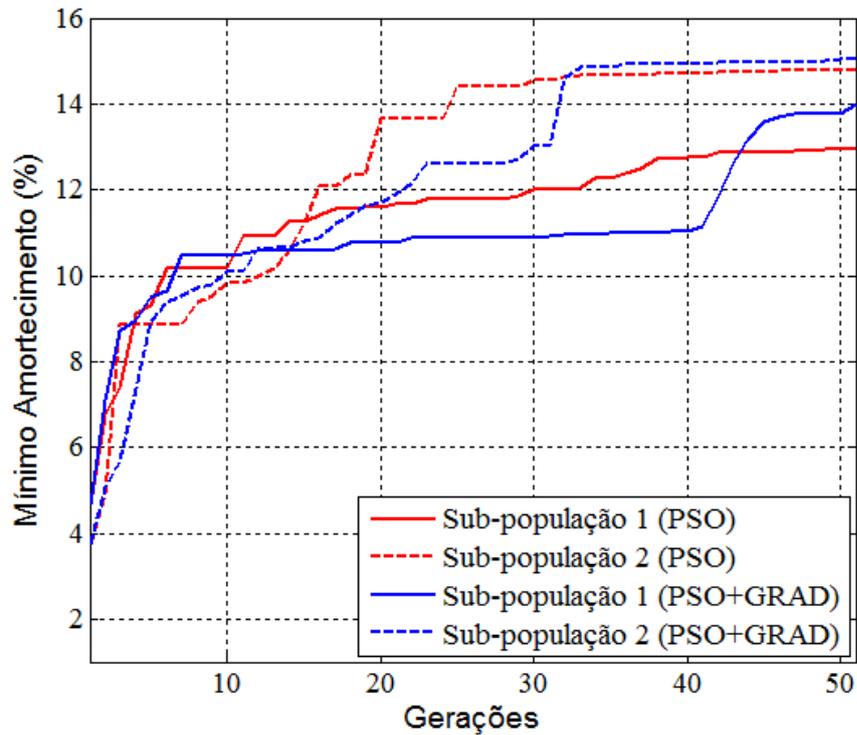


Figura 5.61 - Convergência do método *PSO* Multipopulacional (sem e com gradiente).

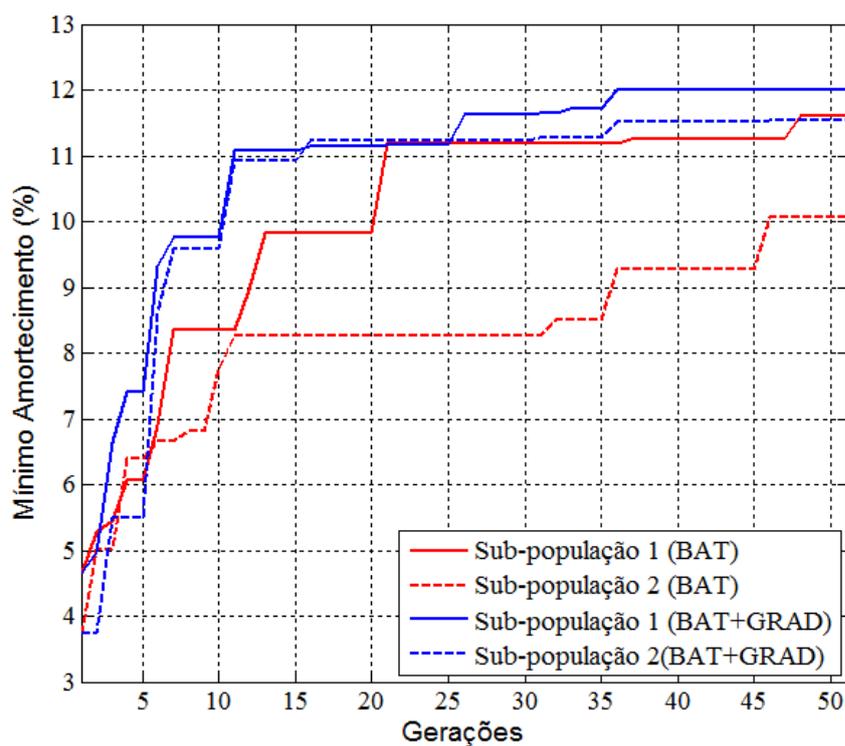


Figura 5.62 - Convergência do método BAT Multipopulacional (sem e com gradiente).

Para efeitos de ilustração, a variação do mínimo amortecimento antes e após a aplicação da etapa do Método do Gradiente é apresentada na Tabela 5.49 e na Tabela 5.50, tanto para o método com uma população quanto para o multipopulacional (ambos baseados no *PSO*). As situações em que ocorreu uma variação superior a 0,10% (em valor absoluto) são destacadas.

Tabela 5.49: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: *PSO + Gradiente*.

Geração	1ª Melhor Solução	
	Amortecimento Pré e Pós Etapa do Gradiente (%)	
	<i>Pré</i>	<i>Pós</i>
10	11,01	11,08
20	11,49	13,44
30	14,25	16,79
40	16,97	17,04
50	17,12	17,15

Tabela 5.50: Análise da convergência: efeitos da busca local por gradiente: *PSO Multipop.* + *Gradiente* - 1ª melhor solução.

<i>Geração</i>	<i>Sub-população 1</i> <i>Amortecimento (%)</i>		<i>Sub-população 2</i> <i>Amortecimento (%)</i>	
	<i>Pré-Gradiente</i>	<i>Pós-Gradiente</i>	<i>Pré-Gradiente</i>	<i>Pós-Gradiente</i>
10	10,51	10,59	10,11	10,63
20	10,79	10,89	11,88	12,17
30	10,92	10,96	13,02	14,59
40	11,14	11,84	14,92	14,97
50	13,98	15,39	15,06	15,10

5.6.4.3 Análise dos Cenários

Para a melhor solução da Tabela 5.48 (*PSO+Gradiente*), a Tabela 5.51 apresenta os modos de oscilação dominantes em cada cenário considerando o sistema em malha fechada. Observa-se que em todos os cenários os modos foram adequadamente amortecidos, passando-se de um amortecimento mínimo de 2,95% no quinto cenário (vide Tabela 5.46) para um amortecimento de 17,14 % no sexto cenário.

Tabela 5.51: Modo de oscilação dominante - Controle Centralizado.

<i>Cenário</i>	<i>Malha Aberta</i>		
	Modo	ξ_{min} (%)	<i>Freq.</i> (Hz)
1	$-1,35 \pm j7,61$	17,46	1,21
2	$-2,08 \pm j11,70$	17,50	1,86
3	$-2,01 \pm j11,56$	17,15	1,84
4	$-2,03 \pm j11,44$	17,49	1,82
5	$-1,96 \pm j11,19$	17,21	1,78
6	$-2,11 \pm j12,13$	17,14	1,93

A eficiência do controlador central é comprovada a partir da análise da Tabela 5.52, que apresenta os fatores de amortecimento mínimos em três condições de operação: malha aberta, malha fechada com controle descentralizado e malha fechada com o controle hierárquico (descentralizado e centralizado).

Tabela 5.52: Comparação dos fatores de amortecimento mínimo.

	<i>Malha Aberta</i>	<i>Descentralizado</i>	<i>Centralizado (Hierárquico)</i>
Modo	$0,84 \pm j5,00$	$-0,15 \pm j4,99$	$-2,11 \pm j12,13$
ξ_{min} (%)	-16,59	2,95	17,14
<i>Freq. (Hz)</i>	0,80	0,79	1,93

5.6.4.4 Comparação com a Literatura

O melhor resultado obtido para projeto do controlador central com um tempo total de atraso de 400ms será comparado com os resultados propostos em:

- i. (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009): nesse caso o ajuste foi realizado pela técnica de controle robusto *LQR*;
- ii. (DOTTA, 2009): nesse caso o ajuste foi realizado com o método híbrido, que acopla os algoritmos Quasi-Newton *BFGS*, Feixe e Gradiente Amostrado (vide seção 2.5.3.4).
- iii. com o controle descentralizado ajustado de forma coordenada nesse trabalho (vide seção 5.3).

Os modos dominantes para o sistema operando em malha fechada com o controle hierárquico são apresentados na Tabela 5.53.

Tabela 5.53: Controle Hierárquico - Comparação com a Literatura.

	<i>Hierárquico</i>			<i>Descentralizado (Coordenado)</i>
	<i>Proposto</i>	<i>Literatura (LQR)</i>	<i>Literatura (Híbrido)</i>	
Modo	$-2,11 \pm j12,13$	$-0,49 \pm j5,00$	$-0,49 \pm j5,40$	$-0,75 \pm j5,26$
ξ_{min} (%)	17,14	9,67	9,14	14,11
<i>Freq. (Hz)</i>	1,93	0,80	0,86	0,85

Com base na Tabela 5.53 observa-se que o aumento do amortecimento das oscilações não é justificativa suficiente para a implementação do controlador central: coeficientes de

amortecimento razoáveis foram obtidos somente com o ajuste coordenado do controle descentralizado. Conforme anteriormente mencionado, o controlador central é efetivo nas situações em que não é possível se efetuar o ajuste coordenado de controladores devido a fatores técnicos e econômicos.

5.6.4.5 Parâmetros dos Controladores

Para o projeto do controlador central, somente serão apresentados os parâmetros dos controladores ajustados pela metodologia *PSO com Etapa de Gradiente*. Os valores estão indicados na Tabela 5.54.

Tabela 5.54: Sistema Sul-Sudeste - controle centralizado - melhor solução.

Estabilizador	<i>PSO+Gradiente</i>		
	K_p	α	ω
01	11,974	10,000	11,608
02	12,619	0,930	23,479
03	8,775	10,000	17,500
04	15,369	1,150	11,230
05	13,278	1,980	20,241
06	5,020	8,260	18,739
07	2,846	6,000	16,664
08	19,001	10,000	20,542
09	3,931	0,100	7,427
10	16,013	0,100	20,550
11	7,224	10,000	22,128
12	6,967	0,100	10,043
13	14,618	10,000	26,416
14	6,774	0,100	7,240
15	11,364	0,100	14,675
16	6,142	0,100	9,485
Amortecimento Mínimo	17,14 % no 6º cenário		

5.6.4.6 Simulação no Tempo

Com o objetivo de validar o projeto de controle central, simulações no domínio do tempo foram conduzidas considerando as não linearidades do sistema. Os limites da saída dos estabilizadores centrais e locais (sinais atuadores) são os mesmos adotados em (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009): $\pm 0,2 pu$.

O evento simulado é o mesmo da seção 5.3.7: foi aplicado um curto circuito trifásico na barra 5. Esse curto circuito foi eliminado após 50ms através da abertura da linha 1-5 e logo após 50ms essa linha foi religada.

As simulações foram conduzidas para o quinto cenário, uma vez que este apresentou o menor fator de amortecimento na maioria dos casos. Inicialmente, na Figura 5.63, o controlador descentralizado (com o ajuste da literatura e com 2,95% de amortecimento) é comparado com o controlador hierárquico (amortecimento de 17,21%). Observa-se que a inclusão de uma malha adicional de controle permitiu uma melhora significativa na resposta transitória do sistema, validando os resultados da análise modal.

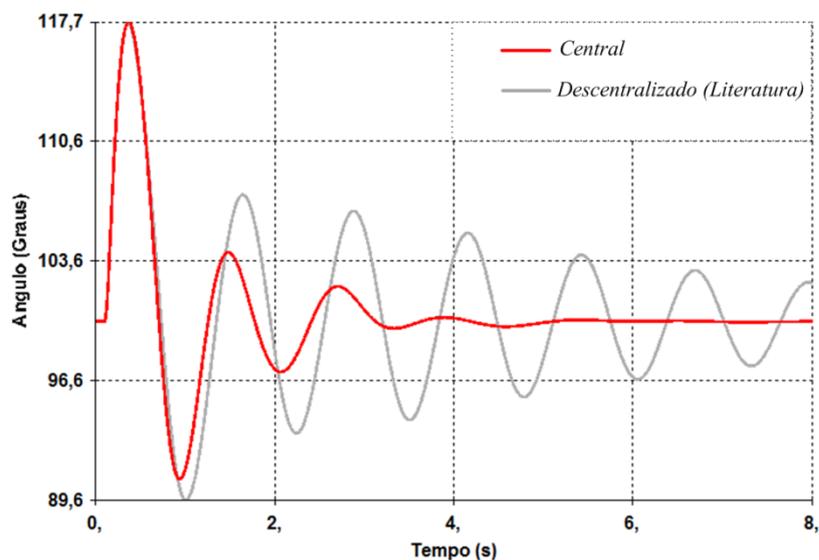


Figura 5.63 - Ângulo do gerador de Itaipu- Cenário 5.

A segunda comparação está associada ao controle descentralizado (ajustado de forma coordenada neste trabalho, com um amortecimento mínimo de 14,11%) e ao controle hierárquico (amortecimento de 17,21%). Conforme já discutido, o controle hierárquico

apresenta resultados ligeiramente melhores que o controle descentralizado ajustado de forma coordenada.

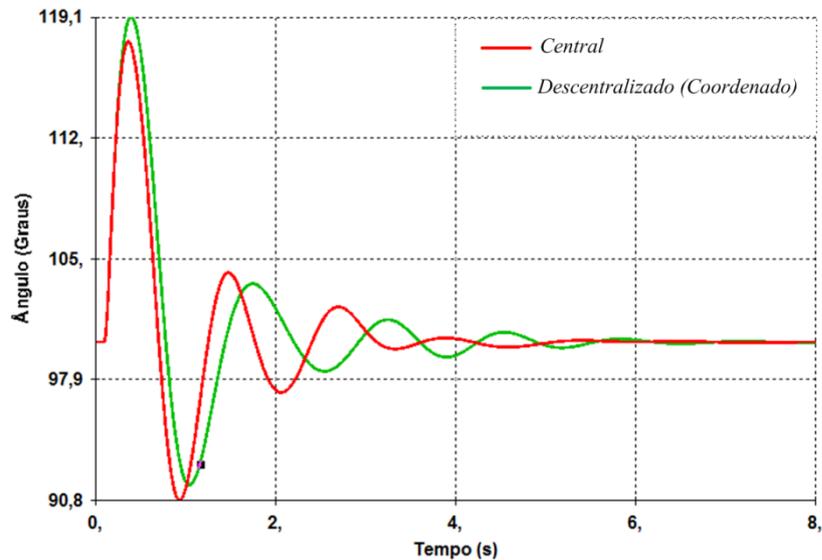


Figura 5.64 - Ângulo do gerador de Itaipu- Cenário 5.

Por fim, cita-se que o sistema atinge o regime permanente em menor tempo com a atuação do controle centralizado. A justificativa para esse comportamento é que o pólo dominante fica mais afastado do eixo imaginário quando se emprega o controle hierárquico (vide Tabela 5.53)

5.6.4.7 Robustez à Perda de Sinal e Variação do Tempo de Atraso

O controlador central projetado deve ser robusto às variações de topologia da rede que foram consideradas no projeto e às variações de tempo de atraso e perdas de canais de comunicação que não foram consideradas na fase de projeto.

Inicialmente são avaliados o valor de mínimo amortecimento diante de perdas de canais de comunicação, definidas com base no trabalho de (CÁRDENAS, 2011). Esses valores são apresentados na Tabela 5.55.

Na Tabela 5.55, a primeira coluna indica quantos canais foram perdidos, a segunda coluna especifica se os canais são de entrada e/ou saída, a terceira coluna especifica quais são

os canais (com base na Figura 5.58) e a última coluna indica o fator de amortecimento mínimo.

Tabela 5.55: Análise de robustez quanto a perda de canais de comunicação.

<i>Sinais Perdidos</i>	<i>Especificação</i>	<i>Combinação</i>	$\xi_{min}(\%)$
1 canal	1 entrada	1e	3,75
		2e	5,32
		3e	5,86
		4e	9,26
	1 saída	1s	2,41
		2s	4,80
		3s	12,67
		4s	7,36
2 canais	2 entradas	1e - 3e	1,90
		2e - 4e	3,95
		3e - 4e	6,07
	2 saídas	1s - 2s	2,21
		3s - 4s	7,20
	1 entrada e 1 saída	1e - 4s	3,81
		3e - 4s	5,48
		4e - 3s	8,92
6 canais	3 entradas e 3 saídas	1e - 2e - 3e - 1s - 2s - 3s	3,02
		2e - 3e - 4e - 2s - 3s - 4s	2,15
8 sinais	4 entradas e 4 saídas	1e - 2e - 3e - 4e - 1s - 2s - 3s - 4s <i>Somente controle descentralizado</i>	2,95

É possível observar, a partir da Tabela 5.55, que o controlador central é robusto quanto a perda de canais de comunicação. O pior valor de amortecimento foi obtido para o caso de perda de 2 entradas do controlador central (1e - 3e), relativas aos sinais remotos de velocidade das usinas de Foz do Areia e Salto Segredo.

Na ausência dos canais de comunicação 1e - 3e, o modo crítico é de natureza inter-área (oscilação entre os sistemas Sul e o Sudeste), conforme ilustrado na Figura 5.65. Como os dois sinais perdidos estão associados ao sistema Sul (Geradores 1 e 3), o modo de oscilação correspondente sofre o maior impacto.

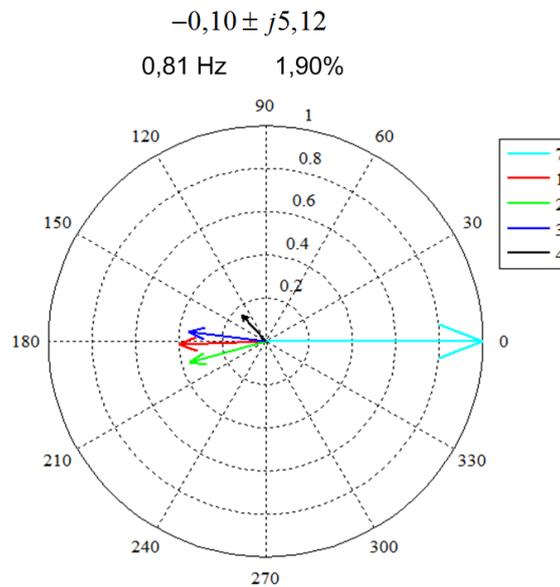


Figura 5.65 - *Mode Shape* - modo crítico - controle centralizado sem as entradas 1e-3e.

Da Tabela 5.55, observa-se que, na perda de todos os canais de comunicação do controlador central, a planta possui o primeiro nível de controle (descentralizado), que garante a estabilidade do sistema com um fator de amortecimento mínimo de 2,95% (que está de acordo com a Tabela 5.46).

Uma vez investigada a robustez do controlador central quanto às perdas de canais de comunicação, é interessante investigar sua robustez quanto à variação do tempo de atraso: ressalta-se que um total de 400ms foi considerado na fase de projeto. O tempo de atraso está diretamente associado à compensação de fase dos estabilizadores centrais.

A variação do mínimo amortecimento para diferentes tempos de atraso é apresentada na Figura 5.66. Observa-se que o controlador projetado não é robusto para a variação do tempo total de atraso. Esse comportamento era esperado, uma vez que: (i) a variação do tempo de atraso não foi considerada na etapa de projeto e (ii) os tempos de atraso foram variados em uma ampla faixa.

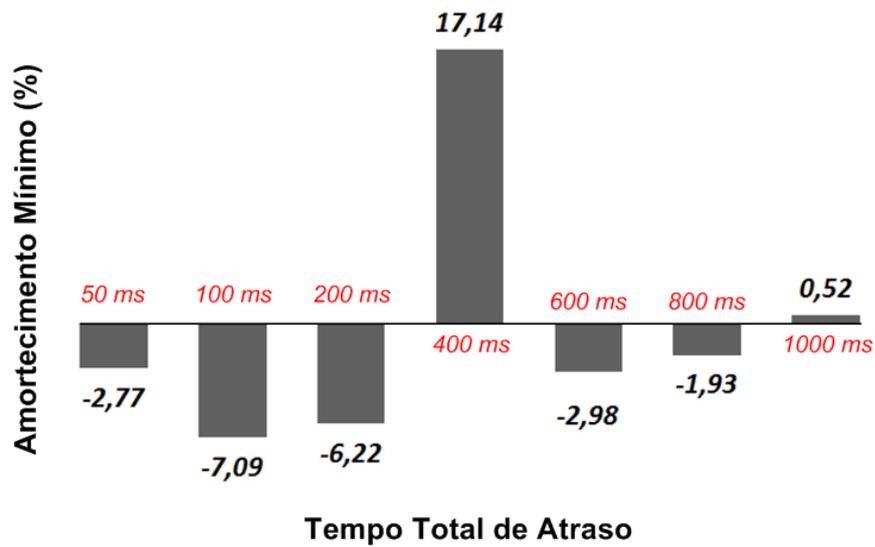


Figura 5.66 - Variação de ξ_{\min} com o tempo total de atraso (controlador projetado para 400ms).

A variação do tempo total de atraso em uma faixa mais restrita de $\pm 20\%$ em torno do valor considerado na fase de projeto (400ms) é ilustrada na Figura 5.67.

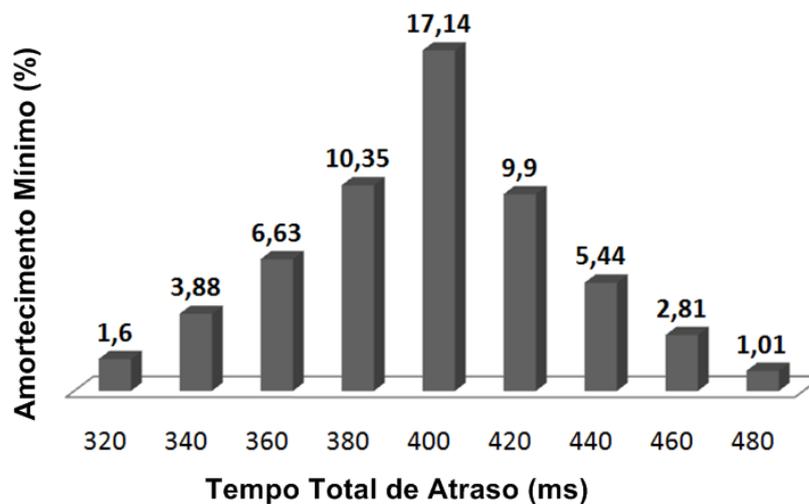


Figura 5.67 - Variação de ξ_{\min} com o tempo total de atraso (controlador projetado para 400ms).

