

MAXWELL MARTINS DE MENEZES

**MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS NO AJUSTE DE ESPs E
CONTROLADORES DE AMORTECIMENTO INSERIDOS NO FACTS
TCSC EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Ilha Solteira
2014



MAXWELL MARTINS DE MENEZES

**MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS NO AJUSTE DE ESPs E
CONTROLADORES DE AMORTECIMENTO INSERIDOS NO FACTS
TCSC EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP - Campus de
Ilha Solteira, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo
Orientador

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

M543m Menezes, Maxwell Martins de.
Métodos de otimização aplicados no ajuste de ESPS e controladores de amortecimento inseridos no FACTS TCSC em sistemas elétricos de potência / Maxwell Martins de Menezes. - Ilha Solteira: [s.n.], 2014
115 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Percival Bueno de Araujo
Inclui bibliografia

1. Estabilidade a pequenas perturbações. 2. Facts. 3. Particle swarm optimization. 4. Bacterial foraging optimization.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Métodos de Otimização Aplicados no Ajuste de ESPs e Controladores de Amortecimento Inseridos no FACTS TCSC em Sistemas Elétricos de Potência

AUTOR: MAXWELL MARTINS DE MENEZES

ORIENTADOR: Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dra. MARA LÚCIA MARTINS LOPES

Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. FRANCISCO DAMASCENO FREITAS

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade de Brasília



Prof. Dr. WALMIR DE FREITAS FILHO

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 09 de outubro de 2014.

DEDICATÓRIA

À minha família, em especial aos meus pais Marcos e Tânia, ao meu irmão Marcos Junior e a minha namorada Gabriela, por todo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Nesta caminhada tive a oportunidade de conhecer diversas pessoas, as quais tenho admiração e carinho. Primeiramente, gostaria de agradecer a minha força espiritual que sempre me acompanha, a qual chamo de Deus. Tenho a convicção que sua companhia é fundamental para superar os obstáculos da vida com alegria e determinação.

Base de minha formação pessoal, meus pais Marcos Menezes e Tânia Mara sempre me ajudaram e apoiaram, mesmo em momentos delicados, com todo suporte necessário. Não posso esquecer de mencionar meu irmão Marcos Menezes Jr, que além de tudo é um grande amigo. Tenho orgulho de fazer parte desta família, a qual tenho todo respeito e carinho.

Atualmente, minha namorada Gabriela Cassol tem vivido ao meu lado e não poderia deixar de mencioná-la. Gostaria de agradecer o prazer de ter sua companhia e pedir desculpas pelos momentos que possivelmente não estive presente.

Em especial, devo a oportunidade de realizar este trabalho a duas pessoas, as quais tenho uma grande admiração e respeito. Me refiro a Ricardo Frangiosi de Moura (primo e amigo pessoal) e Percival Bueno de Araujo (meu orientador). Agradeço a oportunidade de trabalhar e conviver com estas pessoas que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Aos meus amigos do departamento de engenharia elétrica, Danilo do Valle, Marcos Furini, Luis Fabiano Barone, Elenilson Fortes, João Zamperin, Carlos Pupin, Naryanne Rodrigues e Alexandre Amaral, um muito obrigado pela convivência e de propiciar encontros produtivos e descontraídos, que certamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Meus amigos pessoais, Diógenes Vitali, Fábio Mussa, Juliano Spuldaro, Rodolfo Viana e Thiago Salla, gostaria de manifestar o prazer de ter pessoas especiais em minha convivência.

Não posso deixar de mencionar os amigos de trabalho, Marconi Januário, Daiane Muniz, Kleyton Hoffmann, Vitor Couto e Vlademir Oliveira por tornar a convivência em nossos ambiente de trabalho mais agradável. Também gostaria de agradecer à Rose Maria Makowski pelas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Em nome de José Carlos Azzolini, gostaria de agradecer à Universidade do Oeste de Santa Catarina por ter dado todo o suporte necessário. Tenho certeza que o afastamento concedido teve uma participação satisfatória para a conclusão do trabalho.

Agradeço também ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista pela qualidade de ensino, dedicação e o apoio financeiro oferecidos.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho. Em especial ao professor Laurence Duarte Colvara, a professora Anna Diva Plasencia Lotufo e aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista campus de Ilha Solteira.

EPIGRAFE

**“Mesmo desacreditado e ignorado por todos,
não posso desistir, pois para mim,
vencer é nunca desistir.”**

Albert Einstein

RESUMO

O trabalho tem como propósito principal a análise da estabilidade a pequenas perturbações em Sistemas Elétricos de Potência, que é representado pelo Modelo Sensibilidade de Potência. São analisados três sistemas teste, conhecidos na literatura como Sul-Brasileiro, simétrico de duas áreas e *New England*. A princípio os sistemas teste foram submetidos a um ponto de operação de modo a serem instáveis. É proposta a utilização dos Estabilizadores de Sistema de Potência e do dispositivo *Thyristor Controlled Series Capacitor* em conjunto com o controlador *Power Oscillation Damping*. Estes controladores possuem a função de inserir amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência do Sistema Elétrico de Potência. Neste caso é necessário alocar e ajustar os parâmetros dos respectivos controladores de forma correta. As localizações dos controladores são determinadas pelos fatores de participação (Estabilizadores de Sistema de Potência) e a distância entre polo de interesse e zero da função de transferência de malha aberta do controlador *Power Oscillation Damping* (conjunto *Thyristor Controlled Series Capacitor-Power Oscillation Damping*). Para o ajuste de parâmetros dos controladores (Estabilizadores de Sistema de Potência e *Power Oscillation Damping*) são utilizados dois algoritmos de otimização baseados em enxame de partículas, sendo eles o *Particle Swarm Optimization* e de *Bacterial Foraging Optimization* orientado pelas formas de movimentação do *Particle Swarm Optimization*. A atuação dos controladores alocados e ajustados de acordo com os métodos propostos aumenta o amortecimento dos modos oscilatórios de baixa frequência dos sistemas teste. Este fato é verificado pela análise dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Estabilidade a pequenas perturbações. FACTS. TCSC. ESP. POD. Particle swarm optimization. Bacterial foraging optimization.

ABSTRACT

This work aims to analyze small signal stability in power systems represented by the power sensitivity model. Three test systems known in the literature, such as South Brazilian, Two Symmetrical Areas and New England are analyzed. At first, the systems were submitted to an operation point to become unstable. The Power System Stabilizers and the device Thyristor Controlled Series Capacitor with the Power Oscillation Damping controller are proposed to use. These controllers insert additional damping to the low frequencies oscillations. In this case, it is necessary to allocate and adjust the parameters of the controllers correctly. The controller position is determined by the participation factors (Power System Stabilizers) and the distance between the interest pole and the zero of the open-loop transfer function of the Power Oscillation Damping Controller (Thyristor Controlled Series Capacitor-Power Oscillation Damping). Two algorithms based on the particle swarm are used to adjust the controller parameters (Power System Stabilizer and the Power Oscillation Damping), that are Particle Swarm Optimization and Bacterial Foraging Optimization oriented by the movement forms of the Particle Swarm Optimization. The actuation of the controller both allocated and adjusted according to the proposed method improves the low frequency oscillation damping. The results obtained confirm this conclusion.

Keywords: Small-signal stability. FACTS. TCSC. ESP. POD. Particle swarm optimization. Bacterial foraging optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Balço de Potência Ativa e Reativa no Sistema Multimáquinas	30
Figura 2	Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação - RAT	35
Figura 3	Circuito Equivalente do Dispositivo TCSC	40
Figura 4	Modelo Dinâmico do Dispositivo TCSC	43
Figura 5	Modelo Dinâmico do ESP	46
Figura 6	Modelo Dinâmico do Dispositivo TCSC-POD	48
Figura 7	Divisão dos Blocos de <i>washout</i> e avanço-atraso de fase do POD	49
Figura 8	Deslocamento de polos em ocasiões diferentes	53
Figura 9	Deslocamento da posição de uma partícula	55
Figura 10	Representação de um indivíduo nos algoritmos PSO e BF-PSO	60
Figura 11	Região de concentração para os autovalores desejados	62
Figura 12	Sistema teste Sul-Brasileiro	64
Figura 13	Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 4, 5, 7, 8 e 9) do sistema teste Sul-Brasileiro	65
Figura 14	Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 1, 2, 3 e 6) do sistema teste Sul-Brasileiro	65
Figura 15	Localização dos polos no plano complexo com ajuste dos controladores pelo PSO e BF-PSO no sistema teste Sul-Brasileiro	71
Figura 16	Comparação de níveis de amortecimento considerando variações de cargas nos barramentos do sistema teste Sul-Brasileiro	72
Figura 17	Sistema teste simétrico de duas áreas	72
Figura 18	Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios do sistema teste simétrico de duas áreas	74
Figura 19	Localização dos polos no plano complexo com ajuste dos controladores pelo PSO e BF-PSO no sistema teste simétrico de duas áreas	78

Figura 20	Ângulo interno do gerador síncrono G1 do sistema teste simétrico de duas áreas	79
Figura 21	Comparação de níveis de amortecimento considerando variações de cargas nos barramentos do sistema teste simétrico de duas áreas	80
Figura 22	Sistema teste <i>New England</i>	81
Figura 23	Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 6 à 9) do sistema teste <i>New England</i>	82
Figura 24	Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 1 à 5) do sistema teste <i>New England</i>	83
Figura 25	Trajetória do polo relacionado ao modo interárea: TCSC-POD instalado na LT 30-31	84
Figura 26	Trajetória do polo relacionado ao modo interárea: TCSC-POD instalado na LT 16-17	85
Figura 27	Localização dos polos no plano complexo com ajuste dos controladores pelo PSO e BF-PSO no sistema teste <i>New England</i>	90
Figura 28	Ângulo interno do gerador síncrono G5 do sistema teste <i>New England</i>	91
Figura 29	Comparação de níveis de amortecimento considerando variações de cargas nos barramentos do sistema teste <i>New England</i>	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (caso base sul-brasileiro)	64
Tabela 2	Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G3, G4, G8 e G9) no sistema teste Sul-Brasileiro	66
Tabela 3	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 5 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro	67
Tabela 4	Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10) no sistema teste Sul-Brasileiro	67
Tabela 5	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 9 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro	68
Tabela 6	Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G3, G4, G8 e G9) no sistema teste Sul-Brasileiro	68
Tabela 7	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 5 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro	69
Tabela 8	Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10) no sistema teste Sul-Brasileiro	69
Tabela 9	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 9 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro	70
Tabela 10	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (caso base duas áreas)	73
Tabela 11	Polos, zeros e suas respectivas diferenças relacionadas ao modo interárea do controlador POD no sistema teste simétrico de duas áreas	74

Tabela 12	Configuração do PSO com a atuação do TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas	75
Tabela 13	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas	75
Tabela 14	Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G2 e G3) e TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas	75
Tabela 15	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 2 ESPs e TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas	76
Tabela 16	Configuração do BF-PSO com a atuação do TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas	76
Tabela 17	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas	76
Tabela 18	Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G2 e G3) e TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas	77
Tabela 19	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 2 ESPs e TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas	77
Tabela 20	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (caso base <i>New England</i>)	82
Tabela 21	Polos, zeros e suas respectivas diferenças relacionadas ao modo interárea do controlador POD no sistema teste <i>New England</i>	83
Tabela 22	Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G5 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste <i>New England</i>	86
Tabela 23	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 3 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste <i>New England</i>	86
Tabela 24	Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste <i>New England</i>	87

Tabela 25	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 8 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste <i>New England</i>	87
Tabela 26	Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G5 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste <i>New England</i>	88
Tabela 27	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 3 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste <i>New England</i>	88
Tabela 28	Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste <i>New England</i>	89
Tabela 29	Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 8 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste <i>New England</i>	89
Tabela 30	Dados dos geradores síncronos - sistema teste Sul-Brasileiro	102
Tabela 31	Dados dos reguladores automáticos de tensão - sistema teste Sul-Brasileiro	102
Tabela 32	Dados das linhas de transmissão - sistema teste Sul-Brasileiro	102
Tabela 33	Dados das barras e carregamento - sistema teste Sul-Brasileiro	105
Tabela 34	Dados dos geradores síncronos - sistema teste de duas áreas	106
Tabela 35	Dados dos reguladores automáticos de tensão - sistema teste de duas áreas	106
Tabela 36	Dados das linhas de transmissão - sistema teste de duas áreas	107
Tabela 37	Dados das barras e carregamento - sistema teste de duas áreas	107
Tabela 38	Dados dos geradores síncronos - sistema teste <i>New England</i>	108
Tabela 39	Dados dos reguladores automáticos de tensão - sistema teste <i>New England</i>	108
Tabela 40	Dados das linhas de transmissão - sistema teste <i>New England</i>	108
Tabela 41	Dados das barras e carregamento - sistema teste <i>New England</i>	110

LISTA DE SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
ESP	Estabilizador do Sistema de Potência
RAT	Regulador Automático de Tensão
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
SVC	<i>Static VAR Compensator</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
PAR	<i>Phase Angle Regulator</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>
IPFC	<i>Interline Power Flow Controller</i>
GUPFC	<i>Generalized Unified Power Flow Controller</i>
POD	<i>Power Oscillation Damping</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
FTMA	Função de Transferência de Malha Aberta
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
BFO	<i>Bacterial Foraging Optimization</i>
MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
FTMF	Função de Transferência em Malha Fechada

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_k	Ângulo interno do gerador síncrono
\vec{E}_k	Tensão interna do gerador síncrono
x_d'	Reatância transitória de eixo direto do gerador síncrono
\bar{i}_k	Corrente elétrica terminal do gerador síncrono
\bar{V}_k	Tensão elétrica terminal do gerador síncrono
\vec{E}_{ak}	Tensão de eixo em quadratura do gerador síncrono
x_{qk}	Reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador síncrono
V_{dk}	Tensão terminal de eixo direto do gerador síncrono
V_{qk}	Tensão terminal de eixo em quadratura do gerador síncrono
I_{dk}	Corrente terminal de eixo direto
I_{qk}	Corrente terminal de eixo em quadratura
P_{gk}	Potência ativa gerada pelo gerador síncrono
Q_{gk}	Potência reativa gerada pelo gerador síncrono
Z_{kl}	Impedância da linha de transmissão entre as barras k e l
Z_{km}	Impedância da linha de transmissão entre as barras k e m
A_{1gk}	Coefficiente de sensibilidade da potência ativa do gerador síncrono
A_{2gk}	Coefficiente de sensibilidade da potência ativa do gerador síncrono
A_{3gk}	Coefficiente de sensibilidade da potência ativa do gerador síncrono
R_{1gk}	Coefficiente de sensibilidade da potência reativa do gerador síncrono
R_{2gk}	Coefficiente de sensibilidade da potência reativa do gerador síncrono
R_{3gk}	Coefficiente de sensibilidade da potência reativa do gerador síncrono
P_{kl}	Potência ativa transferida da barra k para a barra l
Q_{kl}	Potência reativa transferida da barra k para a barra l
P_{km}	Potência ativa transferida da barra k para a barra m

Q_{km}	Potência reativa transferida da barra k para a barra m
\bar{Y}_{km}	Admitância da linha de transmissão entre as barras k e m
I_{km}	Corrente elétrica entre as barras k e m
A_{1km}	Coefficiente de sensibilidade da potência ativa entre as barras k e m
A_{2km}	Coefficiente de sensibilidade da potência ativa entre as barras k e m
A_{3km}	Coefficiente de sensibilidade da potência ativa entre as barras k e m
R_{1km}	Coefficiente de sensibilidade da potência reativa entre as barras k e m
R_{2km}	Coefficiente de sensibilidade da potência reativa entre as barras k e m
R_{3km}	Coefficiente de sensibilidade da potência reativa entre as barras k e m
ΔP_{gk}	Variações de potência ativa no gerador síncrono
ΔQ_{gk}	Variações de potência reativa no gerador síncrono
ΔP_{kl}	Variações de potência ativa entre as barras k e l
ΔQ_{kl}	Variações de potência reativa entre as barras k e l
Ω_k	Conjunto de barras conectadas à barra k
ΔP_{Lk}	Variações de potência ativa na carga conectada à barra k
ΔQ_{Lk}	Variações de potência reativa na carga conectada à barra k
x_{dk}	Reatância síncrona de eixo direto do gerador síncrono
E_{fdk}	Tensão de campo do gerador síncrono
T'_{d0k}	Constante transitória de eixo direto do gerador síncrono
K_{V_k}	Coefficiente de reação de armadura do gerador síncrono
K_{A_k}	Coefficiente de reação de armadura do gerador síncrono
E_{fd}	Tensão de excitação do gerador síncrono
ΔV_k	Variações da tensão terminal do gerador síncrono
ΔV_{ref}	Tensão de referência do Regulador Automático de Tensão
K_r	Ganho do Regulador Automático de Tensão
T_r	Constante de tempo do Regulador Automático de Tensão
ω_0	Velocidade síncrona

M_k	Constante de inércia do gerador síncrono
D_k	Amortecimento inerente do Sistema Elétrico de Potência
Δx	Vetor de variáveis de estado do Modelo Sensibilidade Potência
Δz	Vetor de Variáveis algébricas do Modelo Sensibilidade Potência
Δu	Vetor de variáveis de entrada do Modelo Sensibilidade Potência
J_1	Matriz que relaciona variáveis de estado-estado do Modelo Sensibilidade de Potência
J_2	Matriz que relaciona variáveis de estado-algébricas do Modelo Sensibilidade de Potência
J_3	Matriz que relaciona variáveis algébricas-estado do Modelo Sensibilidade de Potência
J_4	Matriz que relaciona variáveis algébricas-algébricas do Modelo Sensibilidade de Potência
B_1	Matriz de entrada do Modelo Sensibilidade de Potência
B_2	Matriz de entrada do Modelo Sensibilidade de Potência
\mathcal{A}	Matriz de estado do Modelo Sensibilidade de Potência
\mathcal{B}	Matriz de entradas do Modelo Sensibilidade de Potência
X_{TCSC}	Reatância capacitiva do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
Z_e	Impedância equivalente após instalação do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
A_{4km}	Coefficiente de Sensibilidade da potência ativa do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
ΔX_{TCSC}	Variações da reatância capacitiva do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
K_{TCSC}	Ganho estático do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
T_{TCSC}	Constante do atraso inerente do sistema de controle do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
ΔX_{ref}	Desvio da reatância do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
K_1	Coefficiente do comportamento dinâmico do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
K_2	Coefficiente do comportamento dinâmico do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>

K_3	Coefficiente do comportamento dinâmico do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
K_4	Coefficiente do comportamento dinâmico do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
K_5	Coefficiente do comportamento dinâmico do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
ΔV_s	Sinal de saída do Estabilizador do Sistema de Potência
$\Delta \omega$	Variações da velocidade angular do rotor
K_{ESP}	Ganho do Estabilizador do Sistema de Potência
T_w	Constante de <i>washout</i> dos controladores de amortecimento
T_1	Constante de tempo dos controladores de amortecimento
T_2	Constante de tempo dos controladores de amortecimento
T_3	Constante de tempo dos controladores de amortecimento
T_4	Constante de tempo dos controladores de amortecimento
ΔV_1	Variáveis de estado provenientes do Estabilizador do Sistema de Potência
ΔV_2	Variáveis de estado provenientes do Estabilizador do Sistema de Potência
ΔV_s	Variáveis de estado provenientes do Estabilizador do Sistema de Potência
ΔX_1	Variáveis de estado provenientes do <i>Power Oscillation Damping</i>
ΔX_2	Variáveis de estado provenientes do <i>Power Oscillation Damping</i>
ΔX_{POD}	Variáveis de estado provenientes do <i>Power Oscillation Damping</i>
p_{ki}	Fatores de participação
ϕ_{ki}	Autovetor esquerdo
ψ_{ik}	Autovetor direito
v_i	Velocidade do indivíduo no <i>Particle Swarm Optimization</i>
x_i	Posição do indivíduo no <i>Particle Swarm Optimization</i>
c_1	Ponderações no <i>Particle Swarm Optimization</i>
c_2	Ponderações no <i>Particle Swarm Optimization</i>
r_1	Valores aleatórios entre 0 e 1 no <i>Particle Swarm Optimization</i>
r_2	Valores aleatórios entre 0 e 1 no <i>Particle Swarm Optimization</i>
so_i	Fatores sociais no <i>Particle Swarm Optimization</i>

co_i	Fatores cognitivos no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$Pbest_i$	Melhores posições de cada indivíduo no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$Gbest$	Melhor posição entre os indivíduos no <i>Particle Swarm Optimization</i>
v_{Pbest_i}	Velocidade relacionada a melhor posição individual no <i>Particle Swarm Optimization</i>
v_{Gbest}	Velocidade relacionada a melhor posição global no <i>Particle Swarm Optimization</i>
x_{min}	Valores mínimos permitidos por um indivíduo
x_{max}	Valores máximos permitidos por um indivíduo
ϵ_{calc}	Erro calculado nos algoritmos de otimização
ϵ_{per}	Erro permitido nos algoritmos de otimização
$C(i)$	Passo de deslocamento no <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
$\phi(i)$	Direção a ser definida no <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
$\theta^i(j, k, l)$	Representação das bactérias no <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
$\Delta(i)$	Vetor aleatório no <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
J	Saúde das bactérias no <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
J_{cc}	Representação da aglomeração das bactérias no <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
$d_{attract}$	Coefficiente de atração do <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
$h_{repellant}$	Coefficiente de repulsão do <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
$w_{attract}$	Coefficiente de atração do <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
$w_{repellant}$	Coefficiente de repulsão do <i>Bacterial Foraging Optimization</i>
ξ_{d_i}	Amortecimento desejado nos modos oscilatórios
λ_{d_i}	Autovalor desejado nos modos oscilatórios
λ_{c_i}	Autovalores calculados nos métodos de otimização
ξ	Coefficiente de amortecimento
ω_n	Frequência natural não amortecida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo Geral	26
1.1.2	Objetivos Específicos	27
1.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	27
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	28
2	MODELO SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS	29
2.1	INTRODUÇÃO	29
2.2	EQUAÇÕES GERAIS	29
2.3	POTÊNCIAS GERADAS	31
2.4	FLUXO DE POTÊNCIA	32
2.5	TENSÃO INTERNA DO GERADOR SÍNCRONO	34
2.6	TENSÃO DE CAMPO DO GERADOR SÍNCRONO	35
2.7	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DO GERADOR SÍNCRONO	36
2.8	REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA MULTIMÁQUINAS NO MSP	36
2.9	CONCLUSÕES	38
3	FACTS TCSC E OS CONTROLADORES SUPLEMENTARES	40
3.1	INTRODUÇÃO	40
3.2	THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR	40
3.2.1	Inclusão do TCSC no MSP	42
3.3	ESTABILIZADORES DO SISTEMA DE POTÊNCIA	45
3.3.1	Inclusão do ESP no MSP	46

3.4	POWER OSCILLATION DAMPING	48
3.4.1	Inclusão do POD no MSP	48
3.5	CONCLUSÕES	50
4	LOCALIZAÇÃO E AJUSTE DE PARÂMETROS DOS ESPs E TCSC-POD	51
4.1	INTRODUÇÃO	51
4.2	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO	51
4.2.1	Controladores ESP	51
4.2.2	Conjunto TCSC-POD	52
4.3	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	53
4.3.1	Algoritmo PSO	53
4.3.2	Algoritmo BF-PSO	56
4.3.3	Formulação do Problema de Otimização	60
4.4	CONCLUSÕES	61
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	63
5.1	INTRODUÇÃO	63
5.2	SISTEMA SUL-BRASILEIRO	63
5.2.1	Localização dos dispositivos de controle	65
5.2.2	Ajuste dos controladores ESPs com PSO	66
5.2.3	Ajuste dos controladores ESPs com BF-PSO	68
5.2.4	Comparação dos ajustes obtidos com PSO e BF-PSO	70
5.3	SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS	72
5.3.1	Localização dos dispositivos de controle	73
5.3.2	Ajuste dos controladores ESPs e POD com PSO	74
5.3.3	Ajuste dos controladores ESPs e POD com BF-PSO	76

5.3.4	Comparação dos ajustes obtidos com PSO e BF-PSO	78
5.4	<i>SISTEMA NEW ENGLAND</i>	80
5.4.1	Localização dos dispositivos de controle	81
5.4.2	Ajuste dos controladores ESPs e POD com PSO	85
5.4.3	Ajuste dos controladores ESPs e POD com BF-PSO	87
5.4.4	Comparação dos ajustes obtidos com PSO e BF-PSO	90
5.5	CONCLUSÕES	92
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	97
	ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTES	102
	APÊNDICE A - TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS PELO AUTOR	111

1 INTRODUÇÃO

Entre os motivos que influenciam na estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), pode-se citar as constantes variações de carga a que os barramentos são submetidos, instalação de novas linhas de transmissão, diferentes características dos grupos geradores de energia elétrica, interconexão entre sistemas e a diversificação da matriz energética.

Em se tratando da estabilidade a pequenas perturbações é possível afirmar que as oscilações de baixa frequência fracamente amortecidas (ou com amortecimento negativo), podem causar a instabilidade do SEP. Estas oscilações são tratadas como modos oscilatórios do tipo local (geradores síncronos oscilando contra o restante do SEP), interárea (grupo de geradores síncronos oscilando contra outro grupo de geradores síncronos) e intraplanta (geradores síncronos de uma mesma planta de geração oscilando entre si), os quais podem ser reconhecidos pela sua frequência natural não amortecida (KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981; SAUER; PAI, 1998).

As faixas de frequência em que se caracterizam os modos oscilatórios são de aproximadamente 0,8 a 1,8 Hz para os modos locais, 0,2 a 0,8 Hz nos modos interárea e 1,5 a 2,5 Hz no modo intraplanta (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981; SAUER; PAI, 1998). Como a faixa de frequência pode ser comum entre os modos oscilatórios, em alguns casos este reconhecimento é prejudicado, necessitando, por exemplo, da verificação dos fatores de participação de cada gerador síncrono para sua correta classificação (MARTINS; LIMA, 1990). Nos SEPs analisados neste trabalho é considerado que um gerador síncrono equivale a um grupo de geradores síncronos de uma mesma planta de geração. Neste caso, são de interesse a análise sobre os modos locais e interárea.

Os Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP) são geralmente utilizados para introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência (ANDERSON; FOUAD, 2003; DEMELLO; CONCORDIA, 1969; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981; ROGERS, 2000). Este componente é uma malha de controle adicional que atua no Regulador Automático de Tensão (RAT), o qual tem a função de controlar a tensão nos terminais de saída dos geradores síncronos. Os RATs são equipamentos de ação rápida (constantes de tempo muito baixas) e considerando altos ganhos e baixas constantes de tempo, podem diminuir significativamente os níveis de amortecimento em determinados modos oscilatórios do SEP (ANDERSON; FOUAD, 2003; DEMELLO; CONCORDIA, 1969; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981).

Larsen e Swann (1981) mostram que dependendo da complexidade do SEP, os ESPs tem como objetivo principal introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência

do tipo local. No entanto, a contribuição dos ESPs para introduzir amortecimento aos modos oscilatórios do tipo interárea pode ser pequena e, em alguns casos, pode influenciar negativamente no amortecimento de outro modo oscilatório.