A sensibilidade do mínimo valor de amortecimento à variação dos tempos de atraso, ilustrada na Figura 5.66 e na Figura 5.67, indicam a necessidade do reajuste do controle central. Baseando no princípio de que o controle central é ajustado por um operador independente, dispendo de uma ferramenta de monitoramento da estabilidade em tempo real, pode-se utilizar a metodologia proposta para o reajuste. Em um primeiro momento pode-se

buscar estabilizar o sistema através do refinamento dos ganhos. Caso esse procedimento não seja suficiente, procede-se com o reajuste dos ganhos e dos parâmetros de compensação de fase. Nesse sentido, melhoramentos na metodologia proposta são necessários, tais como a aplicação de computação paralela e de métodos de otimização analítica mais eficientes para refinamento dos ganhos. A questão que surge está associada à predição do tempo de atraso, que deve ser melhor investigada com base na literatura técnica especializada.

5.6.5 Análise do Amortecimento para Diferentes Tempos de Atraso

Nessa seção o controle centralizado é projetado considerando diferentes tempos totais de atraso: envio e recepção de sinais. As simulações foram realizadas utilizando o método *PSO com Etapa de Gradiente*, que forneceu melhores resultados para esse sistema, para um tempo de atraso total de 400ms. Os valores de mínimo amortecimento são apresentados na Figura 5.68.

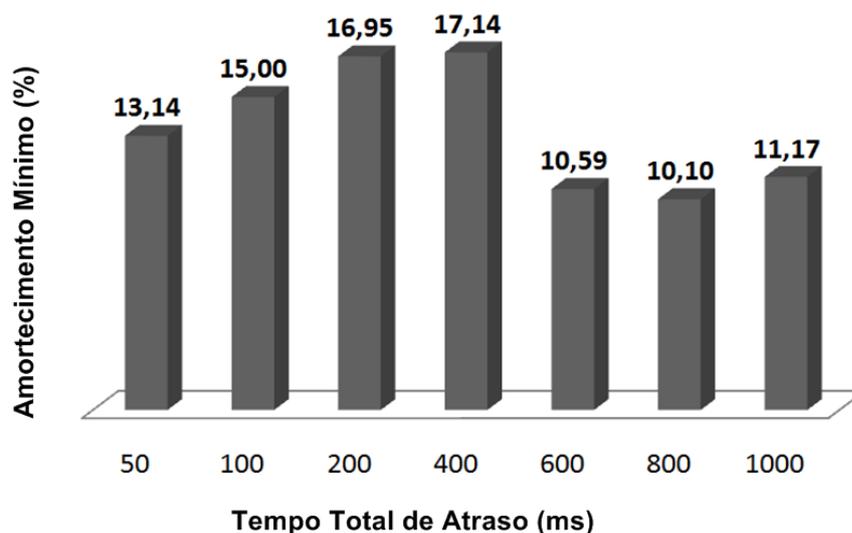


Figura 5.68 - Variação do mínimo amortecimento com o tempo de atraso.

Observa-se que não existe um padrão definido para a variação do fator de amortecimento mínimo com o tempo de atraso. Esse fato também foi observado em (CÁRDENAS, 2011). O que pode ser afirmado é que quanto maior o tempo de atraso, maior é a compensação de fase necessária ao controlador central.

5.6.6 Análise Preliminar de Resultados

As seguintes conclusões são obtidas a partir do projeto de uma estrutura de controle centralizada para o sistema Sul Sudeste brasileiro (ajuste de 48 parâmetros):

- i. os métodos com etapa de gradiente podem permitir a obtenção de melhores soluções, embora essa hibridização implique em um aumento em torno de 45% (população única) e 75% (duas populações) do tempo computacional;
- ii. os métodos multipopulacionais apresentaram os piores resultados, indicando a necessidade da consideração de um número maior de indivíduos nas subpopulações, principalmente quando existem muitos parâmetros a serem otimizados;
- iii. a qualidade dos métodos baseados no *Bat Algorithm* não foi tão boa quanto a qualidade dos baseados no *PSO*, indicando a necessidade de aperfeiçoamento do método *Bat Algorithm* original ou a consideração de um maior número de indivíduos (para melhorar a etapa de busca global);
- iv. a consideração do tempo de atraso não dificulta o procedimento de ajuste do ponto de vista dos métodos populacionais de otimização;
- v. existe a necessidade de um estudo mais criterioso quanto à robustez do controle central à perda de canais de comunicação e variação do tempo de atraso: casos mais críticos devem ser tratados na fase do projeto, em conjunto com os diversos pontos de operação.

5.7 ANÁLISE DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Ao se fazer a análise do desempenho computacional das metodologias propostas, torna-se importante fazê-la a partir do porte do sistema simulado (número de estados), do número de cenários considerados e dos parâmetros de simulação (total de indivíduos e de gerações).

A Tabela 5.56 apresenta o total de estados em malha aberta e fechada para cada caso simulado. A partir dessa tabela, duas observações importantes devem ser feitas: (i) em malha

fechada o número de estados é maior devido aos controladores e (ii) no controle centralizado ocorre um aumento significativo de estados em malha fechada por causa da modelagem dos tempos de atraso do sinais pela aproximação de Padé de segunda ordem.

Tabela 5.56: Total de estados em malha aberta e fechada.

<i>Sistema</i>	<i>Malha Aberta</i>	<i>Malha Fechada</i>
<i>Sul-Sudeste (Descentralizado)</i>	30	42
<i>New-England</i>	62	98
<i>2 Áreas e 4 Geradores</i>	32	44
<i>Sul-Sudeste (Hierárquico)</i>	42*	154

* com o controle local inserido no sistema.

Ressalta-se que o número de estados em malha fechada está associado ao tempo computacional das metodologias propostas, uma vez que quanto maior o número de estados, maior o número de autovalores a serem calculados em cada cenário.

Com base no número de indivíduos e de gerações adotados neste trabalho, a Tabela 5.57 apresenta o número aproximado de execuções da rotina de cálculo de autovalores em malha fechada para cada caso simulado. Adicionalmente cita-se que os métodos híbridos realizarão um maior número de execuções devido à etapa do método do gradiente.

Tabela 5.57: Número aproximado de execuções da rotina de cálculo de autovalores.

<i>Sistema</i>	<i>Indivíduos</i>	<i>Gerações</i>	<i>Cenários</i>	<i>Execuções</i>
<i>Sul-Sudeste (Descentralizado)</i>	25	50	6	7500
<i>New-England</i>	50	100	14	70000
<i>2 Áreas e 4 Geradores</i>	26	25	14	9100
<i>Sul-Sudeste (Centralizado)</i>	30	50	6	9000

A Tabela 5.58 apresenta o tempo computacional médio para cada um dos casos: (A) sistema Sul-Sudeste (descentralizado), (B) sistema *New-England*, (C) Sistema 2 Áreas e 4 Geradores e (D) sistema Sul-Sudeste (centralizado).

Tabela 5.58: Tempo computacional.

<i>Método</i>	<i>Tempo médio de Simulação (min)</i>			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>PSO-Comum</i>	2,40	65,95	2,96	14,95
<i>PSO+Gradiente</i>	3,30	80,35	3,95	21,68
<i>PSO-Multipopulacional</i>	2,58	64,24	2,84	17,00
<i>PSO Multipopulacional+Gradiente</i>	4,00	82,41	4,67	27,93
<i>BAT-Comum</i>	2,53	60,24	2,71	14,77
<i>BAT+Gradiente</i>	3,28	70,41	3,80	20,23
<i>BAT-Multipopulacional</i>	2,72	60,84	3,15	14,19
<i>BAT Multipopulacional+Gradiente</i>	4,05	78,92	3,92	24,87

A partir da Tabela 5.58 observa-se que, conforme esperado, o tempo computacional aumenta com o número de execuções da rotina de cálculo de autovalores (Tabela 5.57) e de estados em malha fechada (Tabela 5.56).

Com base na Tabela 5.58, a Figura 5.69 e a Figura 5.70 apresentam o aumento percentual do tempo computacional devido à inclusão da etapa de busca local por gradiente para todos os sistemas simulados.

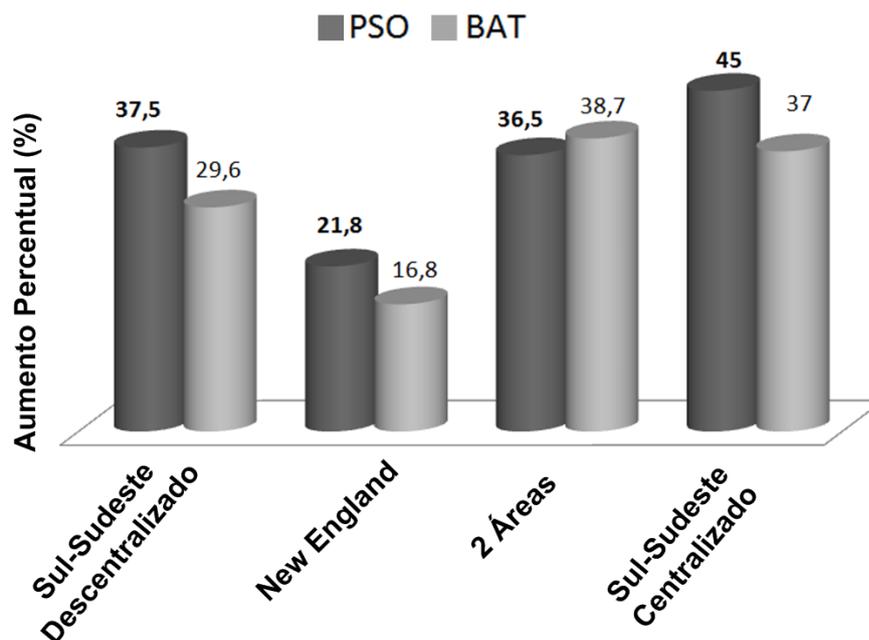


Figura 5.69 - Aumento do tempo computacional devido à hibridização: 1 população.

Na Figura 5.69 tem-se o aumento percentual do tempo computacional nos métodos com uma única população: observa-se que para o sistema *New England*, a inclusão do método do gradiente implicou em um aumento de 21,8% para o *PSO+Gradiente* (com relação ao *PSO Comum*) e de 16,8 % para o *Bat+Gradiente* (com relação ao *Bat Comum*).

Na Figura 5.70 tem-se o aumento percentual do tempo computacional nos métodos com duas subpopulações: observa-se que para o sistema *New England*, a inclusão do método do gradiente implicou em um aumento de 28,3% para o *PSO Multipopulacional+Gradiente* (com relação ao *PSO Multipopulacional*) e de 29,7% para o *Bat Multipopulacional+Gradiente* (com relação ao *Bat Multipopulacional*).

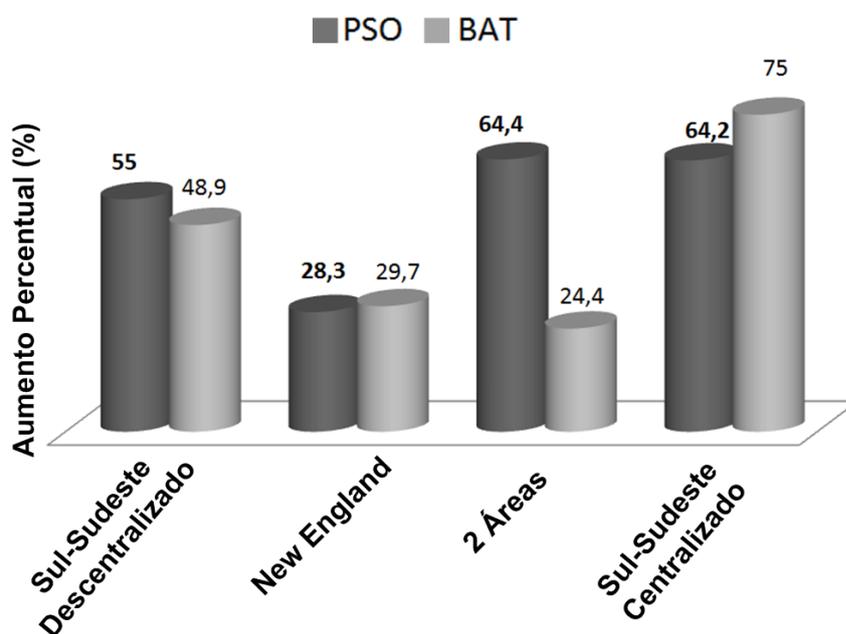


Figura 5.70 - Aumento do tempo computacional devido à hibridização: 2 subpopulações.

Em relação ao tempo de simulação, a partir da Figura 5.69 e da Figura 5.70 observa-se que a hibridização com o método do gradiente implica em um aumento máximo percentual de 45% para as metodologias baseadas em uma única população e de 75% para as metodologias multipopulacionais. Ressalta-se que o aumento do tempo computacional não torna as metodologias propostas menos competitivas, uma vez que a qualidade da solução é melhorada.

As diversas execuções das rotinas de cálculo de autovalores têm sido uma das críticas em relação aos métodos de otimização populacionais. A solução para a redução do esforço

computacional seria a redução da ordem do sistema, o que implicaria em um menor número de autovalores calculados a cada execução (MARTINS, TARANTO e HAUER, 2000). Entretanto, cita-se que mesmo com o elevado esforço computacional, os métodos de otimização populacionais são atrativos e podem complementar os projetos realizados baseando-se em controle clássico e moderno.

5.8 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO

Esse capítulo apresentou os resultados obtidos com as metodologias propostas para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência. Foram utilizados três sistemas testes da literatura técnica e foram projetadas três estruturas descentralizadas de controle e uma centralizada. Os estudos foram realizados de forma sistemática considerando a mesma população inicial e três simulações para os diferentes métodos. Adicionalmente, comparações com resultados da literatura foram realizadas, comprovando a superioridade das metodologias propostas. Por fim, os controladores projetados foram validados através de simulações no domínio do tempo.

6 Conclusões

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

O projeto de controladores de sistemas elétricos de potência para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência tem sido estudado desde a década de sessenta. Por estarem bem fundamentadas na literatura, as técnicas de controle clássico têm sido aplicadas para a solução desse problema: a desvantagem está associada ao projeto sequencial de controladores, o que demanda elevado esforço por parte do projetista, principalmente para sistemas de grande porte. Outra vertente é a aplicação de técnicas de controle robusto (moderno) para o projeto de controladores, tais como *LQR*, *LMI* e *BMI*: a desvantagem está associada à necessidade da redução de ordem e ao fato de que nem sempre o processo de solução alcança a convergência. Além disso, problemas de não convexidade não podem ser tratados por *LMIs*, o que implica na necessidade de artifícios matemáticos para tornar o problema convexo mas pode gerar problemas numéricos.

Em contrapartida, os métodos de otimização são bastantes atrativos para a solução do problema de ajuste de controladores. Uma vez escolhido um índice de desempenho em malha fechada a ser otimizado, diferentes técnicas de otimização podem ser aplicadas. Adicionalmente, ao contrário das técnicas de controle robusto descritas no parágrafo anterior, uma vez que o processo diverja, basta o projetista alterar a condição inicial e reiniciar o processo. Cita-se ainda que as metodologias baseadas em otimização paramétrica são mais simples de implementar do que as baseadas em técnicas de controle robusto.

Dentre as técnicas de otimização destacam-se os métodos de direção de busca baseados nas derivadas da função objetivo e os métodos populacionais bioinspirados. Os primeiros possuem a vantagem de serem rápidos e as desvantagens de não fazerem uma busca global e serem sensíveis às condições iniciais.

Em contrapartida, os métodos de otimização populacionais são menos sensíveis às condições iniciais, entretanto podem ter a convergência demorada. Adicionalmente tais métodos podem sofrer de convergência prematura devido à perda da diversidade da população. Além disso, tais métodos geralmente podem não ser muito eficientes para busca local quando comparados com os métodos de direção de busca.

A presente tese de doutorado apresentou metodologias bioinspiradas para o projeto coordenado de controladores robustos de sistemas de potência. Nesse caso, o objetivo foi ajustar os parâmetros de compensação de fase e ganho de estabilizadores instalados nos geradores. Os estabilizadores possuem o objetivo de modular a tensão de campo dos geradores para o amortecimento de oscilações. O critério de robustez foi satisfeito através da consideração de múltiplos cenários operativos na fase do projeto. O procedimento de ajuste foi formulado como um problema de otimização com o objetivo de maximizar o coeficiente de amortecimento do sistema em malha fechada em vários pontos de operação.

Foram aplicadas metodologias bioinspiradas na experiência (ou inteligência) de enxames: Otimização baseada no Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*) e Otimização baseada na Eco-localização de Morcegos (*Bat Algorithm*). A principal diferença entre o *PSO* e o *Bat Algorithm* é que no último, os indivíduos da população possuem um maior grau de liberdade para se movimentarem no espaço de busca. Adicionalmente, no *Bat Algorithm* existe uma etapa de intensificação estocástica ao redor do melhor indivíduo da geração corrente (esse processo é controlado pela taxa de emissão de pulsos).

Com o objetivo de melhorar a busca local ao redor da melhor solução, este trabalho apresentou a proposição de duas metodologias híbridas baseadas no *PSO* e no *Bat Algorithm*: a cada n_{local} gerações (valor empiricamente adotado), é executada uma busca local utilizando-se o Método do Gradiente Descendente para o refinamento dos ganhos dos controladores. Uma vez que os métodos populacionais (eficientes na busca global ou diversificação) posicionem as soluções em uma bacia de atração promissora, o método do Gradiente (eficiente na busca local ou intensificação) sintoniza os ganhos considerando fixo o ajuste de fase da melhor solução corrente do método populacional. Com isso foram propostos Algoritmos Meméticos específicos para a solução do problema de ajuste de controladores.

Para reduzir a probabilidade dos métodos populacionais perderem a diversidade da população (o que pode conduzir a uma convergência prematura para soluções de má qualidade), os métodos tiveram suas populações divididas em duas subpopulações (que não interagem entre si). Com isso foram propostos Algoritmos Multipopulacionais para a solução do problema de ajuste de controladores.

Por fim, os métodos Multipopulacionais foram hibridizados com o Método do Gradiente para o refinamento dos ganhos, dando origem a dois Algoritmos Meméticos Multipopulacionais específicos para a solução do problema de ajuste de controladores.

As metodologias propostas foram aplicadas a três sistemas testes da literatura, sendo projetados controladores descentralizados. Adicionalmente, para um dos sistemas foi projetado o controlador centralizado como segundo nível de um controle hierárquico.

As conclusões são apresentadas de acordo com os seguintes pontos de vista: (i) otimização e (ii) controle.

As seguintes conclusões estão associadas aos métodos de otimização propostos:

a) *Metodologias Multipopulacionais*

A divisão da população em duas subpopulações melhorou a qualidade da solução em alguns casos e a piorou em outros. Para os casos em que ocorreu a deterioração, a justificativa está no fato do baixo número de indivíduos na subpopulação: ao se reduzir o número de indivíduos, a capacidade de busca global pode ser deteriorada. O método baseado no *Bat Algorithm* foi o mais sensível à divisão da população.

Ressalta-se que a simples divisão da população pode não ser suficiente para manter a diversidade, principalmente quando são considerados poucos indivíduos.

Adicionalmente cita-se que uma subpopulação iniciada com soluções de pior qualidade pode estar associada à melhor solução no término das gerações.

b) *Hibridização com o Método do Gradiente*

A hibridização dos métodos com uma única população e dos métodos multipopulacionais com o Método do Gradiente Descendente apresentou resultados satisfatórios.

Do ponto de vista da qualidade da solução, foi observado um aumento de 9% no valor absoluto do amortecimento em um dos casos, somente com o refinamento do ganho dos estabilizadores. Entretanto, um aumento na faixa de 0,1% a 4% (em valor absoluto) foi mais recorrente nas simulações.

Em geral, foi observado que grandes variações de amortecimentos são obtidas no início do processo iterativo. Em contrapartida, aumentos mais moderados (da ordem de 0,1% em valor absoluto por exemplo) são obtidos nas gerações

finais. Isso é justificado pelo fato de que nas primeiras gerações, os métodos populacionais efetuam uma busca global mais intensa. Com isso, no fim do processo, as bacias de atração são praticamente as mesmas.

Entretanto, ressalta-se que a aplicação da busca local por gradiente não é garantia de melhora da solução. Isso porque o sucesso dos métodos populacionais está associado a um correto balanceamento entre as buscas global e local. Se a busca global não for eficiente, a busca local também não será.

Quanto ao esforço computacional, a inclusão da etapa do gradiente aumentou o tempo computacional na faixa de 15 a 45% nos métodos com uma única população. Para os métodos multipopulacionais, o aumento do esforço computacional esteve na faixa de 20 a 75%.

O aumento do esforço computacional era esperado e não torna as metodologias propostas menos competitivas. Como o refinamento dos ganhos pode aumentar o amortecimento, a convergência do algoritmo pode ser mais rápida para o caso do projetista especificar um amortecimento mínimo (nesse caso, quando o objetivo for satisfeito, o processo é encerrado).

Além disso, cita-se que a inclusão do método gradiente melhorou o amortecimento médio do conjunto de três simulações. Com isso, pode-se dizer que a hibridização permite a obtenção de algoritmos mais confiáveis, uma vez que os métodos populacionais são estocásticos e não garantem a otimalidade da solução.

c) *Bioinspiração: PSO e Bat Algorithm*

Embora as metodologias baseadas no *Bat Algorithm* tenham apresentado melhores soluções em alguns casos, pode-se concluir que os métodos baseados no *PSO* foram mais eficientes neste tipo de problema.

Enquanto o *Bat Algorithm* permite variações bruscas de posição, o *PSO* evolui seus indivíduos com passos mais moderados no espaço de busca. O resultado desses procedimentos é que o *Bat Algorithm* tende a evoluir bastante suas soluções no início (quando o volume do som ainda é alto). Uma vez que este

método bioinspirado foi utilizado em sua versão original, acredita-se que algumas melhorias possam ser feitas para torná-lo mais competitivo.

As seguintes conclusões estão associadas ao Sistema de Controle:

a) *Esforço do Controle e Tempo para se atingir o Regime Permanente*

Os coeficientes de mínimo amortecimento obtidos neste trabalho estão na faixa de 13 a 39%, de acordo com o sistema simulado. Esses resultados foram obtidos a partir da execução do algoritmo durante um total pré-especificado de gerações, sem a especificação de um amortecimento mínimo para que o processo de simulação fosse abortado.

É importante ressaltar que quanto maior o coeficiente de amortecimento, maior a energia gasta pelo controlador, o que implica em um maior esforço de controle. Através de simulações no tempo, foi possível observar que no caso dos amortecimentos elevados, a saída do controlador (tensão do estabilizador) atingiu os limites mínimo e máximo várias vezes.

De fato, amortecimentos da ordem de 5 a 10% são adotados na prática pelas concessionárias de energia elétrica²² (ONS, 2000; PELLANDA, APKARIAN e MARTINS, 2006; DILL e SILVA, 2012). Nesse sentido, o projetista pode utilizar as metodologias propostas nessa tese tendo em vista um amortecimento mínimo requisitado, a partir do qual o processo de simulação terminaria: nesse caso, o aumento do amortecimento obtido com o refinamento dos ganhos na busca local pode reduzir o tempo de simulação despendido pelo projetista.

Outra constatação realizada está associada ao tempo para que o sistema atinja o regime permanente: independentemente do coeficiente de amortecimento obtido pelas diferentes metodologias, as simulações no tempo indicaram que o tempo para se atingir o regime permanente permaneceu o mesmo. A justificativa para esse comportamento está no fato da abscissa espectral não ter sido considerada como objetivo: a minimização desse índice implica na

²² Considerando sistemas de grande porte, com vários tipos de plantas de geração e de equipamentos e com a necessidade de se considerar diversos cenários operativos na fase de projeto (como variações de carga e satisfação ao critério de segurança $n-1$), amortecimentos na faixa de 5 a 10% são justificáveis (ONS, 2000).

aceleração dos modos e conseqüentemente na redução do tempo para que as oscilações sejam amortecidas.

b) *Controle Descentralizado e Centralizado*

Este trabalho apresentou metodologias para o projeto de estruturas de controle descentralizadas e centralizadas. O controle centralizado foi considerado como um segundo nível de uma estrutura hierárquica, onde o primeiro nível corresponde ao controle descentralizado ajustado de acordo com as normas de cada empresa.

Os resultados indicaram que somente o aumento do amortecimento dos modos de oscilação não justifica a implementação da segunda malha de controle (centralizada), uma vez que resultados satisfatórios foram obtidos através do ajuste coordenado do controle descentralizado. Entretanto, a implementação prática do ajuste coordenado pode ser limitada por questões técnicas e econômicas: nesse caso justifica-se a implementação do controle centralizado.

Conforme mencionado no capítulo de revisão, o controle centralizado é fundamentado no amortecimento dos modos de oscilação inter-área. Neste trabalho não se considerou uma função objetivo que priorizasse esses modos. Entretanto, conforme relatado na literatura, a priorização de alguns modos pode deteriorar o amortecimento de outros.

Por fim, cita-se que a consideração dos tempos de atraso de transmissão dos sinais na fase de projeto é importante, uma vez que esse atraso pode desestabilizar a malha de controle caso não seja devidamente tratado.

Outra questão que merece atenção está associada à perda de sinais remotos, o que pode degradar o amortecimento do sistema. Uma alternativa seria a consideração da perda de sinais remotos como cenários adicionais na fase de projeto. Entretanto, esse procedimento é de natureza combinatória e de difícil solução. Nesse sentido, torna-se necessário o desenvolvimento de índices para identificar os canais de comunicação mais importantes.

Adicionalmente a consideração de diferentes tempos de atraso na fase do projeto deve ser melhor investigada.

As metodologias propostas para o projeto de controladores apresentaram resultados satisfatórios. Com base nos resultados, o emprego do *PSO* hibridizado com o Método do Gradiente apresentou os melhores resultados em grande parte dos casos. Em relação as metodologias baseadas no *Bat Algorithm*, melhorias são necessárias para que as soluções destas sejam competitivas com as baseadas no *PSO*, principalmente para problemas de sistemas de controle de maior porte.

É importante destacar a principal contribuição deste trabalho de investigação: o desenvolvimento de metodologias populacionais híbridas para melhorar a etapa de busca local em algoritmos de otimização para o ajuste de controladores de amortecimento de sistemas de potência. Dessa forma, os métodos bioinspirados na experiência de enxames *PSO* e *Bat Algorithm* foram hibridizados com o Método do Gradiente Descendente para o refinamento dos ganhos dos controladores. Adicionalmente, foram desenvolvidos algoritmos multipopulacionais para reduzir a possibilidade da perda de diversidade da população. Ressalta-se que o desenvolvimento de algoritmos populacionais híbridos de otimização (Algoritmos Meméticos) é um campo que tem atraído a atenção de diversos pesquisadores. Nesse contexto, a aplicação desses algoritmos para o projeto de sistemas de controle é um campo fértil e, com base nos resultados deste trabalho, pode fornecer resultados promissores.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

As propostas de investigação futura nesse trabalho podem ser divididas em dois pontos de vista: (1) métodos de otimização e (2) controle de sistemas de potência.

Quanto aos métodos de otimização, propõem-se:

1. Investigar, para o problema sob análise, quais seriam: (i) os valores mais adequados para as constantes dos algoritmos *PSO* e *Bat*, (ii) o número de indivíduos, (iii) o número de gerações e (iv) a quantidade de subpopulações nos métodos multipopulacionais (e conseqüentemente o número de indivíduos nestas);
2. Hibridizar os algoritmos de otimização bioinspirados aqui tratados com outros métodos de direção de busca (tais como *Quase-Newton BFGS* e *Gradiente*

Amostrado). Com isso espera-se melhorar, ainda mais, a capacidade de busca local dos métodos populacionais;

3. Melhorar as metodologias baseadas no conceito de multipopulações: nesse trabalho, as sub-populações não interagem entre si. O desenvolvimento de algum procedimento de interação entre elas poderia melhorar o desempenho dessas sub-populações, principalmente quando ocorre a convergência prematura para uma solução de má-qualidade;
4. O desempenho computacional poderá ser melhorado com a aplicação de computação paralela. Ressalta-se que as metodologias desenvolvidas nesse trabalho são paralelizáveis;
5. Embora não tratado nesse trabalho, o desenvolvimento de metodologias híbridas de otimização multi-objetivo é um campo fértil para novas investigações (BOSMAN, 2012). O acoplamento dos métodos populacionais multi-objetivos baseados no conceito da Fronteira de Pareto com métodos de direção de busca com derivadas é sugerido como proposta de continuidade.

Quanto ao problema de ajuste de controladores de sistemas de potência, as seguintes propostas são apresentadas:

1. A realização do ajuste coordenado de estabilizadores com os dispositivos *FACTS-POD* de primeira e segunda geração;
2. O desenvolvimento de metodologias baseadas em otimização multi-objetivo para o projeto de controladores hierárquicos: ressalta-se que até o presente momento, essa linha de pesquisa não foi explorada. Nesse caso, funções objetivo associadas ao desempenho e robustez podem ser combinadas;
3. Desenvolver algoritmos híbridos de otimização que utilizem, para a busca local, métodos de projeto específicos para o projeto de controladores, tais como os baseados em resíduos da função de transferência. Uma opção seria o método proposto em (JABR, PAL e MARTINS, 2010b), que otimiza os ganhos dos estabilizadores usando programação linear sequencial;
4. A aplicação das metodologias propostas para o projeto dos controladores do Sistema Interligado Nacional (SIN).

REFERÊNCIAS

ABIDO, M. A. Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing. **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, v. 15, n. 3, p. 297-304, Setembro 2000. ISSN: 0885-8969 DOI: 10.1109/60.875496.

ABOUL-ELA, M. E.; SALLAM, A. A.; MCCALLEY, J. D. Damping controller design for power system oscillations using global signals. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 11, n. 2, p. 767-773, Maio 1996. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.496152.

AGUIRRE, L. A. **Enciclopédia de Automática**. 1ª. ed. [S.l.]: Editora Blucher, v. 1, 2 e 3, 2007.

AL-MOHAMMED, A. H.; MANSOUR, M. M.; ABIDO, M. A. **Application of Phasor Measurement Units (PMUs) for fault location in SEC-EOA interconnected network**. Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International. [S.l.]: [s.n.]. Dezembro 2010. p. 435-439.

ALRASHIDI, M. R.; EL-HAWARY, M. E. A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 4, p. 913-918, Agosto 2009. ISSN: 1089-778X DOI: 10.1109/TEVC.2006.880326.

ARAUJO, P. B.; ZANETTA JUNIOR., L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 23, n. 3, p. 173-178, 2001. ISSN: 0142-0615 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615\(00\)00055-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615(00)00055-7).

ARCANJO, D. N. **Metodologia Multi-Estagio para Restabelecimento de Sistemas Eletricos de Distribuicao Utilizando Algoritmos Bio-Inspirados (Mestrado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Juiz de Fora. [S.l.]. 2014.

ARCIDIACONO, V.; FERRARI, E.; MARCONATO, R. Evaluation and Improvement of Electromechanical Oscillation Damping By Means of Eigenvalue-Eigenvector Analysis. Practical Results in the Central Peru Power System. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-99, n. 2, p. 769-778, Março 1980. ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/TPAS.1980.319672.

BARBOSA, A. A. **Utilização de Ferramentas Lineares na Análise e Controle do Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Grande Porte (Mestrado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. 1999.

BLUM, C.; PUCHINGER, J. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 6, p. 4135-4151, 2011. ISSN: 1568-4946 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.02.032>.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, v. 35, n. 3, p. 268-308, Setembro 2003.

BOLLINGER, K. E.; WINSOR, R.; CAMPBELL, A. Frequency Response Methods for Tuning Stabilizers to Damp out Tie-Line Power Oscillations: Theory and Field-Test Results. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-98, n. 5, p. 1509-1515, Setembro 1979. ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/TPAS.1979.319463.

BORA, T. C.; COELHO, L. D. S.; LEBENSZTAJN, L. Bat-Inspired Optimization Approach for the Brushless DC Wheel Motor Problem. **Magnetics, IEEE Transactions on**, v. 48, n. 2, p. 947-950, Fevereiro 2012. ISSN: 0018-9464 DOI: 10.1109/TMAG.2011.2176108.

BOSMAN, P. A. N. On Gradients and Hybrid Evolutionary Algorithms for Real-Valued Multiobjective Optimization. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 16, n. 1, p. 51-69, Fevereiro 2012. ISSN: 1089-778X DOI: 10.1109/TEVC.2010.2051445.

BOUKARIM, G. E.; CHOW, J. H.; MARTINS, N. A comparison of classical, robust, and decentralized control designs for multiple power system stabilizers. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 15, n. 4, p. 1287-1292, Novembro 2000. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.898103.

BOYD, S.; GHAOVI, L. E.; FERON, E. **Linear Matrix Inequalities in System Control Theory**. [S.l.]: SIAM - Studies in Applied Mathematics, 1994.

BREMERMANN, H. J. Optimization through Evolution and Recombination. [S.l.]: Spartan Books, 1962. Cap. Self-Organizing systems, p. 93-106.

BURKE, J. V.; HENRION, D.; LEWIS, A. S. **A nonsmooth, nonconvex optimization approach to robust stabilization by static output feedback and low-order controller**. IFAC Symp. Robust Control Design, Milan, Italy. [S.l.]: 2003.

BURKE, J. V.; HENRION, D.; LEWIS, A. S. Stabilization via Nonsmooth, Nonconvex Optimization. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 11, p. 1760-1769, Novembro 2006. ISSN: 0018-9286 DOI: 10.1109/TAC.2006.884944.

BURKE, J. V.; LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. Two numerical methods for optimizing matrix stability. **Linear Algebra and its Applications**, v. 351-352, p. 117-145, 2002. ISSN: 0024-3795 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0024-3795\(02\)00260-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0024-3795(02)00260-4).

CAMPOS, V. A. F.; DA CRUZ, J. J.; ZANETTA JUNIOR, L. C. Robust Control of Dynamical Systems Using Linear Matrix Inequalities and Norm-Bounded Uncertainty. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 25, n. 2, p. 151-160, 2014b. ISSN: 2195-3880 DOI: 10.1007/s40313-014-0109-7.

CAMPOS, V. A. F.; DA CRUZ, J. J.; ZANETTA JUNIOR., L. C. Robust control of electrical power systems using PSS and Bilinear Matrix Inequalities. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 62, p. 10-18, 2014a. ISSN: 0142-0615 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.016>.

CAPONIO, A.; CASCELLA, G. L.; NERI, F. A Fast Adaptive Memetic Algorithm for Online and Offline Control Design of PMSM Drives. **Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on**, v. 37, n. 1, p. 28-41, Fevereiro 2007. ISSN 1083-4419 DOI: 10.1109/TSMCB.2006.883271.

CÁRDENAS, S. L. E. **Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência utilizando Sinais Remotos via Algoritmos Genéticos (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Rio de Janeiro (RJ). 2011.

CASTOLDI, M. F. **Algoritmo Híbrido para Projeto de Controladores de Amortecimento de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Algoritmos Genéticos e Gradiente Descendente (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2011.

CASTOLDI, M. F.; BRETAS, N. G.; RAMOS, R. A. A hybrid algorithm to tune power oscillation dampers for FACTS devices in power systems. **Control Engineering Practice**, v. 24, p. 25-32, 2014. ISSN: 0967-0661 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.11.001>.

CASTRO, L. N.; TIMMIS, J. **An artificial immune network for multimodal function optimization**. Evolutionary Computation, 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on. [S.l.]. Maio 2002. p. 699-704.

CEPEL. **Anarede - Programa de Análise de Redes: Manual do Usuário**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobrás). [S.l.]. 2009a.

CEPEL. **PacDyn - Small Signal Stability Analysis and Control v9.1: User's Manual**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobrás). [S.l.]. 2009b.

CEPEL. **Plot CEPEL**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. [S.l.]. 2009c.

CEPEL. **2010. ANATEM - Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos: Manual do Usuário**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobrás). [S.l.]. 2010.

CHAUDHURI, B.; PAL, B. C. Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 1, p. 499-506, Fevereiro 2004. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2003.821463.

CHENG, S.; SHI, Y. **Dynamical Exploitation Space Reduction in Particle Swarm Optimization for Solving Large Scale Problems**. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2012). At Brisbane, Australia: [s.n.]. 2012.

CHENINE, M.; VANFRETTI, L.; BENGTSSON, S. **Implementation of an experimental wide-area monitoring platform for development of synchronized phasor measurement applications**. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. [S.l.]. Julho 2011. p. 1-8.

CHOMPOOBUTRGOOL, Y. **Aspects of Wide-Area Damping Control Design using Dominant Path Synchrophasor Signals (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. 2015.

CHOMPOOBUTRGOOL, Y.; VANFRETTI, L. **Identification of Power System Dominant Inter-Area Oscillation Paths**. Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE. [S.l.]. Julho 2013. p. 1-1.

CHOMPOOBUTRGOOL, Y.; VANFRETTI, L. **Analysis of time delay effects for wide-area damping control design using dominant path signals**. PES General Meeting Conference Exposition, 2014 IEEE. [S.l.]. Julho 2014. p. 1-5.

CHOW, J. H.; SANCHEZ-GASCA, J. J. Pole-placement designs of power system stabilizers. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 1, p. 271-277, Fevereiro 1989. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.32488.

CHOW, J. H.; SANCHEZ-GASCA, J. J. Power system damping controller design using multiple input signals. **Control Systems, IEEE**, v. 20, n. 4, p. 82-90, Agosto 2000. ISSN: 1066-033X DOI: 10.1109/37.856181.

COELHO, F. C. R. **Alocação de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica via Otimização Bio-inspirada na Ecolocalização de Morcegos (Mestrado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Juiz de Fora. [S.l.]. 2013.

COELHO, F. C. R.; SILVA JUNIOR, I. C.; DIAS, B. H. **Otimização baseada na Mobilização Militar**. XI Congreso Chileno de Investigacion Operativa. [S.l.]. 2015.

CORDEIRO, J. A.; PARPINELLI, R. S.; LOPES, H. S. **Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Bat Algorithm e Domparação de Desempenho**. Encontro Nacional de Inteligência Artificial, Curitiba. [S.l.]. 2012.

CRUZ, J. J.; ZANETTA JUNIOR., L. C. Stabilizer design for multimachine power systems using mathematical programming. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 19, n. 8, p. 519-523, 1997. ISSN: 0142-0615 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615\(97\)00023-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615(97)00023-9).

DA, Y.; XIURUN, G. An improved PSO-based ANN with simulated annealing technique. **Neurocomputing**, v. 63, p. 527-533, 2005. ISSN: 0925-2312 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2004.07.002>.

DASGUPTA, S.; PARAMASIVAM, M.; VAIDYA, U. Real-Time Monitoring of Short-Term Voltage Stability Using PMU Data. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 28, n. 4, p. 3702-3711, Novembro 2013. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2258946.

DE JONG, K. A. **An Analysis of the Behaviour of a Class of Genetic Adaptive Systems (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. University of Michigan. [S.l.]. 1975.

DE LA REE, J.; THORP, J. S.; PHADKE, A. G. Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. 1, n. 1, p. 20-27, Junho 2010. ISSN: 1949-3053 DOI: 10.1109/TSG.2010.2044815.

DE MARCO, F. J.; MARTINS, N.; FERRAZ, J. C. R. An automatic method for power system stabilizers phase compensation design. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 28, n. 2, p. 997-1007, Maio 2013. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2209208.

DECKER, I. C.; SILVA, A. S.; AGOSTINI, M. N. Experience and applications of phasor measurements to the Brazilian interconnected power system. **European Transactions on Electrical Power**, v. 21, n. 4, p. 1557-1573, 2011. ISSN: 1546-3109 DOI: 10.1002/etep.537.

DEL VALLE, Y.; VENAYAGAMOORTHY, G. K.; MOHAGHEGHI, S. Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 2, p. 171-195, Abril 2008. ISSN: 1089-778X DOI: 10.1109/TEVC.2007.896686.

DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-88, n. 4, p. 316-329, Abril 1969. ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/TPAS.1969.292452.

DILL, G. K. **Projeto de Controladores Robustos para Sistemas de Potencia baseado em Otimizacao Parametrica (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Santa Catarina. [S.l.]. 2013.

DILL, G. K.; SILVA, A. S. **Projeto de Controladores para Sistemas de Potência Utilizando Algoritmos Clássicos e Heurísticos**. 9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2011. [S.l.]. 2011.

DILL, G. K.; SILVA, A. S. Robust Design of Power System Controllers Based on Optimization of Pseudospectral Functions. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 28, n. 2, p. 1756-1765, Maio 2012. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2226251.

DO BOMFIM, A. L. B.; TARANTO, G. N.; FALCAO, D. M. Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 15, n. 1, p. 163-169, Fevereiro 2000. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.852116.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on**, v. 26, n. 1, p. 29-41, Fevereiro 1996. ISSN: 1083-4419 DOI: 10.1109/3477.484436.

DORIGO, M.; STUTZLE, T. **Ant Colony Optimization**. [S.l.]: The MIT Press, 2004.

DOTTA, D. **Controle Hierarquico usando Sinais de Medição Fasorial Sincronizada (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Santa Catarina. [S.l.]. 2009.

DOTTA, D.; SILVA, A. S.; DECKER, I. C. Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 24, n. 1, p. 208-216, Fevereiro 2009. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2008.2004733.

EL-SHERBINY, M. K.; MEHTA, D. M. Dynamic System Stability Part I - Investigation of the Effect of Different Loading and Excitation Systems. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-92, n. 5, p. 1538-1546, Setembro 1973. ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/TPAS.1973.293699.

ESMAILI, M. R.; HOOSHMAND, R. A.; PARASTEGARI, M. New Coordinated Design of SVC and PSS for Multi-machine Power System Using BF-PSO Algorithm. **Procedia Technology**, v. 11, p. 65-74, 2013. ISSN: 2212-0173 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.163>.

FAN, S. K.; LIANG, Y. C.; ZAHARA, E. Hybrid simplex search and particle swarm optimization for the global optimization of multimodal functions. **Engineering Optimization**, v. 36, n. 4, p. 401-418, Agosto 2004.

FEBRES, C. A.; ARAUJO, P. B.; FURINI, M. A. Damping of Low-Frequency Oscillations by Supplementary Control of Power System Stabilizers. **TEMA Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, v. 9, n. 2, p. 223-232, 2008.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995. ISSN: 1573-2916 DOI: 10.1007/BF01096763.

FERRAZ, J. C. R. **Avanços na utilização de Análise Linear em Sistemas Elétricos de Potência (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2002.

FERRAZ, J. C. R.; MARTINS, N.; TARANTO, G. N. **Simultaneous partial pole placement for power system oscillation damping control**. Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE. [S.l.]. 2001. p. 1154-1159 vol.3.

FREITAS, F. D.; COSTA, I. S. Computationally efficient optimal control methods applied to power systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 14, n. 3, p. 1036-1045, Agosto 1999. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.780917.

FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Melhora da Estabilidade Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Multimáquinas Usando o Dispositivo FACTS. **Sba Controle & Automação**, v. 19, n. 2, p. 214-225, Abril-Junho 2008.

FURINI, M. A.; PEREIRA, A. L. S.; ARAUJO, P. B. Pole placement by coordinated tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD stabilizers. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 33, n. 3, p. 615-622, 2011. ISSN: 0142-0615 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.019>.

GAVIOLI, G. A. **Validação de Modelos de Simulação de Sistemas de Energia Elétrica utilizando Dados Fasoriais Sincronizados (Mestrado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2013.

GEROMEL, J. C. **Methods and Techniques for Decentralized Control Systems: Analysis and Design**. [S.l.]: Clup, 1987.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986. ISSN: 0305-0548 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1).

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

GOLDBERG, D. E.; RICHARDSON, J. **Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization**. Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their Application. [S.l.]. 1987.

GUIMARÃES, C. H. C.; TARANTO, G. N.; GOMES JUNIOR, S. **Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência por posicionamento parcial de par de pólos complexo conjugados**. XIII Congresso Brasileiro de Automática. Florianópolis. 2000.

HANDOKO, S. D.; KWON, C. K.; ONG, Y. S. **A study on constrained MA using GA and SQP: Analytical vs. finite-difference gradients**. Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on. [S.l.]. Junho 2008. p. 4031-4038.

HEFFRON, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators. **Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 71, n. 1, Janeiro 1952. ISSN: 0097-2460 DOI: 10.1109/AIEEPAS.1952.4498530.

HENICHE, A.; KAMWA, I. Control loops selection to damp inter-area oscillations of electrical networks. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 17, n. 2, p. 378-384, Maio 2002. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2002.1007907.