A interconexão de SEPs em corrente alternada por meio de longas linhas de transmissão é um fator que contribui para o surgimento de modos oscilatórios do tipo interárea e, em alguns casos, pode conter um baixo amortecimento relacionado a ele. Nestas situações são aplicadas as compensações estáticas e que no decorrer dos anos foi parcialmente substituída pelas compensações dinâmicas, as quais podem ser representadas pelos dispositivos *Flexible Alternating Current Transmission Systems* (FACTS) (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SEN; SEN, 2009; SONG; JOHNS, 1999; WATANABE et al., 1998).

Entre as formas de classificação dos dispositivos FACTS pode-se citar Sen e Sen (2009), que os diferencia pelo controle das potências ativa e reativa de forma simultânea e independente. Os FACTS com controle simultâneo se caracterizam em dispositivos que podem regular o valor absoluto da tensão, seu ângulo de fase ou a reatância da linha de transmissão. Os FACTS com controle independente reúnem mais de uma regulação característica de um FACTS com controle simultâneo, ou seja, um mesmo dispositivo FACTS pode por exemplo regular o valor absoluto da tensão e de seu ângulo de fase.

Entre os dispositivos FACTS com controle simultâneo que regulam tensão, pode-se citar o *Static VAR Compensator* (SVC) (HINGORANI; GYUGYI, 1999; MARTINS; LIMA, 1990; SONG; JOHNS, 1999) e o *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) (HINGORANI; GYUGYI, 1999; PEREIRA, 2009; SONG; JOHNS, 1999). Esses dispositivos são caracterizados pelo controle da tensão no barramento nos quais são instalados.

O dispositivo FACTS *Phase Angle Regulator* (PAR) (SEN; SEN, 2009) é um dispositivo que realiza a regulação do ângulo da tensão da barra de instalação.

No caso de dispositivos FACTS que regulam a reatância da linha de transmissão, podem ser citados o *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) (SONG; JOHNS, 1999; YANG; LIU; MCCLLEY, 1998; WATANABE et al., 1998) e o *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) (CASTRO et al., 2007; HINGORANI; GYUGYI, 1999; MIHALIC; PAPIC, 1998; PUPIN; PINA; ARAUJO, 2009). Por meio da diminuição da reatância da linha de transmissão na qual são instalados, estes dispositivos FACTS aumentam os limites de estabilidade e controlam o fluxo de potência.

Dos dispositivos FACTS com controle independente, são citados o *Unified Power Flow Controller* (UPFC) (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007; FURINI, 2011; MOURA,

2012) e o *Interline Power Flow Controller* (IPFC) (GYUGYI; SEN; SCHAUDER, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999)). O FACTS UPFC pode ser considerado como um dispositivo que reúne as características dos FACTS SSSC e STATCOM. O FACTS IPFC é uma junção de dois ou mais FACTS SSSC.

Além dos dispositivos FACTS citados, também destaca-se o *Generalized Unified Power Flow Controller* (GUPFC) (VALLE, 2014; ZHANG; HANDSCHIN; YAO, 2001). Este dispositivo pode ser visto como uma combinação entre os FACTS IPFC e STATCOM, com controle simultâneo de suas características.

Os dispositivos FACTS não possuem características de introduzir amortecimento aos modos oscilatórios e para este fim é utilizado um controlador suplementar chamado de *Power Oscillation Damping* (POD) (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994). O FACTS TCSC acoplado com um controlador POD (conjunto TCSC-POD) é uma das recomendações propostas pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) (IEEE STANDARDS, 2009), a qual pode ser verificada na aplicação prática encontrada na interligação norte-sul do Sistema Interligado Nacional (GAMA et al., 2000; PELANDA et al., 2006) e de estudos mostrados em (ALAM et al., 2012; FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011; YANG; LIU; MCCLLEY, 1998).

Dependendo das características e da complexidade de um SEP, existem vários locais em que podem ser instalados os dispositivos de controle e a instalação de forma desordenada pode causar danos à sua operação. Entre os métodos de localização dos controladores ESPs, podem ser citados o método dos resíduos (FEBRES; ARAUJO, 2008; YANG; LIU; MCCLLEY, 1998) e os fatores de participação (KUNDUR, 1994). Como exemplo para determinar a localização dos dispositivos FACTS é citado novamente o método dos resíduos (FEBRES; ARAUJO, 2008; YANG; LIU; MCCLLEY, 1998) e a distância entre o polo e zero da Função de Transferência de Malha Aberta (FTMA) do controlador POD (MOURA, 2012; MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012).

Os parâmetros dos controladores ESPs e POD dependem de sua localização no SEP. Por isso, primeiramente são determinadas as localizações de cada um dos dispositivos de controle a serem alocados no SEP e em seguida é realizado o ajuste de seus parâmetros. Esta etapa será fundamental para introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência do SEP de modo eficaz.

Podem ser citados como métodos clássicos de ajuste dos parâmetros de controladores os baseados em compensação de fase (MARTINS; LIMA, 1990; YANG; LIU; MCCLLEY, 1998) e os baseados na alocação de polos (ARAUJO; ZANETA, 2001; FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011). As técnicas baseadas em inteligência artificial, como lógica Fuzzy (YIXIN et al.,

1999) e as redes neurais artificiais (PEREIRA; ARAUJO; FURINI, 2009; NGUYEN; GIANTO, 2008) podem ser adaptadas para determinar parâmetros dos controladores. O algoritmo genético (BASKARAN; KARPAGAM; DEVARAJ, 2012), o *Particle Swarm Optimization* (PSO) (ABIDO, 2002; BRATTON; KENNEDY, 2007; KENNEDY; EBERHART, 1995) e o *Bacterial Foraging Optimization* (BFO) (PASSINO, 2000; PASSINO, 2002) são alguns dos métodos de otimização que são utilizados em diversas áreas do conhecimento e também no ajuste dos parâmetros de controladores.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhido o conjunto TCSC-POD atuando simultaneamente com os controladores ESPs, os quais são conhecidos na literatura e possuem aplicações comerciais em funcionamento nos SEPs. Os SEPs utilizados para análise são os conhecidos na literatura como sistema teste Sul-Brasileiro (PEREIRA, 2009), simétrico de duas áreas (KUNDUR, 1994) e *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001).

De acordo com a característica de cada um dos sistemas teste mencionados são verificados os dispositivos de controle a serem instalados. Para determinar a localização dos controladores ESPs são utilizados os fatores de participação (KUNDUR, 1994) e para o conjunto TCSC-POD a distância entre o polo e zero da FTMA do controlador POD (MOURA, 2012; MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012).

São ajustados os parâmetros dos controladores ESP e POD após determinadas suas localizações. Este ajuste é realizado pelos algoritmos de otimização PSO e pelo BFO modificado parcialmente pelas formas de orientação do algoritmo PSO (BF-PSO). São algoritmos baseados em enxame de partículas e se mostram eficientes no cálculo de parâmetros de controladores em geral.

No algoritmo BFO, em uma etapa chamada de reprodução, as respostas são separadas em melhores e piores. Logo em seguida, as piores respostas são eliminadas e em seu lugar são duplicadas as melhores respostas (PASSINO, 2002). Nesta etapa o algoritmo BFO pode excluir possíveis regiões com respostas que atendam a uma determinada função objetivo, o que pode dificultar a convergência do algoritmo. Este fato é a motivação para utilização do algoritmo BF-PSO, como alternativa para não excluir possíveis regiões com soluções desejadas.

O ajuste dos controladores ESPs e POD instalados nos sistemas teste são realizados de forma coordenada (ajuste simultâneo de todos os controladores considerados) nos algoritmos de otimização PSO e BF-PSO. O ajuste dos controladores de forma individual pode causar interações indesejadas entre eles (JABR et al., 2010). Em pesquisas realizadas anteriormente foi verificado que alguns métodos de ajuste coordenado como o *Decentralized Modal Control* (ARAUJO; ZANETA, 2001), possuem respostas computacionais (em termos de programação

e convergência) complicadas, dependendo da quantidade de controladores. A capacidade em realizar uma busca sistemática não dependente da quantidade de controladores foi determinante para a escolha dos métodos de otimização BFO e BF-PSO para o ajuste coordenado dos controladores ESP e POD considerados neste trabalho.

Para analisar e representar os SEPs é utilizado o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) (DECKMANN; COSTA, 1994). Este modelo foi escolhido pela facilidade de incluir novos dispositivos e ser um modelo linear que pode ser utilizado na análise da estabilidade a pequenas perturbações do SEP.

Com a modelagem e representação do SEP pelo MSP, considerando a atuação do controlador ESP e do conjunto TCSC-POD, foram implementados computacionalmente, utilizando-se o software Matlab[®] e os algoritmos PSO e BF-PSO em uma CPU Intel[®] Core[™] 3,4 GHz e 8 GB de memória RAM.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar os algoritmos PSO e BF-PSO no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD em SEPs.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar a atuação conjunta dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD no SEP;
- Aumentar os níveis de amortecimentos nos SEPs analisados;
- Utilizar métodos para determinar a localização dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD no SEP;
- Estudo da estabilidade a pequenas perturbações nos SEPs analisados;
- Comparar os resultados obtidos pelo algoritmos PSO e BF-PSO.

1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O propósito deste trabalho é desenvolver algoritmos de otimização para o ajuste de parâmetros dos controladores ESP e POD de forma coordenada para auxiliar na estabilidade dos SEPs.

Com relação ao algoritmo PSO é proposta sua utilização para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs por Eslami et al. (2012) e Shayeghi et al. (2009). Este mesmo algoritmo é utilizado por Shayeghi, Safari e Shayanfar (2010) para o ajuste coordenado entre os ESPs e os controladores de amortecimento no FACTS TCSC. Nestes casos as funções objetivo utilizadas diferem da que é utilizada neste trabalho.

Ali e Majhi (2006) e Korani, Dorrah e Emara (2009) utilizam o algoritmo BFO e BF-PSO para o ajuste de controladores proporcional-integral-derivativo em uma malha de controle. Este algoritmo também é utilizado por Ali e Abd-Elazim (2012) no ajuste do controlador POD acoplado a um dispositivo TCSC.

O trabalho de Esmaili et al. (2013) trata de um ajuste coordenado de ESPs com controladores de amortecimento inseridos no FACTS SVC utilizando o algoritmo BF-PSO. Porém, o controlador de amortecimento é um proporcional-integral e os ajustes são obtidos de forma coordenada com algoritmos distintos. Neste caso, o PSO para o ajuste de parâmetros do ESP e o BFO para o ajuste de parâmetros do controlador proporcional-integral.

Portanto, este trabalho se diferencia dos outros encontrados na literatura por fazer o ajuste de parâmetros dos controladores de amortecimento (ESPs ou POD) inseridos no SEP de forma coordenada com os algoritmos PSO e BF-PSO. Outro ponto importante a ser destacado é a possibilidade de utilizar os algoritmos de otimização PSO e BF-PSO programados (não foram utilizados Toolbox do Matlab[®]) para outros tipos de controladores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com relação à organização do trabalho, no Capítulo 2 é apresentada a formulação do SEP multimáquinas pelo MSP. Com o desenvolvimento de suas equações é possível realizar uma representação do domínio do tempo que foi implementada computacionalmente para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações.

No Capítulo 3 são abordados os aspectos relevantes em relação ao funcionamento do FACTS TCSC e dos controladores ESP e POD, realizando o equacionamento necessário para representá-los no MSP. Os controladores ESP e POD têm como função introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência do SEP.

No Capítulo 4 são discutidos os métodos de localização e ajuste de parâmetros dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD. A localização é determinada por métodos clássicos. No caso do controlador ESP os fatores de participação e no caso do conjunto TCSC-POD a posição dos zeros da FTMA. Na sequência são apresentados os métodos de

otimização PSO e BF-PSO para o ajuste de parâmetros dos controladores ESP e POD. Como os controladores ESP e POD podem assumir ajustes distintos com relação a sua localização no SEP são determinados suas localizações para posteriormente realizar o ajuste dos parâmetros.

No Capítulo 5 são apresentadas as simulações realizadas em três sistemas teste (Sul-Brasileiro, simétrico de duas áreas e *New England*). Em cada sistema teste é verificado a localização dos dispositivos que serão instalados para posteriormente ajustar os parâmetros dos controladores ESP e POD. Inicialmente estes sistemas teste são instáveis para o ponto de operação considerado, e após verificadas as melhores localizações são calculados os parâmetros dos controladores ESP e/ou POD. É esperado que os métodos de localização e ajuste de parâmetros contribuam para estabilidade do SEP.

O Capítulo 6 traz as principais conclusões pertinentes ao trabalho, bem como as propostas para trabalhos futuros e considerações finais.

Para um melhor entendimento do trabalho são apresentados na sequência as Referências, o Anexo A com os dados dos sistemas teste utilizados nas simulações e o Apêndice A sobre os trabalhos publicados pelo autor.

2 MODELO SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS

2.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo, são apresentadas as características principais, bem como o equacionamento do MSP multimáquinas. Este modelo é baseado nos balanços nodais de potências ativa e reativa. Ou seja, os balanços de potência ativa e de potência reativa devem ser satisfeitos em qualquer momento em todas as barras do sistema elétrico durante todo processo dinâmico. Pelo fato de ser um modelo linear, o MSP pode ser utilizado na análise da estabilidade a pequenas perturbações do SEP (DECKMANN; COSTA, 1994).

O equacionamento deste capítulo é parte de pesquisas realizadas anteriormente pelo autor deste trabalho (MENEZES, 2010) e, também, de pesquisas realizadas por outros autores do grupo de trabalho (FURINI, 2011; MOURA, 2012).

2.2 EQUAÇÕES GERAIS

No MSP, o gerador síncrono trifásico é representado pelos seus enrolamentos do estator (fases a, b e c) e um enrolamento no rotor (enrolamento de campo - fd). Pelo fato das medidas realizadas no rotor por um observador localizado no estator (e vice-versa) serem variáveis no tempo, para facilitar são definidos dois sistemas de coordenadas, o primeiro representando as grandezas do estator (coordenadas estáticas - (r,m)) e o segundo as grandezas do rotor (coordenadas rotativas - (d,q)).

Para facilitar o manuseio das equações, é necessário referenciar as grandezas em um único sistema de coordenadas. Para este fim, é utilizada a Transformada de Park (ANDERSON; FOUAD, 2003).

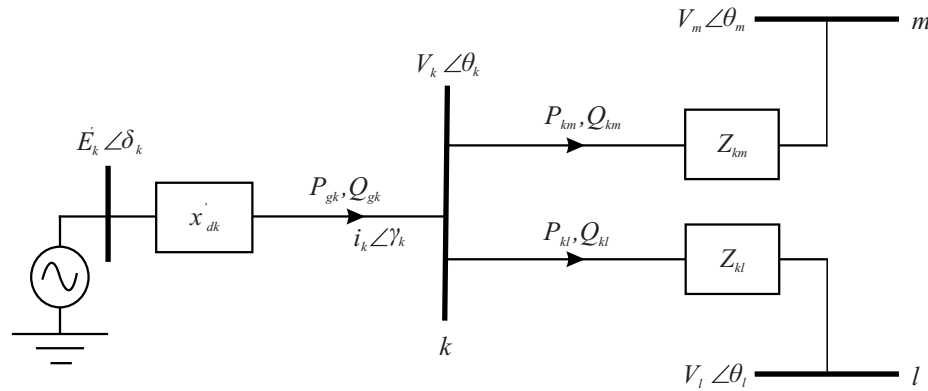
A Equação (1) representa o operador que permite realizar as transferências de medidas entre o sistema de coordenada fixo (r,m) e o sistema de coordenadas rotativo (d,q), onde δ_k é o ângulo interno do gerador síncrono conectado à barra k .

$$T = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta_k & -\text{cos } \delta_k \\ \text{cos } \delta_k & \text{sen } \delta_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

A partir do diagrama unifilar mostrado na Figura 1, é possível definir e deduzir as equações de potência para um sistema multimáquinas, onde as grandezas \vec{E}_k e x'_d correspondem à tensão interna e a reatância transitória de eixo direto do gerador síncrono conectado à barra k . A

corrente e tensão terminais entregues na barra k são representadas pelas grandezas \bar{i}_k e \bar{V}_k .

Figura 1 - Balanço de Potência Ativa e Reativa no Sistema Multimáquinas



Fonte: Furini (2011).

Ao se considerar a Equação (2) (expressa no sistema de coordenadas fixo) e analisando a Figura 1, pode ser obtida por meio da lei de Kirchoff das tensões a Equação (3).

$$\bar{V}_k = V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k = V_{rk} + jV_{mk} \quad (2)$$

$$\bar{E}'_k = \bar{V}_k + jx'_{dk} \bar{i}_k \quad (3)$$

Em Anderson e Fouad (2003) e Kundur (1994), uma tensão localizada sobre o eixo em quadratura é definida como \bar{E}'_{ak} , expressa no sistema de coordenadas rotativo e definida na Equação (4), onde a constante x_{qk} é a reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador síncrono conectado à barra k .

$$\bar{E}'_{ak} = \bar{V}_k + jx_{qk} \bar{i}_k \quad (4)$$

Quando se aplica a Equação (1) nas Equações (2), (3) e (4), é realizada a mudança de coordenadas para as componentes de eixo direto (V_{dk}) e eixo em quadratura (V_{qk}) da tensão terminal do gerador síncrono conectado à barra k , definidas nas Equações (5) e (6).

$$V_{dk} = V_k \sin(\delta_k - \theta_k) = E'_{dk} + x'_{dk} I_{qk} = x_{qk} I_{qk} \quad (5)$$

$$V_{qk} = V_k \cos(\delta_k - \theta_k) = E'_{qk} - x'_{dk} I_{dk} = E_{ak} - x_{qk} I_{dk} \quad (6)$$

Com as Equações (5) e (6), é possível obter as equações da corrente de eixo direto (I_{dk}) e

da corrente de eixo em quadratura (I_{qk}), definidas nas Equações (7) e (8).

$$I_{dk} = \frac{E'_{qk} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (7)$$

$$I_{qk} = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (8)$$

2.3 POTÊNCIAS GERADAS

Ao se analisar novamente a Figura 1, a potência ativa (P_{gk}) e potência reativa (Q_{gk}) entregues pelo gerador síncrono conectado à barra k , é transferida para outras duas barras (l e m), conectadas respectivamente pelas linhas de transmissão com impedância $Z_{kl} = R_{kl} + jX_{kl}$ e $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$.

A Equação (9) representa a potência complexa disponível na barra k e substituindo no conjunto de Equações de (5) a (8) é possível definir as potências ativa e reativa geradas nas Equações (10) e (11).

$$\dot{S}_{gk} = \bar{V}_k \bar{I}_k^* \quad (9)$$

$$P_{gk} = \frac{E'_{qk} V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k^2 \sin 2(\delta_k - \theta_k) \quad (10)$$

$$Q_{gk} = \frac{E'_{qk} V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{2} \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) [1 - \cos 2(\delta_k - \theta_k)] \quad (11)$$

As Equações (10) e (11) podem ser linearizadas, admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio. O resultado da expansão em série de Taylor desconsiderando os termos de ordem maior ou igual a dois é definido nas Equações (12) e (13).

$$\Delta P_{gk} = A_{1gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + A_{2gk} \Delta E'_{qk} + A_{3gk} \Delta V_k \quad (12)$$

$$\Delta Q_{gk} = R_{1gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + R_{2gk} \Delta E'_{qk} + R_{3gk} \Delta V_k \quad (13)$$

As constantes A_{1gk} , A_{2gk} e A_{3gk} são os coeficientes de potência ativa do gerador síncrono

conectado à barra k e são definidas nas equações (14) a (16).

$$A_{1gk} = \left(\frac{\partial P_{gk}}{\partial (\delta_k - \theta_k)} \right) = \frac{E'_{qk} V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k^2 \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \cos 2(\delta_k - \theta_k) \quad (14)$$

$$A_{2gk} = \left(\frac{\partial P_{gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (15)$$

$$A_{3gk} = \left(\frac{\partial P_{gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \sin 2(\delta_k - \theta_k) \quad (16)$$

Analogamente, R_{1gk} , R_{2gk} e R_{3gk} são os coeficientes de potência reativa do gerador síncrono conectado à barra k e são definidas nas equações (17) a (19).

$$R_{1gk} = \left(\frac{\partial Q_{gk}}{\partial (\delta_k - \theta_k)} \right) = -\frac{E'_{qk} V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - V_k^2 \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \sin 2(\delta_k - \theta_k) \quad (17)$$

$$R_{2gk} = \left(\frac{\partial Q_{gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (18)$$

$$R_{3gk} = \left(\frac{\partial Q_{gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{2V_k}{x'_{dk}} - V_k \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) [1 - \cos 2(\delta_k - \theta_k)] \quad (19)$$

2.4 FLUXO DE POTÊNCIA

Na Figura 1, são mostradas duas linhas de transmissão, uma representada pela impedância Z_{kl} e outra com impedância Z_{km} , onde P_{kl} e Q_{kl} são respectivamente as potências ativa e reativa transferidas da barra k para a barra l . De modo análogo, P_{km} e Q_{km} são as potências transferidas da barra k para a barra m .

Para a obtenção dos coeficientes de fluxo de potência, é considerada somente a interligação entre as barras k e m . Para fins de simplificação, é utilizada a Equação (20) que representa sua admitância (\bar{Y}_{km}).

$$\bar{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km} = \frac{R_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} - j \frac{X_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \quad (20)$$

As Equações (21) e (22) correspondem à corrente (I_{km}) e aos fluxos de potência ativa (P_{km}) e de potência reativa (Q_{km}) injetada da barra k para a barra m .

$$\bar{I}_{km} = Y_{km}(\bar{V}_k - \bar{V}_m) \quad (21)$$

$$\dot{S}_{km} = \bar{V}_k \bar{I}_{km}^* = P_{km} + jQ_{km} \quad (22)$$

Ao se redefinir as Equações (21) e (22), são obtidos os fluxos de potências ativa e reativa da barra k para a barra m e mostrados nas Equações (23) e (24).

$$P_{km} = V_k^2 G_{km} - V_k V_m G_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m B_{km} \sin \theta_{km} \quad (23)$$

$$Q_{km} = -V_{km}^2 B_{km} + V_k V_m B_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m G_{km} \sin \theta_{km} \quad (24)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, as Equações (23) e (24) são linearizadas, resultando nas Equações (25) e (26).

$$\Delta P_{km} = A_{1km} \Delta(\theta_{km}) + A_{2km} \Delta V_k + A_{3km} \Delta V_m \quad (25)$$

$$\Delta Q_{km} = R_{1km} \Delta(\theta_{km}) + R_{2km} \Delta V_k + R_{3km} \Delta V_m \quad (26)$$

As constantes A_{1km} , A_{2km} e A_{3km} são os coeficientes do fluxo de potência ativa da barra k para a barra m e definidas nas Equações (27) a (29).

$$A_{1km} = \left(\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_{km}} \right) = V_k V_m G_{km} \sin \theta_{km} - V_k V_m B_{km} \cos \theta_{km} \quad (27)$$

$$A_{2km} = \left(\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \right) = 2V_k G_{km} - V_m G_{km} \cos \theta_{km} - V_m B_{km} \sin \theta_{km} \quad (28)$$

$$A_{3km} = \left(\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \right) = -V_k G_{km} \cos \theta_{km} - V_k B_{km} \sin \theta_{km} \quad (29)$$

De modo análogo, as constantes R_{1km} , R_{2km} e R_{3km} são os coeficientes do fluxo de potência reativa da barra k para a barra m e são definidas nas equações (30) a (32).

$$R_{1km} = \left(\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_{km}} \right) = -V_k V_m B_{km} \sin \theta_{km} - V_k V_m G_{km} \cos \theta_{km} \quad (30)$$

$$R_{2km} = \left(\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \right) = -2V_k (B_{km} + B_{km}^{sh}) + V_m B_{km} \cos \theta_{km} - V_m G_{km} \sin \theta_{km} \quad (31)$$

$$R_{3km} = \left(\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \right) = -V_k B_{km} \cos \theta_{km} - V_k G_{km} \sin \theta_{km} \quad (32)$$

Considerando que as potências ativa e reativa injetadas pelo gerador síncrono na barra k é transferida para a barra l ($k-l$) e para barra m ($k-m$), conforme o diagrama mostrado na Figura 1, o balanço nodal de potência garante que as variações das potência geradas (ΔP_{gk} e ΔQ_{gk}) devem ser iguais à soma das variações do fluxo de potência $k-l$ (ΔP_{kl} e ΔQ_{kl}) com as variações do fluxo de potência $k-m$ (ΔP_{km} e ΔQ_{km}).

Na Figura 1, pode-se observar um conjunto de barras ligadas à barra k (Ω_k) e, ao supor uma carga incremental que consome potências ativa e reativa (ΔP_{Lk} e ΔQ_{Lk}), tem-se o balanço generalizado de potências ativa e reativa na barra k e definidas pelas Equações (33) e (34).

$$\Delta P_{gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta P_{km} = 0 \quad (33)$$

$$\Delta Q_{gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta Q_{km} = 0 \quad (34)$$

As Equações (33) e (34) são equações algébricas e traduzem o balanço nodal de potência em sua forma incremental em cada barra do SEP multimáquinas. A igualdade de potências ativa e reativa devem ser satisfeitas em todo e qualquer instante no processo dinâmico do SEP (DECKMANN; COSTA, 1994).

2.5 TENSÃO INTERNA DO GERADOR SÍNCRONO

A Equação (35) descreve as variações da tensão interna do gerador síncrono, onde x_{dk} é a reatância síncrona de eixo direto, E_{fdk} é a tensão de campo e T'_{d0k} a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994).

$$T'_{d0k} \dot{E}'_{qk} = E_{fdk} - [E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk}) I_{dk}] \quad (35)$$

Considerando pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, a Equação (35) pode ser linearizada e escrita como na Equação (36).

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}'_{qk} = \Delta E_{fdk} - \Delta E'_{qk} - (x_{dk} - x'_{dk}) \Delta I_{dk} \quad (36)$$

A corrente de eixo direto do gerador k , definida na Equação (7), também pode ser linearizada e resulta na Equação (37).

$$\Delta I_{dk} = \frac{1}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} - \frac{\cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \Delta V_k + \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \Delta(\delta_k - \theta_k) \quad (37)$$

A substituição da Equação (37) na Equação (36) permite escrever a Equação (38), que representa as variações da tensão interna do gerador síncrono conectado à barra k .

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}'_{fdk} = \Delta E_{fdk} - \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} + K_{V_k} \Delta V_k - K_{A_k} \Delta(\delta_k - \theta_k) \quad (38)$$

As constantes K_{V_k} e K_{A_k} são os coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono ligado à barra k no MSP e suas expressões são representadas pelas Equações (39) e (40).

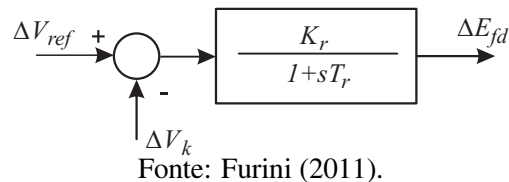
$$K_{V_k} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (39)$$

$$K_{A_k} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (40)$$

2.6 TENSÃO DE CAMPO DO GERADOR SÍNCRONO

Quando se introduz um RAT ao gerador síncrono conectado à barra k , é possível considerar as variações da tensão de excitação. Na Figura 2, é mostrado o modelo do RAT, que tem como função modular a tensão de excitação (E_{fd}) de acordo com as variações da tensão terminal (ΔV_k), em relação a uma tensão de referência (ΔV_{ref}).