HINDI, H. **A tutorial on convex optimization**. American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004. [S.l.]. Junho 2004. p. 3252-3265 vol.4.

HINGORANI, N. G. High Power Electronics and flexible AC Transmission System. **Power Engineering Review, IEEE**, v. 8, n. 7, p. 3-4, Julho 1988. ISSN: 0272-1724 DOI: 10.1109/MPER.1988.590799.

HO, Y.-C.; PEPYNE, D. L. **Simple explanation of the no free lunch theorem of optimization**. Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on. [S.l.]. 2001. p. 4409-4414 vol.5.

HOLBERT, K. E.; HEYDT, G. T.; NI, H. Use of Satellite Technologies for Power System Measurements, Command, and Control. **Proceedings of the IEEE**, v. 93, n. 5, p. 947-955, Maio 2005. ISSN: 0018-9219 DOI: 10.1109/JPROC.2005.846334.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. [S.l.]: The University of Michigan Press, 1975.

HOOKE, R.; JEEVES, T. A. Direct search solution of numerical and statistical problems. **Journal of the Association for Computing Machinery**, v. 8, n. 1, p. 212-219, 1961.

IEEE. IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. **IEEE Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995)**, p. 0_1-57, 2006. ISSN DOI: 10.1109/IEEESTD.2006.99376.

IEEE. **Report of the IEEE PES Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls**. IEEE. [S.l.]. 2015.

INGBER, L. Simulated annealing: Practice versus theory. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 18, n. 11, p. 29-57, 1993. ISSN: 0895-7177 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90204-C](http://dx.doi.org/10.1016/0895-7177(93)90204-C).

JABR, R. A.; PAL, B. C.; MARTINS, N. A Sequential Conic Programming Approach for the Coordinated and Robust Design of Power System Stabilizers. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 25, n. 3, p. 1627-1637, Agosto 2010a. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2040637.

JABR, R. A.; PAL, B. C.; MARTINS, N. Robust and coordinated tuning of power system stabiliser gains using sequential linear programming. **Generation, Transmission Distribution, IET**, v. 4, n. 8, p. 893-904, Agosto 2010b. ISSN: 1751-8687 DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0669.

JADDI, N. S.; ABDULLAH, S.; HAMDAN, A. R. Multi-population cooperative bat algorithm-based optimization of artificial neural network model. **Information Sciences**, v. 294, p. 628-644, 2015. ISSN: 0020-0255 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.050>.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

KAMWA, I.; GRONDIN, R.; TRUDEL, G. IEEE PSS2B versus PSS4B: the limits of performance of modern power system stabilizers. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 903-915, Maio 2005. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846197.

KAO, Y.-T.; ZAHARA, E. A hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for multimodal functions. **Applied Soft Computing**, v. 8, n. 2, p. 849-857, 2008. ISSN: 1568-4946 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2007.07.002>.

KAZARLIS, S. A.; PAPADAKIS, S. E.; THEOCHARIS, J. B.; PETRIDIS, V. Microgenetic algorithms as generalized hill-climbing operators for GA optimization. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 5, n. 3, p. 204-217, Junho 2001. ISSN: 1089-778X DOI: 10.1109/4235.930311.

KELNER, V.; CAPITANESCU, F.; LEONARD, O.; WEHENKEL, L.. A hybrid optimization technique coupling an evolutionary and a local search algorithm. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 215, n. 2, p. 448-456, 2008. ISSN: 0377-0427 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cam.2006.03.048>.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on. [S.l.]. Novembro 1995. p. 1942-1948 vol.4.

KHADANGA, R. K.; SATAPATHY, J. K. Time delay approach for PSS and SSSC based coordinated controller design using hybrid PSO-GSA algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 71, p. 262-273, 2015. ISSN: 0142-0615 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.03.014>.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983. ISSN: 0036-8075 DOI: 10.1126/science.220.4598.671.

KRASNOGOR, N.; SMITH, J. A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 9, n. 5, p. 474-488, Outubro 2005. ISSN: 1089-778X DOI: 10.1109/TEVC.2005.850260.

KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; BRETAS, N. G. Robust control methodology for the design of supplementary damping controllers for FACTS devices. **Sba Controle & Automação**, v. 20, n. 2, p. 192-205, Abril-Junho 2009.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. 1^a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. 1196 p.

KUNJUMUHAMMED, L. P.; PAL, B. C. Selection of Feedback Signals for Controlling Dynamics in Future Power Transmission Networks. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 3, p. 1493-1501, Maio 2015. ISSN: 1949-3053 DOI: 10.1109/TSG.2014.2362967.

LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-100, n. 6, p. 3017-3024, Junho 1981a. ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/TPAS.1981.316355.

LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-100, n. 6, p. 3025-3033, Junho 1981b. ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/TPAS.1981.316410.

LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying Power System Stabilizers Part III: Practical Considerations. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-100, n. 6, p. 3034-3046, Junho 1981c. ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/TPAS.1981.316411.

LEE, K. S.; GEEM, Z. W. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 194, n. 36-38, p. 3902-3933, 2005. ISSN: 0045-7825 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2004.09.007>.

LEMMA, T. A.; BIN MOHD HASHIM, F. **Use of fuzzy systems and bat algorithm for exergy modeling in a gas turbine generator**. Humanities, Science and Engineering (CHUSER), 2011 IEEE Colloquium on. [S.l.]. Dezembro 2011. p. 305-310.

LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. Nonsmooth optimization via quasi-Newton methods. **Mathematical Programming**, v. 141, n. 1, p. 135-163, 2012. ISSN: 1436-4646 DOI: 10.1007/s10107-012-0514-2.

LOZANO, M.; GARCIA-MARTINEZ, C. Hybrid metaheuristics with evolutionary algorithms specializing in intensification and diversification: Overview and progress report. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 3, p. 481-497, 2010. ISSN: 0305-0548 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2009.02.010>.

LUENBERGER, D. **Linear and nonlinear programming**. 2nd. ed. [S.l.]: Springer, 2003.

MARINI, R. **Uso de medição fasorial sincronizada visando a melhoria da estabilidade de sistemas elétricos de potência (Mestrado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2005.

MARTINS, N. Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 1, n. 1, p. 217-224, Fevereiro 1986. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.1986.4334874.

MARTINS, N.; PINTO, H.; BIANCO, A.. **TCSC Control Structures for Line Power Scheduling and Methods to Determine Their Location and Tuning to Damp System Oscillations**. IV SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Foz do Iguaçu, PR. 1994.

MARTINS, N.; LIMA, L. T. G. **Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems**. Power Industry Computer Application Conference, 1989. PICA '89, Conference Papers. [S.l.]. Maio 1989a. p. 74-82.

MARTINS, N.; LIMA, L. T. G. **Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems**. IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Method for System Dynamic Performance. [S.l.]. 1989b. p. 17-33.

MARTINS, N.; MACEDO, N. J. P.; LIMA, L. T. G. Control strategies for multiple static VAR compensators in long distance voltage supported transmission systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 8, n. 3, p. 1107-1117, Agosto 1993. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.260887.

MARTINS, N.; TARANTO, G. N.; HAUER, J. F. **Impact of Interactions Among Power System Controls (Task Force No. 38.02.16)**. CIGRÉ. Paris, França. 2000.

MENEZES, M. M. **Métodos de Otimização Aplicados no Ajuste de ESPs e Controladores de Amortecimento Inseridos nos FACTS TCSC em Sistemas de Potência (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - Câmpus de Ilha Solteira. São Paulo, Brasil. 2014.

MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B.; PUPIN, C. E. **Ajuste de Parâmetros de Controladores POD Acoplados em Dispositivos TCSC Através de Redes Neurais**. 9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2011. [S.l.]. 2011.

MHASKAR, U. P.; KULKARNI, A. M. Power oscillation damping using FACTS devices: modal controllability, observability in local signals, and location of transfer function zeros. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 1, p. 285-294, Fevereiro 2006. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2005.856983.

MOLINA, D.; LOZANO, M.; HERRERA, F. **MA-SW-Chains**: Memetic algorithm based on local search chains for large scale continuous global optimization. *Evolutionary Computation (CEC)*, 2010 IEEE Congress on. [S.l.]. Julho 2010. p. 1-8.

MONDAL, D.; CHAKRABARTI, A.; SENGUPTA, A. **Power System Small-Signal Stability Analysis and Control**. 1ª. ed. [S.l.]: Academic Press (Elsevier), 2014. 316 p.

MOORE, B. Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability, and model reduction. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 1, p. 17-32, Fevereiro 1981. ISSN: 0018-9286 DOI: 10.1109/TAC.1981.1102568.

MORAES, C. A. **Heurística Construtiva e Otimização Bio-inspirada aplicadas à Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica (Mestrado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Juiz de Fora. [S.l.]. 2015.

NADUVATHUPARAMBIL, B.; VALENTI, M. C.; FELIACHI, A. **Communication delays in wide area measurement systems**. *System Theory*, 2002. Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on. [S.l.]. 2002. p. 118-122.

NAKRANI, S.; TOVEY, C. **On Honey Bees and Dynamic Allocation in an Internet Server Colony**. Proceedings of 2nd International Workshop on the Mathematics and Algorithms of Social Insects. [S.l.]. 2003.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965. ISSN DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308.

NERI, F.; COTTA, C. Memetic algorithms and memetic computing optimization: A literature review. *Swarm and Evolutionary Computation*, v. 2, p. 1-14, 2012. ISSN: 2210-6502 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2011.11.003>.

NIU, B.; ZHU, Y.; HE, X. MCPSO: A multi-swarm cooperative particle swarm optimizer. *Applied Mathematics and Computation*, v. 185, n. 2, p. 1050-1062, 2007. ISSN: 0096-3003 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2006.07.026>.

NOEL, M. M. A new gradient based particle swarm optimization algorithm for accurate computation of global minimum. *Applied Soft Computing*, v. 12, n. 1, p. 353-359, 2012. ISSN: 1568-4946 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.08.037>.

NOURIZADEH, S.; KARIMI, M. J.; RANJBAR, A. M. Power system stability assessment during restoration based on a wide area measurement system. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 6, n. 11, p. 1171-1179, Novembro 2012. ISSN: 1751-8687 DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0054.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2011.

OJIMA, A. L. R. O.; THEODORO, E. J. **Busca Multimodal utilizando Algoritmos Evolutivos (Relatório de Pesquisa)**. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). [S.l.]. 2002.

OLIVEIRA, R. V. **Projeto de Controladores de Amortecimento para Sistemas Elétricos de Potência (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2006.

ONS. **Procedimentos de Rede - Submódulo 23.2**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Rio de Janeiro, Brasil. 2000.

OSMAN, I.; LAPORTE, G. Metaheuristics: A bibliography. **Annals of Operations Research**, v. 63, n. 5, p. 511-623, 1996. ISSN: 0254-5330 DOI: 10.1007/BF02125421.

PAI, M. A. **Energy Functions Analysis for Power System Stability**. [S.l.]: Boston Kluwer Academic Publishers, 1989. 256 p.

PAL, B. C.; JABR, R. A.; MARTINS, N. Robust and low-order design of flexible ac transmission systems and power system stabilisers for oscillation damping. **Generation, Transmission Distribution, IET**, v. 6, n. 5, p. 445-452, Maio 2012. ISSN: 1751-8687 DOI: 10.1049/iet-gtd.2011.0684.

PAL, B.; CHAUDHURI, B. **Robust Control in Power Systems**. 1^a. ed. [S.l.]: Springer, 2005. 190 p.

PASSINO, K. M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. **Control Systems, IEEE**, v. 22, n. 3, p. 52-67, Junho 2002. ISSN: 1066-033X DOI: 10.1109/MCS.2002.1004010.

PELLANDA, P. C.; APKARIAN, P.; MARTINS, N. **Tuning Structurally Constrained Stabilizers for Large Power Systems via Nonsmooth Multi-Directional Search**. Anais do XII Latin-American Congress on Automatic Control. Salvador, BA, Brasil. 2006. p. 425-430.

PERES, W.; PASSOS FILHO, J. A.; DA SILVA JUNIOR, I. C. Coordinated tuning of power system stabilizers using bio-inspired algorithms. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 64, p. 419-428, 2015. ISSN: 0142-0615 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.040>.

PERES, W.; PASSOS FILHO, J. A.; SILVA, I. C. **Power system stabilizers tuning using bio-inspired algorithm**. PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble. [S.l.]. Junho 2013. p. 1-5.

PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements in power systems. **Computer Applications in Power, IEEE**, v. 6, n. 2, p. 10-15, Abril 1993. ISSN: 0895-0156 DOI: 10.1109/67.207465.

PHADKE, A. G. **Synchronized phasor measurements-a historical overview**. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES. [S.l.]. Outubro 2002. p. 476-479 vol.1.

POTTER, M.; JONG, K. Cooperative Coevolution: An Architecture for Evolving Coadapted Subcomponents. **Evolutionary Computation**, v. 8, n. 1, p. 1-29, Março 2000. ISSN: 1063-6560 DOI: 10.1162/106365600568086.

PRIOSTE, F. B. **Detecção e Controle de Oscilações Eletromecânicas usando Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2011.

RAIDL, G. R. **A Unified View on Hybrid Metaheuristics**. Third International Workshop, HM Gran Canaria, Espanha. [S.l.]. 2006. p. pp 1-12.

RAMOS, R. A.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. A new methodology for the coordinated design of robust decentralized power system damping controllers. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 1, p. 444-454, Fevereiro 2004. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2003.820690.

RAMOS, R. A.; MARTINS, A. C. P.; BRETAS, N. G. An improved methodology for the design of power system damping controllers. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 4, p. 1938-1945, Novembro 2005. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2005.857280.

RASHEDI, E.; POUR, H. N.; SARYAZDI, S. GSA: A Gravitational Search Algorithm. **Information Sciences: an International Journal**, v. 179, n. 13, p. 2232-2248, Junho 2009.

ROGERS, G. **Power System Oscillations**. 1ª. ed. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2000. 328 p.

SAMBARIYA, D. K.; PRASAD, R. Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 61, p. 229-238, 2014. ISSN: 0142-0615 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.050>.

SANCHEZ-GASCA, J. J.; CHOW, J. H. Power system reduction to simplify the design of damping controllers for interarea oscillations. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 11, n. 3, p. 1342-1349, Agosto 1996. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.535675.

SERAPIÃO, A. B. S. Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: uma Visão Geral. **Revista SBA Controle e Automação**, v. 20, n. 09, p. 271-304, 2009.

SHI, X. H.; LIANG, Y. C.; LEE, H. P. An improved GA and a novel PSO-GA-based hybrid algorithm. **Information Processing Letters**, v. 93, n. 5, p. 255-261, 2005. ISSN: 0020-0190 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ipl.2004.11.003>.

SHI, Y.; EBERHART, R. **A modified particle swarm optimizer**. Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on. [S.l.]. Maio 1998. p. 69-73.

SIMO, J. B.; KAMWA, I.; TRUDEL, G. Validation of a new modal performance measure for flexible controllers design. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 11, n. 2, p. 819-826, Maio 1996. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.496160.

SIMOES COSTA, A. J. A.; FREITAS, F. D.; SILVA, A. S. Design of decentralized controllers for large power systems considering sparsity. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 1, p. 144-152, Fevereiro 1997. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/59.574934.

SORENSEN, K.; SEVAUX, M. MAPM: memetic algorithms with population management. **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 5, p. 1214-1225, 2006. ISSN: 0305-0548 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2004.09.011>.

STORN, R.; PRICE, K. Differential Evolution: A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341-359, 1997. ISSN: 0925-5001 DOI: 10.1023/A:1008202821328.

STORN, R.; PRICE, K. Differential Evolution: A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341-359, 1997. ISSN: 0925-5001 DOI: 10.1023/A:1008202821328.

SUN, Z.; WANG, N.; SRINIVASAN, D. Optimal tuning of type-2 fuzzy logic power system stabilizer based on differential evolution algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 62, p. 19-28, 2014. ISSN: 0142-0615 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.022>.

TAKAHASHI, R. H. C. **Otimização Escalar e Vetorial (Notas de Aula)**. Universidade Federal de Minas Gerais: Departamento de Matemática. <http://www.mat.ufmg.br/~taka/>. 2007.

TAKAHASHI, R. H. C.; MARTINS, F. V. C. **Avaliação e Interpretação do Operador mAG no Algoritmo Genético Real-Polarizado**. XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, Brasil. [S.l.]. 2004.

TOMASTIK, R. N.; LUH, P. B.; ZHANG, D. **A reduced-complexity bundle method for maximizing concave nonsmooth functions**. Decision and Control, 1996., Proceedings of the 35th IEEE Conference on. [S.l.]. Dezembro 1996. p. 2114-2119 vol.2.

TORCZON, V. J. **Multi-directional search: A direct search algorithm for parallel machines (Doutorado em Matemática)**. Rice University. [S.l.]. 1989.

TROFINO, A. **Controle Robusto (Notas de Aula)**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2000.

TRUNFIO, G. A. A Cooperative Coevolutionary Differential Evolution Algorithm with Adaptive Subcomponents. **Procedia Computer Science**, v. 51, p. 834-844, 2015. ISSN: 1877-0509 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.209>.

VAJTA, M. **Some Remarks on Padé-Approximations**. Veszprém, Hungary: 3rd Symposium Tempus-Intcom. 2000.

VALLE, D. B. **A Influência do Controlador GUPFC no Sistema Elétrico de Potência Visando a Estabilidade a Pequenas Perturbações (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. [S.l.]. 2014.

VAN DEN BERGH, F.; ENGELBRECHT, A. P. A Cooperative approach to particle swarm optimization. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 8, n. 3, p. 225-239, Junho 2004. ISSN: 1089-778X DOI: 10.1109/TEVC.2004.826069.

VANANTWERP, J. G.; BRAATZ, R. D. A tutorial on linear and bilinear matrix inequalities. **Journal of Process Control**, v. 10, n. 4, p. 363-385, 2000. ISSN: 0959-1524 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-1524\(99\)00056-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-1524(99)00056-6).

VANFRETTI, L.; CHOW, J. H. **Analysis of power system oscillations for developing synchrophasor data applications**. Bulk Power System Dynamics and Control (iREP) - VIII (iREP), 2010 iREP Symposium. [S.l.]. Agosto 2010. p. 1-17.

VERDEJO, H.; GONZALEZ, D.; DELPIANO, J. Tuning of Power System Stabilizers using Multiobjective Optimization NSGA II. **Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)**, v. 13, n. 8, p. 2653-2660, Agosto 2015. ISSN: 1548-0992 DOI: 10.1109/TLA.2015.7332145.

VIVEROS, E. R. C. **Ajuste Coordenado de Controladores de Sistemas de Potência usando Metas-Heurísticas (Doutorado em Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2007.

WOLPERT, D. H.; MACREADY, W. G. No free lunch theorems for optimization. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 1, n. 1, p. 67-82, Abril 1997. ISSN: 1089-778X DOI: 10.1109/4235.585893.

WRIGHT, M. H. Nelder, Mead, and the other Simplex Method. **Documenta Mathematica**, v. Extra Volume ISMP, p. 271-276, 2012.

WU, H.; TSAKALIS, K. S.; HEYDT, G. T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 4, p. 1935-1941, Novembro 2004. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2004.836272.

YANG, T. C. Applying Hinf optimisation method to power system stabiliser design Part 1: Single-machine infinite-bus systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 19, n. 1, p. 29-35, 1997a. ISSN: 0142-0615 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615\(96\)00026-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615(96)00026-9).

YANG, T. C. Applying Hinf optimisation method to power system stabiliser design Part 2: Multi-machine power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 19, n. 1, p. 37-43, 1997b. ISSN: 0142-0615 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615\(96\)00027-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615(96)00027-0).

YANG, X.-S. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. **Lecture Notes in Computer Sciences**, v. 5792, p. 169-178, 2009.

YANG, X.-S. **Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms**. 2^a. ed. [S.l.]: Luniver Press, 2010a.

YANG, X.-S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. In: GONZALEZ, J., editor. **Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, v. 284, 2010b. p. 65-74. ISBN: 978-3-642-12537-9 DOI: 10.1007/978-3-642-12538-6_6.

YANG, X.-S. Flower Pollination Algorithm for Global Optimization. **Unconventional Computation and Natural Computation 2012, Lecture Notes in Computer Science**, v. 7445, p. 240-249, 2013a.

YANG, X.-S. Bat algorithm: Literature Review and Applications. **International Journal of Bio-Inspired Computation**, v. 5, n. 3, p. 141-149, 2013b. ISSN DOI: 10.1504/IJBIC.2013.055093.

YANG, X.-S.; DEB, S. **Cuckoo Search via Levy flights**. Nature Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on. [S.l.]. Dezembro 2009. p. 210-214.

YASSAMI, H.; DARABI, A.; RAFIEI, S. M. R. Power system stabilizer design using Strength Pareto multi-objective optimization approach. **Electric Power Systems Research**, v. 80, n. 7, p. 838-846, 2010. ISSN: 0378-7796 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2009.12.011>.

ZANETTA JUNIOR, L. C.; CRUZ, J. J. An incremental approach to the coordinated tuning of power systems stabilizers using mathematical programming. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 895-902, Maio 2005. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846111.

ZHANG, Y.; BOSE, A. Design of Wide-Area Damping Controllers for Interarea Oscillations. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 3, p. 1136-1143, Agosto 2008. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2008.926718.

ZHOU, M.; THORP, J. S.; PHADKE, A. G. An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 4, p. 1930-1937, Novembro 2006. ISSN: 0885-8950 DOI: 10.1109/TPWRS.2006.881112.

ZOLOTAS, A. C.; CHAUDHURI, B.; JAIMOUKHA, I. M.; KORBA, P. A Study on LQG/LTR Control for Damping Inter-Area Oscillations in Power Systems. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, v. 15, n. 1, p. 151-160, Janeiro 2007. ISSN: 1063-6536 DOI: 10.1109/TCST.2006.883232.

Apêndice A – Estabilidade a Pequenas Perturbações e Análise Modal

A.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse Apêndice apresenta uma revisão dos conceitos básicos associados ao estudo da estabilidade a pequenas perturbações nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). São apresentados os aspectos associados à modelagem do sistema e análise modal.