Figura 2 - Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação - RAT



Como mostrado na Figura 2, o modelo do RAT é de primeira ordem, composto por um ganho K_r e uma constante de tempo T_r . Em Anderson e Fouad (2003), deMello e Concordia (1969) e Kundur (1994), este modelo é utilizado para estudos da estabilidade a pequenas perturbações e também será utilizado neste trabalho.

Ao analisar a Figura 2, é possível definir as expressões no domínio da frequência e no domínio do tempo da tensão de campo E_{fd} , conforme as Equações (41) e (42), respectivamente.

$$E_{fd} = \frac{K_r}{1 + sT_r} (V_{ref} - V_k) \quad (41)$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{E_{fd}}{T_r} + \frac{K_r}{T_r} (V_{ref} - V_k) \quad (42)$$

A Equação (42) assume a forma mostrada na Equação (43), quando se consideram pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio.

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_r} \Delta E_{fd} + \frac{K_r}{T_r} \Delta V_{ref} - \frac{K_r}{T_r} \Delta V_k \quad (43)$$

2.7 EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DO GERADOR SÍNCRONO

A partir da Equação (44) (equação de balanço - swing) do gerador síncrono é possível verificar o comportamento das grandezas mecânicas em função das grandezas elétricas (ANDERSON; FOUAD, 2003; DEMELLO; CONCORDIA, 1969; KUNDUR, 1994).

$$M_k \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} = P_{mec} - P_{gk} - D_k \frac{d\delta_k}{dt} \quad (44)$$

A Equação (44), uma equação diferencial de grau dois, pode ser decomposta em duas equações diferenciais de grau um, sendo as variações do ângulo interno (δ_k) e velocidade angular do rotor (ω_k) linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, definidas nas Equações (45) e (46).

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta \omega_k \quad (45)$$

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_{mec} - \Delta P_{gk} - D_k \Delta \omega_k) \quad (46)$$

As grandezas presentes nas Equações (44) a (46) (ω_0 , M_k e D_k) são, respectivamente, a velocidade síncrona, constante de inércia do gerador síncrono e o amortecimento inerente do SEP.

2.8 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA MULTIMÁQUINAS NO MSP

O conjunto de equações algébricas (Equações (33) e (34)) com o conjunto de equações diferenciais (Equações (38), (43), (45) e (46)), permitem representar o SEP multimáquinas por meio do MSP. Será considerado um sistema multimáquinas de n geradores (ng) e n barras (nb) para representação do SEP no MSP e demonstrada pela Equação (47), onde Δx representa o vetor de variáveis de estado (Equação (48)), Δz as variáveis algébricas (Equação (49)) e Δu as

variáveis de entrada (Equação (50)).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta \omega_1 \dots \omega_{ng}]^t & [\Delta \delta_1 \dots \delta_{ng}]^t & [\Delta E'_{q_1} \dots \Delta E'_{q_{ng}}]^t & [\Delta E_{fd_1} \dots \Delta E_{fd_{ng}}]^t \end{bmatrix}^t \quad (48)$$

$$\Delta z = \begin{bmatrix} [\Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_{nb}]^t & [\Delta V_1 \dots \Delta V_{nb}]^t \end{bmatrix}^t \quad (49)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} [\Delta P_{mec_1} \dots \Delta P_{mec_{ng}}]^t & [\Delta V_{ref_1} \dots \Delta V_{ref_{ng}}]^t & [\Delta P_{L_1} \dots \Delta P_{L_{nb}}]^t & [\Delta Q_{L_1} \dots \Delta Q_{L_{nb}}]^t \end{bmatrix}^t \quad (50)$$

Na equação (47), J_1 é uma matriz que relaciona variáveis de estado com variáveis de estado, J_2 é matriz que relaciona variáveis de estado com variáveis algébricas. A matriz J_3 relaciona variáveis algébricas com variáveis de estado e a relação entre variáveis algébricas com variáveis algébricas é realizada pela matriz J_4 . As matrizes de entradas do sistema são B_1 e B_2 .

$$J_1 = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[D] & -[M]^{-1}[A_{1g}] & -[M]^{-1}[A_{2g}] & [0] \\ [\omega_0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & -[T'_{d0}]^{-1}[K_A] & -[T'_{d0}]^{-1}[x'_d]^{-1}[x_d] & [T'_{d0}]^{-1} \\ [0] & [0] & [0] & -[T_r]^{-1} \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} [M]^{-1}[A_{1g}] & [0] & -[M]^{-1}[A_{3g}] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [T'_{d0}]^{-1}[K_A] & [0] & [T'_{d0}]^{-1}[K_V] & [0] \\ [0] & [0] & -[T_r]^{-1}[K_r] & [0] \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} [0] & [A_{1g}] & [A_{2g}] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [R_{1g}] & [R_{2g}] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} [J_{41}] & [J_{42}] \\ [J_{43}] & [J_{44}] \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [T_r]^{-1} [K_r] & [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} [0] & [0] & [diag(-1)] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [diag(-1)] \end{bmatrix} \quad (56)$$

Para a formação da matriz J_4 (componentes J_{41} , J_{42} , J_{43} e J_{44}), é necessário aplicar as Equações (57) a (60), relacionado a cada componente da Equação (54) (esta matriz possui forma semelhante à matriz jacobiana do fluxo de potência).

$$\begin{cases} J_{41} = -A_{1g} - \sum_{k \neq m} A_{1km} & \text{se } k = m \\ J_{41} = A_{1km} & \text{se } k \neq m \end{cases} \quad (57)$$

$$\begin{cases} J_{42} = A_{3g} - \sum_{k \neq m} A_{2km} & \text{se } k = m \\ J_{42} = -A_{3km} & \text{se } k \neq m \end{cases} \quad (58)$$

$$\begin{cases} J_{43} = -R_{1g} - \sum_{k \neq m} R_{1km} & \text{se } k = m \\ J_{43} = R_{1km} & \text{se } k \neq m \end{cases} \quad (59)$$

$$\begin{cases} J_{44} = R_{3g} - \sum_{k \neq m} R_{2km} & \text{se } k = m \\ J_{44} = -R_{3km} & \text{se } k \neq m \end{cases} \quad (60)$$

Ao se considerar a eliminação do vetor de variáveis algébricas Δz (Equação (47)), é possível realizar a representação do SEP na forma de espaço de estado (Equação (61)), onde \mathcal{A} é a matriz de estados (Equação (62)) e \mathcal{B} é a matriz de entradas (Equação (63)).

$$\Delta \dot{x} = \mathcal{A} \Delta x + \mathcal{B} \Delta u \quad (61)$$

$$\mathcal{A} = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3 \quad (62)$$

$$\mathcal{B} = B_1 - J_2 J_4^{-1} B_2 \quad (63)$$

2.9 CONCLUSÕES

Nesse capítulo foram discutidas as características do MSP multimáquinas. Cabe mencionar que seu conceito fundamental é baseado no balanço nodal de potência, onde o equilíbrio de potência ativa e o equilíbrio de potência reativa em todas as barras do SEP devem ser satisfeitos em qualquer instante.

O desenvolvimento matemático do modelo necessário para sua representação no domínio do tempo foi apresentado, possibilitando a inclusão de novos dispositivos. As equações necessárias para sua representação são compostas por dois conjuntos. O primeiro de equações algébricas (variáveis algébricas) e o outro de equações diferenciais (variáveis de estado).

No Capítulo 3, são modificadas as equações desenvolvidas neste capítulo para se considerar a inclusão do dispositivo FACTS TCSC e dos controladores suplementares ESP e POD em SEPs.

3 FACTS TCSC E OS CONTROLADORES SUPLEMENTARES

3.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é realizado o equacionamento necessário para incluir o dispositivo TCSC e os controladores suplementares ESP e POD no MSP multimáquinas.

Primeiramente, são abordadas características do TCSC, mostrando uma configuração simplificada encontrada na literatura (FURINI; ARAUJO, 2008; YANG; LIU; MCCLELLY, 1998). Posteriormente, são conceituadas as estruturas dos controladores ESP e POD. Estes controladores contribuem para introdução de amortecimento aos modos de oscilação do SEP.

Nesse trabalho, a introdução de amortecimento nos modos locais de oscilação é realizada pelo controlador ESP, enquanto que o POD deverá amortecer os modos interárea de oscilação.

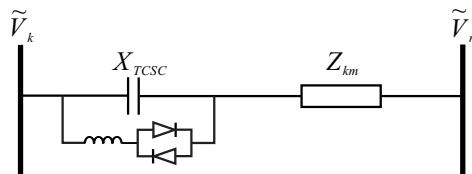
Ao final de cada seção, as equações obtidas para os modelos dinâmicos do TCSC e controladores são inseridas no MSP multimáquinas apresentados no Capítulo 2.

O equacionamento deste capítulo é parte de pesquisas realizadas anteriormente pelo autor deste trabalho (MENEZES, 2010) e, também, de pesquisas realizadas por outros autores do grupo de trabalho (FURINI, 2011; MOURA, 2012).

3.2 THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR

Na Figura 3 é mostrado um modelo básico do dispositivo TCSC, o qual pode ser representado por reatores controlados por tiristores em paralelo com uma reatância capacitiva variável (X_{TCSC}), que é controlada pelo ângulo de disparo dos tiristores (SONG; JOHNS, 1999; WATANABE et al., 1998).

Figura 3 - Circuito Equivalente do Dispositivo TCSC



Fonte: Watanabe et al. (1998).

A inclusão do dispositivo TCSC em uma linha de transmissão com impedância $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$, provoca a diminuição de sua reatância original (X_{km}), resultando em uma reatância equivalente (X_e). A impedância equivalente Z_e após a instalação do dispositivo TCSC é definida

na Equação (64).

$$Z_e = R_{km} + j(X_{km} - X_{TCSC}) = R_{km} + jX_e \quad (64)$$

Com a inclusão do dispositivo TCSC, as equações de corrente e potência complexa transferidas da barra k para a barra m (Equações (21) e (22)) são modificadas e redefinidas como nas Equações (65) e (66), respectivamente.

$$\tilde{I}_{km} = \frac{\tilde{V}_k - \tilde{V}_m}{Z_e} \quad (65)$$

$$\tilde{S}_{km} = \tilde{V}_k \tilde{I}_{km}^* \quad (66)$$

Ao redefinir a Equação (66) em função da Equação (65), é possível calcular o fluxo de potência complexa na linha de transmissão de instalação do dispositivo TCSC.

Nas Equações (67) e (68) são definidas as potências ativa (P_{km}) e reativa (Q_{km}) obtidas pela separação da parte real e parte imaginária da potência complexa.

$$P_{km} = \frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_e}{|Z_e|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (67)$$

$$Q_{km} = -\frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_e}{|Z_e|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (68)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, a linearização das Equações (67) e (68) fornece as variações da potência ativa e potência reativa, definidas, respectivamente, nas Equações (69) e (70).

$$\Delta P_{km} = A_{1km} \Delta \theta_{km} + A_{2km} \Delta V_k + A_{3km} \Delta V_m + A_{4km} \Delta X_{TCSC} \quad (69)$$

$$\Delta Q_{km} = R_{1km} \Delta \theta_{km} + R_{2km} \Delta V_k + R_{3km} \Delta V_m + R_{4km} \Delta X_{TCSC} \quad (70)$$

As constantes A_{1km} , A_{2km} e A_{3km} são os coeficientes de sensibilidade de potência ativa e R_{1km} , R_{2km} e R_{3km} os coeficientes de potência reativa. Observa-se nas Equações (69) e (70), que um novo coeficiente de potência ativa (A_{4km}) e outro de potência reativa (R_{4km} , Coeficiente de Sensibilidade da potência reativa do *Thyristor Controlled Series Capacitor*) são incluídos no equacionamento, quando comparado com o apresentado no Capítulo 2 (Equações (25) e (26)). Estes coeficientes ponderam, respectivamente, as variações do fluxo de potência ativa e do fluxo de potência reativa produzidas pelas variações da reatância do dispositivo TCSC (MENEZES,

2010).

Nas Equações (71) a (74) são definidos os coeficientes de sensibilidade de potência ativa com a inclusão do dispositivo TCSC no SEP.

$$A_{1km} = \left(\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_{km}} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_e}{|Z_e|^2} (V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (71)$$

$$A_{2km} = \left(\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_e}{|Z_e|^2} (V_m \sin \theta_{km}) \quad (72)$$

$$A_{3km} = \left(\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (V_k \cos \theta_{km}) + \frac{X_e}{|Z_e|^2} (V_k \sin \theta_{km}) \quad (73)$$

$$A_{4km} = \left(\frac{\partial P_{km}}{\partial X_{TCSC}} \right) = \frac{2R_{km}X_e}{|Z_e|^4} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{-R_{km}^2 + X_e^2}{|Z_e|^4} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (74)$$

Analogamente, os coeficientes de sensibilidade de potência reativa são definidas nas Equações (75) a (78).

$$R_{1km} = \left(\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_{km}} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_e}{|Z_e|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (75)$$

$$R_{2km} = \left(\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_e}{|Z_e|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) \quad (76)$$

$$R_{3km} = \left(\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_e|^2} (V_k \sin \theta_{km}) - \frac{X_e}{|Z_e|^2} (V_k \cos \theta_{km}) \quad (77)$$

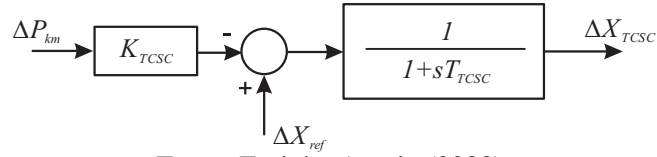
$$R_{4km} = \left(\frac{\partial Q_{km}}{\partial X_{TCSC}} \right) = -\frac{2R_{km}X_e}{|Z_e|^4} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{-R_{km}^2 + X_e^2}{|Z_e|^4} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (78)$$

3.2.1 Inclusão do TCSC no MSP

Na Figura 4 é mostrado o modelo dinâmico linearizado do TCSC, onde as variações de potência ativa (ΔP_{km}) na LT de instalação é o sinal de entrada escolhido. Observe que este sinal é obtido localmente e, além disso, os modos interárea de oscilação possuem alta observabilidade neste sinal, tornando prática comum o uso do fluxo de potência ativa para a entrada do controlador POD (FURINI; ARAUJO, 2008; YANG; LIU; MCCLELLY, 1998).

Considerando o modelo dinâmico mostrado na Figura 4 é possível descrever seu comportamento por meio da Equação (79), tornando a reatância X_{TCSC} uma variável de estado do SEP.

Figura 4 - Modelo Dinâmico do Dispositivo TCSC



Fonte: Furini e Araujo (2008).

A reatância variável do TCSC (ΔX_{TCSC}) é modulada por um bloco de primeira ordem, definido por um ganho estático (K_{TCSC}) e o atraso inerente do sistema de controle do dispositivo, representado por uma constante de tempo (T_{TCSC}). O sinal (ΔX_{ref}) é o desvio do valor da reatância do TCSC em regime permanente.

$$\Delta \dot{X}_{TCSC} = \frac{1}{T_{TCSC}} (\Delta X_{ref} - \Delta X_{TCSC} - K_{TCSC} \Delta P_{km}) \quad (79)$$

A substituição da Equação (69) na Equação (79) fornece a Equação (80), a qual define o comportamento dinâmico do TCSC.

$$\Delta \dot{X}_{TCSC} = K_1 \Delta X_{TCSC} + K_2 \Delta \theta_{km} + K_3 \Delta V_k + K_4 \Delta V_m + K_5 \Delta X_{ref} \quad (80)$$

As constantes K_1 , K_2 , K_3 , K_4 e K_5 são os coeficientes do comportamento dinâmico do n -ésimo TCSC e suas expressões são definidas nas Equações (81) a (85).

$$K_{1n} = \frac{-(1 + K_{TCSC_n} A_{4km})}{T_{TCSC_n}} \quad (81)$$

$$K_{2n} = \frac{-K_{TCSC_n} A_{1km}}{T_{TCSC_n}} \quad (82)$$

$$K_{3n} = \frac{-K_{TCSC_{nd}} A_{2km}}{T_{TCSC_n}} \quad (83)$$

$$K_{4n} = \frac{-K_{TCSC_{nd}} A_{3km}}{T_{TCSC_n}} \quad (84)$$

$$K_{5n} = \frac{1}{T_{TCSC_n}} \quad (85)$$

Para a representação do MSP multimáquinas com a atuação de dispositivos TCSC, considera-se um SEP multimáquinas com n_g geradores, n_b barras e n_d dispositivos TCSC instalados em linhas de transmissão entre as barras iniciais (n_{bi}) e finais (n_{bf}), definidas de acordo com o sentido do fluxo de potência. Assim, as constantes definidas nas Equações (80) a

(85) podem ser agrupadas na forma matricial, definidas nas Equações (86) a (89).

$$K_1 = \begin{bmatrix} K_{1_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{1_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{1_n} \end{bmatrix} \quad (86)$$

$$\begin{cases} K_2(n_d, n_{bi}) = -K_{2_n} \\ K_2(n_d, n_{bf}) = K_{2_n} \\ K_2(n_d, n_b) = 0 \end{cases} \quad (87)$$

$$\begin{cases} K_{34}(n_d, n_{bi}) = K_{3_n} \\ K_{34}(n_d, n_{bf}) = K_{4_n} \\ K_{34}(n_d, n_b) = 0 \end{cases} \quad (88)$$

$$K_5 = \begin{bmatrix} K_{5_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{5_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{5_n} \end{bmatrix} \quad (89)$$

O conjunto de Equações (80) a (89) permite inserir o modelo dinâmico do TCSC no MSP e sua atuação modificará, conseqüentemente, as matrizes J_1 , J_2 , J_3 , B_1 e B_2 (Equações (51), (52), (53), (55) e (56)) pelas matrizes das Equações (90), (91), (97), (92) e (98), além de inserir uma nova variável de estado (Equação (93)) e uma nova variável de entrada (Equação (94)) equivalentes ao seu funcionamento.

$$J_1 = \begin{bmatrix} J_1 & [0] \\ [0] & [K_1] \end{bmatrix} \quad (90)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} J_2 \\ [K_2] & [K_{34}] \end{bmatrix} \quad (91)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} B_1 & [0] \\ [0] & [K_5] \end{bmatrix} \quad (92)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta\omega_1 \dots \omega_{ng}]^t & [\Delta\delta_1 \dots \delta_{ng}]^t & [\Delta E'_{q_1} \dots \Delta E'_{q_{ng}}]^t & [\Delta E_{fd_1} \dots \Delta E_{fd_{ng}}]^t \\ & & & [\Delta X_{TCSC_1} \dots \Delta X_{TCSC_{nd}}]^t \end{bmatrix}^t \quad (93)$$

$$\Delta u = \left[\begin{array}{cccc} [\Delta P_{mec_1} \dots \Delta P_{mec_{ng}}]^t & [\Delta V_{ref_1} \dots \Delta V_{ref_{ng}}]^t & [\Delta P_{L_1} \dots \Delta P_{L_{nb}}]^t & [\Delta Q_{L_1} \dots \Delta Q_{L_{nb}}]^t \\ & & & [\Delta X_{ref_1} \dots \Delta X_{ref_{nd}}]^t \end{array} \right]^t \quad (94)$$

Nas Equações (95) e (96) são definidas as regras de formação das submatrizes A_{4km} e R_{4km} , que representam o efeito do dispositivo TCSC no balanço de potências ativa e reativa em cada barra do sistema.

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{4km} = (n_{bi}, n_d) = -A_{4km} \\ A_{4km} = (n_{bf}, n_d) = -A_{4mk} \\ A_{4km} = (n_b, n_d) = 0 \end{array} \right. \quad (95)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{4km} = (n_{bi}, n_d) = -R_{4km} \\ R_{4km} = (n_{bf}, n_d) = -R_{4mk} \\ R_{4km} = (n_b, n_d) = 0 \end{array} \right. \quad (96)$$

Com as Equações (69), (70), (95) e (96) é obtida a modificação da forma matricial das equações algébricas (Equações (97) e (98)), que consideradas na Equação (47) descrevem o balanço nodal de potência ativa e o balanço nodal de potência reativa, para todas as barras do SEP.

$$J_3 = \left[\begin{array}{cc} [J_3] & [A_{4km}] \\ & [R_{4km}] \end{array} \right] \quad (97)$$

$$B_2 = \left[\begin{array}{cc} [0] \\ [B_2] & [0] \end{array} \right] \quad (98)$$

3.3 ESTABILIZADORES DO SISTEMA DE POTÊNCIA

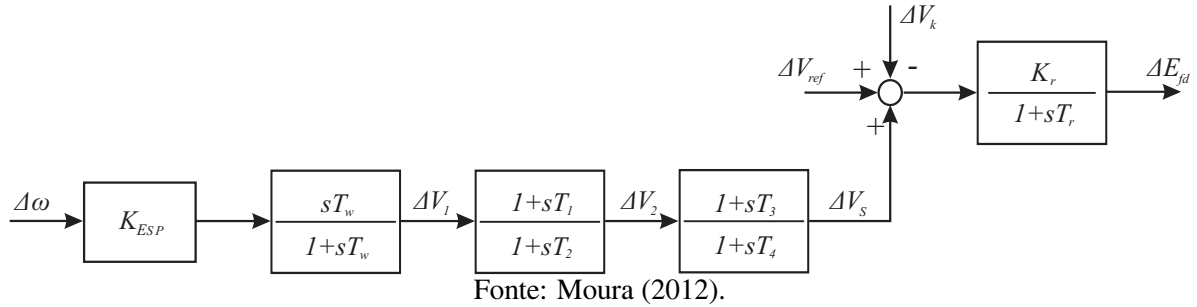
Na Figura 5 é mostrado o modelo do controlador ESP, com o sinal de saída ΔV_s aplicado diretamente à malha de controle de um RAT, baseado na estrutura mostrada na Figura 2.

As variações da velocidade angular do rotor ($\Delta\omega$) do gerador síncrono de instalação do ESP são consideradas como sinal de entrada. Este sinal de entrada é muito utilizado na literatura, uma vez que a função do ESP é introduzir amortecimento aos modos oscilatórios do SEP e todo torque elétrico está em fase com a velocidade angular do rotor é chamado de torque de amortecimento (LARSEN; SWANN, 1981).

No modelo mostrado na Figura 5, o controlador ESP possui um ganho (K_{ESP}) ajustado

para obter o amortecimento desejado, um bloco de *washout* definido pela constante T_w e as constantes T_1 , T_2 , T_3 e T_4 , responsáveis para compensação de fase de interesse (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981; TALAQ, 2012).

Figura 5 - Modelo Dinâmico do ESP



3.3.1 Inclusão do ESP no MSP

A inclusão do controlador ESP no MSP introduz três novas variáveis de estado, as quais neste trabalho, são definidas como ΔV_1 , ΔV_2 e ΔV_s . Por meio de uma análise do diagrama mostrado na Figura 5, são obtidas as Equações (99) a (101), as quais descrevem o comportamento do ESP e que devem ser incluídas no MSP multimáquinas.

$$\Delta \dot{V}_1 = K_{ESP} \Delta \dot{\omega} - \frac{1}{T_w} \Delta V_1 \quad (99)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_1 + \frac{1}{T_2} \Delta V_1 - \frac{1}{T_2} \Delta V_2 \quad (100)$$

$$\Delta \dot{V}_s = \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{V}_2 + \frac{1}{T_4} \Delta V_2 - \frac{1}{T_4} \Delta V_s \quad (101)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, a equação diferencial referente à tensão de campo do gerador síncrono pode ser escrita, em sua forma linearizada, como na Equação (102).

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_r} \Delta E_{fd} + \frac{K_r}{T_r} \Delta V_{ref} - \frac{K_r}{T_r} \Delta V_k + \frac{K_r}{T_r} \Delta V_s \quad (102)$$

Ao se comparar a Equação (102) com a Equação (43), conclui-se que a diferença está no termo referente à variável ΔV_s , que com a inclusão do ESP passa a fazer parte da Equação (102).

A partir das (99) a (102) é possível incluir o n -ésimo controlador ESP no MSP. Além das variáveis de estado (Equação (48)) verificadas no Capítulo 2, outras três novas variáveis de estado são inseridas no MSP pelo funcionamento do ESP. A inclusão do ESP no MSP

alterará as matrizes J_1 , J_2 , J_3 e B_1 (Equações (51), (52), (53) e (55)), que podem ser verificadas conseqüentemente pelas Equações (103), (106), (107) e (108), além da modificação do vetor de variáveis de estado (Equação (109)).

$$J_1 = \begin{bmatrix} J_1 & \\ & J_{1a} \\ & J_{1b} \end{bmatrix} \quad (103)$$

$$J_{1a} = \begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & -\frac{[K_r]}{[T_r]} \\ [0] & [0] & [0] \\ \frac{1}{[T_2]} \left(1 - \frac{[T_1]}{[T_w]}\right) & -\frac{1}{[T_2]} & [0] \\ \frac{[T_3]}{[T_2][T_4]} \left(1 - \frac{[T_1]}{[T_w]}\right) & \frac{1}{[T_4]} \left(1 - \frac{[T_3]}{[T_2]}\right) & -\frac{1}{[T_4]} \end{bmatrix} \quad (104)$$

$$J_{1b} = \begin{bmatrix} -\frac{[K_{ESP}][D]}{[M]} & -\frac{[K_{ESP}][A_{1g}]}{[M]} & -\frac{[K_{ESP}][A_{2g}]}{[M]} & -\frac{1}{[T_w]} \\ -\frac{[K_{ESP}][T_1][D]}{[M][T_2]} & -\frac{[K_{ESP}][T_1][A_{1g}]}{[M][T_2]} & -\frac{[K_{ESP}][T_1][A_{2g}]}{[M][T_2]} & [0] \\ -\frac{[K_{ESP}][T_1][T_3][D]}{[M][T_2][T_4]} & -\frac{[K_{ESP}][T_1][T_3][A_{1g}]}{[M][T_2][T_4]} & -\frac{[K_{ESP}][T_1][T_3][A_{2g}]}{[M][T_2][T_4]} & [0] \end{bmatrix} \quad (105)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} & J_2 & & \\ \frac{[K_{ESP}][A_{1g}]}{[M]} & [0] & -\frac{[K_{ESP}][A_{3g}]}{[M]} & [0] \\ \frac{[K_{ESP}][T_1][A_{1g}]}{[M][T_2]} & [0] & -\frac{[K_{ESP}][T_1][A_{3g}]}{[M][T_2]} & [0] \\ \frac{[K_{ESP}][T_1][T_3][A_{1g}]}{[M][T_2][T_4]} & [0] & -\frac{[K_{ESP}][T_1][T_3][A_{3g}]}{[M][T_2][T_4]} & [0] \end{bmatrix} \quad (106)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} J_3 & [0] \end{bmatrix} \quad (107)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} & B_1 & & \\ & \frac{[K_{ESP}]}{[M]} & [0] & [0] & [0] \\ & \frac{[K_{ESP}][T_1]}{[M][T_2]} & [0] & [0] & [0] \\ & \frac{[K_{ESP}][T_1][T_3]}{[M][T_2][T_4]} & [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (108)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta\omega_1 \dots \omega_{ng}]^t & [\Delta\delta_1 \dots \delta_{ng}]^t & [\Delta E'_{q_1} \dots \Delta E'_{q_{ng}}]^t & [\Delta E_{fd_1} \dots \Delta E_{fd_{ng}}]^t \\ & [\Delta V_{1_1} \dots \Delta V_{1_n}]^t & [\Delta V_{2_1} \dots \Delta V_{2_n}]^t & [\Delta V_{S_1} \dots \Delta V_{S_n}]^t \end{bmatrix}^t \quad (109)$$

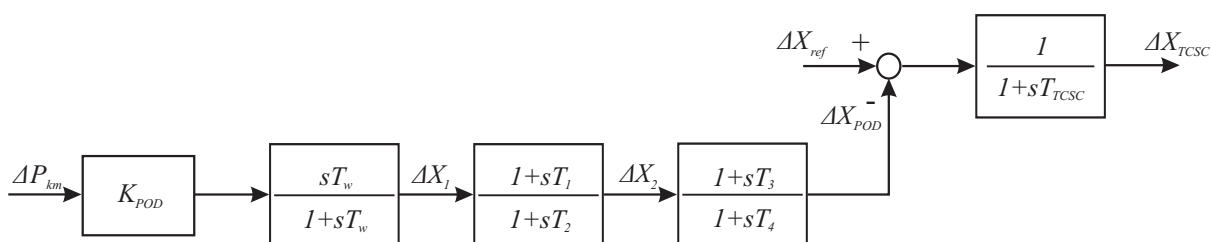
3.4 POWER OSCILLATION DAMPING

Basicamente a estrutura do controlador POD é a mesma do controlador ESP, sendo a diferença entre eles o modo de atuação e os sinais de entrada e saída. O ESP é um controlador suplementar colocado na malha de controle de excitação do gerador síncrono. Em se tratando do POD, sua localização se dá no sistema de transmissão, acoplado a um dispositivo FACTS (em particular deste trabalho, o dispositivo TCSC).