A.2 ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Conforme (KUNDUR, 1994), a estabilidade dos SEP pode ser classificada em três tipos:

i) **Estabilidade de Tensão:** definida como a habilidade de um SEP em manter as tensões estáveis nas barras do sistema após a ocorrência de distúrbios. A instabilidade da tensão pode resultar na queda ou subida progressiva da tensão em certas barras do sistema;

ii) **Estabilidade da Frequência:** definida como a capacidade de um SEP manter a frequência estável após a ocorrência de um distúrbio severo, resultando em um desequilíbrio entre geração e carga;

iii) **Estabilidade Eletromecânica ou Angular:** definida como a capacidade das máquinas síncronas de um SEP interligado em manter o sincronismo após um distúrbio.

Para que o sistema mantenha-se em sincronismo, cada gerador deve restaurar o equilíbrio entre os torques mecânico e elétrico após um determinado distúrbio. Na ocorrência de um distúrbio, alguns geradores irão acelerar ou desacelerar. Se um gerador assume uma velocidade maior que a velocidade de outro gerador, a posição angular do gerador mais rápido avançará, transferindo parte da carga do gerador mais lento para o mais rápido (relação potência-ângulo), reduzindo a diferença de velocidade e restaurando o sincronismo entre as unidades. Entretanto, a relação potência-ângulo é não linear, e a partir de certo ponto, o

aumento da separação angular resultará na diminuição da potência transferida, fazendo com que a posição angular do gerador mais rápido aumente e conduza o sistema à instabilidade (BARBOSA, 1999).

A estabilidade angular pode ser dividida em duas categorias: *Estabilidade Transitória* e *Estabilidade a Pequenos Sinais*.

A **Estabilidade Transitória** é a habilidade do SEP em se manter em sincronismo depois que é submetido a uma perturbação severa. A resposta do sistema envolve grandes excursões de ângulo do rotor do gerador e é influenciada pela relação não linear *Potência-Ângulo*. A análise da Estabilidade Transitória é feita utilizando-se ferramentas de análise do domínio no tempo.

A **Estabilidade a Pequenas Perturbações (ou a Pequenos Sinais)** corresponde a habilidade do SEP em se manter em sincronismo depois de uma pequena perturbação (de carga ou geração). A análise desse tipo de estabilidade é realizada utilizando-se equações linearizadas considerando um determinado ponto de operação.

A.3 ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS DE UM SMBI

Essa seção apresenta, de forma sucinta, a modelagem em espaço de estados de um Sistema Máquina Barra Infinita (SMBI) para o estudo da estabilidade a pequenos sinais, também conhecido como *Modelo de Heffron-Phillips (Modelo-HP)*, proposto em (HEFFRON e PHILLIPS, 1952) e utilizado em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969) para o desenvolvimento dos conceitos de torques de sincronização e de amortecimento.

É importante ressaltar que esse modelo permite a análise da oscilação entre um gerador e o resto do sistema (equivalente), capturando portanto os efeitos das oscilações locais. As oscilações entre grupos de geradores de áreas diferentes (oscilações inter-área) devem ser estudadas utilizando-se o modelo multimáquinas.

A.3.1 Equações Diferenciais e Algébricas

Considere o SMBI ilustrado na Figura A.1. A dinâmica desse sistema, desconsiderando as variáveis associadas aos reguladores e estabilizadores, pode ser representada por um modelo de terceira ordem. Esse modelo é capaz de representar a dinâmica eletromecânica e de campo do gerador síncrono.

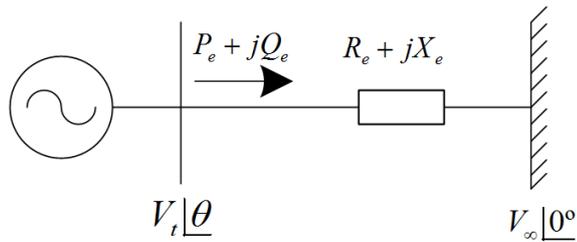


Figura A.1- Sistema Máquina Barra Infinita.

As variáveis do modelo H-P podem ser classificadas em três categorias:

- **Entrada:** torque mecânico da turbina (T_M) e tensão de campo do gerador (E_{fd});
- **Estado:** ângulo de torque (δ), desvio de velocidade (δ) e tensão proporcional ao fluxo E'_q ;
- **Saída:** ângulo de torque (δ) e tensão terminal da máquina (e_t).

As hipóteses abaixo são consideradas:

- a velocidade ω do rotor não se afasta muito da velocidade síncrona ω_s (1 pu) para que os torques elétrico e mecânico sejam aproximados pelas potências elétrica e mecânica;
- a potência mecânica no eixo não varia rapidamente e é constante, exceto pela ação do regulador de velocidade;
- o efeito dos enrolamentos amortecedores é contabilizado pelo coeficiente de amortecimento D .

As equações podem ser classificadas em:

- **Algébricas:** associadas ao estator da máquina e à rede elétrica;
- **Diferenciais:** associadas à dinâmica eletromecânica e de campo da máquina.

Essas equações serão apresentadas a seguir e seguem a seguinte nomenclatura:

- ω é a velocidade do rotor em rad/s; δ é o ângulo do rotor da máquina em rad (radianos); H é a constante de inércia da máquina em s; P_m é a potência mecânica no eixo em pu; P_e é a potência elétrica fornecida pela máquina em pu; D é o coeficiente de amortecimento em pu de potência.s/rad;

- V_q e V_d são as tensões terminais da máquina nos eixos em quadratura e direto (q e d); I_q e I_d são as correntes injetadas no sistema pela máquina em fase com os eixos q e d;
- X'_q e X'_d são as reatâncias transitórias de eixo q e d; X_d é a reatância síncrona de eixo d; r_a é a resistência de armadura (estator);
- E'_q é a tensão transitória interna da máquina no eixo em quadratura (eixo q); E_{fd} é a tensão de campo do gerador e T'_{d0} é a constante transitória de eixo direto com o estator em aberto.

As equações diferenciais são apresentadas em (A.1)-(A.3).

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e - D(\omega - \omega_s)) \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - (X_d - X'_d) \cdot I_d - E'_q) \quad (\text{A.3})$$

As equações algébricas associadas ao estator são apresentadas em (A.4)-(A.5).

$$E'_q - V_q = r_a \cdot I_q + X'_d \cdot I_d \quad (\text{A.4})$$

$$-V_d = r_a \cdot I_d + X'_q \cdot I_q \quad (\text{A.5})$$

A equação algébrica relacionada à rede elétrica é dada em (A.6).

$$I_r + jI_m = \frac{(V_t | \underline{\theta}) - (V_\infty | \underline{0})}{R_e + jX_e} \quad (\text{A.6})$$

Ressalta-se que as equações associadas à máquina síncrona estão nas referências dq da própria máquina. Por outro lado a equação relacionada à rede elétrica está na referência fixa do sistema (real e imaginário). A metodologia de transformação entre as coordenadas pode ser obtida em (KUNDUR, 1994).

A.3.2 Sistemas de Excitação

Os sistemas de excitação de uma máquina síncrona possuem o objetivo de fornecer corrente contínua para o enrolamento de campo do rotor, sendo composto por (ROGERS,

2000): excitatriz, regulador de tensão, transdutor de tensão, estabilizador de sistemas de potência, limitadores e circuitos de proteção. Dependendo da fonte de energia da excitatriz, esta pode ser: excitatriz CC, CA e Estática.

Nessa seção, apresenta-se os modelos dos sistemas de excitação (reguladores de tensão) utilizados nesse trabalho. Esses modelos estavam no banco de dados dos sistemas utilizados pelo autor desta tese e não foram alterados. São considerados dois tipos (EL-SHERBINY e MEHTA, 1973; ROGERS, 2000):

- **Tipo 1:** associados aos sistemas de excitação CC, o primeiro modelo é apresentado na Figura A.2. O sinal de entrada é uma composição da tensão de referência V_{REF} , da tensão terminal V_T (devidamente processada por um transdutor) e pela tensão proveniente do estabilizador V_{PSS} que modula a tensão de campo para prover o necessário amortecimento das oscilações. A tensão de saída E_{FD} será aplicada ao circuito de campo da máquina síncrona. Os ganhos K e as constantes de tempo T estão associados a três blocos: amplificador (K_A e T_A), enrolamento de campo do gerador CC (K_E e T_E) e circuito de realimentação estabilizante (K_F e T_F).

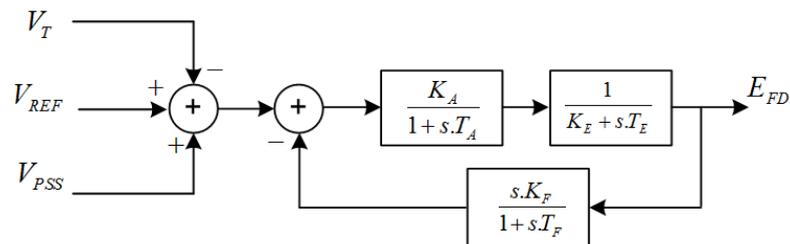


Figura A.2- Regulador Tipo 1.

- **Tipo 2:** associado aos sistemas de excitação modernos com alto ganho e baixa constante de tempo (K_e e T_e), o segundo modelo é apresentado na Figura A.3. Esse modelo aumenta os torques de sincronização e melhora a estabilidade transitória dos geradores. Entretanto, os ganhos altos fazem que o amortecimento intrínseco dos geradores seja deteriorado (reduzido), conduzindo o sistema a problemas de estabilidade a pequenos sinais, devido ao baixo amortecimento das oscilações.

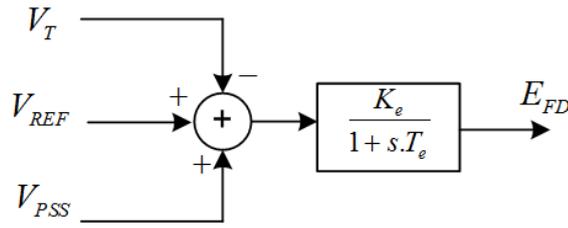


Figura A.3- Regulador Tipo 2.

A.3.3 Linearização das Equações

Em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969) os conceitos de torques de sincronização e amortecimento são estudados a partir do *Modelo de Heffron-Phillips* (HEFFRON e PHILLIPS, 1952). As equações apresentadas anteriormente são linearizadas em torno de um ponto de operação dando origem a seis constantes cujos valores dependem do ponto de operação e dos parâmetros do sistema. Em (EL-SHERBINY e MEHTA, 1973) o comportamento das seis constantes são estudadas para vários cenários de carregamento.

Nessa seção, o modelo linearizado é apresentado. As expressões das constantes não serão apresentadas, e podem ser encontradas em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969; EL-SHERBINY e MEHTA, 1973).

O conjunto de equações linearizadas são apresentadas em (A.7)-(A.11).

$$\Delta T_e = K_1 \cdot \Delta \delta + K_2 \cdot \Delta E'_q \quad (\text{A.7})$$

$$K_3 \cdot T'_{d0} \cdot \frac{d\Delta E'_q}{dt} + \Delta E'_q = K_3 \cdot (\Delta E_{fd} - K_4 \cdot \Delta \delta) \quad (\text{A.8})$$

$$e_t = K_5 \cdot \Delta \delta + K_6 \cdot \Delta E'_q \quad (\text{A.9})$$

$$2H \cdot \frac{d\Delta \omega}{dt} + D \cdot \Delta \omega = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta \delta = \omega_s \cdot \int_0^t \Delta \omega(t) \cdot dt \quad (\text{A.11})$$

A.3.4 Diagrama de Blocos e Modelagem em Espaço de Estados do *Modelo-HP*

Após a aplicação da Transformada de Laplace nas equações linearizadas no item anterior é possível desenvolver um diagrama de blocos para o *Modelo-HP*. O diagrama de blocos é apresentado na Figura A.4. O termo $EXC(s)$ representa o modelo do sistema de excitação a ser usado, conforme anteriormente apresentado.

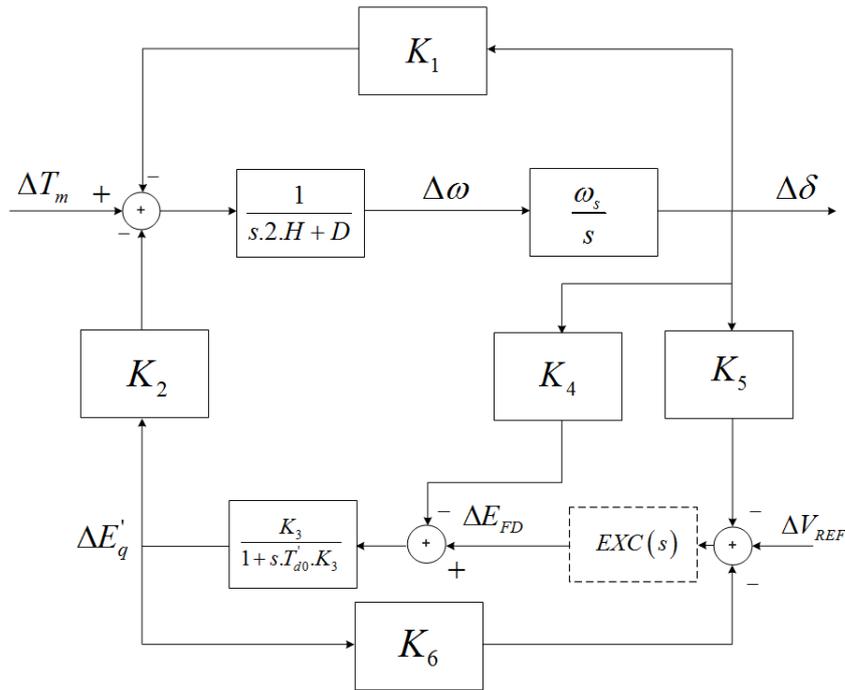


Figura A.4- Diagrama de blocos do Modelo de Heffron-Phillips.

A interpretação das seis constantes é descrita abaixo:

$$K_1 = \left. \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \right|_{E'_q}$$

Define a variação do torque elétrico para uma variação do ângulo de carga considerando constante o enlace de fluxo no eixo-d. É o coeficiente de torque sincronizante do sistema.

$$K_2 = \left. \frac{\Delta T_e}{\Delta E'_q} \right|_{\delta}$$

Define a variação do torque elétrico para uma variação no enlace de fluxo considerando constante o ângulo de carga.

$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e}$$

Considerando a impedância externa como uma reatância pura, essa constante depende apenas das impedâncias da máquina e do sistema de transmissão. É a única constante cujo valor não varia com as condições de operação.

$$K_4 = -\frac{1}{K_3} \cdot \frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta}$$

Representa o efeito desmagnetizante da reação da armadura sobre o fluxo no eixo-d.

$$K_5 = \left. \frac{\Delta e_t}{\Delta \delta} \right|_{E'_q}$$

Define a variação da tensão terminal para uma variação no ângulo do rotor considerando constante o enlace de fluxo no eixo-d.

$$K_6 = \left. \frac{\Delta e_t}{\Delta E'_q} \right|_{\delta}$$

Define a variação da tensão terminal para uma variação no enlace de fluxo no eixo-d considerando constante o ângulo de carga. É o efeito preponderante das variações de fluxo sobre a tensão terminal.

Considerando um sistema de excitação estático, a função $EXC(s)$ é apresentada na equação (A.12).

$$EXC(s) = \frac{K_e}{1 + sT_e} \quad (\text{A.12})$$

A modelagem em espaço de estados para o diagrama de blocos da Figura A.4 considerando um sistema de excitação estático, é apresentado na equação (A.13).

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{E}'_q \\ \Delta\dot{E}'_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D & -K_1 & -K_2 & 0 \\ \frac{2H}{2H} & \frac{2H}{2H} & \frac{2H}{2H} & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_4 & -1 & 1 \\ 0 & \frac{T'_{d0}}{T_e} & \frac{K_3 \cdot T'_{d0}}{T_e} & \frac{T'_{d0}}{T_e} \\ 0 & -K_5 \cdot K_e & -K_6 \cdot K_e & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_e}{T_e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

A.4 ANÁLISE DO MODELO DE HEFFRON-PHILLIPS

A.4.1 Conceitos Preliminares

É possível realizar uma análise matemática rigorosa utilizando o *Modelo de Heffron-Phillips*, tal como a apresentada em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969). Essas análises não serão reproduzidas aqui, sendo importante ressaltar as seguintes conclusões:

1. o torque elétrico total desenvolvido pela máquina pode ser decomposto em duas parcelas: o torque de sincronização $\Delta T_s = K_s \cdot \Delta\delta$ (em fase com o desvio angular) e o torque de amortecimento $\Delta T_d = K_d \cdot \Delta\omega$ (em fase com o desvio de velocidade), conforme a equação (A.14).

$$\Delta T_e = K_s \cdot \Delta\delta + K_d \cdot \Delta\omega \quad (\text{A.14})$$

Na equação (A.14) K_s é referido como coeficiente de *torque sincronizante* e K_d é referido como coeficiente de *torque de amortecimento*.

2. Para que ocorra a estabilidade é necessário que ambos os coeficientes de torque sejam positivos, vide Figura A.5.

a) A ausência de torque de amortecimento conduz a um problema de instabilidade oscilatória, sendo solucionado com o uso de estabilizadores de sistemas de potência, vide Figura A.6 (a).

b) A ausência de torque sincronizante conduz a um problema de instabilidade monotônica (aperiódica). Esse tipo de instabilidade é solucionado pelo uso de sistemas de excitação estáticos com altos ganhos e baixas constantes de tempo, vide Figura A.6 (b).

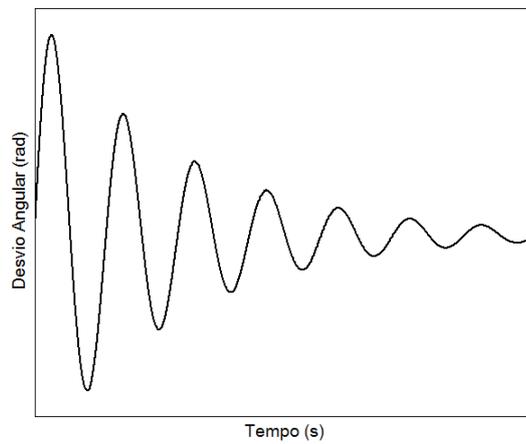


Figura A.5- Sistema Estável ($T_s > 0$ e $T_d > 0$).

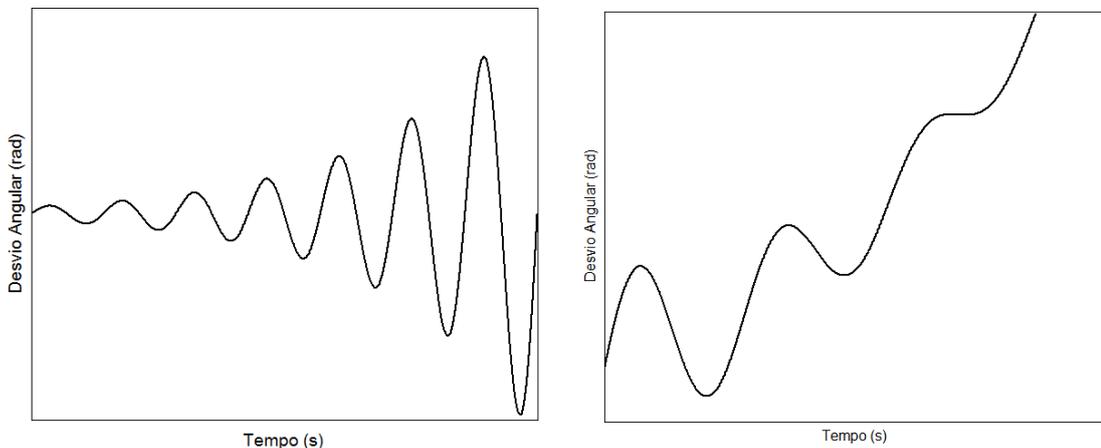


Figura A.6- (a) Instabilidade Oscilatória ($T_s > 0$ e $T_d < 0$) (b) Instabilidade Aperiódica ($T_s < 0$ e $T_d > 0$).

3. Os geradores possuem um torque de amortecimento natural. O uso de sistemas de excitação estáticos modernos com altos ganhos e baixas constantes de tempo solucionaram o problema da instabilidade aperiódica com o reforço dos torques de sincronização. Todavia, tais sistemas de excitação deterioraram o amortecimento natural das máquinas, tendendo a introduzir amortecimento negativo. Isso conduziu ao problema de instabilidade oscilatória devido a carência de torques de amortecimento.

4. Com base nos itens anteriores, observa-se a necessidade de um equipamento que adicione torque de amortecimento aos geradores. Em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969) foi proposta a adição de um sinal estabilizante no regulador de tensão das máquinas síncronas visando modular a tensão de excitação com o objetivo de amortecer as oscilações. O equipamento que realiza essa modulação é denominado Estabilizador de Sistemas de Potência e em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969) foi utilizado o desvio de velocidade como entrada para o estabilizador. A equação (A.15) denota de forma genérica a função de transferência do estabilizador $PSS(s)$ que utiliza o desvio de velocidade como sinal de entrada.

$$PSS(s) = \frac{\Delta V_{REF}}{\Delta \omega} \quad (A.15)$$

Atualmente, as oscilações eletromecânicas surgem devido à falta de torque de amortecimento (PAL e CHAUDHURI, 2005). A inércia das máquinas evita que a potência mecânica seja reduzida nos primeiros instantes de uma redução da potência elétrica, fazendo com que o rotor acelere, aumentando o ângulo do rotor e provocando oscilações.

A.4.2 Função GEP

A ação de um estabilizador de sistema de potência é efetiva através da função de transferência $GEP(s)$, denominada *Generator-Exciter-Power System*. Essa função de transferência entre a tensão de referência V_{REF} e o torque elétrico T_e (considerando o desvio de velocidade nulo) é apresentada nas Figuras A.7 e A.8.

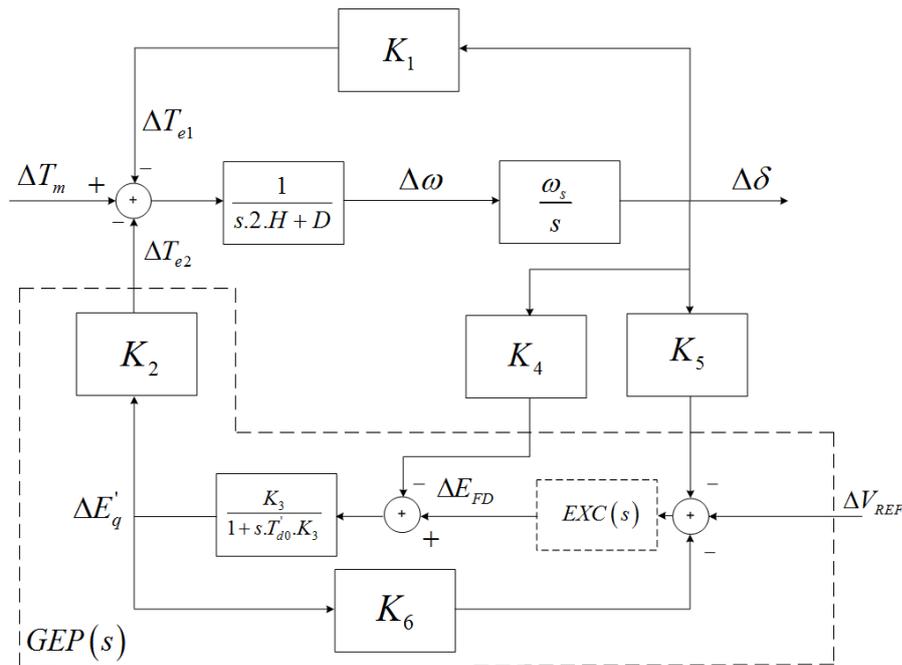


Figura A.7- Modelo-HP: Função GEP(s).

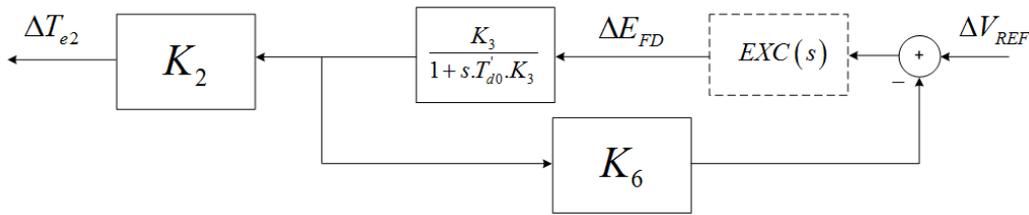


Figura A.8- Função GEP(s).

Em (DEMELLO e CONCORDIA, 1969) é demonstrado que a função $GEP(s)$ é dada pela equação (A.16).

$$GEP(s) = \frac{\Delta T_{e2}}{\Delta V_{REF}} = \frac{K_2 \cdot K_3 \cdot EXC(s)}{(1 + s \cdot T'_{d0} \cdot K_3) + K_3 \cdot K_6 \cdot EXC(s)} \quad (A.16)$$

Denotando o torque elétrico de amortecimento, em fase com o desvio de velocidade, produzido pelo estabilizador como ΔT_{ePSS} e usando-se a equação (A.15), pode-se escrever a função de transferência apresentada na equação (A.17).

$$\frac{\Delta T_{ePSS}}{\Delta \omega} = \frac{\Delta T_{ePSS}}{\Delta V_{REF}} \cdot \frac{\Delta V_{REF}}{\Delta \omega} = GEP(s) \cdot PSS(s) \quad (A.17)$$

Observa-se que para a produção de um torque puramente de amortecimento em fase com a velocidade, deve-se ajustar a fase do bloco estabilizador como o negativo da fase do bloco $GEP(s)$. Entretanto as características de fase e ganho do bloco $GEP(s)$ variam com as condições de operação. Nesse sentido é inviável fazer a compensação de fase para todo o espectro de frequências.

O estabilizador deve ser projetado para fornecer torque de amortecimento adequado apenas para uma faixa de frequência de interesse, em especial na faixa dos modos de oscilação local e inter-área (0,1 - 1,2 Hz) nos quais a unidade geradora participe.

A.5 MODELAGEM DE UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS

O *Modelo de Heffron-Phillips* revisado anteriormente é adequado para o estudo dos modos locais de oscilação (gerador oscilando contra o resto do sistema equivalente). Entretanto esse modelo não é adequado para o estudo dos modos de oscilação inter-área. Nesse sentido, torna-se necessário o emprego de um modelo mais preciso para a rede. Além disso, um detalhamento do modelo dos geradores é requerido.

Nessa seção é apresentada, de forma sucinta, a modelagem do sistema para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações considerando as diversas máquinas síncronas, conforme apresentado a seguir (KUNDUR, 1994):

1. a rede elétrica é representada pela matriz admitância de barras;
2. as cargas estáticas são representadas pelo modelo exponencial ou polinomial (MARTINS e LIMA, 1989a);
3. turbinas e reguladores de velocidade não são detalhados na modelagem pois a potência mecânica é considerada constante;
4. os sistemas de excitação são modelados conforme anteriormente apresentado;
5. os geradores são representados pelas suas equações mecânicas (duas equações diferenciais) e elétricas. As equações elétricas compreendem (i) as equações algébricas do estator e (ii) as equações diferenciais associadas aos efeitos transitórios e subtransitórios nos eixos direto e quadratura. O conjunto de equações elétricas (ii) dá origem aos diversos modelos de geradores:

<i>Modelo 1</i>	conhecido como o modelo clássico, não considera as variações de tensão de campo e não requer equações elétricas diferenciais.	Ordem 2
<i>Modelo 2</i>	considera apenas os efeitos transitórios no eixo-d. Assim, uma única equação elétrica diferencial é considerada. Corresponde ao modelo de <i>Heffron-Phillips</i> .	Ordem 3
<i>Modelo 3</i>	considera os efeitos transitórios nos eixos q e d.	Ordem 4
<i>Modelo 4</i>	considera os efeitos transitórios no eixo d e os efeitos subtransitórios nos eixos q e d.	Ordem 5
<i>Modelo 5</i>	considera os efeitos transitórios e subtransitórios nos eixos q e d.	Ordem 6

É importante observar que o " termo Ordem" indica o número de variáveis de estados para cada gerador, incluindo as de natureza mecânicas, desconsiderando aquelas associadas ao circuito de campo (regulador de tensão) e estabilizadores.

A.6 ANÁLISE MODAL

A.6.1 Modelagem em Espaço de Estados

A dinâmica de um SEP pode ser descrito por um conjunto de equações não lineares algébricas e diferenciais conforme apresentado a seguir:

$$\dot{x} = f(x, z, u) \quad (\text{A.18})$$

$$0 = g(x, z, u) \quad (\text{A.19})$$

$$y = h(x, z, u) \quad (\text{A.20})$$

em que $x \in \mathfrak{R}^n$ é o vetor de variáveis de estado, $z \in \mathfrak{R}^m$ é o vetor de variáveis algébricas, $u \in \mathfrak{R}^p$ é o vetor de variáveis de entrada do sistema e $y \in \mathfrak{R}^q$ é o vetor de variáveis de saídas. A equação (A.18) denota as equações diferenciais associadas aos geradores, controladores, cargas e dispositivos dinâmicos. A equação (A.19) corresponde às equações algébricas que definem a rede de transmissão. As equações que definem as variáveis de saída do sistema (potência elétrica, corrente elétrica, frequência e tensão nas barras) são dadas em (A.20).

As equações anteriores podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio (x_0, z_0, u_0) e após manipulações algébricas para a eliminação das variáveis z , tem-se um novo sistema de equações definido em (A.21)²³.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

em que A é a matriz de estados ($n \times n$), B é a matriz de entrada ($n \times p$), C é a matriz de saídas ($q \times n$) e D é a matriz de transmissão direta ($q \times p$). As matrizes A , B , C e D representam o sistema linearizado em torno de um ponto de equilíbrio, em espaço de estados e no domínio do tempo.

A.6.2 Autovalores, Autovetores e Modos

Nas equações (A.22) e (A.23), ϕ_i e ψ_i representam os autovetores à direita e à esquerda associados ao i -ésimo autovalor λ_i , respectivamente. Os autovalores da matriz A são calculados conforme a equação (A.24).

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad (\text{A.22})$$

$$\psi_i A = \lambda_i\psi_i \quad (\text{A.23})$$

²³ Considerando as equações linearizadas, uma notação matematicamente rigorosa seria: $\Delta\dot{x}(t) = A\Delta x(t) + B\Delta u(t)$ e $\Delta y(t) = C\Delta x(t) + D\Delta u(t)$. Entretanto, por questões de simplicidade o índice Δ será desconsiderado e a indicação do domínio do tempo (t) será omitida.

$$\det(A - \lambda_i \cdot I) = 0 \quad (\text{A.24})$$

O autovalor λ_i é um número complexo com partes real e imaginária conforme a equação (A.25). Cada autovalor está associado a um determinado modo de oscilação e possui um fator de amortecimento ξ_i e uma frequência de oscilação f_i , conforme apresentado na equação (A.26) e (A.27).

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (\text{A.25})$$

$$\xi_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (\text{A.26})$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (\text{A.27})$$

Conforme o Primeiro Método de Lyapunov (AGUIRRE, 2007), considerando o sistema linearizado em um determinado ponto de operação, a estabilidade local pode ser avaliada a partir dos autovalores da matriz de estado:

- um autovalor real corresponde a um modo não oscilatório. Um autovalor real negativo corresponde a um modo estável e um autovalor positivo caracteriza uma instabilidade monotônica;
- autovalores complexos ocorrem em pares conjugados e cada par corresponde a um modo oscilatório. Se a parte real for negativa, este sistema será estável. Caso contrário, ocorre a instabilidade oscilatória com amplitude crescente;
- se a parte real de qualquer autovalor for nula nada se pode afirmar sobre a estabilidade do sistema. Essa afirmação é importante e será retomada mais a frente, quando os autovalores de um sistema com ou sem barra infinita forem avaliados.

A.6.3 Mode-Shapes

Na análise de SEP, o autovetor à direita ϕ_i é conhecido como *mode-shape* associado ao autovalor λ_i (KUNDUR, 1994). O *mode-shape* fornece a medida da atividade de uma variável de estado quando um determinado modo é excitado.

As magnitudes dos elementos do vetor ϕ_i fornecem o grau de atividade de cada variável de estado em relação ao modo λ_i . Os ângulos dos elementos do vetor ϕ_i fornecem as defasagens de cada variável em relação ao modo λ_i .

Dessa forma, quando se estuda os desvios de velocidade do rotor ($\Delta\omega$) de todos os geradores, e concentramos a atenção no comportamento de determinado modo de oscilação, tem-se o que se denomina *mode-shape de velocidade*.

Logo, os *mode-shapes* fornecem informações importantes na participação de uma máquina ou grupo de máquinas em um modo de oscilação eletromecânica específico.

A.6.4 Fatores de Participação

Os fatores de participação são obtidos a partir da combinação dos autovetores à direita e à esquerda. O fator de participação é definido como um produto, elemento por elemento, dos autovetores ϕ_i e ψ_i associados ao modo λ_i . O fator de participação (P_{ki}) da variável de estado k no modo i é definido pela equação (A.28).

$$P_{ki} = \phi_{ki} \cdot \psi_{ik} \quad (\text{A.28})$$

Os fatores de participação podem ser utilizados para identificar a relação entre as variáveis de estado e os modos oscilatórios, independente da unidade e dimensionamento das variáveis de estado. Através da análise dos fatores de participação é possível identificar a natureza do modo de oscilação λ_i (eletromecânico, excitação, etc).

A.6.5 Função de Transferência, Controlabilidade e Observabilidade

No domínio da frequência, a função de transferência associada ao sistema de equações (A.21) é apresentada na equação (A.29).

$$\frac{y(s)}{u(s)} = G_r(s) = (D + C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B) \quad (\text{A.29})$$

em que $y(s)$ e $u(s)$ representam as variáveis de saída e de entrada, respectivamente.

Utilizando-se uma transformação linear, pode-se diagonalizar a matriz de estados A , de forma que a função de transferência passa a ser dada conforme a equação (A.30).

$$G_r(s) = \sum_{i=1}^n \frac{C \cdot \phi_i \cdot \psi_i \cdot B}{s - \lambda_i} \quad (\text{A.30})$$

em que n representa o número de autovalores.

Da equação (A.30) pode-se identificar duas parcelas:

- **matriz de observabilidade modal** ($C \cdot \phi_i$): relaciona os estados do sistema às saídas. Através dessa matriz pode-se identificar qual o estado tem mais influência na observabilidade do modo.
- **matriz de controlabilidade modal** ($\psi_i \cdot B$): relaciona as entradas com os estados do sistema. Através dessa matriz é possível identificar qual entrada tem mais influência na controlabilidade do modo.

A.6.6 Resíduos da Função de Transferência

Na equação (A.30), o produto das matrizes de controlabilidade modal e observabilidade modal originam uma matriz de resíduos conforme a equação (A.31).

$$G_r(s) = \sum_{i=1}^n \frac{C \cdot \phi_i \cdot \psi_i \cdot B}{s - \lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (\text{A.31})$$

em que R_i é o resíduo da função de transferência correspondente ao i -ésimo pólo λ_i .

Em (ARCIDIACONO, FERRARI e MARCONATO, 1980; MARTINS e LIMA, 1989a) é demonstrado que o resíduo da função de transferência pode ser interpretado como a sensibilidade de um modo de oscilação a uma realimentação incremental do ganho. Considere Figura A.9, onde um sistema cuja função de transferência vale $G(s)$ será realimentado negativamente por um controlador do tipo $K \cdot H(s)$.

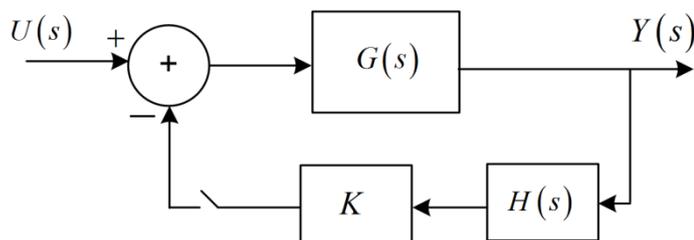


Figura A.9- Inclusão de realimentação com ganho incremental.

É possível demonstrar que o deslocamento do autovalor λ_i para uma variação do ganho K será dado pela equação (A.32). Nesse caso, a realimentação é feita considerando a saída j do sistema (entrada do controlador) e a entrada k do sistema (saída do controlador). A equação (A.33) apresenta a equação para o cálculo do resíduo.

$$\Delta\lambda_i = -R_{ijk} \cdot K \cdot H(\lambda_i) \quad (\text{A.32})$$

$$R_{ijk} = C_j \cdot \phi_i \cdot \psi_i \cdot B_k \quad (\text{A.33})$$

É importante ressaltar que se a realimentação fosse positiva, o sinal negativo da equação (A.32) seria suprimido.

A.7 ANÁLISE DOS MODOS DE OSCILAÇÃO

Os modos de oscilação podem ser do tipo (PAL e CHAUDHURI, 2005): intra-planta, local, inter-área, modos de controle e modos torsionais.

Abaixo são descritos os modos de interesse desse trabalho:

- **modos intra-planta** (2 a 3 Hz): um ou mais geradores oscilam contra outro de uma mesma planta;
- **modos locais** (1 a 2 Hz): um gerador (ou grupo de geradores) oscila contra o resto do sistema. Também é caracterizado como um modo local as oscilações entre unidades geradoras pertencentes à mesma área do sistema;
- **modos inter-área** (0,1 a 0,7 Hz): são observados quando um grupo de geradores localizados em uma área oscila contra outro grupo de geradores localizados em outra área do sistema.

A Figura A.10 ilustra dois exemplos de modos de oscilação local e inter-área.

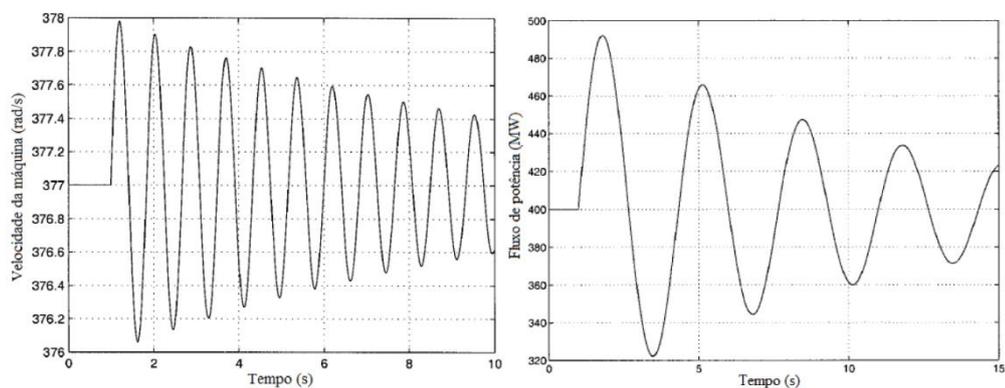


Figura A.10- (a) Modo Local (b) Modo Inter-área. (Adaptado de (PAL e CHAUDHURI, 2005)).

A melhoria da estabilidade a pequenos sinais é realizada através de equipamentos de controle que adicionam torque de amortecimento às oscilações eletromecânicas. Entre os equipamentos que adicionam torque de amortecimento estão os Estabilizadores de Sistemas

de Potência - ESP (instalados nos geradores) e os controladores do tipo *Power Oscillation Damper* - POD (instalados nos equipamentos *FACTS*)(PAL e CHAUDHURI, 2005).

A.8 ASPECTOS ASSOCIADOS AOS AUTOVALORES DA MATRIZ DE ESTADOS

Conforme apresentado em (PAL e CHAUDHURI, 2005), na ausência de uma barra infinita no sistema que forneça uma referência angular e de velocidade, existirão dois autovalores na origem do plano complexo.

Tal fato torna a matriz de estados singular e pode comprometer o projeto dos controladores para o amortecimento de oscilações, pois:

- algumas metodologias de projeto de controladores tais como as baseadas em *LMI (Linear Matrix Inequalities)* necessitam que a matriz de estados seja não singular (OLIVEIRA, 2006);
- métodos de otimização que visam a minimização da parte real dos autovalores (matematicamente definida como abscissa espectral) ou a maximização do mínimo amortecimento do sistema podem encontrar dificuldades caso tais autovalores nulos não sejam corretamente tratados (DILL, 2013);
- metodologias que visem a minimização da *norma H_2* , que está associada ao esforço dos controladores, não funcionam quando a matriz de estados é singular. Isso porque a *norma H_2* não é definida para sistemas instáveis, assumindo um valor infinito (TROFINO, 2000).

Uma importante ressalva deve ser feita nesse momento. Embora existam dois autovalores nulos na ausência de uma barra infinita, caso os demais autovalores estejam no semi-plano esquerdo complexo, o sistema será estável.

O primeiro autovalor nulo está associado à ausência de uma referência angular para o sistema, que faz com que o conjunto de equações do modelo linearizado seja redundante. Essa redundância pode ser removida ao escolher uma máquina como referência angular e expressando todos os outros ângulos em função da máquina escolhida como referência.

O segundo autovalor nulo ocorre quando o torque de amortecimento do gerador é independente dos desvios de velocidade da máquina. Essa situação acontece quando o amortecimento mecânico é desconsiderado e quando o regulador de velocidade não é representado. Além disso, quando a relação entre a constante de inércia e o coeficiente de

amortecimento de todos os geradores é a mesma. Uma solução para esse problema seria a inclusão de um pequeno coeficiente de amortecimento mecânico aos geradores, o suficiente para a eliminação da singularidade e que não altere significativamente a dinâmica do sistema. Outra solução seria a representação do regulador de velocidade no modelo do sistema, tal como proposto em (OLIVEIRA, 2006). Entretanto, (OLIVEIRA, 2006) conclui que não há vantagem em termos de desempenho dos estabilizadores projetados quando se usa a representação do controle primário de velocidade, isso porque existe um desacoplamento entre a dinâmica do regulador de velocidade e a dinâmica do sistema de excitação.

Adicionalmente, é importante ressaltar que a representação de um dos geradores como barra infinita soluciona os problemas de singularidade da matriz de estados. Entretanto, a escolha de qual gerador a ser modelado como barra infinita deve ser criteriosa, de forma a não produzir um erro na análise dinâmica do sistema (OLIVEIRA, 2006).

A.9 ÍNDICES PARA A LOCALIZAÇÃO DE CONTROLADORES E SELEÇÃO DE SINAIS FÍSICOS

Após a identificação dos modos de oscilação menos amortecidos no sistema torna-se necessária a identificação: (i) dos melhores pontos de instalação de controladores de amortecimento para atuarem na melhoria desses modos e (ii) do melhor sinal físico a ser utilizado na entrada do controlador.

Nessa seção são apresentados os métodos mais comumente citados na literatura para a localização desses controladores no sistema. Tais métodos são adequados tanto para a identificação dos geradores candidatos a serem equipados com estabilizadores quanto para a identificação dos pontos do sistema a receberem a instalação de equipamentos *FACTS* equipados com equipamentos *POD* (*Power Oscillation Damper*) (MARTINS, PINTO, *et al.*, 1994).

Outro tópico abordado é sobre a seleção dos sinais físicos mais adequados para serem utilizados na entrada do controlador.

C.1.1 Fatores de Participação

Conforme (KUNDUR, 1994) os fatores de participação podem ser utilizados para identificar qual o gerador do sistema é o melhor candidato para a implementação do controle.

Considerando os modos de oscilação com os menores fatores de amortecimento deve-se proceder com o cálculo dos fatores de participação associados a esses modos. Como o fator de participação mede a contribuição de uma variável em um modo, basta identificar quais as variáveis com os maiores fatores de participação. Os geradores associados aos maiores fatores de participação para um determinado modo serão escolhidos para a alocação do controlador.

Como exemplo, considere a Figura A.11, que ilustra os fatores de participação associados a um determinado modo de oscilação em um sistema com 10 geradores cujas variáveis de estado são indicadas. Observa-se que a interpretação dos fatores de participação indica que o gerador número 4 é o mais adequado para receber a instalação de um estabilizador para atuar no amortecimento do modo sob análise. Adicionalmente é possível identificar a natureza do modo: trata-se de um modo de oscilação eletromecânico, pois as variáveis ω e δ possuem maiores fatores de participação que as variáveis associadas ao sistema de excitação E'_q e E_{fd} .

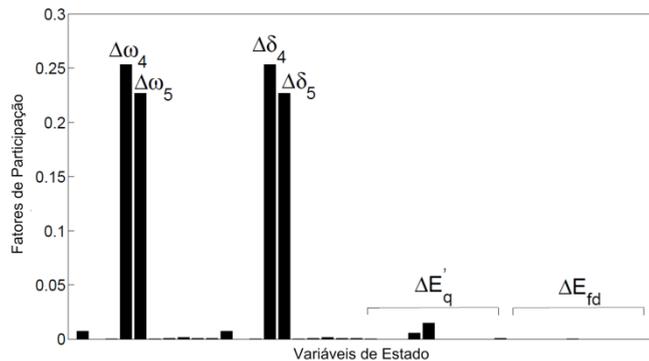


Figura A.11- Ilustração dos Fatores de Participação. (Fonte: (FEBRES, ARAUJO e FURINI, 2008)).