Enquanto que para o ESP é usual utilizar como sinal de entrada as variações da velocidade angular do rotor do gerador síncrono (ANDERSON; FOUAD, 2003; DEMELLO; CONCORDIA, 1969; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981), para o POD o sinal de entrada considerado são as variações da potência ativa (ΔP_{km}) da LT em que o TCSC está instalado (FURINI; ARAUJO, 2008; YANG; LIU; MCCLELLY, 1998). Como já mencionado no Capítulo 1, a escolha deste sinal de entrada é escolhido por ser um sinal que é obtido localmente e, também, porque os modos interárea de oscilação possuem alta observabilidade a partir deste sinal.

Na Figura 6 é mostrada a estrutura básica do controlador POD para o dispositivo TCSC (ALAM et al., 2012; FURINI; ARAUJO, 2008; LIN; XU; HUANG, 2005), sendo o sinal ΔX_{ref} o desvio do valor da reatância do TCSC em regime permanente.

Figura 6 - Modelo Dinâmico do Dispositivo TCSC-POD

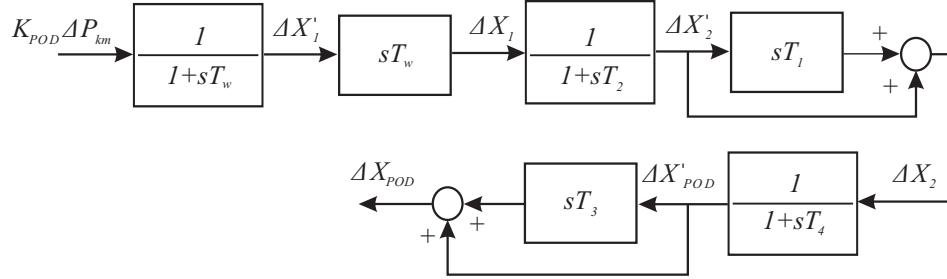


Fonte: Moura (2012).

3.4.1 Inclusão do POD no MSP

Como a entrada do controlador POD (ΔP_{km}) não é uma variável de estado, é necessário dividir a estrutura mostrada na Figura 6 (FURINI; ARAUJO, 2008), o que resulta na Figura 7 com novas variáveis de estado ($\Delta X'_1$, $\Delta X'_2$ e $\Delta X'_{POD}$) sem significado físico, porém úteis para a modelagem do controlador na forma de espaço de estados.

Por inspeção da Figura 7 as derivadas das variáveis de estado ΔX_1 , ΔX_2 e ΔX_{POD} , são

Figura 7 - Divisão dos Blocos de *washout* e avanço-atraso de fase do POD

Fonte: Furini (2011).

definidas, respectivamente, nas Equações (110) a (112).

$$\Delta \dot{X}'_1 = \frac{K_{POD}}{T_w} \Delta P_{km} - \frac{1}{T_w} \Delta X'_1 \quad (110)$$

$$\Delta \dot{X}'_2 = \frac{K_{POD}}{T_2} \Delta P_{km} - \frac{1}{T_2} \Delta X'_1 - \frac{1}{T_2} \Delta X'_2 \quad (111)$$

$$\Delta \dot{X}_{POD} = K_{POD} \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta P_{km} - \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta X'_1 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} \Delta X'_2 - \frac{1}{T_4} \Delta X'_{POD} \quad (112)$$

Na Equação (113) é escrita a expressão de modulação da reatância série do dispositivo TCSC e responsável pela introdução de amortecimento às oscilações de baixa frequência do SEP.

$$\Delta \dot{X}_{TCSC} = \frac{1}{T_{TCSC}} (\Delta X_{ref} - \Delta X_{TCSC} - \Delta X_{POD}) \quad (113)$$

Para a inclusão do controlador POD no MSP, é considerada a Equação (47), com a modificação das Equações (51), (52), (53), (55) e (56) pelas Equações (114), (116), (117), (118) e (98), além de alterar o vetor de variáveis de estado (Equação (119)) e do vetor de variáveis de entrada (Equação (94)).

$$J_1 = \begin{bmatrix} [J_1] & [0] \\ [0] & [J_{1c}] \end{bmatrix} \quad (114)$$

$$J_{1c} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{[T_w]} & [0] & [0] & \frac{[K_{POD}][A_{4km}]}{[T_w]} \\ -\frac{1}{[T_2]} & -\frac{1}{[T_2]} & [0] & \frac{[K_{POD}][A_{4km}]}{[T_2]} \\ -\frac{1}{[T_2][T_4]} & \frac{1}{[T_4]} \left(1 - \frac{[T_1]}{[T_2]}\right) & -\frac{1}{[T_4]} & \frac{[K_{POD}][T_1][A_{4km}]}{[T_2][T_4]} \\ -\frac{[T_1][T_3]}{[T_2][T_4][T_{rcsc}]} & -\frac{[T_3]}{[T_4][T_{rcsc}]} \left(1 - \frac{[T_1]}{[T_2]}\right) & -\frac{1}{[T_{rcsc}]} \left(1 - \frac{[T_3]}{[T_4]}\right) & -\frac{[K_{POD}][T_1][T_3][A_{4km}]}{[T_2][T_4][T_{rcsc}]} - \frac{1}{[T_{rcsc}]} \end{bmatrix} \quad (115)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} [J_2] & & & \\ \frac{[K_{POD}][A_{1km}]}{[T_w]} & -\frac{[K_{POD}][A_{1km}]}{[T_w]} & \frac{[K_{POD}][A_{2km}]}{[T_w]} & \frac{[K_{POD}][A_{3km}]}{[T_w]} \\ \frac{[K_{POD}][A_{1km}]}{[T_2]} & -\frac{[K_{POD}][A_{1km}]}{[T_2]} & \frac{[K_{POD}][A_{2km}]}{[T_2]} & \frac{[K_{POD}][A_{3km}]}{[T_2]} \\ \frac{[K_{POD}][T_1][A_{1km}]}{[T_2][T_4]} & -\frac{[K_{POD}][T_1][A_{1km}]}{[T_2][T_4]} & \frac{[K_{POD}][T_1][A_{2km}]}{[T_2][T_4]} & \frac{[K_{POD}][T_1][A_{3km}]}{[T_2][T_4]} \\ -\frac{[K_{POD}][T_1][T_3][A_{1km}]}{[T_2][T_4][T_{TCSC}]} & \frac{[K_{POD}][T_1][T_3][A_{1km}]}{[T_2][T_4][T_{TCSC}]} & -\frac{[K_{POD}][T_1][T_3][A_{2km}]}{[T_2][T_4][T_{TCSC}]} & -\frac{[K_{POD}][T_1][T_3][A_{3km}]}{[T_2][T_4][T_{TCSC}]} \end{bmatrix} \quad (116)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} [J_3] & [0] & [A_{4km}] \\ [0] & [0] & [R_{4km}] \end{bmatrix} \quad (117)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [0] \\ [0] \quad \frac{1}{[T_{TCSC}]} \end{bmatrix} \quad (118)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta\omega_1 \dots \omega_{ng}]^t [\Delta\delta_1 \dots \delta_{ng}]^t [\Delta E'_{q_1} \dots \Delta E'_{q_{ng}}]^t [\Delta E_{fd_1} \dots \Delta E_{fd_{ng}}]^t [\Delta X_{1_1} \dots \Delta X_{1_{nd}}]^t \\ [\Delta X_{2_1} \dots \Delta X_{2_{nd}}]^t [\Delta X_{POD_1} \dots \Delta X_{POD_{nd}}]^t [\Delta X_{TCSC_1} \dots \Delta X_{TCSC_{nd}}]^t \end{bmatrix}^t \quad (119)$$

3.5 CONCLUSÕES

Nesse capítulo, foi abordado o dispositivo TCSC e os controladores suplementares ESP e POD, os quais são capazes de melhorar os níveis de operação de um SEP. Foram apresentados os aspectos fundamentais destes dispositivos, além de mostrar o modelo simplificado de cada um deles.

O equacionamento do dispositivo TCSC e dos controladores ESP e POD foram realizados a partir dos seus modelos dinâmicos e suas equações foram posteriormente incluídas no MSP multimáquinas.

Com a inclusão dos controladores ESP e POD, espera-se aumentar os níveis de amortecimento das oscilações de baixa frequência do SEP. A melhora no desempenho do SEP no que se refere à estabilidade a pequenas perturbações é obtida pelo ajuste correto dos parâmetros dos controladores ESP e POD. A localização destes controladores no SEP também é determinante em seu projeto. No Capítulo 4, são definidas as técnicas de localização e ajuste dos parâmetros do controlador ESP e dispositivo TCSC-POD, para posteriormente verificar sua eficácia no amortecimento das oscilações de baixa frequência pouco amortecidas ou até mesmo instáveis do SEP.

4 LOCALIZAÇÃO E AJUSTE DE PARÂMETROS DOS ESPS E TCSC-POD

4.1 INTRODUÇÃO

Nessa seção são discutidos os métodos de localização e ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares. O uso indevido de dispositivo de controle pode provocar estados críticos de operação, ou seja, a definição da localização e do ajuste de parâmetros dos controladores suplementares de forma incorreta pode resultar em condições ineficazes para a operação do SEP.

Inicialmente, são definidos os métodos para localização e, posteriormente, os métodos para determinar os parâmetros dos controladores suplementares. A localização do controlador ESP e do conjunto TCSC-POD influenciará no cálculo de seus parâmetros, justificando a ordem de procedimento adotado.

Para a localização do controlador ESP são utilizados os fatores de participação (KUNDUR, 1994) de cada gerador síncrono aos modos oscilatórios. No caso do conjunto TCSC-POD é analisada a distância entre o polo e o zero referente da função de transferência em malha aberta do controlador POD (MOURA, 2012).

Métodos de otimização são utilizados para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e POD. São discutidos dois métodos de otimização fundamentados no comportamento de enxames, baseados no algoritmo PSO (ABIDO, 2002) e pelo algoritmo BFO (PASSINO, 2000). É realizada uma modificação no algoritmo BFO, de modo que sua orientação se alterne por componentes do algoritmo PSO (KORANI; DORRAH; EMARA, 2009).

4.2 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO

4.2.1 Controladores ESP

Os fatores de participação (p_{ki}) podem ser utilizados para identificar a relação entre as variáveis de estado e os modos oscilatórios, independentemente da unidade e dimensionamento das variáveis de estado (KUNDUR, 1994).

Ao analisar os fatores de participação, é possível determinar a influência de um certo gerador síncrono com relação a uma variável de estado. Esta análise será a utilizada para determinar a localização dos controladores ESP a partir dos fatores de participação, obtidos pelo vetor de p_{ki} descrito na Equação (120), sendo k a representação da variável de estado e i a

representação do modo oscilatório considerado.

$$p_{ki} = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ki} \psi_{ik} \end{bmatrix} \quad (120)$$

Na Equação (120) ϕ_{ki} é o autovetor esquerdo relacionado ao modo oscilatório i de uma variável de estado k , enquanto ψ_{ik} é o autovetor direito relativo à variável de estado k de um modo oscilatório i . Assim, pode ser definida a participação de uma variável k em um modo de oscilação i .

A multiplicação dos autovetores à esquerda e à direita faz com que p_{ki} se torne adimensional, independentemente da escolha de sua unidade. A somatória dos fatores de participação associado a qualquer um dos modos oscilatórios ou variável de estado é igual a 1 (KUNDUR, 1994).

4.2.2 Conjunto TCSC-POD

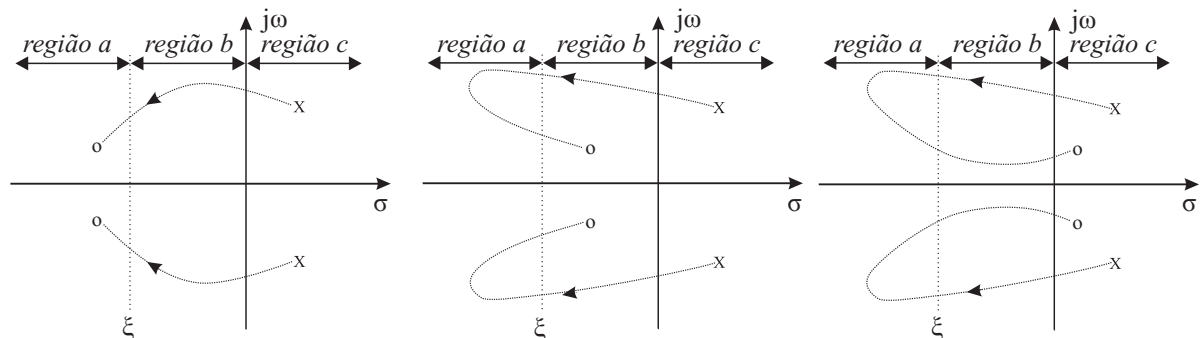
A localização do TCSC-POD é determinada pelo cálculo da distância entre o polo e o zero, referente ao modo interárea, da função de transferência em malha aberta (FTMA) do controlador POD. A posição do zero da FTMA é determinante para o deslocamento do polo da função de transferência em malha fechada (FTMF) do sistema a ser controlado (MOURA, 2012).

A posição relativa entre um polo de interesse e um zero poderá dificultar ou facilitar o controle sobre um sistema. A melhor localização é determinada pela maior distância entre o polo de interesse e o zero relacionado a um modo interárea (MARTINS; PINTO; LIMA, 1992; MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012). Esta análise deve ser feita considerando o funcionamento dos controladores ESP e TCSC-POD com ganho do controlador POD nulo.

Na Figura 8 são ilustrados esquemas de como ocorre o deslocamento de polos com relação ao zero da FTMA. A posição do polo será igual à posição do zero relacionado quando o ganho do controlador POD tender ao infinito. Considerando a posição do polo com ganho infinito do controlador POD, pode-se afirmar que a *região a* é considerada como sendo uma situação estável desejada, na *região b* uma situação estável indesejada e na *região c* situação instável. Se o coeficiente de amortecimento relacionado ao polo for maior que o amortecimento desejado (ξ_d), é considerado como situação estável desejada, mas se for menor é uma situação estável

indesejada e uma situação instável para o coeficiente de amortecimento negativo.

Figura 8 - Deslocamento de polos em ocasiões diferentes



Fonte: Moura (2012).

Uma característica fundamental é que quanto menor a distância entre o polo de interesse e o zero, maior a atração no deslocamento do polo da FTMF do sistema a ser controlado, o que limitará a faixa de desempenho do controlador POD (MOURA, 2012).

Outro ponto que pode ser observado na Figura 8 é a posição do zero. Se o zero estiver na *região b* ou *região c* poderá ocorrer uma atração do polo para uma região indesejada, o que não ocorre caso o zero estiver posicionado na *região a*. Esta análise também é válida para verificar qual localização seria a mais indicada, assegurando que o polo não seja atraído para posições indesejáveis.

4.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

4.3.1 Algoritmo PSO

O algoritmo PSO foi proposto por Kennedy e Eberhart (1995) após observar relatos do sociobiologista *Edward O. Wilson*, que verificou o comportamento de enxames de pássaros em uma determinada região, realizando alterações específicas na posição de cada indivíduo com uma determinada velocidade de deslocamento (RAO, 2009).

O PSO pode ser tratado como um enxame de partículas, onde cada partícula representa um indivíduo. Esses indivíduos devem ser distribuídos em um espaço qualquer e obedecer a três conceitos básicos: harmonia, separação e alinhamento. Os indivíduos devem se movimentar no espaço evitando colisões entre si (harmonia), sem ocupar ou se aproximar em espaços já ocupados por outros (separação) e, no geral, seguir o restante do enxame (alinhamento) (RAO, 2009).

Segundo Lee e El-Sharkawi (2008) são exemplificados diversos algoritmos do PSO,

mostrando suas características e diferenças. O algoritmo original proposto por Kennedy e Eberhart (1995) e demonstrado por Lee e El-Sharkawi (2008), Yoshida et al. (2000) são utilizados como base para desenvolvimento deste trabalho.

A movimentação do indivíduo em um espaço qualquer é determinada a partir de sua velocidade (Equação (121)), variável a cada mudança de posição no espaço considerado. Nas Equações (121) e (122) são definidas as formas de velocidade ($v_i(t+1)$) e da nova posição do indivíduo ($x_i(t+1)$) a partir da sua posição atual $x_i(t)$, onde i representa o indivíduo, t representa o número da transição e W o fator de busca (ponderação na velocidade atual do indivíduo). As variáveis c_1 e c_2 são ponderações e r_1 e r_2 distribuições aleatórias entre os valores 0 e 1.

$$v_i(t+1) = Wv_i(t) + c_1r_1co_i(t) + c_2r_2so_i(t) \quad (121)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (122)$$

A velocidade de deslocamento de cada indivíduo depende dos fatores sociais (so_i) e cognitivos (co_i) e, são definidos, respectivamente, nas Equações (123) e (124). Esses fatores são classificados de acordo com as posições percorridas pelos indivíduos do enxame, com os fatores sociais relacionados a cada um dos indivíduos com sua respectiva melhor posição ($Pbest_i$) e os fatores cognitivos relacionados a melhor posição encontrada entre todos os indivíduos do enxame ($Gbest$).

$$co_i = Pbest_i - x_i(t) \quad (123)$$

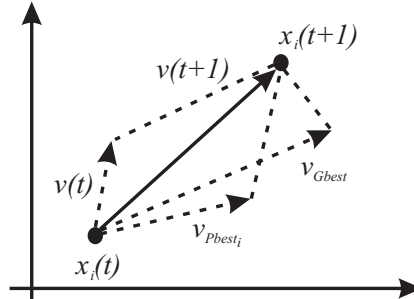
$$so_i = Gbest - x_i(t) \quad (124)$$

Para Bratton e Kennedy (2007), o enxame de partículas poderá convergir lentamente em relação a uma solução ótima sem garantia de convergência se $c_1 + c_2 < 4,0$. Se $c_1 + c_2 \geq 4,0$ a convergência pode ser rápida e garantida. Em algumas aplicações encontradas na literatura (ESLAMI et al., 2012; SHAYEGHI et al., 2009; YOSHIDA et al., 2000), é utilizado $c_1 + c_2 = 4,0$ sendo $c_1 = c_2 = 2,0$. No entanto, é possível ponderar a Equação (121) para favorecer a melhor posição encontrada por um indivíduo ou a melhor posição encontrada entre todos os indivíduos do enxame (BRATTON; KENNEDY, 2007).

Na Figura 9 é exemplificado o deslocamento de um indivíduo do enxame após uma transição ou iteração do algoritmo, onde $v_i(t)$ é a velocidade atual da partícula. As constantes

v_{Pbest_i} e v_{Gbest} são as velocidades relacionadas à melhor posição individual e global das partículas.

Figura 9 - Deslocamento da posição de uma partícula



Fonte: Yoshida et al. (2000).

Para deslocamento de um indivíduo em um espaço qualquer, é necessário controlar as formas de velocidade e posição. Nas Equações (125) e (126), são definidas, respectivamente, as restrições para a velocidade e posição. A constante v_{max} é a velocidade máxima de um indivíduo e as constantes x_{min} e x_{max} são relacionados aos valores mínimos e máximos permitidos para um indivíduo.

$$v_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t+1) & \text{se } -v_{max} \leq v_i(t+1) \leq v_{max} \\ -v_{max} & \text{se } v_i(t+1) < -v_{max} \\ v_{max} & \text{se } v_i(t+1) > v_{max} \end{cases} \quad (125)$$

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + v_i(t+1) & \text{se } x_{min} \leq x_i(t) + v_i(t+1) \leq x_{max} \\ x_{min} & \text{se } x_i(t) + v_i(t+1) < x_{min} \\ x_{max} & \text{se } x_i(t) + v_i(t+1) > x_{max} \end{cases} \quad (126)$$

As restrições impostas pelas Equações (125) e (126) permitem afirmar que um indivíduo não extrapolará os limites da região de busca determinados em projeto. Os valores mínimos e máximos de velocidade e posição são impostos a partir de valores determinados em projeto. No caso deste trabalho são as constantes ($T_{1_i} = T_{3_i}$, $T_{2_i} = T_{4_i}$ e K_i) dos controladores suplementares ESP e POD apresentados no Capítulo 3.

No Algoritmo 1 são definidos os passos para obter possíveis soluções factíveis com o PSO, baseados na proposta de Kennedy e Eberhart (1995). Esse algoritmo não garante que uma solução obtida é igual ou próxima de uma solução ótima para o problema, limitando-se apenas a respeitar ou não as condições de parada, as quais são diferenciadas pela convergência ou não do algoritmo. Se o algoritmo convergir, o erro calculado (ϵ_{calc}) deverá ser menor que o erro

permitido (ϵ_{per}). Porém, se o número de iterações (it) exceder o número máximo de iterações (n_{it}), o algoritmo não converge para uma solução desejada.

Algoritmo 1 - *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Entrada: $W, c_1, c_2, x_{min}, x_{max}, v_{max}, n_i, \epsilon_{per}$ e n_{it}

Saída: G_{best}

1 **Início**

2 **Repita**

3 determinar posições e velocidades aleatórias;

4 $x_i = x_{min} + (x_{max} - x_{min}) * rand([0 \ 1]);$

5 $v_i = v_{min} + (v_{max} - v_{min}) * rand([0 \ 1]);$

6 calcular e avaliar a função objetivo ($fo(x_i)$);

7 **Se** $fo(x_{i+1}) \leq fo(x_i)$ **Então**

8 $G_{best} = x_i;$

9 $P_{best_i} = x_i;$

10 **Senão**

11 $P_{best_i} = x_i;$

12 **Fim**

13 **Até** $n_i;$

14 **Enquanto** $\epsilon_{calc} \geq \epsilon_{per}$ **ou** $it \leq n_{it}$ **Faça**

15 $it = it + 1;$

16 **Repita**

17 calcular fatores cognitivos e sociais co_i e so_i (Equações (123) e (124));

18 calcular a velocidade (Equação (121));

19 aplicar condições de velocidade e posição (Equações (125) e (126));

20 calcular e avaliar a função objetivo ($fo(x_i)$);

21 **Se** $fo(x_i) \leq fo_{P_{best_i}}$ **Então**

22 $P_{best_i} = x_i;$

23 **Senão**

24 $P_{best_i} = P_{best_i};$

25 **Fim**

26 **Se** $fo(x_i) \leq fo_{G_{best}}$ **Então**

27 $G_{best} = x_i;$

28 **Senão**

29 $G_{best} = G_{best};$

30 **Fim**

31 $\epsilon_{calc} = fo(x_i);$

32 **Até** n_i **ou** $\epsilon_{calc} \geq \epsilon_{det};$

33 **Fim**

34 **Fim**

4.3.2 Algoritmo BF-PSO

A estratégia empregada na busca de alimentos, com tempo reduzido, é uma das formas para sobrevivência dos seres vivos em geral. Essas estratégias, com o passar do tempo, foram

naturalmente sendo aprimoradas de acordo com o ambiente de cada um. Baseados neste contexto, as estratégias na busca de alimentos, de um grupo ou um indivíduo, tornaram-se objeto de estudo (PASSINO, 2000).

De acordo com Passino (2000) e Passino (2002), são definidos aspectos com relação à estratégia de busca de alimentos da bactéria *Escherichia Coli* (conhecida como *E. coli*), na qual tendem a encontrar áreas ricas para coleta de alimentos, por meio de processo de localização, manipulação e ingestão.

O comportamento, na busca de alimentos, da bactéria *E. coli* será utilizado para encontrar possíveis regiões com soluções desejadas (áreas ricas em alimentos). Esse comportamento será tratado como algoritmo BFO e, sua composição básica é formada por quatro etapas sequenciais: quimiotaxia, aglomeração, reprodução e dispersão (ALI; MAJHI, 2006; PASSINO, 2002).

A etapa de quimiotaxia representa o deslocamento de uma bactéria, realizado na direção de uma determinada região (nado) ou por um movimento aleatório (giro), resultando em uma direção indeterminada (PASSINO, 2002). Na Equação (127) é definido o deslocamento de uma bactéria, considerando um passo de deslocamento ($C(i)$) com sua direção a ser determinada ($\phi(i)$). A representação de $\theta^i(j, k, l)$ é referente à bactéria na i -ésima posição, na j -ésima etapa de quimiotaxia, k -ésima etapa de reprodução e l -ésima etapa de dispersão.