C.1.2 Resíduos da Função de Transferência

Considere a Figura A.12 que ilustra o sistema em malha fechada. A função de transferência $SEP(s)$ representa o SEP sem o estabilizador, que inclui a modelagem do regulador de tensão. O controlador, cuja estrutura é apresentada no Capítulo 3, é o estabilizador com a função de transferência $K.H(s)$.

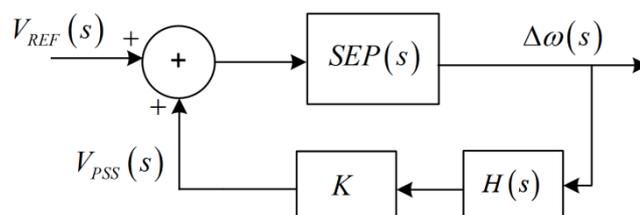


Figura A.12- Sistema em Malha Fechada.

Conforme apresentado em (MARTINS e LIMA, 1989a; MHASKAR e KULKARNI, 2006; KUNJUMUHAMMED e PAL, 2015), com o objetivo de identificar os geradores mais adequados para a instalação dos estabilizadores, pode-se utilizar o resíduo da função de transferência $\Delta\omega_k/V_{REF\ k}$ para cada gerador k .

Considere o equacionamento apresentado em (A.34). É possível concluir que para se obter um maior deslocamento do modo de oscilação em análise $\Delta\lambda_i$ com menor esforço de controle (ganho do estabilizador reduzido) os geradores com maiores valores de resíduos devem ser escolhidos.

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_i &= R_i \cdot K \cdot H(\lambda_i) \\ |\Delta\lambda_i| &= |R_i| \cdot |K \cdot H(\lambda_i)|\end{aligned}\tag{A.34}$$

A metodologia baseada nos resíduos da função de transferência para identificar os geradores candidatos à alocação de estabilizadores também pode ser aplicada para a determinação dos pontos do sistema a receberem equipamentos *FACTS-POD* (MARTINS e LIMA, 1989a)(MARTINS, PINTO, *et al.*, 1994).

C.1.3 Zeros da Função de Transferência de Malha Aberta

Enquanto os resíduos indicam o movimento dos autovalores para variações incrementais do ganho, a magnitude do ganho é limitada pela distância entre os pólos (modos) críticos e os zeros da função de transferência em malha aberta (FTMA).

Embora grandes valores para os resíduos indiquem quais os geradores são candidatos a receberem os estabilizadores, somente a análise destes não é suficiente para a estabilização do sistema através do fechamento das malhas de controle associadas.

Da teoria de sistemas lineares, sabe-se que os pólos da função de transferência de malha fechada se aproximam assintoticamente dos zeros da função de transferência de malha aberta, na medida em que o ganho da malha de realimentação tende a infinito. A existência de zeros críticos muito próximos do pólo que se deseja amortecer sugere a impossibilidade de se estabilizar este modo através do fechamento da malha de controle (MARTINS, 1986; MARINI, 2005).

Assim o posicionamento de zeros da função de transferência em malha aberta de um sistema linear está intimamente associado a dificuldade de controlá-lo. Caso os zeros da

FTMA deste sistema estejam posicionados no lado direito do plano complexo, o sistema se tornará instável para ganhos suficientemente elevados.

Dessa forma, os geradores candidatos a receberem uma malha de realimentação (estabilizador) são aqueles que: (i) apresentam maior valor para o resíduo e (ii) apresentam a maior distância entre zeros e pólos críticos (FURINI e ARAUJO, 2008).

C.1.4 Sinais Físicos

Uma revisão dos sinais físicos a serem utilizados como entrada nos controladores para amortecimento é devidamente apresentada no Capítulo 3. Entretanto de forma sucinta pode-se dizer que os sinais mais comumente utilizados como entrada nos estabilizadores de sistemas de potência são: velocidade do rotor, frequência elétrica, potência elétrica e potência acelerante (KUNDUR, 1994). Com o advento dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (PHADKE, 1993; PHADKE, 2002) outros sinais tornaram-se disponíveis, tais como aqueles associados aos ângulos das barras (DOTTA, 2009; CHOMPOOBUTRGOOL e VANFRETTI, 2014).

Conforme apresentado em (HENICHE e KAMWA, 2002; ZHANG e BOSE, 2008; KUNJUMUHAMMED e PAL, 2015) a abordagem de seleção de sinais para realimentação baseada nos resíduos da função de transferência é limitada aos casos onde o mesmo tipo de sinal físico está sendo analisado. Essa abordagem apresenta um problema de escala quando se compara sinais de diferentes significados físicos.

Para contornar essa deficiência, em (HENICHE e KAMWA, 2002) é apresentada uma abordagem baseada em medidas geométricas modais. Geometricamente, a observabilidade de um modo λ_i considerando a saída C_j pode ser interpretada como o cosseno do ângulo entre os vetores C_j e ϕ_i . Se o cosseno desse ângulo é próximo de zero, significa que essa saída apresenta uma baixa observabilidade associada ao modo em questão. O mesmo raciocínio é válido para a análise da controlabilidade. Com essa abordagem é possível comparar sinais de diferentes significados físicos.

As abordagens acima mencionadas podem ser agrupadas em uma metodologia robusta para a seleção de sinais físicos considerando diferentes pontos de operação, tal como recentemente apresentado em (KUNJUMUHAMMED e PAL, 2015). Uma seleção efetiva dos sinais de realimentação deve seguir os seguintes critérios:

- o melhor sinal físico para a realimentação é aquele com o maior valor de resíduo para todas as condições de operação;
- a variação na magnitude e fase dos resíduos deve ser a mínima possível;
- uma boa separação entre pólos críticos e zeros é requerida para se ter maior liberdade para o ajuste dos ganhos e movimentação dos pólos para estabilização.

A.10 CONSIDERAÇÕES DO APÊNDICE

Esse apêndice apresentou os conceitos importantes para análise da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas elétricos de potência. Adicionalmente aspectos relacionados à modelagem do sistema e análise modal foram apresentados.

Apêndice B – Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS)

Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) estão associados a uma questão muito importante no monitoramento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP): a obtenção de fasores de tensão e corrente em pontos da rede elétrica, geograficamente distantes, em uma referência de tempo comum (PHADKE, 2002). O desenvolvimento dos SMFS foi possível devido ao avanço da computação e dos sistemas de posicionamento globais via satélites, *Global Positioning Systems (GPS)*.

O elemento básico dos SMFS é a Unidade de Medição Fasorial Sincronizada (UMFS), que mede fasores de tensão e corrente com uma referência de tempo comum através de sinais via satélite (*GPS*). As medidas de tensão e corrente são processadas pelas UMFS e convertidas em fasores através de algoritmos baseados na Transformada Discreta de Fourier. A cada medida realizada pelas UMFS tem-se uma etiqueta de tempo associada ao Tempo Universal Coordenado (TUC). As UMFS modernas recebem sinais de um pulso por segundo fornecido pelo sistema *GPS*. Esse pulso é subdividido internamente de acordo com a taxa de amostragem adotada. A precisão desse trem de pulsos é da ordem de $1\mu\text{s}$, o que corresponde a um erro de fase de aproximadamente $0,022^\circ$ para um sistema que opera em 60 Hz (IEEE, 2006).

Após esse processamento de sinais nas UMFS, os fasores são enviados a um computador denominado Concentrador de Dados a taxas que variam de 10 a 60 fasores por segundo (HOLBERT, HEYDT e NI, 2005). O concentrador de dados, referido como *PDC* (do inglês, *Phasor Data Concentrator*) possui três finalidades: (i) receber os fasores enviados pelas UMFS, (ii) verificar eventuais erros de transmissão, organizar e (iii) disponibilizar esses dados para diversas aplicações dentro da operação do SEP (DOTTA, 2009).

Para a conexão entre as UMFS e o PDC podem ser utilizados *links* de fibra ótica, canais de micro-ondas, *Power Line Communication (PLC)* e até a própria internet com o sistema *Virtual Private Network (VPN)*. A escolha do sistema de comunicação a ser utilizado está diretamente ligada à aplicação que se destina o SMFS, uma vez que as questões associadas aos atrasos envolvidos na transmissão de dados são extremamente relevantes,

principalmente na área de controle, haja vista que tais atrasos deterioram o comportamento dinâmico do controle (PRIOSTE, 2011).

As aplicações de monitoração não exigem taxas de amostragem como as exigidas para as aplicações em controle, sendo possível o uso da internet como canal de comunicação entre a UMFS e o PDC (PHADKE, 2002). Em contrapartida, as aplicações de controle exigem taxas de amostragem maiores, além de uma segurança maior na transmissão de dados. Nesse contexto, o uso de fibra ótica apresenta-se como uma boa opção para minimizar o tempo de atraso (ou de latência) na transmissão no sinal (NADUVATHUPARAMBIL, VALENTI e FELIACHI, 2002). O tempo de atraso no uso de fibra ótica é da ordem de 100ms, conforme apresentado em (HOLBERT, HEYDT e NI, 2005).

Na literatura técnica, diversas aplicações foram propostas utilizando os sistemas de medição fasorial sincronizada, tais como: monitoramento das grandezas da rede (CHENINE, VANFRETTI e BENGTSSON, 2011), controle para amortecimento de oscilações eletromecânicas (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009), estimação estática de estados (ZHOU, THORP e PHADKE, 2006), monitoramento da estabilidade de tensão (DASGUPTA, PARAMASIVAM e VAIDYA, 2013), aumento do desempenho dos sistemas de proteção (DE LA REE, THORP e PHADKE, 2010), validação de parâmetros da rede elétrica (GAVIOLI, 2013), recomposição de sistemas elétricos (NOURIZADEH, KARIMI e RANJBAR, 2012) e localização de faltas (AL-MOHAMMED, MANSOUR e ABIDO, 2010).

Nos últimos anos, diversas aplicações dos SMFS foram desenvolvidas nos Estados Unidos e em países da Europa (PHADKE, 2002). No Brasil, alguns projetos de desenvolvimento e de aplicação dos SMFS são relatados em (DOTTA, SILVA e DECKER, 2009). Destaca-se o SMFS do projeto MedFasee, que é instalado na Baixa Tensão e atualmente é composto por 22 UMFS instaladas em universidades brasileiras distribuídas em todas as regiões do país. O PDC está instalado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Apêndice C – Dados Utilizados

C.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesse Apêndice são apresentados os dados dos sistemas utilizados. Os dados para execução do fluxo de potência (somente caso base) são apresentados no formato do programa ANAREDE e os dados dinâmicos no formato do programa PacDyn.

C.2 SISTEMA SUL SUDESTE

C.2.1 Dados para o Fluxo de Potência

```

DBAR
(No) OETGb( nome ) Gl( V) ( A) ( Pg) ( Qg) ( Qn) ( Qm) (Bc ) ( Pl) ( Ql) ( Sh) Are (Vf)
1 1 AREIA 103024.51658.-412.-999999999 2405.-467.179.2 11000
2 1 SANTIAGO 103027.21332.-200.-999999999 692.3-184.149.1 11000
3 1 SEGREDO 102926.61540.-447.-999999999 688.2-235.114.2 11000
4 1 ITAIPU 103948.56500.1959.-999999999 62.6 24.3 36.8 21000
5 BARRA-5 99821.2 845.8 -9.2 33. 11000
6 BARRA-6 98921.4 -4.9 79.82142. 31000
7 2 SUDESTE 966 0.-3164952.7-999999999 2884.-196. 42. 31000
99999
DLIN
(De) d O d(Pa) NcEP ( R% ) ( X% ) (Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc ) (Cn) (Ce) Ns
1 3 1 .03 .38
2 3 1 .05 .76
4 6 1 .029 .734
5 1 1 .19 2.45
5 2 1 .15 2.25
6 5 1 .39
6 7 1 .04 .57
99999
DARE
1 0. * SUL *
2 0. * ITAIPU A.C. *
3 0. * SUL SUDESTE *
99999

```

Figura C. 1- Dados para o fluxo de potência - Sistema Sul Sudeste Brasileiro.

C.2.2 Dados para Estudos de Transitórios Eletromecânicos

```

DGEN
#(#1) noR# (base) (-HH-) (-X'd) (-X'q) (-Xd-) (-Xq-) (-RR-) (T'd0) (T'q0) (Xp-) (-Sat-) (-D-)
#(#1) no  (-X''d) (-X''q) (T''d0) (T''q0) (-Xl-) (-A--) (-B--) (-C--) (-Xt-)
  1 0 41900.0 4.500 0.300 0.000 0.850 0.7000.0000 5.000 0.0000.000 0.000
  1 0 0.200 0.200 0.053 0.123
  2 0 41400.0 4.500 0.300 0.000 0.850 0.7000.0000 5.000 0.0000.000 0.000
  2 0 0.200 0.200 0.053 0.123
  3 0 41944.0 4.500 0.300 0.000 0.880 0.6900.0000 5.000 0.0000.000 0.000
  3 0 0.200 0.200 0.060 0.090
  4 0 46633.0 5.070 0.300 0.000 0.900 0.6800.0000 7.600 0.0000.000 0.000
  4 0 0.240 0.270 0.090 0.190
  7 0 46000.0 5.000 0.300 0.000 1.000 0.7000.0000 8.000 0.0000.000 0.000 0.01
  7 0 0.250 0.250 0.090 0.200
-999
DAVR
#bus no (-Ka-) (-Ta-) (-Kf-) (-Tf-) (-Tn-) (-Td-) (-Ke-) (-Te-) (Vsat) (Vsmx) (Vmax) (Vc)M
  1 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 13
  2 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 23
  3 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 33
  4 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 43
  7 0 30.00 0.050 0.00 0.000 0.000 0.000 0.00 0.000 0.00 0.00 0.00 73
-999

```

Figura C. 2- Dados dinâmicos - Sistema Sul Sudeste Brasileiro.

C.3 SISTEMA NEW-ENGLAND

C.3.1 Dados para o Fluxo de Potência

DBAR

(No)	O	TB(nome)	G(V)	(A)	(Pg)	(Qg)	(Qn)	(Qm)	(Bc)	(Pl)	(Ql)	(Sh)	(A(Vf)
1		bus #1	1048-9.5										11000
2		bus #2	1049-6.9										11000
3		bus #3	1031-9.8							322.	2.4		11000
4		bus #4	1004-11.							500.	184.		11000
5		bus #5	1005-9.4										11000
6		bus #6	1007-8.7										11000
7		bus #7	997-11.							233.8	84.		11000
8		bus #8	996-11.							522.	176.		11000
9		bus #9	1028-11.										11000
10		bus#10	1017-6.3										11000
11		bus#11	1013-7.1										11000
12		bus#12	1000-7.1							8.5	88.		11000
13		bus#13	1014 -7.										11000
14		bus#14	1012-8.7										11000
15		bus#15	1016-9.1							320.	153.		11000
16		bus#16	1032-7.7							329.4	32.3		11000
17		bus#17	1034-8.7										11000
18		bus#18	1031-9.5							158.	30.		11000
19		bus#19	1050 -3.										11000
20		bus#20	991-4.5							680.	103.		11000
21		bus#21	1032-5.3							274.	115.		11000
22		bus#22	1050-.82										11000
23		bus#23	1045 -1.							247.5	84.6		11000
24		bus#24	1038-7.6							308.6	-92.2		11000
25		bus#25	1058-5.5							224.	47.2		11000
26		bus#26	1052-6.8							139.	17.		11000
27		bus#27	1038-8.8							281.	75.5		11000
28		bus#28	1051-3.3							206.	27.6		11000
29		bus#29	1050-.54							283.5	26.9		11000
30	1	bus#30	1048-4.5	250.146.3	-9999999999								11000
31	1	bus#31	982.115573.2207.1	-9999999999						9.2	4.6		11000
32	1	bus#32	9831.73	650.205.3	-9999999999								11000
33	1	bus#33	9972.17	632.108.6	-9999999999								11000
34	1	bus#34	1012.734	508.166.5	-9999999999								11000
35	1	bus#35	10494.14	650.209.3	-9999999999								11000
36	1	bus#36	10646.83	560.102.1	-9999999999								11000
37	1	bus#37	10281.24	540. .411	-9999999999								11000
38	1	bus#38	10276.52	830.23.02	-9999999999								11000
39	2	bus#39	1030-11.1000.87.43	-9999999999						1104.	250.		11000

9999

Figura C. 3- Dados para o fluxo de potência - Sistema New England.

DLIN	(De)	O	(Pa)	NcEP	(R%)	(X%)	(Mvar)	(Tap)	(Tmn)	(Tmx)	(Phs)	(Bc)	(Cn)	(Ce)	Ns
	1		2	1	.35	4.11	69.87								
	1		39	1	.1	2.5	75.								
	2		3	1	.13	1.51	25.72								
	2		25	1	.7	.86	14.6								
	2		30	1		1.81		1.025							
	3		4	1	.13	2.13	22.14								
	3		18	1	.11	1.33	21.38								
	4		5	1	.08	1.28	13.42								
	4		14	1	.08	1.29	13.82								
	5		6	1	.02	.26	4.34								
	5		8	1	.08	1.12	14.76								
	6		7	1	.06	.92	11.3								
	6		11	1	.07	.82	13.89								
	6		31	1		2.5		1.07							
	7		8	1	.04	.46	7.8								
	8		9	1	.23	3.63	38.04								
	9		39	1	.1	2.5	120.								
	10		11	1	.04	.43	7.29								
	10		13	1	.04	.43	7.29								
	10		32	1		2.		1.07							
	12		11	1	.16	4.35		1.006							
	12		13	1	.16	4.35		1.006							
	13		14	1	.09	1.01	17.23								
	14		15	1	.18	2.17	36.6								
	15		16	1	.09	.94	17.1								
	16		17	1	.07	.89	13.42								
	16		19	1	.16	1.95	30.4								
	16		21	1	.08	1.35	25.48								
	16		24	1	.03	.59	6.8								
	17		18	1	.07	.82	13.19								
	17		27	1	.13	1.73	32.16								
	19		20	1	.07	1.38		1.06							
	19		33	1	.07	1.42		1.07							
	20		34	1	.09	1.8		1.009							
	21		22	1	.08	1.4	25.65								
	22		23	1	.06	.96	18.46								
	22		35	1		1.43		1.025							
	23		24	1	.22	3.5	36.1								
	23		36	1	.05	2.72									
	25		26	1	.32	3.23	51.3								
	25		37	1	.06	2.32		1.025							
	26		27	1	.14	1.47	23.96								
	26		28	1	.43	4.74	78.02								
	26		29	1	.57	6.25	102.9								
	28		29	1	.14	1.51	24.9								
	29		38	1	.08	1.56		1.025							

9999

Figura C. 4- Dados para o fluxo de potência - Sistema New England.

C.3.2 Dados para Estudos de Transitórios Eletromecânicos

```

DGEN
#(#1)noRM(Base) (-HH-) (-X'd) (-X'q) (-Xd-) (-Xq-) (-Ra-) (T'd0) (T'q0) (Xp-) (-Sat-) (-D-)
#(#1)no (-X"d) (-X"q) (T"d0) (T"q0) (-Xl-) (-A--) (-B--) (-C--) (-Xt-)
 30 0 21000.0 4.200 0.310 0.000 1.000 0.6900.001410.200 0.0000.125 0.000 4.0
 31 0 31000.0 3.030 0.697 1.700 2.950 2.8200.0270 6.560 1.5000.350 0.000 9.75
 32 0 31000.0 3.580 0.531 0.876 2.495 2.370.00386 5.700 1.5000.304 0.00010.00
 33 0 31000.0 2.860 0.436 1.660 2.620 2.580.00222 5.690 1.5000.295 0.00010.00
 34 0 31000.0 2.600 1.320 1.660 6.700 6.2000.0014 5.400 0.4400.540 0.000 3.00
 35 0 31000.0 3.480 0.500 0.814 2.540 2.4100.0615 7.300 0.4000.224 0.00010.00
 36 0 31000.0 2.640 0.490 1.860 2.950 2.920.00268 5.660 1.5000.322 0.000 8.00
 37 0 31000.0 2.430 0.570 0.911 2.900 2.800.00686 6.700 0.4100.280 0.000 9.00
 38 0 31000.0 3.450 0.570 0.587 2.106 2.0500.0030 4.790 1.9600.298 0.00014.00
 39
-999

```

Figura C. 5- Dados dinâmicos - Sistema New England.

Os dados dos reguladores de tensão no formato do programa PACDYN podem ser obtidos em (FERRAZ, 2002).

C.4 SISTEMA DE 2 ÁREAS E 4 GERADORES

Nessa etapa do documento, são reproduzidos os dados disponíveis em (IEEE, 2015).