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\phi(i) \quad (127)$$

Caso o deslocamento $C(i)$ de uma bactéria encontrar uma área mais rica de soluções, se comparada com a área anterior, um passo $C(i)$ deve ser dado nesta direção (representação do nado). Este procedimento deve continuar até que o número de nados permitidos sejam excedidos, ou um nado não obtenha uma melhor posição. Neste caso é dado um giro, que é definido pela Equação (128) (ALI; ABD-ELAZIM, 2012). A variável $\Delta(i)$ é um vetor aleatório (com tamanho igual ao número de bactérias) responsável por mudar a direção de uma determinada bactéria, com valores reais especificados entre o intervalo de -1 a 1.

$$\phi(i) = \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \times \Delta(i)}} \quad (128)$$

Para saber a qualidade atribuída a um deslocamento $\theta^i(j+1, k, l)$, é necessário a cada mudança de posição calcular um índice para avaliar a sua saúde, a qual representa a função objetivo do problema de otimização. Na Equação (129), é definida a saúde ($J(i, j+1, k, l)$) de cada bactéria após um certo deslocamento $\theta^i(j+1, k, l)$, sendo $J_{cc}(\theta^i(j+1, k, l))$ a

representação da aglomeração entre as bactérias (PASSINO, 2002).

$$J(i, j+1, k, l) = J(i, j, k, l) + J_{cc}(\theta^i(j+1, k, l)) \quad (129)$$

A tendência de organização entre as bactérias é chamada de aglomeração e pode ser representada pela Equação (130), sendo S o número de bactérias e d o número de parâmetros otimizados. O valor da função de aglomeração é igual a zero conforme a tendência em encontrar um ponto ótimo pelas bactérias (PASSINO, 2002). As constantes $d_{attract}$, $h_{repellant}$, $w_{attract}$ e $w_{repellant}$ são coeficientes que regulam a forma de atração ou repulsão entre as bactérias.

$$J_{cc}(\theta^i(j+1, k, l)) = \sum_{i=1}^S -d_{attract} \times \exp(-w_{attract} \sum_{i=1}^d (\theta_m - \theta_m^i)^2) \\ + \sum_{i=1}^S -h_{repellant} \times \exp(-w_{repellant} \sum_{i=1}^d (\theta_m - \theta_m^i)^2) \quad (130)$$

A etapa de reprodução consiste na substituição das bactérias menos saudáveis pelas mais saudáveis. Essa etapa é realizada após a j -ésima etapa de quimiotaxia pertencente a k -ésima etapa de reprodução e l -ésima etapa de dispersão.

Em uma etapa de dispersão são eliminadas as bactérias menos saudáveis. Após esta eliminação são reiniciadas as etapas representadas pela j -ésima etapa de quimiotaxia e k -ésima etapa de reprodução. Vale ressaltar que a saúde de uma bactéria é definida pela sua respectiva função objetivo.

A forma de aglomeração, definida na Equação (130), em conjunto com a etapa de reprodução pode ser substituída pelas formas de movimentação do indivíduos do algoritmo PSO (KORANI; DORRAH; EMARA, 2009), representados pelas formas de velocidade e posição, respectivamente, definidas nas Equações (121) e (122). Portanto, a proposta de modificação de Korani, Dorrah e Emara (2009) para o algoritmo BFO, será tratada como algoritmo BF-PSO.

No Algoritmo 2 são definidos os passos para construção de um algoritmo com o BF-PSO. Essa proposta é baseada no algoritmo apresentado em Korani, Dorrah e Emara (2009).

Em um algoritmo BFO, a forma de reprodução das bactérias é de acordo com sua saúde, sendo replicadas as bactérias mais saudáveis no lugar das menos saudáveis. Porém, não é possível garantir que as regiões mais saudáveis possuem os melhores indicativos para regiões ricas em alimentos, ou seja, a partir das regiões mais saudáveis, determinadas na k -ésima etapa de reprodução, pode ser que não se encontre regiões ricas em alimentos.

Devido à alteração da etapa de reprodução por meio dos operadores do algoritmo PSO, é

Algoritmo 2 - *Bacterial Foraging* orientado pelo *Particle Swarm Optimization* (BF-PSO).

Entrada: $S, \theta_{inf}, \theta_{sup}, n_s, n_c, n_{re}, n_{ed}, p_{ed}, c_1$ e c_2

Saída: $\theta_{geral}(j, k, l)$

```

1 Início
2   Repita
3      $m = m + 1;$ 
4     determinar posições aleatórias para cada bactéria;
5      $\theta^m = \theta_{inf} + (\theta_{sup} - \theta_{inf}) * rand([0 \ 1]);$ 
6   Até  $m < S;$ 
7   Enquanto  $l < n_{ed}$  Faça
8      $l = l + 1;$ 
9     Enquanto  $k < n_{re}$  Faça
10       $k = k + 1;$ 
11      Enquanto  $j < n_c$  Faça
12         $j = j + 1;$ 
13        Enquanto  $i < S$  Faça
14           $i = i + 1;$ 
15          calcular a função objetivo  $J(i, j, k, l)$  para  $\theta^i(j, k, l);$ 
16          considerar a Equação (127) para atualização da posição  $\theta^i(j + 1, k, l);$ 
17          recalculer a função objetivo  $J(i, j + 1, k, l)$  para  $\theta^i(j + 1, k, l);$ 
18          Enquanto  $n_{nado} < n_s$  Faça
19             $n_{nado} = n_{nado} + 1;$ 
20            Se  $J(i, j + 1, k, l) < J(i, j, k, l)$  Então
21              considerar passo com a Equação (127) em  $\theta^i(j + 1, k, l);$ 
22              recalculer a função objetivo  $J(i, j + 1, k, l)$  para  $\theta^i(j + 1, k, l);$ 
23            Senão
24               $n_{nado} = n_s;$ 
25            Fim
26          Fim
27        Fim
28      Fim
29      verificar a saúde de cada bactéria  $\theta_{local}^i(j, k, l) = \theta^i(j, k, l);$ 
30      verificar a bactéria mais saudável entre todas  $\theta_{geral}(j, k, l) = \theta^i(j, k, l);$ 
31    Repita
32       $m = m + 1;$ 
33      atualizar  $\theta^i(j, k, l)$  de acordo com os operadores do algoritmo PSO
34      definidos nas Equações (121) a (126);
35    Até  $m < S;$ 
36  Fim
37  atualizar  $\theta^i(j, k, l)$  excluindo a porcentagem  $p_{ed}$  de bactérias menos saudáveis;
38 Fim

```

obtida uma maior aleatoriedade na busca indicativa em regiões ricas em alimentos, justificando, assim, a proposta de modificação descrita neste trabalho.

4.3.3 Formulação do Problema de Otimização

Ao se considerar as características definidas no Capítulo 2, é possível verificar se um SEP multimáquinas é estável ou não por meio da análise dos autovalores da matriz \mathcal{A} , a qual é definida na Equação (62). No caso deste trabalho, foram inseridos os modelos dinâmicos do controlador ESP e do conjunto TCSC-POD para auxiliar na estabilidade do SEP multimáquinas.

Como o foco do trabalho é estudar a estabilidade de pequenas perturbações, é de fundamental importância determinar de modo correto o local de instalação e ajuste do controlador ESP e do conjunto TCSC-POD. Os controladores suplementares ESP e POD são os componentes a serem ajustados com a função de introduzir amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência do SEP multimáquinas.

Portanto, os algoritmos de otimização descritos neste capítulo são utilizados para determinar os parâmetros dos controladores suplementares, de forma a introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência de modo coordenado e de acordo com o estipulado em projeto.

Observando as Figuras 5 e 6, pode-se verificar que o modelo dinâmico referentes aos controladores ESP e POD são semelhantes. Possuem um ganho (K), um bloco *washout* (T_w) e constantes de avanço-atraso de fase (T_1 , T_2 , T_3 e T_4). Neste trabalho, é considerado que $T_w = 10$, $T_1 = T_3$ e $T_2 = T_4$.

O conjunto de soluções referentes aos parâmetros ($T_{1_1} \dots T_{1_n}$, $T_{2_1} \dots T_{2_n}$ e $K_1 \dots K_n$) de n controladores suplementares instalados nos SEPs são calculados pelos algoritmos PSO e BFO-PSO. Neste conjunto de soluções um indivíduo (referente ao algoritmo PSO) ou uma bactéria (referente ao algoritmo BF-PSO) são equivalentes. Na Figura 10 é mostrada a representação de um indivíduo ou bactéria utilizada na formulação dos algoritmos PSO e BF-PSO. Para desenvolvimento deste trabalho foram considerados 25 indivíduos no algoritmo PSO e 10 bactérias no algoritmo BF-PSO.

Figura 10 - Representação de um indivíduo nos algoritmos PSO e BF-PSO

indivíduo/bactéria	1	T_{1_1}	T_{2_1}	K_1
	2	T_{1_2}	T_{2_2}	K_2
	3	T_{1_3}	T_{2_3}	K_3
	\vdots			
	n	T_{1_n}	T_{2_n}	K_n

Fonte: Elaboração do autor.

Para determinar as constantes (T_1 , T_2 e K) de cada controlador suplementar instalado no

SEP multimáquinas é necessário definir uma função objetivo, como definida na Equação (131). Essa equação tende a minimizar a distância entre os modos oscilatórios de interesse calculados (λ_{c_i}) e os modos de interesse desejados (λ_{d_i}).

$$\min \sum_{i=1}^n |\lambda_{c_i} - \lambda_{d_i}| \quad (131)$$

A partir da definição do coeficiente de amortecimento desejado (ξ_{d_i}), para cada modo oscilatório de interesse, é calculado o valor equivalente para λ_{d_i} . Os valores de λ_{c_i} são calculados a partir de simulações do SEP multimáquinas com as configurações dos controladores suplementares ESP e POD (valores das constantes T_1 , T_2 e K), obtidas por meio de iterações dos algoritmos de otimização.

A Equação (131) é sujeita ao conjunto de restrições definidas na Equação (132), sendo λ_k os autovalores da matriz \mathcal{A} e i a representação do modo oscilatório relacionado aos controladores ESP e POD. Com essas restrições não serão permitidas soluções infactíveis, visto como exemplo a saturação dos modos dos controladores de amortecimento e autovalores com parte real positiva.

$$\begin{aligned} K_i^{min} &\leq K_i \leq K_i^{max} \\ T_{1i}^{min} &\leq T_{1i} \leq T_{1i}^{max} \\ T_{2i}^{min} &\leq T_{2i} \leq T_{2i}^{max} \\ \xi_{d_i}^{min} &\leq \xi_{d_i} \leq \xi_{d_i}^{max} \\ \lambda_k &= Re(\lambda_k) \pm jIm(\lambda_k), \forall Re(\lambda_k) < 0 \end{aligned} \quad (132)$$

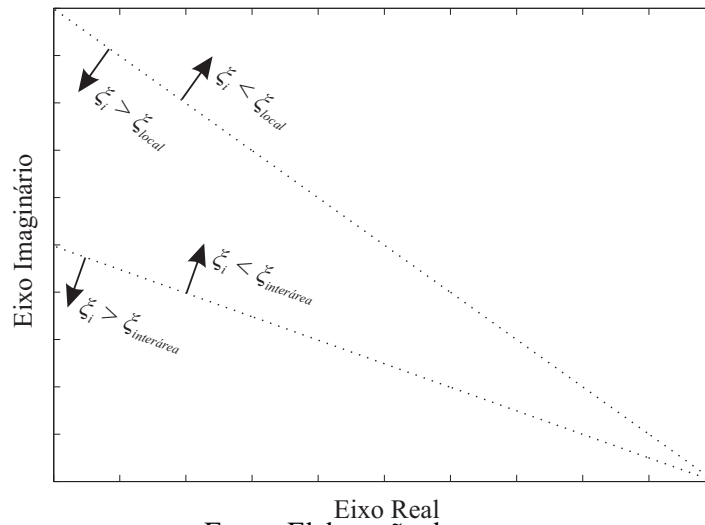
Com os parâmetros determinados pelos algoritmos de otimização, é desejado que os modos oscilatórios relacionados aos controladores ESP e POD se posicionem em uma determinada região do plano complexo. Na Figura 11, são ilustradas as regiões desejadas para os modos oscilatórios do tipo local e interárea.

Na Figura 11 as regiões são definidas por meio dos coeficientes de amortecimento especificados para cada modo oscilatório. Nesse trabalho, o mínimo desejado será definido em $\xi_{local} = 5\%$ para o modo local e $\xi_{interárea} = 10\%$ para o modo interárea.

4.4 CONCLUSÕES

Nesse capítulo, foram discutidos os métodos de localização e ajuste de parâmetros em controladores ESP e no conjunto TCSC-POD. Para a localização dos controladores foram

Figura 11 - Região de concentração para os autovalores desejados



Fonte: Elaboração do autor.

utilizados métodos clássicos de análise e para o ajuste de parâmetros foram abordados dois métodos de otimização (algoritmo PSO e BF-PSO).

No que se refere à localização dos ESPs, foram utilizados os fatores de participação. Para o conjunto TCSC-POD o método aplicado foi a distância entre o polo de interesse e o zero da FTMA do controlador POD.

Para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e POD, foi proposta a utilização de dois métodos de otimização baseados na cultura de enxames. A princípio foram estudados os algoritmos PSO e BFO, o primeiro baseado no comportamento de enxames em busca de alimentos e o segundo baseado no comportamento da bactéria *E. Coli* para encontrar áreas ricas em alimentos. Posteriormente, verificou-se que o deslocamento das bactérias do algoritmo BFO poderiam ser orientadas por particularidades do algoritmo PSO, sendo definido o algoritmo BF-PSO.

No Capítulo 5, serão realizadas simulações para verificar a eficácia das ferramentas e métodos propostos, para finalmente se realizar análises dos resultados encontrados e obter conclusões sobre o trabalho.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são apresentadas as simulações realizadas em três sistemas teste para análise da estabilidade a pequenas perturbações. O primeiro sistema teste é chamado de Sul-Brasileiro (PEREIRA, 2009), o qual apresenta modos oscilatórios locais estáveis e instáveis. O segundo sistema teste é chamado simétrico de duas áreas (KUNDUR, 1994), com modos oscilatórios locais estáveis (porém com baixo nível de amortecimento) e modo oscilatório interárea instável. O terceiro sistema teste é chamado de *New England* (FURINI, 2011), com modos oscilatórios estáveis e instáveis dos tipos local e interárea.

Os sistemas teste são analisados individualmente para se definir quais os dispositivos de controle que serão utilizados para garantir sua estabilidade. Os métodos para determinar a melhor localização e o ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e do conjunto TCSC-POD, foram descritos no Capítulo 4. Para a localização são considerados métodos clássicos e para o ajuste dos controladores, são utilizados dois métodos de otimização (PSO e BF-PSO).

É esperado que os dispositivos alocados (de acordo com as características dos sistemas teste) com as técnicas de otimização para ajuste contribuam para a estabilidade dos sistemas teste utilizados, com o objetivo de inserir amortecimento coordenado às oscilações de baixa frequência do SEP.

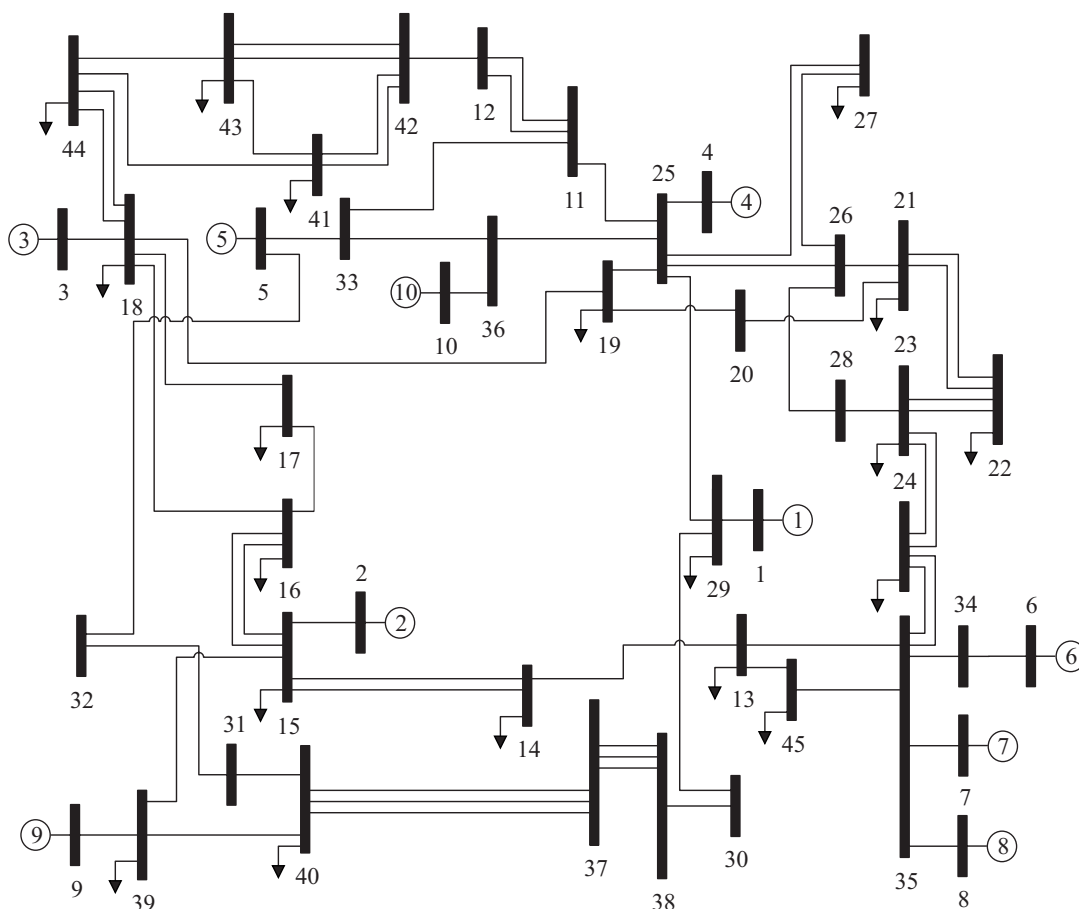
5.2 SISTEMA SUL-BRASILEIRO

Na Figura 12 é mostrado o diagrama unifilar referente ao sistema teste conhecido como Sul-Brasileiro. Esse sistema é composto por 10 geradores, 45 barras e 73 linhas de transmissão. Seus principais dados foram retirados de Pereira (2009) e reproduzidos no Anexo A deste trabalho (carregamento, dados dos geradores síncronos, RATs, barras e linhas de transmissão)

Admitindo o ponto de operação como listado no Anexo A e sem a atuação de controladores suplementares no sistema, foram realizadas simulações utilizando-se o MSP definido no Capítulo 2. A partir destas simulações foi possível calcular seus autovalores de interesse, bem como o coeficiente de amortecimento ξ e a frequência natural não amortecida ω_n a eles associados. Estes resultados são mostrados na Tabela 1.

Após analisar os dados da Tabela 1 verifica-se que o sistema teste com os dados apresentados no Anexo A é instável, caracterizado por parte real positiva de alguns de seus

Figura 12 - Sistema teste Sul-Brasileiro



Fonte: Pereira (2009).

autovalores e, conseqüentemente, apresenta oscilações de amplitude crescente.

Tabela 1 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (caso base sul-brasileiro)

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2623 \pm j 9,6782$	0,0271	9,6817
2	$-0,1120 \pm j 9,6155$	0,0116	9,6162
3	$-0,0269 \pm j 8,6784$	0,0031	8,6784
4	$0,1715 \pm j 8,0573$	-0,0213	8,0591
5	$0,0838 \pm j 6,1661$	-0,0136	6,1666
6	$-0,0125 \pm j 7,6730$	0,0016	7,6730
7	$0,1194 \pm j 7,2562$	-0,0165	7,2571
8	$0,0847 \pm j 6,7135$	-0,0126	6,7140
9	$0,0322 \pm j 6,9301$	-0,0046	6,9302

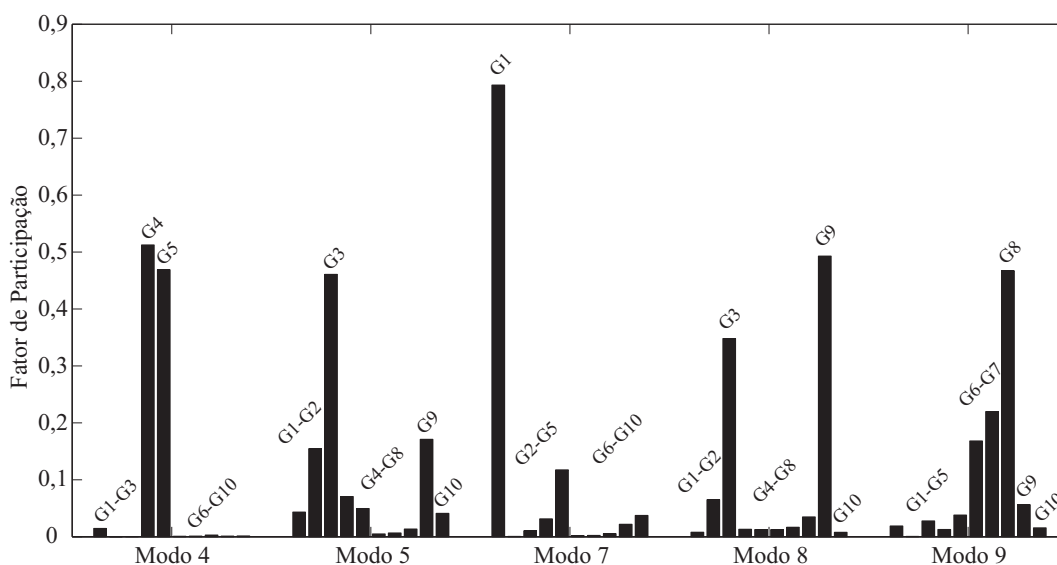
Fonte: Elaboração do autor.

Pela classificação da frequência natural não amortecida (KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981; SAUER; PAI, 1998), é possível atribuir o tipo dos modos oscilatórios da Tabela 1. Sua análise permite afirmar que os modos oscilatórios do sistema teste Sul-Brasileiro são todos do tipo local, sendo os modos 4, 5, 7, 8 e 9 característicos de estado de instabilidade.

5.2.1 Localização dos dispositivos de controle

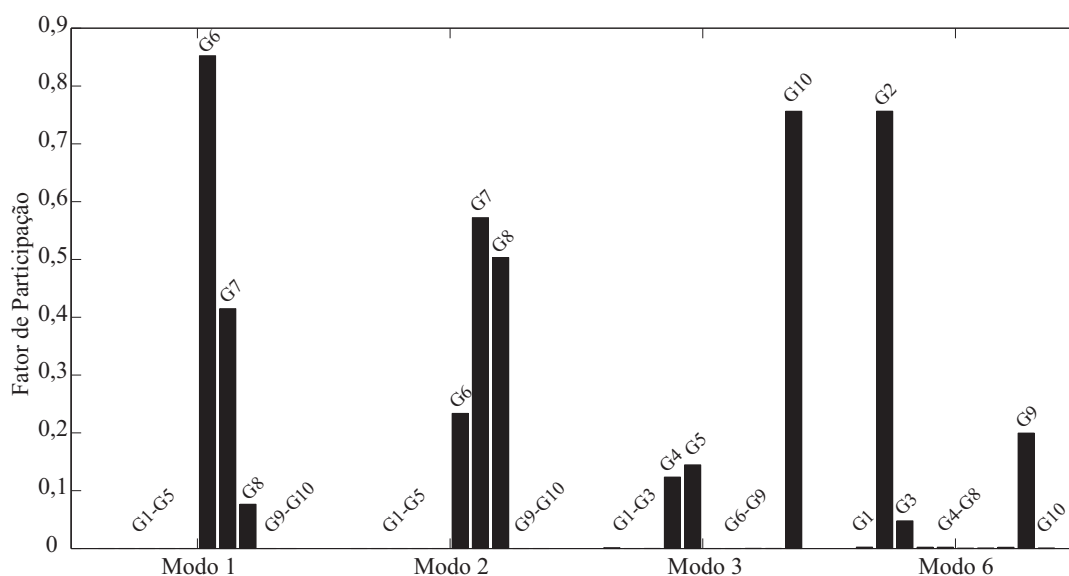
Como o sistema Sul-Brasileiro apresentou somente modos oscilatórios locais, é considerado a atuação somente de controladores ESPs. Nas Figuras 13 e 14, são mostradas as contribuições dos fatores de participação (KUNDUR, 1994) referentes aos modos oscilatórios instáveis (modos 4, 5, 7, 8 e 9) e aos modos oscilatórios estáveis (modos 1, 2, 3 e 6).

Figura 13 - Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 4, 5, 7, 8 e 9) do sistema teste Sul-Brasileiro



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 14 - Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 1, 2, 3 e 6) do sistema teste Sul-Brasileiro



Fonte: Elaboração do autor.

Em cada modo oscilatório do sistema teste Sul-Brasileiro é possível verificar a respectiva

participação de um gerador síncrono. Para essa definição são analisados os fatores de participação mostrados na Figura 13, sendo possível afirmar que para os modos 4, 5, 7, 8 e 9 os geradores mais participativos são, respectivamente, os geradores 4, 3, 1, 9 e 8 (G4, G3, G1, G9 e G8). Analogamente para a Figura 14, é possível afirmar que para os modos 1, 2, 3 e 6 os geradores mais participativos são, respectivamente, os geradores 6, 7, 10 e 2 (G6, G7, G10 e G2).

Para suprir a falta de amortecimento do sistema teste Sul-Brasileiro, será instalado um ESP dedicado para controlar o amortecimento de um certo modo oscilatório de interesse. Primeiramente, são considerados somente os modos oscilatórios responsáveis pela instabilidade do sistema teste. Posteriormente, são instalados ESPs em todos geradores síncronos relacionados aos modos oscilatórios do sistema teste Sul-Brasileiro.

5.2.2 Ajuste dos controladores ESPs com PSO

Ao considerar a instalação de ESPs nos geradores G1, G3, G4, G8 e G9 (geradores com maior participação nos modos oscilatórios instáveis), é processado o algoritmo PSO para o ajuste dos parâmetros. Na Tabela 2 são mostrados os resultados obtidos pelo algoritmo PSO, com os quais será possível alterar os níveis de amortecimento apresentados na Tabela 1 para um coeficiente de amortecimento maior ou igual a 5% em todos os modos oscilatórios relacionados aos geradores síncronos com os ESPs instalados (modos 4, 5, 7, 8 e 9).

Tabela 2 - Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G3, G4, G8 e G9) no sistema teste Sul-Brasileiro

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,0641	0,0134	5,5822
ESP G3	0,1462	0,0575	3,6701
ESP G4	0,1364	0,0414	6,6409
ESP G8	0,0772	0,0291	6,9736
ESP G9	0,1261	0,0106	7,6796

Fonte: Elaboração do autor.

Na Tabela 3 é possível verificar os novos autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n , após a inclusão e ajuste dos parâmetros dos ESPs de acordo com os dados da Tabela 2.

Analisando os autovalores dominantes da Tabela 3, pode-se verificar que o sistema teste Sul-Brasileiro se tornou estável. Outro ponto de destaque é o coeficiente de amortecimento ξ maior que 5% para todos os modos oscilatórios de interesse (modos 4, 5, 7, 8 e 9), que é uma condição estipulada em projeto.

Tabela 3 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 5 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2688 \pm j 9,7119$	0,0277	9,7156
2	$-1,3099 \pm j 9,3397$	0,1389	9,4311
3	$-0,0461 \pm j 8,5140$	0,0054	8,5141
4	$-1,2420 \pm j 7,2956$	0,1678	7,4005
5	$-0,4222 \pm j 6,2487$	0,0674	6,2629
6	$-0,2316 \pm j 7,4681$	0,0310	7,4717
7	$-0,4560 \pm j 7,3380$	0,0620	7,3521
8	$-0,3249 \pm j 5,9537$	0,0545	5,9626
9	$-0,3843 \pm j 7,0349$	0,0545	7,0454

Fonte: Elaboração do autor.

Ainda pela Tabela 3 é possível verificar que alguns modos oscilatórios (modos 1, 3 e 6) são fracamente amortecidos ($\xi < 5\%$). Para manter um controle sobre todos os modos oscilatórios do sistema teste Sul-Brasileiro são instalados nove ESPs (G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10), os quais foram selecionados a partir dos fatores de participação de cada um com relação aos modos oscilatórios de interesse.

Na Tabela 4 são mostrados os resultados obtidos a partir do algoritmo PSO para o ajuste dos parâmetros dos ESPs no sistema teste Sul-Brasileiro.

Tabela 4 - Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10) no sistema teste Sul-Brasileiro

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,0653	0,0424	5,2185
ESP G2	0,1496	0,0593	4,2757
ESP G3	0,0586	0,0427	6,0059
ESP G4	0,1378	0,0597	5,2539
ESP G6	0,0518	0,0592	3,8811
ESP G7	0,1103	0,0594	4,3538
ESP G8	0,1488	0,0227	3,4674
ESP G9	0,1180	0,0584	2,9255
ESP G10	0,0519	0,0355	3,1098

Fonte: Elaboração do autor.

Com o ajuste dos parâmetros dos ESPs com os dados da Tabela 4, é possível verificar os novos autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n , considerando a atuação de nove ESPs (G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10). Nessas condições, pode-se verificar pela Tabela 5 que os coeficientes de amortecimento são maiores que 5% para todos os modos oscilatórios do sistema teste Sul-Brasileiro.

Tabela 5 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 9 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-1,4200 \pm j 9,7829$	0,1436	9,8854
2	$-1,7956 \pm j 9,0152$	0,1953	9,1923
3	$-0,7864 \pm j 8,6659$	0,0904	8,7015
4	$-0,8340 \pm j 7,8590$	0,1055	7,9032
5	$-0,3532 \pm j 6,0935$	0,0579	6,1038
6	$-0,8519 \pm j 7,1565$	0,1182	7,2071
7	$-0,4186 \pm j 7,7860$	0,0537	7,7973
8	$-0,3834 \pm j 6,7772$	0,0565	6,7881
9	$-0,3423 \pm j 6,6053$	0,0518	6,6142

Fonte: Elaboração do autor.

5.2.3 Ajuste dos controladores ESPs com BF-PSO

O ajuste dos parâmetros dos controladores EPSs com o algoritmo BF-PSO pode ser verificado pelos resultados obtidos, mostrados na Tabela 6. Os ESPs foram instalados nos geradores síncronos que possuem maior fator de participação nos modos oscilatórios instáveis (Tabela 1), ou seja, nos geradores G1, G3, G4, G8 e G9.

Tabela 6 - Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G3, G4, G8 e G9) no sistema teste Sul-Brasileiro

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,1082	0,0115	9,8203
ESP G3	0,1083	0,0414	3,4351
ESP G4	0,0823	0,0338	7,9256
ESP G8	0,1347	0,0564	7,7319
ESP G9	0,1356	0,0357	6,9350

Fonte: Elaboração do autor.

Considerando os ESPs ajustados com os parâmetros definidos na Tabela 6, com resultados encontrados pelo algoritmo BF-PSO, é possível verificar a eficácia do ajuste realizado. Para estas condições o sistema teste Sul-Brasileiro se torna estável, o que pode ser verificado pela análise de seus autovalores dominantes, mostrados na Tabela 7. É perceptível que os modos oscilatórios de interesses (modos 4, 5, 7, 8 e 9), possuem coeficientes de amortecimento ξ maior que 5%. No geral, todos os coeficientes de amortecimento ξ foram aumentados (com relação aos dados apresentados na Tabela 1). Este fato se deve à participação generalizada dos geradores síncronos nos modos oscilatórios do sistema teste.

Apesar de apresentar um aumento nos coeficientes de amortecimento ξ , pode-se observar que alguns modos oscilatórios apresentados na Tabela 7 possuem $\xi < 5\%$. Essa condição pode

Tabela 7 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 5 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2693 \pm j 9,7099$	0,0277	9,7137
2	$-1,7120 \pm j 8,4786$	0,1979	8,6497
3	$-0,0619 \pm j 8,4731$	0,0073	8,4733
4	$-1,0195 \pm j 8,1091$	0,1247	8,1730
5	$-0,3564 \pm j 6,0904$	0,0584	6,1008
6	$-0,2436 \pm j 7,4989$	0,0325	7,5029
7	$-1,1584 \pm j 6,3084$	0,1806	6,4139
8	$-0,4558 \pm j 6,3649$	0,0714	6,3812
9	$-0,5027 \pm j 7,0772$	0,0708	7,0950

Fonte: Elaboração do autor.

ser crítica na operação do sistema teste Sul-Brasileiro e para melhorar seu equilíbrio, é sugerido a instalação de ESPs para controlar o amortecimento inserido em todos os modos oscilatórios presentes. Portanto, são definidos por meio dos fatores participação os geradores síncronos G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10. Na Tabela 8 são mostrados os valores encontrados pelo algoritmo BF-PSO para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs.

Tabela 8 - Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10) no sistema teste Sul-Brasileiro

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,1435	0,0471	2,7676
ESP G2	0,0508	0,0268	5,0993
ESP G3	0,1013	0,0241	8,9082
ESP G4	0,1341	0,0268	6,2178
ESP G6	0,1077	0,0272	3,3181
ESP G7	0,0927	0,0268	3,6140
ESP G8	0,1357	0,0256	6,4969
ESP G9	0,0587	0,0327	9,8080
ESP G10	0,1248	0,0593	3,8828

Fonte: Elaboração do autor.

Com os parâmetros dos ESPs ajustados de acordo com os dados da Tabela 8, é possível analisar a estabilidade do sistema teste Sul-Brasileiro por meio dos autovalores dominantes apresentados na Tabela 9. Vale ressaltar que foi definido em projeto um coeficiente de amortecimento mínimo de 5% para todos os modos oscilatórios do sistema teste.

Ao se analisar os coeficientes de amortecimento ξ da Tabela 9, pode-se observar que todos apresentam coeficiente de amortecimento maior que 5%, o que implica no êxito do ajuste dos parâmetros dos controladores ESP por meio do algoritmo BF-PSO.

Tabela 9 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 9 ESPs) no sistema teste Sul-Brasileiro

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-1,6014 \pm j 8,0581$	0,1949	8,2157
2	$-1,5233 \pm j 8,7384$	0,1717	8,8701
3	$-1,2985 \pm j 8,1449$	0,1574	8,2478
4	$-0,3921 \pm j 7,7349$	0,0506	7,7448
5	$-0,5680 \pm j 5,8422$	0,0968	5,8698
6	$-1,0207 \pm j 7,6679$	0,1320	7,7355
7	$-0,7363 \pm j 7,0517$	0,1039	7,0901
8	$-0,7237 \pm j 6,5459$	0,1099	6,5858
9	$-0,5401 \pm j 6,4624$	0,0833	6,4849

Fonte: Elaboração do autor.

5.2.4 Comparação dos ajustes obtidos com PSO e BF-PSO

Para uma comparação dos métodos de otimização PSO e BF-PSO é considerada a atuação de ESPs nos geradores síncronos G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10. Os parâmetros dos controladores ESPs são definidos com os dados apresentados nas Tabelas 4 e 8, respectivamente, calculados pelos algoritmos PSO e BF-PSO.

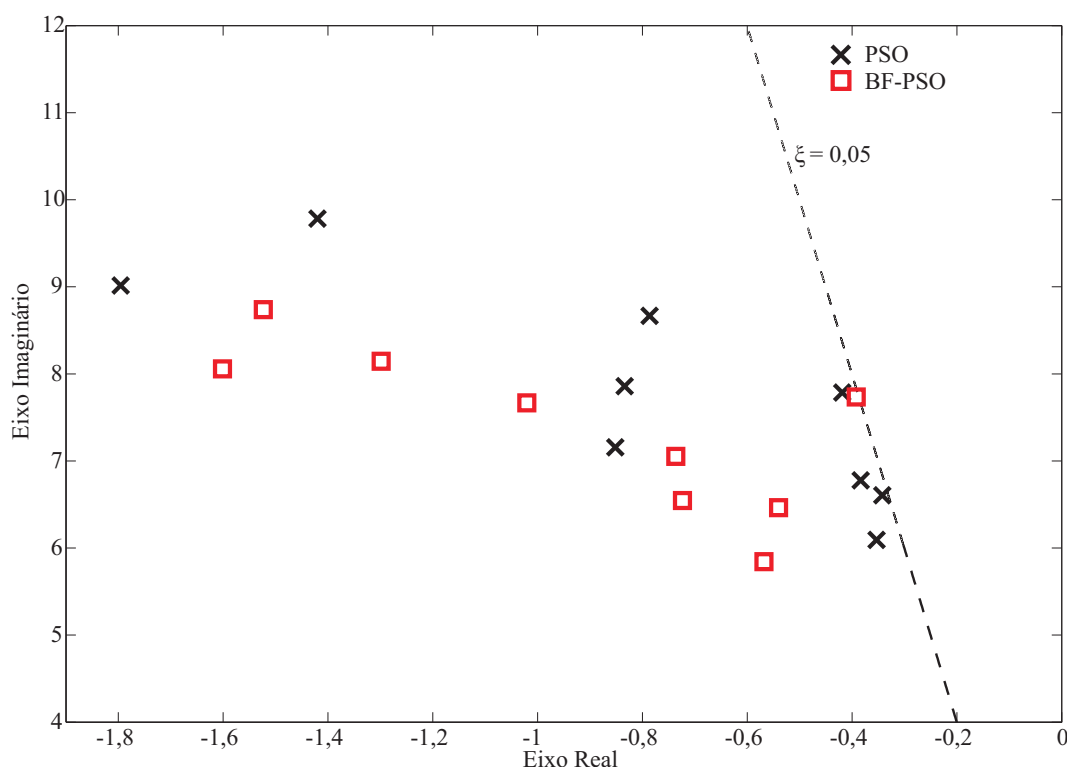
Dos resultados definidos nas Tabelas 4 e 8 é constatado que não existe uma relação entre os algoritmos PSO e BF-PSO para as constantes de tempo e ganho (T_1 , T_2 e K) dos controladores ESPs instalados no sistema teste Sul-Brasileiro. Ainda que os algoritmos PSO e BF-PSO possuem as mesmas constantes iniciais de tempo e ganho (T_1 , T_2 e K), os parâmetros dos controladores ESPs podem assumir diversos valores para uma mesma função objetivo.

Na Figura 15 são mostrados os polos no plano complexo do sistema teste Sul-Brasileiro considerando os ESPs ajustados com os dados das Tabelas 4 e 8, calculados a partir dos algoritmos PSO e BF-PSO. A linha tracejada indica o limite imposto pelo coeficiente de amortecimento ξ definido em projeto ($\xi \geq 5\%$).

Ao analisar a Figura 15 é possível afirmar que os dois métodos de otimização propostos (PSO e BF-PSO) foram capazes de definir as constantes (T_1 , T_2 e K) dos controladores ESPs instalados no sistema teste Sul-Brasileiro com êxito. Essa afirmação pode ser verificada pela localização dos polos no plano complexo, onde todos possuem coeficiente de amortecimento maior que 5%.

Ao verificar os menores coeficientes de amortecimento definidos nas Tabelas 5 e 9, conclui-se que o sistema teste Sul-Brasileiro é mais amortecido quando os controladores ESPs são ajustados pelo algoritmo PSO ($\xi_7 = 0,0537$) se comparado com os resultados obtidos pelo

Figura 15 - Localização dos polos no plano complexo com ajuste dos controladores pelo PSO e BF-PSO no sistema teste Sul-Brasileiro



Fonte: Elaboração do autor.

algoritmo BF-PSO ($\xi_4 = 0,0506$).

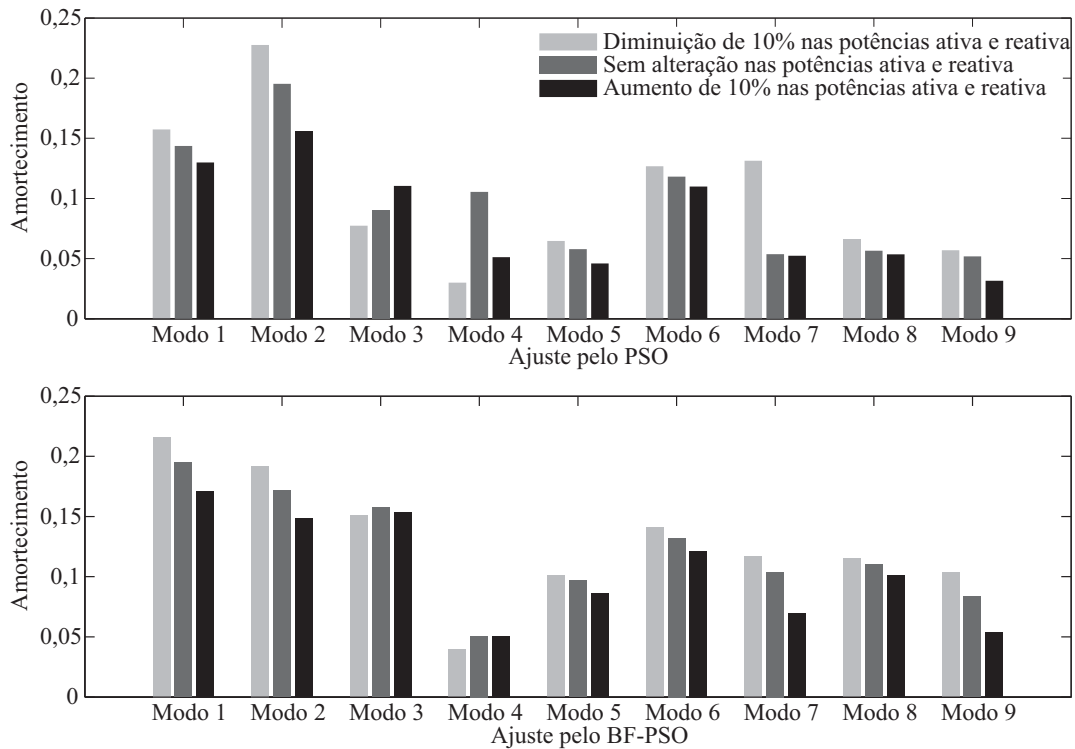
O coeficiente de amortecimento $\xi \geq 5\%$ é determinado para obter uma margem segura de operação do SEP, visto que o ajuste dos controladores ESPs foram realizados com base em um ponto de operação. Para verificar se o sistema teste Sul-Brasileiro opera de forma segura com os ajuste dos parâmetros realizados pelo PSO e BF-PSO (Tabelas 4 e 8), são alterados os carregamentos de potências ativa e reativa de todas as barras do SEP.

Na Figura 16 são mostrados os coeficientes de amortecimento ξ do sistema teste Sul-Brasileiro considerando os carregamentos das barras em três casos: diminuição de 10%, sem alteração e aumento de 10%.

Com as alterações de potências ativa e reativa no ajuste determinado pelo PSO (Tabela 4), foram encontradas três situações para $\xi \leq 5\%$: modo 4 com diminuição de 10% e modos 5 e 9 com aumento de 10%. No entanto, para o ajuste determinado pelo BF-PSO (Tabela 8) somente o modo 4 possui $\xi \leq 5\%$, obtido quando da diminuição de 10% nas potências ativa e reativa. Essas condições não foram utilizadas para se determinar os ajustes dos parâmetros dos controladores ESPs, porém pode-se observar que os ajustes realizados preservaram a estabilidade considerando as alterações realizadas nas condições carregamento do sistema teste

Sul-Brasileiro.

Figura 16 - Comparação de níveis de amortecimento considerando variações de cargas nos barramentos do sistema teste Sul-Brasileiro

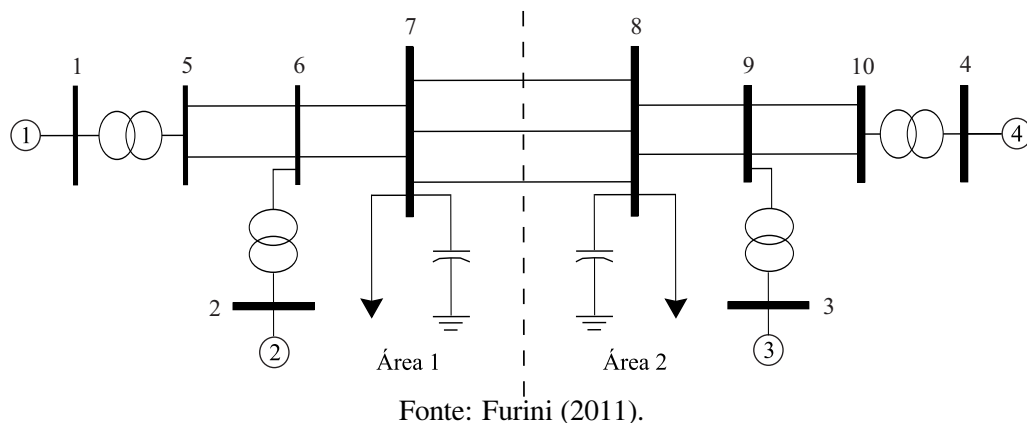


Fonte: Elaboração do autor.

5.3 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

O diagrama unifilar do sistema teste simétrico de duas áreas (KUNDUR, 1994), é mostrado na Figura 17, o qual é constituído por 4 geradores, 10 barras e 15 linhas de transmissão. Esse sistema é distribuído simetricamente entre duas áreas interligadas por 3 linhas de transmissão entre as barras 7 e 8.

Figura 17 - Sistema teste simétrico de duas áreas



Fonte: Furini (2011).

Na Tabela 10 são mostrados os autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n do sistema teste simétrico de duas áreas com o carregamento do sistema de acordo com Furini (2011) e definidos no Anexo A.

Tabela 10 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (caso base duas áreas)

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2356 \pm j 6,2953$	0,0374	6,2997
2	$-0,1585 \pm j 5,8779$	0,0270	5,8800
3	$0,0460 \pm j 4,1382$	-0,0111	4,1385

Fonte: Elaboração do autor.

Para o carregamento definido no Anexo A e sem atuação de controladores ESPs e/ou do conjunto TCSC-POD, o sistema teste simétrico de duas áreas apresenta três modos oscilatórios, sendo dois modos locais e um modo interárea. Ao se analisar a Tabela 10 constata-se que o sistema teste simétrico de duas áreas é instável, originado pela falta de amortecimento do modo oscilatório interárea (modo 3), sendo reconhecido pela sua respectiva frequência natural não amortecida (KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981; SAUER; PAI, 1998).

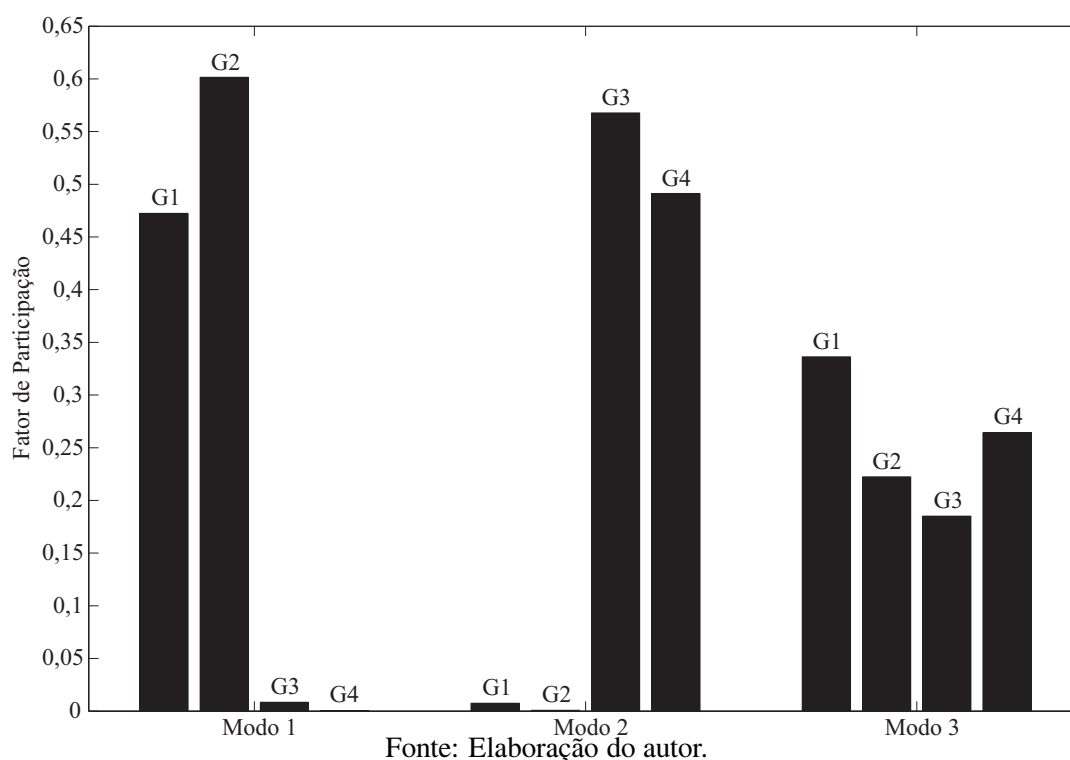
5.3.1 Localização dos dispositivos de controle

Serão instalados controladores ESPs e o conjunto TCSC-POD, respectivamente, para o controle de amortecimento das oscilações de baixa frequência dos modos oscilatórios do tipo local e interárea, presentes no sistema teste simétrico de duas áreas. Para determinar a localização dos ESPs são utilizados os fatores de participação (KUNDUR, 1994) e para a localização do conjunto TCSC-POD a distância entre o polo e zero da FTMA do controlador POD (MARTINS; PELLANDA; ROMMES, 2007; MOURA, 2012).

Na Figura 18 é mostrada a participação dos geradores síncronos com relação a um determinado modo oscilatório. Por meio dos fatores de participação é possível afirmar que o gerador síncrono 2 (G2) é o mais participativo para o modo 1 enquanto que o gerador síncrono 3 (G3) é o mais participativo para o modo 2. Como será utilizado o conjunto TCSC-POD na presença de modos oscilatórios interárea, não serão analisados os fatores de participação para o modo oscilatório interárea (modo 3).

Na Tabela 11 são mostrados os polos (λ), zeros (z) e suas respectivas diferenças ($|\lambda - z|$) da FTMA do controlador POD para prováveis locais de instalação do conjunto TCSC-POD, considerando uma compensação fixa de 10% na linha de transmissão de instalação. O módulo da maior diferença entre o polo e zero da FTMA do controlador POD é o melhor local para instalação do conjunto TCSC-POD (MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012). Portanto, a linha de

Figura 18 - Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios do sistema teste simétrico de duas áreas



transmissão entre as barras 7 e 8 (LT 7-8) é o local mais indicado para instalação do conjunto TCSC-POD.

Tabela 11 - Polos, zeros e suas respectivas diferenças relacionadas ao modo interárea do controlador POD no sistema teste simétrico de duas áreas

Local	λ	z	$ \lambda - z $
LT 6-7	$0,0432 \pm j 4,1634$	$0,0341 \pm j 4,2408$	0,0779
LT 7-8	$0,0473 \pm j 4,2360$	$0,0742 \pm j 4,8275$	0,5921
LT 8-9	$0,0450 \pm j 4,1576$	$0,0474 \pm j 4,2020$	0,0445

Fonte: Elaboração do autor.

Outro ponto a se destacar é que a LT 7-8 interliga as duas áreas (ver Figura 17) e possui uma alta impedância reativa se comparada com as outras linhas de transmissão do sistema teste simétrico de duas áreas, o que implica em uma maior margem de compensação pelo conjunto TCSC-POD.

5.3.2 Ajuste dos controladores ESPs e POD com PSO

Na Tabela 12 são mostrados os ajustes dos parâmetros do controlador POD obtidos a partir do algoritmo PSO. Esses valores devem impor o deslocamento dos polos relacionados como o modo oscilatório interárea para uma região com amortecimento maior que 10% (valor definido

em projeto).

Tabela 12 - Configuração do PSO com a atuação do TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
TCSC-POD	0,1992	0,8874	0,1647

Fonte: Elaboração do autor.

Com o controlador POD ajustado de acordo com as constantes definidas na Tabela 12, é novamente simulado o sistema teste simétrico de duas áreas e pode-se verificar por meio da Tabela 13 os novos autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n .

Tabela 13 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2429 \pm j 6,2926$	0,0386	6,2972
2	$-0,1633 \pm j 5,8765$	0,0278	5,8788
3	$-0,4388 \pm j 4,1537$	0,1051	4,1768

Fonte: Elaboração do autor.

Ao se analisar a Tabela 13 é possível verificar que o coeficiente de amortecimento ξ relacionado ao modo oscilatório interárea (modo de interesse) é maior que 10%, sendo tal condição imposta pelo algoritmo PSO. Outro ponto a se destacar é que os modos oscilatórios locais (modos 1 e 2) não sofreram um deslocamento considerável se comparados com suas respectivas posições definidas na Tabela 10. Além disso, esses modos são fracamente amortecidos ($\xi \leq 0,05$).

Para deslocar os polos relacionados aos modos oscilatórios locais é definida a instalação de ESPs nos geradores síncronos G2 e G3, os mais participativos sobre o modo 1 e o modo 2. Na Tabela 14 são apresentados os ajustes dos parâmetros dos controladores ESPs e POD operando simultaneamente no sistema teste simétrico de duas áreas.

Tabela 14 - Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G2 e G3) e TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G2	0,4273	0,1380	1,1393
ESP G3	0,6627	0,1008	1,1994
TCSC-POD	0,1904	0,8428	0,1442

Fonte: Elaboração do autor.

Na Tabela 15 são mostrados os autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n com a atuação de ESPs nos geradores síncronos G2 e G3,

além do conjunto TCSC-POD na LT 7-8, onde o ajuste dos controladores ESP e POD foram definidos de acordo com a Tabela 14.

Tabela 15 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 2 ESPs e TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,5519 \pm j 6,1055$	0,0900	6,1304
2	$-0,3981 \pm j 5,2817$	0,0752	5,2967
3	$-0,4215 \pm j 4,0905$	0,1025	4,1121

Fonte: Elaboração do autor.

Analisando os coeficientes de amortecimento ξ , é possível verificar que os modos oscilatórios locais (modos 1 e 2) e o modo oscilatório interárea (modo 3) estão de acordo com o definido no algoritmo PSO, ou seja, $\xi \geq 5\%$ para o modo local ($\xi_1 = 0,0900$ e $\xi_2 = 0,0752$) e $\xi \geq 10\%$ para o modo interárea ($\xi_3 = 0,1025$).

5.3.3 Ajuste dos controladores ESPs e POD com BF-PSO

Na Tabela 16 é listado o resultado para o ajuste dos parâmetros do controlador POD utilizando o algoritmo BF-PSO, considerando a atuação do conjunto TCSC-POD na LT 7-8 exercendo uma compensação fixa de 10%. Esse ajuste tem como objetivo inserir amortecimento ao modo oscilatório interárea definido na Tabela 10, o qual é a causa da instabilidade do sistema teste simétrico de duas áreas.

Tabela 16 - Configuração do BF-PSO com a atuação do TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
TCSC-POD	0,1482	0,7174	0,1327

Fonte: Elaboração do autor.

Ao se ajustar os parâmetros do controlador POD de acordo com a Tabela 16 é possível verificar o efeito que o conjunto TCSC-POD provoca nos autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n do sistema teste simétrico de duas áreas, conforme mostrado na Tabela 17.