C.4.1 Dados para o Fluxo de Potência

```

DBAR
(Num)OETGb( nome )G1( V) ( A) ( Pg) ( Qg) ( Qn) ( Qm) (Bc ) ( P1) ( Q1) ( Sh)Are(Vf)
 1 L1 1Gerador1 103020.1 700.185.0-999999999 11000
 2 L1 1Gerador2 101010.3 700.234.7-999999999 11000
 3 L2 1Gerador3 1030 -7.719.7176.3-999999999 21000
 4 L1 1Gerador4 1010-17. 700.202.4-999999999 21000
 5 L 2Barra5 100613.6 11000
 6 L 2Barra6 0978 3.5 11000
 7 L 2Barra7 0961-4.9 967. 100. 200. 11000
 8 L 2Barra8 949-18. 11000
 9 L 2Barra9 971-32. 1767. 100. 350. 21000
10 L 2Barra10 983-24. 21000
11 L 2Barra11 1008-14. 21000
99999

```

Figura C. 6- Dados para o fluxo de potência - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

```

DLIN
(De) d O d (Pa) )NcEP ( R% ) ( X% ) (Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc ) (Cn) (Ce)Ns (Cq) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)
1      5 1      1.6666      1.      900 1000 1000
2      6 1      1.6666      1.      900 1000 1000
3     11 1      1.6666      1.      900 1000 1000
4     10 1      1.6666      1.      900 1000 1000
6      5 1      .25  2.5  4.375      900 1000 1000
6      7 1      .1   1.   1.75      1800 2000 2000
7      8 1      1.1  11.  19.25      900 1000 1000
7      8 2      1.1  11.  19.25      900 1000 1000
8      9 1      1.1  11.  19.25      900 1000 1000
8      9 2      1.1  11.  19.25      900 1000 1000
9     10 1      .1   1.   1.75      1800 2000 2000
10    11 1      .25  2.5  4.375      900 1000 1000
99999

```

Figura C. 7- Dados para o fluxo de potência - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

C.4.2 Dados para Estudos de Transitórios Eletromecânicos

```

DMDG MD03
( Gerador 01
(No) (CS) (Xd) (Xq) (X'd) (X'q) (X''d) (Xl) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
0001 0001 180.0 170.0 30.0 55.0 25.0 20.0 8.0 0.4 0.03 0.05
(No) (Ra) (H) (D) (MVA) Fr C
0001 .0025 6.5 900 60 N
(
( Gerador 02
(No) (CS) (Xd) (Xq) (X'd) (X'q) (X''d) (Xl) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
0002 0001 180.0 170.0 30.0 55.0 25.0 20.0 8.0 0.4 0.03 0.05
(No) (Ra) (H) (D) (MVA) Fr C
0002 .0025 6.5 900 60 N
( Gerador 03
(No) (CS) (Xd) (Xq) (X'd) (X'q) (X''d) (Xl) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
0003 0001 180.0 170.0 30.0 55.0 25.0 20.0 8.0 0.4 0.03 0.05
(No) (Ra) (H) (D) (MVA) Fr C
0003 .0025 6.175 900 60 N
( Gerador 04
(No) (CS) (Xd) (Xq) (X'd) (X'q) (X''d) (Xl) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
0004 0001 180.0 170.0 30.0 55.0 25.0 20.0 8.0 0.4 0.03 0.05
(No) (Ra) (H) (D) (MVA) Fr C
0004 .0025 6.175 900 60 N
(
999999

```

Figura C. 8- Dados dinâmicos - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

A Figura C.9 apresenta os dados do regulador de tensão do gerador 1. Os reguladores de tensão dos outros geradores são iguais ao apresentado.

```

DCDU
(
(*****
(ncdu) ( nome cdu )
  101  THY_TGR
-----
(EFPAR (npar) (   valpar   )
-----
DEFPAR #Tr    0.01
DEFPAR #Ka    200.0
DEFPAR #Ta    1.0
DEFPAR #Tb    1.0
DEFPAR #Vamin -4.0
DEFPAR #Vamax  4.0
-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
-----
0001 ENTRAD          VREF
0002 IMPORT VTR      ET
0003 LEDLAG          ET  VC    1.0      1.0  #Tr
0004 SOMA            +VREF X1
                       -VC  X1
0005 LEDLAG          X1  X2    1.0  #Ta  1.0  #Tb
0006 GANHO           X2  X3    #Ka
0007 LIMITA          X3  X4
                       Vamin  Vamax
0008 EXPORT EFD     X4
-----
(DEFVA          (Vdef) ( D1 )
-----
DEFVAL          Vamin #Vamin
DEFVAL          Vamax #Vamax
FIMCDU

```

Figura C. 9- Dados dinâmicos - Sistema 2 Áreas e 4 Geradores.

C.5 CONSIDERAÇÕES DO APÊNDICE

Esse Apêndice apresentou os dados dos sistemas testes utilizados neste trabalho. Os dados são apresentados no formato dos programas ANAREDE e PACDYN, cujas versões acadêmicas foram utilizadas. As versões são licenciadas à Universidade Federal de Juiz de Fora e à Universidade Federal de São João del-Rei.

Apêndice D – Exemplo Tutorial

D.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse Apêndice apresenta um exemplo tutorial com o objetivo de clarear: (i) o processo de obtenção das matrizes da formulação em espaço de estados para o sistema em malha aberta e fechada e (ii) a avaliação das soluções nos métodos de otimização.

D.2 SISTEMA UTILIZADO

D.2.1 Descrição do Sistema

O sistema teste utilizado neste exemplo tutorial, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura D.1, é composto por três unidades geradoras. Os geradores das barras 1 e 2 são representados por um modelo de quinta ordem e equipados com reguladores de tensão estáticos, com alto ganho e baixa constante de tempo (vide seção A.3.2). O gerador da barra 3 é modelado como uma barra infinita.

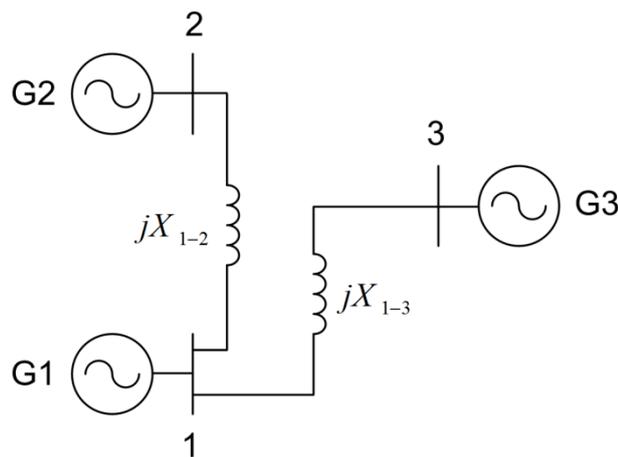


Figura D. 1- Sistema tutorial.

Os dados para a execução do fluxo de potência e para a análise da dinâmica do SEP são apresentados a seguir.

D.2.2 Dados para o Fluxo de Potência

Os dados da rede elétrica, no formato do programa ANAREDE, são apresentados na Figura D.2. O leitor é referido ao manual (CEPEL, 2009a) para obter maiores informações.

```

□ TITU
└ Sistema de 2 maquinas contra Barra Infinita
□ DCTE
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
BASE 100. DASE 100. TEPA .1E-6 EXST .4E-6 TETP 5. TBPA 5.
TLPP 1. TEPR .1E-6 QLST .4E-6 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 .2E-6 VFLD 70. ZMIN .001 HIST 470 LFIT 10
ACIT 30 LFCV 1 DCIT 10 VSIT 10 LPIT 50 LFLP 10
PDIT 10 LCRT 96 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. VINF 1. VSUP 1.
99999
□ DBAR
(Num)OETGb( nome )G1( V) ( A) ( Pg) ( Qg) ( Qn) ( Qm) (Bc ) ( P1) ( Q1) ( Sh)Are(Vf)
1 L1 Maq1 100036.9 50.77.98-999999999 11000
2 L1 Maq2 100045.5 150.11.31-999999999 11000
3 L2 Barra Inf. 1000 0.-200.66.67-999999999 11000
99999
□ DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% ) ( X% ) (Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc ) (Cn) (Ce)Ns
1 2 1 10.
1 3 1 30.
99999
FIM

```

Figura D. 2- Dados para o fluxo de potência.

D.2.3 Dados para Estudo de Transitórios Eletromecânicos

Os dados para estudos da dinâmica no formato do programa PacDyn são apresentados na Figura D.3: são compostos pelos modelos dos geradores e dos reguladores de tensão. O leitor é referido ao manual (CEPEL, 2009b) para obter maiores informações.

```

□ TITU
  ///          BANCO DE DADOS DINAMICOS DO PACDYN          ///
  ///          SISTEMA INTERLIGADO SUL-SE                  ///

□ DSYS
# N = Network File: A = ANAREDE Fomatted File
#                               H = ANAREDE History File
#                               P = PACDYN Formatted File (DEFAULT)
# 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) (Xp-) (-Sat-) (--D-)
#(#1 )no (-X"d) (-X"q) (T"d0) (T"q0) (-Xl-) (-A--) (-B--) (-C--) (-Xt-)
# ILHA DOS POMBOS (2 X 26)
# 2 maquinas (52)
  0001  6 26.00 3.096 .3848 0.000 1.404 .7696 0.000 8.600 0.000 0.00  0.000
  0001  2 .2780 0.000 0.026 0.080 0.156 .0212 8.230 0.8
# 6 maquinas (156)
  0002  6 26.00 3.096 .3848 0.000 1.404 .7696 0.000 8.600 0.000 0.00  0.000
  0002  6 .2780 0.000 0.026 0.080 0.156 .0212 8.230 0.8
#
  0003
-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
-999
#
END

```

Figura D. 3- Dados para estudos de dinâmica do SEP.

D.3 O PROGRAMA PACDYN

O programa PacDyn é dedicado à análise da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência de grande porte (CEPEL, 2009b). Entre as funcionalidades básicas encontram-se: (i) análise modal e (ii) ferramentas para o projeto de controladores utilizando a Teoria de Controle Clássico.

A obtenção do modelo linearizado em espaço de estados para a análise modal é realizada a partir do (i) arquivo com os dados dinâmicos e (ii) do arquivo histórico obtido do programa ANAREDE com os dados do fluxo de potência convergido. A Figura D.4 apresenta a tela principal do programa PacDyn com o módulo de gerenciamento dos casos analisados.

É importante mencionar que o manual do programa Pacdynam (CEPEL, 2009b) é composto por seis capítulos, sendo que o:

- *Capítulo 5* apresenta toda a interface gráfica do programa. Entre as várias funcionalidades disponíveis, são apresentados exemplos sobre (i) o cálculo de pólos, (ii) o cálculo de fatores de observabilidade, de controlabilidade e de

participação, (iii) o cálculo de resíduos da função de transferência, (iv) e a exportação das matrizes em espaço de estados para a plataforma MATLAB[®].

- *Capítulo 6* apresenta um estudo de caso tutorial utilizando uma versão modificada do Sistema de 2 Áreas e 4 Geradores, permitindo que o usuário familiarize-se com o uso do programa.

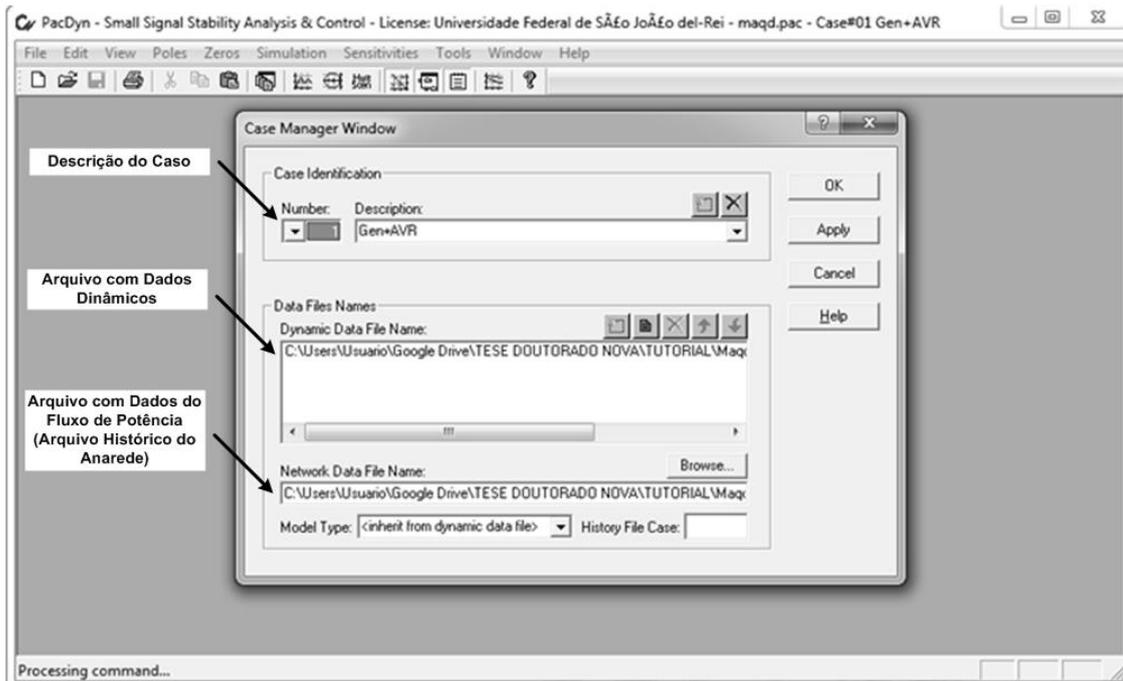


Figura D. 4- Tela principal do programa PacDyn.

D.4 SISTEMA EM MALHA ABERTA

O exemplo tutorial apresentado neste Apêndice considera um único ponto de operação. Os detalhes sobre a implementação computacional foram apresentados na seção 4.8.2, na qual o leitor encontrará a listagem das funções utilizadas para o cálculo de autovalores, coeficientes de amortecimento e realimentação na plataforma MATLAB[®].

A Figura D.5 apresenta as matrizes da formulação em espaço de estados para o sistema em malha aberta. A partir dos autovalores do sistema em malha aberta, apresentados na Figura D.6, observa-se que o sistema é instável (o amortecimento do autovalor dominante é igual a -11,24%) e requer a instalação de estabilizadores.

$$\begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -49.9153 & 0 & 29.5054 & 0 & -4.1827 & 0.0620 & 5.5295 & 2.5426 & 0 & 0 & -0.4869 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -29.9050 & 0 & 0 & 14.1998 & 0 & -3.7727 & 8.2047 & 0 & 0 & -9.4962 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3390 & 0 & -16.7964 & 0 & -0.0638 & 0.1163 & 0.0844 & 0.0388 & 0 & 0 & -0.0074 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1631 & 0.3732 & 0 & 0 & -0.5663 & 0 & 0.1862 & -0.2871 & 0 & 0 & 0.3522 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 376.9911 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -361.9168 & -124.3288 & 0 & 0 & 102.2924 & -20.0000 & -532.0699 & -507.6185 & 0 & 0 & 306.8772 & 0 & 1800 & 0 \\ 1.8432 & -0.8475 & 0 & 0 & 1.5918 & 0 & -43.8293 & 0 & 38.0358 & 0 & -5.1577 & 0.0620 & 0 & 0 \\ 1.2576 & 2.7349 & 0 & 0 & -3.6414 & 0 & 0 & -20.8745 & 0 & 0 & 4.5247 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0281 & -0.0129 & 0 & 0 & 0.0243 & 0 & 0.4319 & 0 & -0.7985 & 0 & -0.0787 & 0.1163 & 0 & 0 \\ -0.0063 & -0.0832 & 0 & 0 & 0.1174 & 0 & -0.2011 & 0.1189 & 0 & 0 & -0.1913 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 376.9911 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -241.1499 & -43.9641 & 0 & 0 & 12.6849 & 0 & -915.5641 & -641.7005 & 0 & 0 & 298.8635 & -20.0000 & 0 & 1800 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura D. 5- Matrizes da formulação em espaço de estados - Malha aberta.

	Real	Imaginary	Freq. (Hz)	Damp (%)
1	0,7002	6,1879	0,9848	-11,243
2	0,7002	-6,1879	-0,9848	-11,243
3	-1,3544	12,669	2,0163	10,631
4	-1,3544	-12,669	-2,0163	10,631
5	-14,717	7,0145	1,1164	90,271
6	-14,717	-7,0145	-1,1164	90,271
7	-51,728	0.	0.	100,00
8	-44,699	0.	0.	100,00
9	-29,322	0.	0.	100,00
10	-19,030	0.	0.	100,00
11	-17,501	0.	0.	100,00
12	-9,0958	0.	0.	100,00

BANCO DE DADOS DINAMICOS DO PACDYN

Figura D. 6- Autovalores do sistema em malha aberta.

Os estabilizadores a serem instalados nos geradores 1 e 2 possuem a estrutura apresentada na seção 4.2.3: são utilizados 2 blocos de compensação de fase e a constante de tempo do filtro *washout* é igual à 3 segundos.

D.5 AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Conforme apresentado na seção 4.3, neste trabalho, cada solução do problema de otimização corresponde a um vetor com o ajuste dos estabilizadores do SEP: para cada estabilizador tem-se três parâmetros de ajuste.

A Figura D.7 apresenta um exemplo de ajuste para os dois estabilizadores a serem instalados no sistema. A partir do vetor de solução, as funções de transferência de cada estabilizador são obtidas.

$[\text{var}] =$	K_1	K_2	α_1	α_2	ω_1	ω_2	
	<i>Ganho</i>		<i>Fase</i>				
$[\text{var}] =$	25,0	25,0	8,5	8,5	34,3	34,3	

$$ESP_1(s) = K_1 \times \frac{\left(1 + s \frac{\sqrt{\alpha_1}}{\omega_p}\right)^{nb}}{\left(1 + s \frac{1}{\omega_1 \cdot \sqrt{\alpha_1}}\right)^{nb}} \times \frac{(s \cdot T_w)}{(1 + s \cdot T_w)} \Rightarrow ESP_1(s) = 25 \cdot \frac{(1 + s \cdot 0,085)^2}{(1 + s \cdot 0,010)^2} \cdot \frac{(s \cdot 3)}{(1 + s \cdot 3)}$$

$$ESP_2(s) = K_2 \times \frac{\left(1 + s \frac{\sqrt{\alpha_2}}{\omega_2}\right)^{nb}}{\left(1 + s \frac{1}{\omega_2 \cdot \sqrt{\alpha_2}}\right)^{nb}} \times \frac{(s \cdot T_w)}{(1 + s \cdot T_w)} \Rightarrow ESP_2(s) = 25 \cdot \frac{(1 + s \cdot 0,085)^2}{(1 + s \cdot 0,010)^2} \cdot \frac{(s \cdot 3)}{(1 + s \cdot 3)}$$

Figura D. 7- Ajuste de estabilizadores.

Conforme a seção 4.8.2, as funções de transferência dos controladores devem ser expressas em espaço de estados, conforme mostrado na Figura D.8.

$$\begin{bmatrix} A_{C1} & B_{C1} \\ C_{C1} & D_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{C2} & B_{C2} \\ C_{C2} & D_{C2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} -200.33 & -10067 & -3333.4 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline -3.1935e+05 & -1.7933e+07 & -6.0209e+06 & 1806.3 \end{array} \right]$$

Figura D. 8- Ajuste de estabilizadores em espaço de estados.

Em malha fechada o sistema é estável, conforme é observado a partir da Figura D.9, que apresenta o conjunto de autovalores: o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante é igual a 27,89%.

	Real	Imaginary	Freq. (Hz)	Damp (%)
1	-1,8472	6,3602	1,0123	27,890
2	-1,8472	-6,3602	-1,0123	27,890
3	-4,3683	12,980	2,0659	31,895
4	-4,3683	-12,980	-2,0659	31,895
5	-13,830	6,3992	1,0185	90,755
6	-13,830	-6,3992	-1,0185	90,755
7	-24,574	7,2186	1,1489	95,946
8	-24,574	-7,2186	-1,1489	95,946
9	-41,361	4,1112	0,6543	99,510
10	-41,361	-4,1112	-0,6543	99,510
11	-114,60	1,0401	0,1655	99,996
12	-114,60	-1,0401	-0,1655	99,996
13	-86,924	0,3166	0,05039	99,999
14	-86,924	-0,3166	-0,05039	99,999
15	-19,227	0.	0.	100,00
16	-7,8605	0.	0.	100,00
17	-0,3507	0.	0.	100,00
18	-0,3352	0.	0.	100,00

BANCO DE DADOS DINAMICOS DO PACDYN

Figura D. 9- Autovalores do sistema em malha fechada.

De acordo com a seção 4.3, a função de avaliação da solução em análise é igual ao mínimo coeficiente de amortecimento: $f = \xi_{\min} = 27,89\%$.

Se existissem pontos de operação adicionais, o processo de realimentação seria repetido para todos eles e a função de avaliação seria o menor coeficiente de amortecimento dentre todas as condições operativas.

Após a inclusão dos controladores, vide as seções 3.8 e 4.2.2, a matriz de estados (A_F) do sistema em malha fechada será dada de acordo com a Figura D.10. Os autovalores dessa matriz foram apresentados na Figura D.9

$$[A_f] = \begin{bmatrix} A_{f1} & A_{f2} \\ A_{f3} & A_{f4} \end{bmatrix}$$

$$[A_{f1}] = \begin{bmatrix} -49.915 & 0 & 29.505 & 0 & -4.1827 & 0.062002 & 5.5295 & 2.5426 & 0 \\ 0 & -29.905 & 0 & 0 & 14.2 & 0 & -3.7727 & 8.2047 & 0 \\ 0.33899 & 0 & -16.796 & 0 & -0.063822 & 0.11628 & 0.084374 & 0.038796 & 0 \\ -0.16311 & 0.37319 & 0 & 0 & -0.56635 & 0 & 0.18623 & -0.2871 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 376.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -361.92 & -124.33 & 0 & 3.2513e+06 & 102.29 & -20 & -532.07 & -507.62 & 0 \\ 1.8432 & -0.84752 & 0 & 0 & 1.5918 & 0 & -43.829 & 0 & 38.036 \\ 1.2576 & 2.7349 & 0 & 0 & -3.6414 & 0 & 0 & -20.874 & 0 \\ 0.028125 & -0.012932 & 0 & 0 & 0.024289 & 0 & 0.43185 & 0 & -0.79849 \end{bmatrix}$$

$$[A_{f2}] = \begin{bmatrix} 0 & -0.4869 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -9.4962 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0074295 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.35217 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 306.88 & 0 & -5.7484e+08 & -3.228e+10 & -1.0838e+10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5.1577 & 0.062002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.5247 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0787 & 0.11628 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_{f3}] = \begin{bmatrix} -0.0063291 & -0.083191 & 0 & 0 & 0.11739 & 0 & -0.20113 & 0.11891 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -241.15 & -43.964 & 0 & 0 & 12.685 & 0 & -915.56 & -641.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura D. 10a- Matriz de estados A_F do sistema em malha fechada.

$$[A_{f4}] = \begin{bmatrix} 0 & -0.19132 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 376.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.2513e+06 & 298.86 & -20 & 0 & 0 & 0 & -5.7484e+08 & -3.228e+10 & -1.0838e+10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -200.33 & -10067 & -3333.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -200.33 & -10067 & -3333.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura D. 10b- Matriz de estados A_f do sistema em malha fechada.

D.6 CONSIDERAÇÕES DO APÊNDICE

Nesse Apêndice foi apresentado um estudo de caso tutorial com o objetivo de clarear: (i) o processo de obtenção das matrizes da formulação em espaço de estados para o sistema em malha aberta e fechada e (ii) a avaliação das soluções nos métodos de otimização. Aspectos associados a análise modal no programa Pacdyn também foram tratados.