Pela análise dos dados presentes na Tabela 17 conclui-se que houve um deslocamento significativo do polo relacionado ao modo interárea, conforme definido em projeto do algoritmo BF-PSO, ou seja, para o modo interárea $\xi \geq 10\%$ ($\xi_3 = 0,1038$). Como os modos oscilatórios locais não foram utilizados no projeto (ajuste definido na Tabela 16) e pelas características do

Tabela 17 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2436 \pm j 6,2944$	0,0387	6,2991
2	$-0,1637 \pm j 5,8774$	0,0278	5,8797
3	$-0,4431 \pm j 4,2440$	0,1038	4,2671

Fonte: Elaboração do autor.

controlador POD, não houve um deslocamento significativo dos polos relacionados aos modos locais, quando comparados com o sistema teste simétrico de duas áreas definido pela Tabela 10.

Além do conjunto TCSC-POD instalado na LT 7-8 é necessário aumentar os níveis de amortecimento dos modos locais e é proposta a instalação de ESPs nos geradores síncronos G2 e G3, os quais foram escolhidos de acordo com os fatores de participação (ver Figura 18). Na Tabela 18 são listadas as constantes T_1 , T_2 e K dos controladores ESPs e POD obtidas por meio do algoritmo BF-PSO.

Tabela 18 - Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G2 e G3) e TCSC-POD na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G2	0,5267	0,0866	4,0317
ESP G3	0,3495	0,1128	1,2233
TCSC-POD	0,0546	0,5120	0,0906

Fonte: Elaboração do autor.

Ao se ajustar os controladores ESPs e POD com os parâmetros definidos na Tabela 18 é possível verificar os novos autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n , os quais são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 2 ESPs e TCSC-POD na LT 7-8) no sistema teste simétrico de duas áreas

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,3612 \pm j 5,7549$	0,0626	5,7662
2	$-0,4962 \pm j 5,0163$	0,0984	5,0407
3	$-0,4345 \pm j 4,0709$	0,1061	4,0940

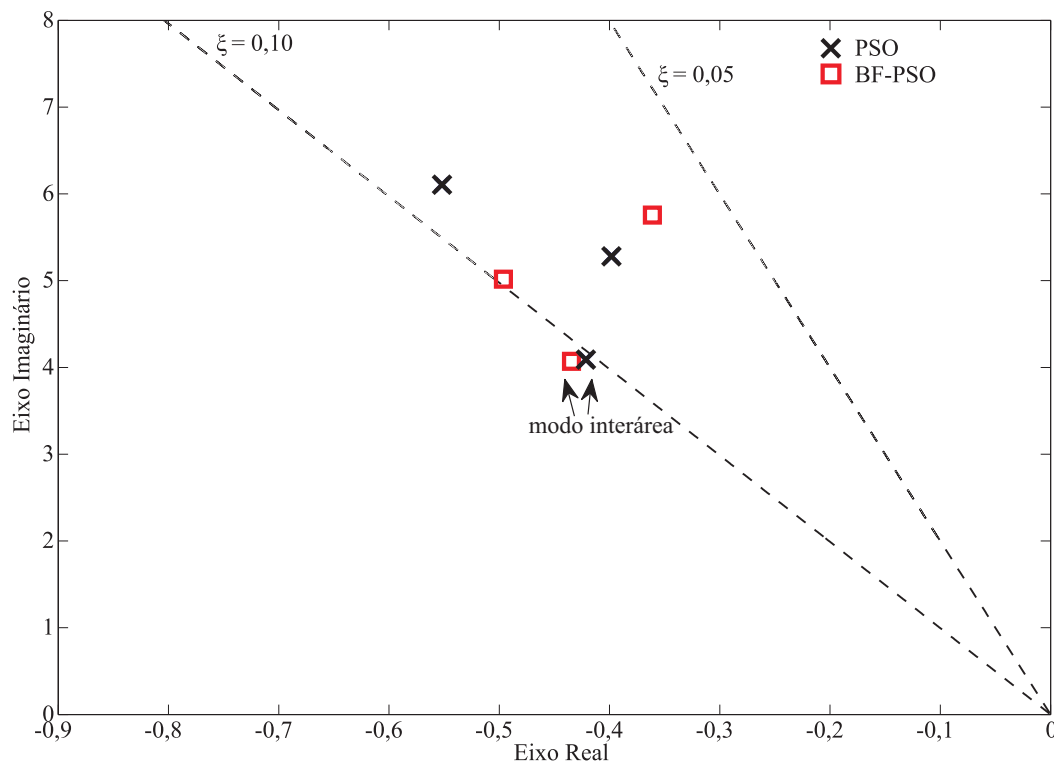
Fonte: Elaboração do autor.

A atuação simultânea dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD com os parâmetros ajustados pelo algoritmo BF-PSO, foi capaz de deslocar os polos para uma região definida em projeto, ou seja, os coeficientes de amortecimento ξ definidos na Tabela 19, estão de acordo com o determinado em projeto ($\xi_{local} \geq 0,05$ e $\xi_{inter\acute{a}rea} \geq 0,1$), os quais asseguram a estabilidade do sistema teste simétrico de duas áreas para as condições de carregamento consideradas.

5.3.4 Comparação dos ajustes obtidos com PSO e BF-PSO

Para efeitos de análise e comparação, são considerados os ajustes dos parâmetros dos controladores ESP e POD definidos nas Tabelas 14 e 18. Na Figura 19 é mostrada a localização dos polos no plano complexo considerando a atuação de ESPs nos geradores síncronos G2 e G3, além do conjunto TCSC-POD instalado na LT 7-8 no sistema teste simétrico de duas áreas. Os ajustes definidos por meio dos algoritmos PSO e BF-PSO deslocaram os polos para as regiões com o amortecimento desejado, que neste caso é maior que 5% para os modos locais e 10% para o interárea.

Figura 19 - Localização dos polos no plano complexo com ajuste dos controladores pelo PSO e BF-PSO no sistema teste simétrico de duas áreas



Fonte: Elaboração do autor.

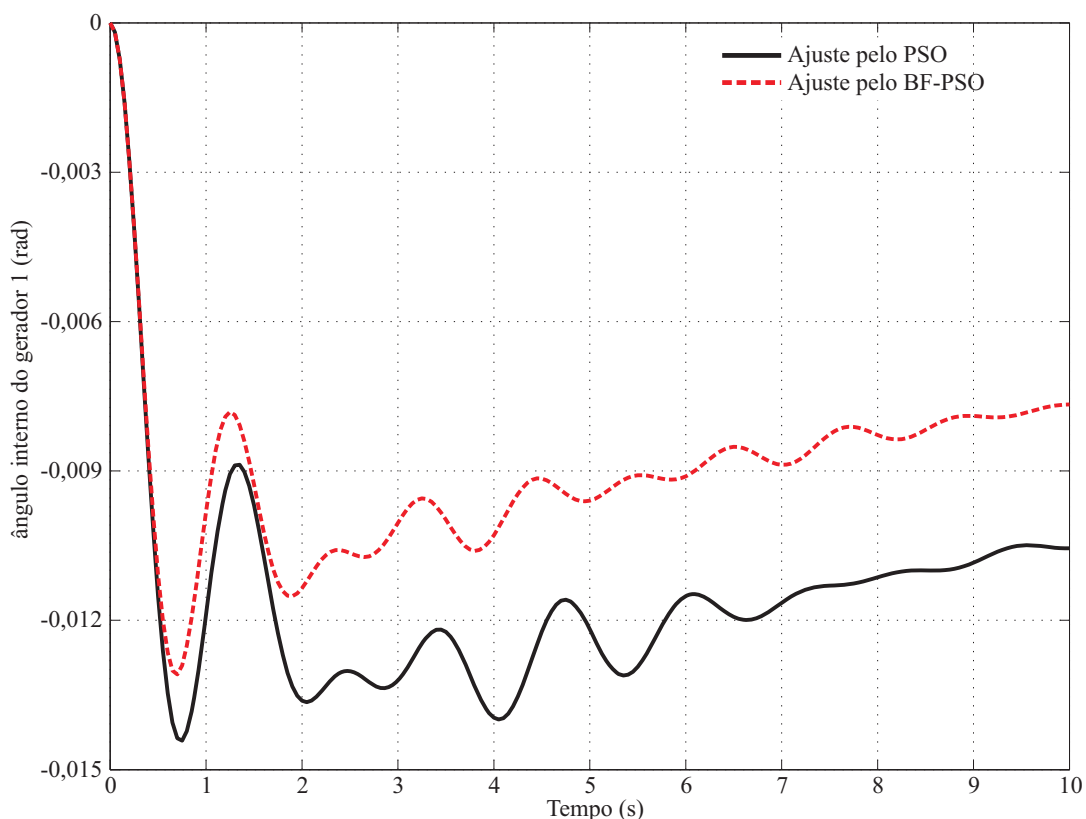
Ao verificar as constantes de tempo e ganho (T_1 , T_2 e K) dos controladores ESPs e POD obtidos pelos algoritmos PSO e BF-PSO (definidos nas Tabelas 14 e 18), percebe-se novamente (como visto no sistema teste Sul-Brasileiro) que não há uma relação entre os ajustes obtidos.

O comportamento do sistema teste simétrico de duas áreas quando os controladores ESPs e POD ajustados com os dados das Tabelas 14 e 18 originam, conseqüentemente, os dados mostrados nas Tabelas 15 e 19. De sua análise é verificado que o sistema teste simétrico de duas áreas é mais amortecido quando os controladores ESPs e POD são ajustados pelo algoritmo PSO, visto os maiores coeficientes de amortecimento obtidos, quando comparados

com o algoritmo BF-PSO (pelo algoritmo PSO $\xi_2 = 0,0752$ contra $\xi_1 = 0,0626$ do algoritmo BF-PSO).

Na Figura 20 são mostrados os desvios do ângulo interno do gerador síncrono 1 (G1) após uma perturbação em degrau de 0,05 pu na potência mecânica de entrada do gerador síncrono 4 (G4), o qual é considerado a referência do sistema teste simétrico de duas áreas. Em ambos os ajustes realizados a tendência é atingir um novo valor de regime permanente. Observe que quando o ajuste é realizado pelo algoritmo PSO, a amplitude da primeira oscilação é maior, quando comparada com a curva obtida pelo ajuste com o algoritmo BF-PSO.

Figura 20 - Ângulo interno do gerador síncrono G1 do sistema teste simétrico de duas áreas



Fonte: Elaboração do autor.

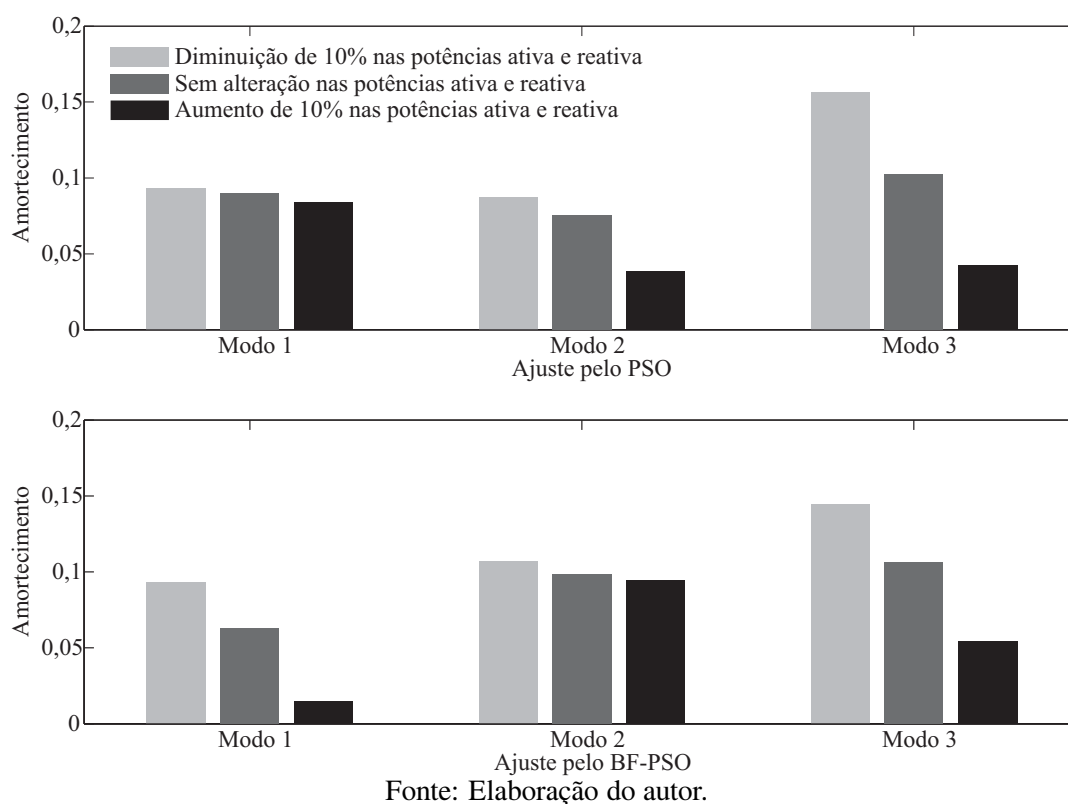
Devido às constantes mudanças de carregamento, inerentes da operação dos SEPs, é avaliado o comportamento do sistema teste simétrico de duas áreas quando submetido à alterações em seu ponto de operação. Deve-se destacar que com alterações no carregamento do SEP, os algoritmos PSO e BF-PSO, aplicados a outra condição de carregamento, não garantem os coeficientes de amortecimento especificados em projeto.

São considerados três casos de alterações no carregamento do sistema teste simétrico de duas áreas: diminuição de 10% nas potências ativa e reativa, sem alteração no carregamento e aumento de 10% nas potências ativa e reativa. Na Figura 21 são mostrados os coeficientes de amortecimento ξ para os casos citados anteriormente para os ajustes dos parâmetros

dos controladores ESPs e POD definidos pelo PSO e BF-PSO. Apesar das alterações de carregamento não provocarem a instabilidade, houve significativa alteração nos coeficientes de amortecimento, sendo que em determinados casos este fica abaixo do especificado.

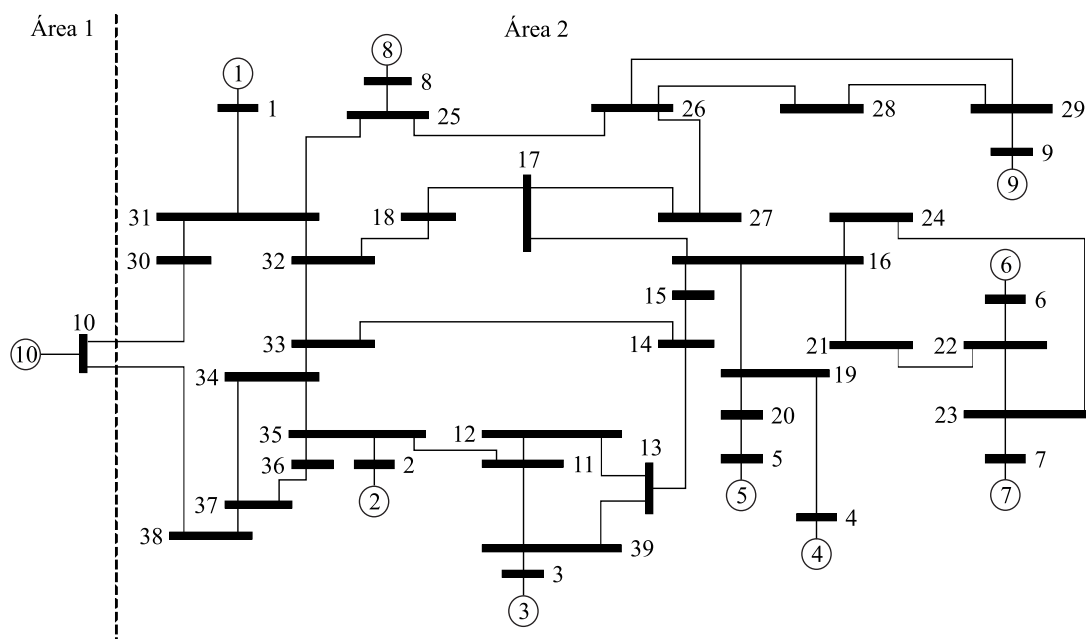
O amortecimento fica abaixo do desejado nos modos 2 e 3 com um aumento de 10% nos carregamentos do sistema, com controladores ajustados pelo algoritmo PSO. Considerando o ajuste pelo algoritmo BF-PSO, o amortecimento fica abaixo do esperado nos modos 1 e 3. Vale ressaltar que estas condições não são previstas nos algoritmos PSO e BF-PSO.

Figura 21 - Comparação de níveis de amortecimento considerando variações de cargas nos barramentos do sistema teste simétrico de duas áreas



5.4 SISTEMA NEW ENGLAND

Na Figura 22 é mostrado o diagrama unifilar referente ao sistema teste conhecido como "New England", que é frequentemente utilizado na literatura para análise da estabilidade a pequenas perturbações. Este sistema possui 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão, o qual é disposto em duas áreas, sendo a área 1 representada pelo gerador síncrono 10 (G10) e a área 2 pelos geradores síncronos 1 a 9 (G1 à G9) (ARAUJO; ZANETA, 2001). Os dados dos geradores síncronos, carregamento, barras e das linhas de transmissão do sistema teste *New England*, são mostrados no Anexo A.

Figura 22 - Sistema teste *New England*

Fonte: Furini (2011).

Com os dados do sistema teste *New England*, presentes em Araujo e Zaneta (2001) e no Anexo A são realizadas simulações e calculados os autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n , que podem ser vistos na Tabela 20. Neste caso, foi considerado o sistema teste *New England* sem atuação de controladores ESPs e dispositivos de compensação.

Ao se analisar os resultados definidos na Tabela 20 é possível concluir que o sistema teste *New England* possui 8 modos locais de oscilação (modos 1 à 8) e 1 modo oscilatório interárea. Dentre esses modos, os modos locais 6 à 8 e o modo interárea 9 estão associados a autovalores com parte real positiva, o que caracteriza a instabilidade do sistema teste *New England*. A classificação dos modos oscilatórios é determinada de acordo com sua frequência natural não amortecida ω_n (KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981; SAUER; PAI, 1998).

Na sequência são definidas as localizações e os ajustes dos parâmetros dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD no sistema teste *New England*.

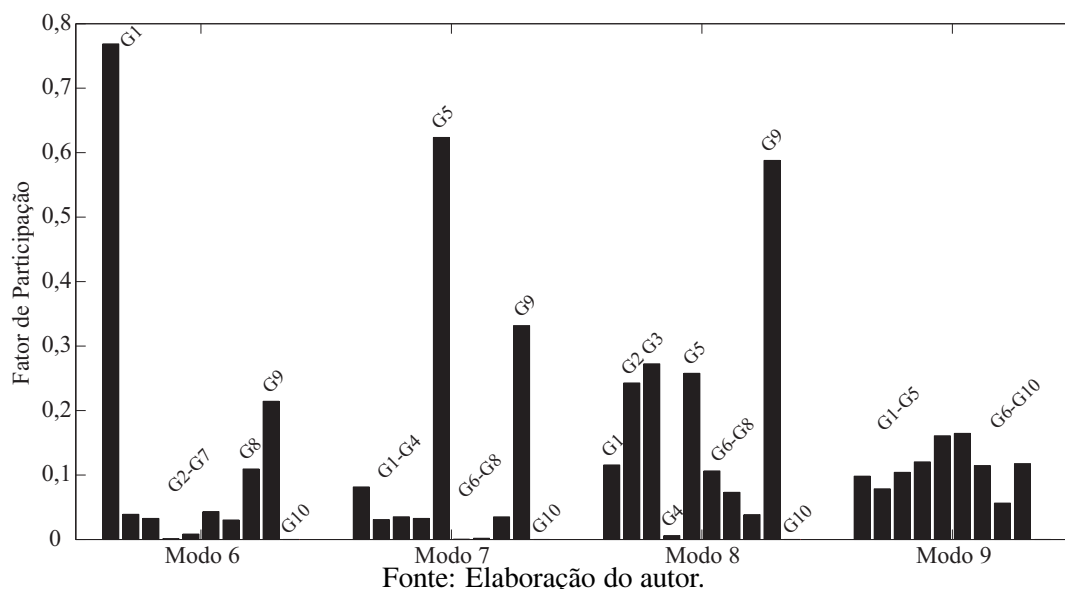
5.4.1 Localização dos dispositivos de controle

Para definir a localização dos controladores ESPs no sistema teste *New England* são utilizados os fatores de participação (KUNDUR, 1994). Na Figura 23 são mostrados os fatores de participação dos modos oscilatórios com parte real positiva (modos 6 à 9) e na Figura 24, os fatores de participação dos modos oscilatórios com parte real negativa (modos 1 à 5).

Tabela 20 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (caso base *New England*)

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2432 \pm j 8,3145$	0,0292	8,3181
2	$-0,1956 \pm j 8,2569$	0,0237	8,2592
3	$-0,2694 \pm j 8,0989$	0,0332	8,1033
4	$-0,2079 \pm j 7,2578$	0,0286	7,2608
5	$-0,1139 \pm j 6,4738$	0,0176	6,4748
6	$0,0580 \pm j 6,8626$	-0,0084	6,8628
7	$0,1693 \pm j 5,9126$	-0,0286	5,9151
8	$0,0901 \pm j 6,3175$	-0,0143	6,3182
9	$0,0015 \pm j 3,5348$	-0,0004	3,5348

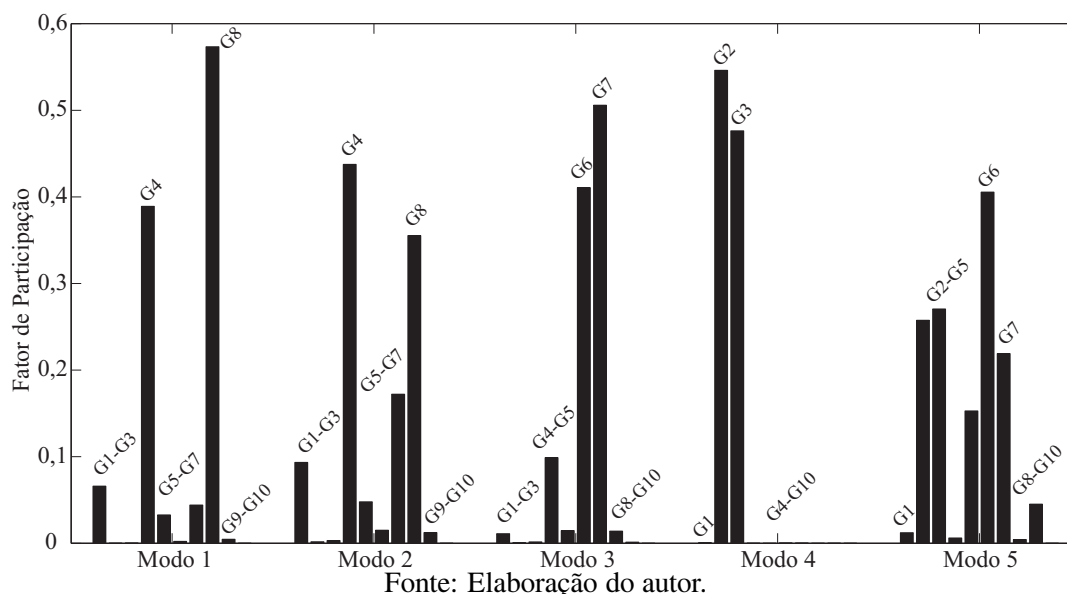
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 23 - Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 6 à 9) do sistema teste *New England*

Analisando os fatores de participação apresentados na Figura 23, é possível afirmar que os geradores síncronos 1, 5 e 9 (G1, G5 e G9) são os mais influentes nos modos oscilatórios 6, 7 e 8. Para o modo oscilatório interárea (modo 9), a participação é distribuída entre os diversos geradores síncronos, com baixa influência sobre este modo quando comparada com a participação nos modos locais de oscilação.

De maneira geral, cada gerador síncrono tem maior influência sobre um determinado modo local. No entanto, pode acontecer que um gerador síncrono tenha influência em mais de um modo oscilatório. Nestes casos é considerado o maior valor dos fatores de participação associados aos geradores síncronos. Ao analisar os fatores de participação mostrados na Figura 24, se conclui que os geradores síncronos 8, 4, 7 e 3 (G8, G4, G7 e G3) são os mais influentes nos modos oscilatórios 1, 2, 3, 4 e 5.

Figura 24 - Fatores de participação de cada gerador com relação aos modos oscilatórios (modos 1 à 5) do sistema teste *New England*



Na Tabela 21 são apresentados os polos (λ), os zeros (z) e suas respectivas distâncias ($|\lambda - z|$) para possíveis locais de instalação do conjunto TCSC-POD no sistema teste *New England*. Onde ocorrer a maior distância entre o polo de interesse e o zero relacionado é considerada a melhor localização de instalação de um dispositivo FACTS (MOURA, 2012).

Ao avaliar as distâncias listadas na Tabela 21 pode-se concluir que as linhas de transmissão 30-10 e 30-31 (LT 30-10 e LT 30-31) possuem distâncias próximas entre o polo e o zero. Se observar o diagrama unifilar da Figura 22, conclui-se que a LT 30-31 é um prolongamento da LT 30-10 (que interliga as áreas 1 e 2). Além disso, a partir dos dados das linhas de transmissão mostrados na Tabela 40 (Anexo A), pode-se afirmar que a LT 30-31 possui impedância maior do que a LT 30-10, o que lhe confere maior flexibilidade para a compensação fixa realizada pelo dispositivo TCSC, ou seja, quanto maior a impedância da LT maior será sua flexibilidade. Em vista destes fatos, para a instalação do conjunto TCSC-POD é escolhida a LT 30-31.

Tabela 21 - Polos, zeros e suas respectivas diferenças relacionadas ao modo interárea do controlador POD no sistema teste *New England*

Local	λ	z	$ \lambda - z $
LT 30-10	$-0,0397 \pm j 3,5214$	$-0,0652 \pm j 2,5724$	0,9709
LT 30-31	$-0,0391 \pm j 3,5584$	$-0,0398 \pm j 2,5707$	0,9877
LT 38-10	$-0,0394 \pm j 3,5401$	$0,0090 \pm j 2,6692$	0,8722
LT 37-38	$-0,0392 \pm j 3,5494$	$0,1162 \pm j 2,6438$	0,9188
LT 16-17	$-0,0403 \pm j 3,5236$	$0,0049 \pm j 3,3033$	0,2249

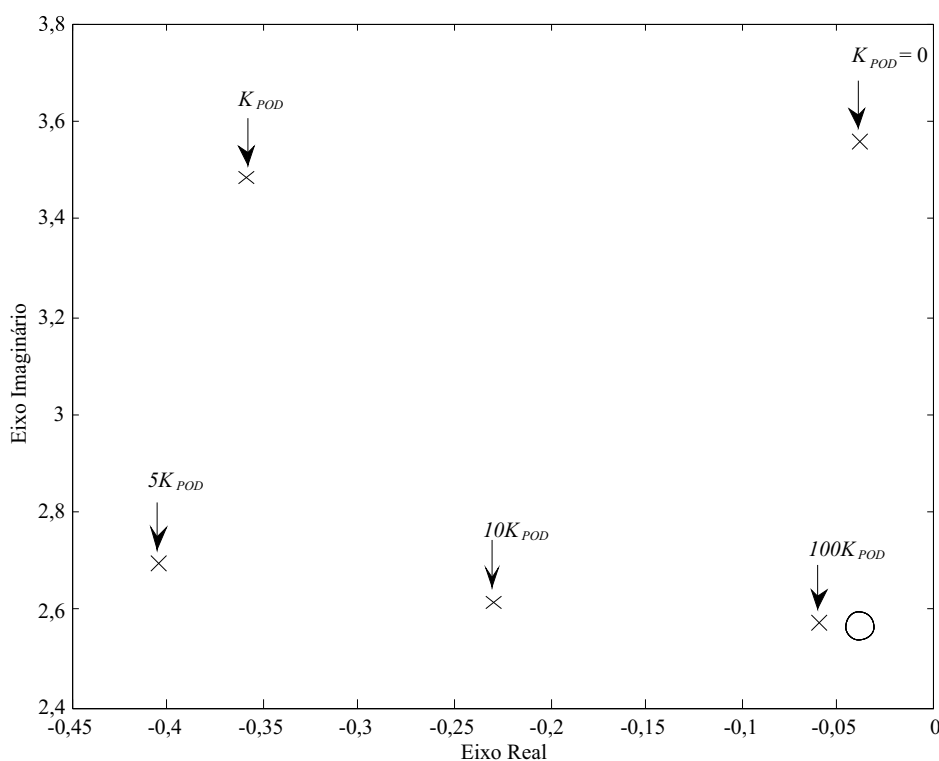
Fonte: Elaboração do autor.

Além da distância entre o polo e o zero, a posição do zero da FTMA também deve ser

observada (MARTINS; PINTO; LIMA, 1992). A ocorrência de um zero no lado direito do plano complexo pode posicionar, em algumas ocasiões, o polo referente da FTMF em uma região de instabilidade.

Na Figura 25 (conjunto TCSC-POD instalado na LT 30-31), são mostrados os deslocamentos dos polos da FTMF provocados pela alteração do ganho do controlador POD (o aumento do ganho do controlador POD causa um deslocamento do polo na tentativa de anular a distância com o zero da FTMA).

Figura 25 - Trajetória do polo relacionado ao modo interárea: TCSC-POD instalado na LT 30-31



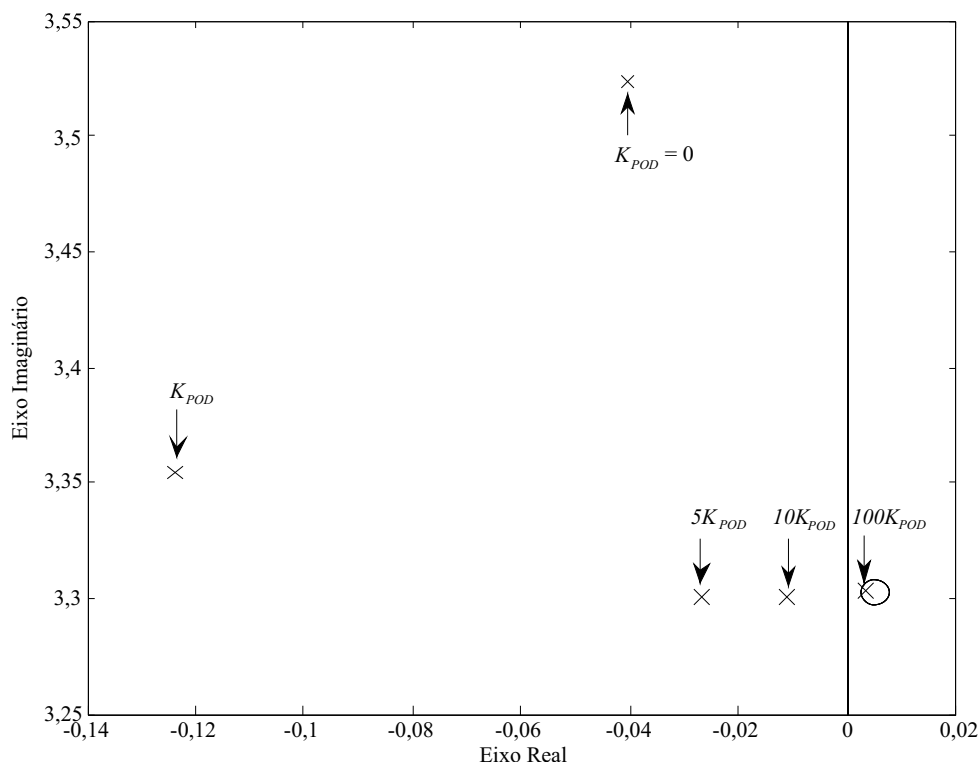
Fonte: Elaboração do autor.

Ao se considerar a variação do ganho relacionado ao controlador POD de zero ao infinito, a posição final do polo relacionado a este controlador tende a ser igual ao seu referente zero (MOURA, 2012). Considerando esta afirmativa é possível afirmar, por meio da Figura 25, que independentemente da variação do ganho do controlador POD, o polo referente ao modo oscilatório de interesse (modo interárea) permanecerá com parte real negativa. Esta afirmação não garante que com a variação do ganho do controlador POD, os demais modos oscilatórios permanecerão no semiplano esquerdo do plano complexo. Eventualmente, algum destes outros modos podem se deslocar para o semiplano direito quando o ganho do controlador POD é aumentado, o que limita o valor do ganho do controlador.

Ainda tratando do deslocamento de polos, na Figura 26 é mostrado o deslocamento do polo associado ao modo interárea quando o conjunto TCSC-POD é instalado na linha de transmissão

16-17 (LT 16-17). Diferentemente do comportamento do modo interárea quando a instalação do conjunto ocorria na LT 30-31 (Figura 25), o aumento do ganho do controlador POD poderá levar este modo para a área de instabilidade (semiplano direito do plano complexo). Este fato pode ser limitante em situações em que se deseja obter novos ajustes de controladores PODs para determinadas condições de carregamento do sistema teste.

Figura 26 - Trajetória do polo relacionado ao modo interárea: TCSC-POD instalado na LT 16-17



Fonte: Elaboração do autor.

5.4.2 Ajuste dos controladores ESPs e POD com PSO

Ao se considerar ESPs instalados nos geradores síncronos G1, G5 e G9, além do conjunto TCSC-POD na LT 30-31, é possível solucionar a instabilidade apresentado pelo sistema teste *New England*. É considerado que o dispositivo TCSC irá exercer uma compensação fixa de 10% na reatância total da linha de transmissão de instalação do dispositivo.

Na Tabela 22 são definidos os ajustes dos controladores ESP e POD calculados por meio do algoritmo PSO para inserir amortecimento nos modos oscilatórios instáveis (modos 6 à 9 definidos na Tabela 20).

Na Tabela 23 são mostrados os novos autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n , obtidos com o ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e POD de acordo com os dados da Tabela 22.

Tabela 22 - Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G5 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste *New England*

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,9222	0,0849	3,7460
ESP G5	0,7927	0,1073	1,3670
ESP G9	0,7896	0,1992	1,7375
TCSC-POD	0,1263	0,3506	0,1474

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 23 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 3 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste *New England*

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,3022 \pm j 8,2995$	0,0364	8,3050
2	$-0,3704 \pm j 8,1257$	0,0455	8,1341
3	$-0,2975 \pm j 8,1762$	0,0364	8,1816
4	$-0,2077 \pm j 7,2577$	0,0286	7,2606
5	$-0,2119 \pm j 6,4203$	0,0330	6,4238
6	$-0,4325 \pm j 6,7827$	0,0636	6,7965
7	$-0,9249 \pm j 5,2994$	0,1719	5,3795
8	$-0,7264 \pm j 6,3398$	0,1138	6,3813
9	$-0,3100 \pm j 2,9318$	0,1051	2,9482

Fonte: Elaboração do autor.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 23 conclui-se que os polos referentes aos modos oscilatórios instáveis da Tabela 20, foram deslocados para o semiplano esquerdo do plano complexo e ficaram concentrados em um região desejada. Esta região foi definida de acordo com o tipo do modo oscilatório e seu respectivo coeficiente de amortecimento desejado ($\xi_{local} \geq 0,05$ e $\xi_{inter\acute{a}rea} \geq 0,1$).

Ao se observar os coeficientes de amortecimento ξ da Tabela 23 verifica-se que o sistema teste *New England* ainda possui amortecimento abaixo do desejado para os modos locais 1 à 5 ($\xi_{local} \leq 0,05$). Para inserir amortecimento à esses modos (modos 1 à 5), são verificados os fatores de participação (Figura 24) (KUNDUR, 1994) e conclui-se pela instalação de ESPs nos geradores síncronos G8, G4, G7 e G3.

Na Tabela 24 são mostrados os parâmetros dos controladores ESPs e POD obtidos por meio do algoritmo PSO, ao se considerar controladores ESPs nos geradores síncronos definidos pelos fatores de participação (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) e o controlador POD inserido ao dispositivo TCSC instalado na LT 30-31.

Configurando o sistema teste *New England* com os parâmetros dos controladores ESPs e POD definidos de acordo com a Tabela 24 são calculados os novos autovalores dominantes,

Tabela 24 - Configuração do PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste *New England*

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,9231	0,0461	3,7255
ESP G2	0,5565	0,1647	1,4796
ESP G3	0,7084	0,0528	2,9436
ESP G4	0,9788	0,0480	2,4457
ESP G5	0,7677	0,1461	1,1760
ESP G7	0,5887	0,1753	0,9634
ESP G8	0,8403	0,1673	1,4682
ESP G9	0,4244	0,1425	3,1356
TCSC-POD	0,1026	0,4431	0,0817

Fonte: Elaboração do autor.

coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n , obtidos por meio de simulações e mostrados na Tabela 25.

Tabela 25 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com PSO para 8 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste *New England*

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,4543 \pm j 8,4122$	0,0539	8,4245
2	$-1,4534 \pm j 8,0394$	0,1779	8,1698
3	$-0,6942 \pm j 8,3214$	0,0831	8,3503
4	$-0,4421 \pm j 7,1833$	0,0614	7,1969
5	$-0,4296 \pm j 6,5939$	0,0650	6,6079
6	$-0,3988 \pm j 6,9052$	0,0577	6,9167
7	$-0,6984 \pm j 5,7782$	0,1200	5,8202
8	$-0,5891 \pm j 6,2142$	0,0944	6,2421
9	$-0,4209 \pm j 3,3022$	0,1264	3,3289

Fonte: Elaboração do autor.

Ao se analisar a Tabela 25 é possível verificar que os coeficientes de amortecimento dos modos oscilatórios locais ($\xi_1 = 0,0539$, $\xi_2 = 0,1779$, $\xi_3 = 0,0831$, $\xi_4 = 0,0614$, $\xi_5 = 0,0650$, $\xi_6 = 0,0577$, $\xi_7 = 0,1200$ e $\xi_8 = 0,0944$) e interárea ($\xi_9 = 0,1264$) estão de acordo como o definido em projeto ($\xi_{local} \geq 0,05$ e $\xi_{interárea} \geq 0,1$).

5.4.3 Ajuste dos controladores ESPs e POD com BF-PSO

Para verificar o ajuste dos controladores ESPs e POD por meio do algoritmo BF-PSO, é considerado inicialmente o sistema teste *New England* instável (caso definido na Tabela 20). São instalados ESPs nos geradores síncronos mais participativos nos modos 6 à 8 (G1, G5 e G9) e o conjunto TCSC-POD na LT 30-31 com compensação fixa de 10% no local de instalação.

Na Tabela 27 são definidos os parâmetros dos controladores ESPs e POD obtidos por meio do algoritmo BF-PSO. O objetivo do projeto é inserir amortecimento adicional ao sistema teste *New England*, controlando o amortecimento dos modos de interesse, que neste caso são os modos oscilatórios instáveis (modos 5 a 9).

Tabela 26 - Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G5 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste *New England*

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,6982	0,0747	5,0000
ESP G5	0,7555	0,1437	0,9385
ESP G9	0,4944	0,1876	4,1397
TCSC-POD	0,1666	0,4360	0,1545

Fonte: Elaboração do autor.

Ao se considerar os controladores ESPs (instalados nos geradores G1, G5 e G9) e POD (instalado em conjunto com o TCSC na LT 30-31) com os parâmetros definidos na Tabela 26, são obtidos por meio de simulações os novos autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n , que são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 3 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste *New England*

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,2863 \pm j 8,2616$	0,0346	8,2666
2	$-0,3063 \pm j 8,3399$	0,0367	8,3455
3	$-0,2931 \pm j 8,1166$	0,0361	8,1219
4	$-0,2077 \pm j 7,2577$	0,0286	7,2607
5	$-0,2528 \pm j 6,4651$	0,0391	6,4700
6	$-0,4393 \pm j 6,6433$	0,0660	6,6578
7	$-0,5172 \pm j 5,9554$	0,0865	5,9778
8	$-0,7431 \pm j 6,7084$	0,1101	6,7494
9	$-0,3480 \pm j 2,9935$	0,1155	3,0137

Fonte: Elaboração do autor.

Apesar dos coeficientes de amortecimento de interesse ($\xi_6 = 0,0660$, $\xi_7 = 0,0865$, $\xi_8 = 0,1101$ e $\xi_9 = 0,1155$) definidos na Tabela 27 respeitarem o mínimo desejado ($\xi_{local} \geq 0,05$ e $\xi_{inter\grave{a}rea} \geq 0,1$), os modos 1 à 5 possuem amortecimento abaixo do desejado ($\xi_{local} \leq 0,05$). Essa condição pode ser crítica para alguns carregamentos do sistema teste *New England*, levando-o à instabilidade.

Para o sistema teste *New England* operar com amortecimento desejado em todos seus modos oscilatórios, é considerada a atuação de mais 5 ESPs, instalados nos geradores síncronos G2, G3, G4, G7 e G8. A definição da localização dos ESPs foi realizada por meio dos fatores

de participação (Figura 24) (KUNDUR, 1994) e análises realizadas em seções anteriores. São mostrados na Tabela 28 os parâmetros dos controladores ESPs (instalados no G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) e do controlador POD (conjunto TCSC instalado na LT 30-31).

Tabela 28 - Configuração do BF-PSO com a atuação de ESPs (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) e TCSC-POD na LT 30-31 no sistema teste *New England*

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	1,4131	0,1353	2,9708
ESP G2	1,3299	0,1222	2,0518
ESP G3	1,0363	0,1346	3,1092
ESP G4	1,2830	0,2000	2,7514
ESP G5	0,2881	0,0657	2,4214
ESP G7	0,1839	0,0676	2,6963
ESP G8	1,2648	0,0873	1,1379
ESP G9	0,7219	0,0642	2,4700
TCSC-POD	0,1687	0,4748	0,1605

Fonte: Elaboração do autor.

Novamente é simulado o sistema teste *New England* e na Tabela 29 são mostrados os autovalores dominantes, coeficientes de amortecimento ξ e frequência natural não amortecida ω_n obtidos com a instalação dos controladores de ESPs (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) e do conjunto TCSC-POD (na LT 30-31) com o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs e POD calculados a partir do algoritmo BF-PSO, os quais são mostrados na Tabela 28.

Tabela 29 - Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida (ajuste com BF-PSO para 8 ESPs e TCSC-POD na LT 30-31) no sistema teste *New England*

Modos	Autovalores	ξ	ω_n
1	$-0,9583 \pm j 8,1289$	0,1171	8,1852
2	$-0,5377 \pm j 8,8643$	0,0605	8,8806
3	$-0,6154 \pm j 8,2118$	0,0747	8,2349
4	$-1,1065 \pm j 7,6767$	0,1427	7,7560
5	$-0,7672 \pm j 6,6849$	0,1140	6,7288
6	$-0,3707 \pm j 6,7301$	0,0550	6,7403
7	$-0,4278 \pm j 6,0774$	0,0702	6,0924
8	$-0,3124 \pm j 4,6162$	0,0675	4,6268
9	$-0,3666 \pm j 2,9683$	0,1226	2,9909

Fonte: Elaboração do autor.

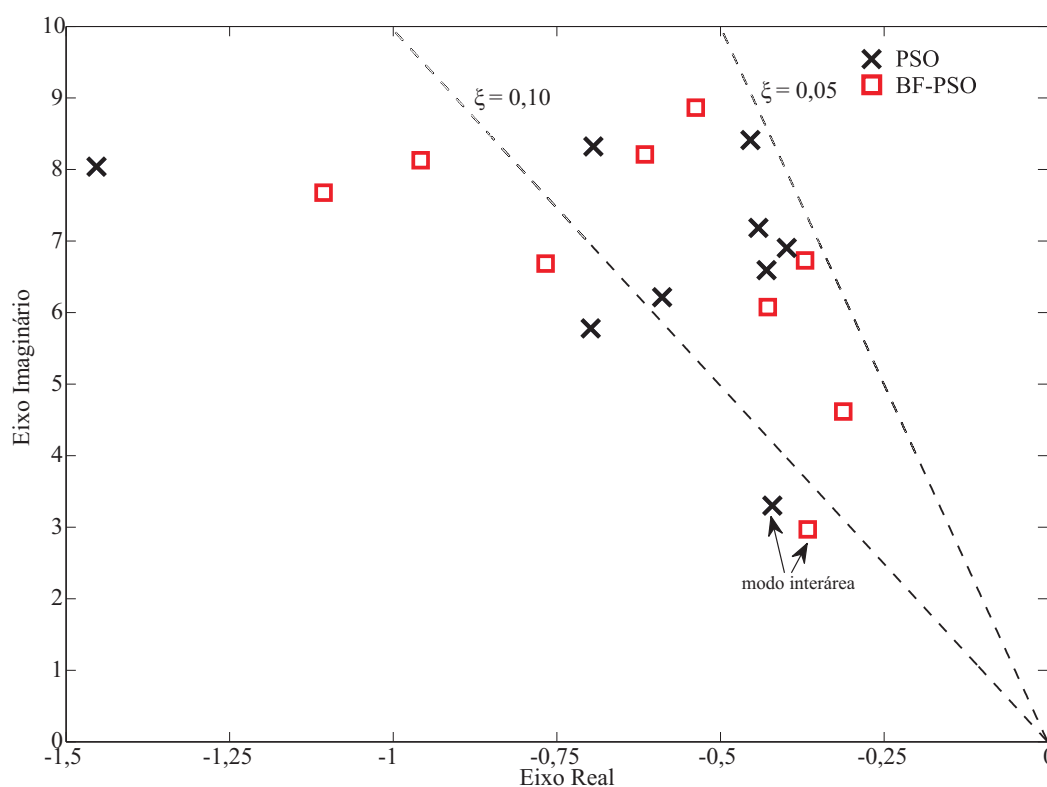
Ao se analisar os dados mostrados na Tabela 29 é possível afirmar que os coeficientes de amortecimento estão de acordo com o definido no projeto do algoritmo BF-PSO, ou seja, os coeficientes de amortecimento dos modos locais são maiores que 5% ($\xi_{local} \geq 0,05$) e o do modo interárea maior que 10% ($\xi_{interárea} \geq 0,1$).

5.4.4 Comparação dos ajustes obtidos com PSO e BF-PSO

Para comparar os resultados obtidos com os algoritmos PSO e BF-PSO são considerados os ajustes dos controladores ESPs e POD definidos nas Tabelas 24 e 28. As constantes de tempo e ganho dos controladores ESPs e POD (Tabelas 24 e 28) possuem valores diferentes. Porém, os ajustes deslocam os polos de interesse para uma região desejada, a qual é definida da mesma forma nos algoritmos PSO e BF-PSO.

Na Figura 27 são mostrados os polos no plano complexo para os ajustes obtidos pelos algoritmos PSO e BF-PSO (Tabelas 24 e 28). Observando as linhas tracejadas na Figura 27 conclui-se que os polos de interesse foram posicionados na região desejada (para os modos locais $\xi_{local} \geq 0,05$ e para o modo interárea $\xi_{inter\acute{a}rea} \geq 0,1$), independente das configurações obtidas pelos algoritmos PSO e BF-PSO.

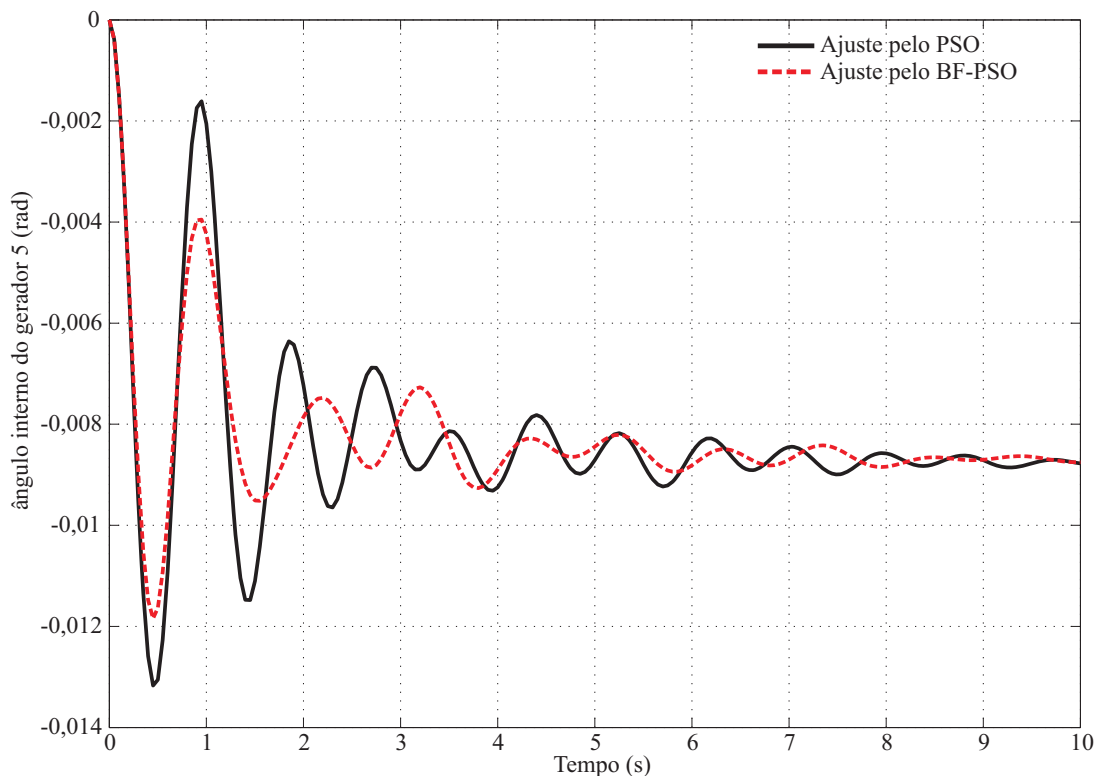
Figura 27 - Localização dos polos no plano complexo com ajuste dos controladores pelo PSO e BF-PSO no sistema teste *New England*



Ao considerar o sistema teste *New England* sem alterações de carregamentos e com uma perturbação em degrau no gerador síncrono G2 (gerador referência do sistema) de 0,05 pu foram verificadas as variações de ângulo interno do gerador síncrono G5 ($\Delta\delta_5 - \Delta\delta_2$), e seu comportamento dinâmico é mostrado na Figura 28. A primeira oscilação referente às variações de ângulo interno com o ajuste por meio do algoritmo BF-PSO (linha tracejada) possui menor

amplitude com relação ao ajuste considerando o algoritmo PSO (linha contínua), com tendência de atingir um mesmo valor de regime permanente para ambos os ajustes.

Figura 28 - Ângulo interno do gerador síncrono G5 do sistema teste *New England*



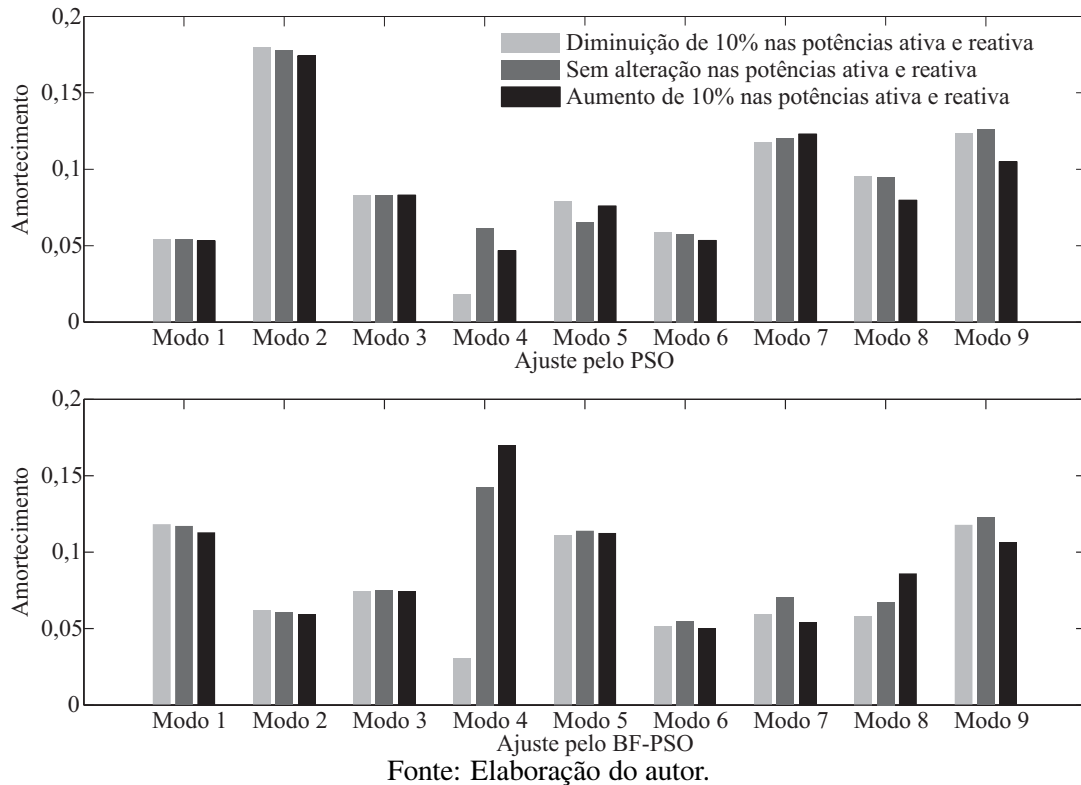
Fonte: Elaboração do autor.

Para verificar o comportamento do sistema teste *New England* com possíveis alterações de carregamento, é considerado um aumento de 10% e também uma diminuição de 10% em suas respectivas potências ativa e reativa em seus barramentos. Na Figura 29 é mostrada a comparação dos níveis de amortecimento considerando os barramentos sem alteração e com alteração de $\pm 10\%$ nas suas potências ativa e reativa.

As condições de variações no carregamento do sistema teste *New England* não foram definidas nos algoritmos PSO e BF-PSO. Portanto, é esperado que ocorram níveis de amortecimento abaixo do desejado ($\xi_{local} \leq 0,05$ e $\xi_{inter\acute{a}rea} \leq 0,1$) após as variações no carregamento. Avaliando a Figura 21 é observado que o amortecimento referente ao modo 4, com alterações nos carregamentos de $\pm 10\%$ e o ajuste dos controladores ESPs e POD com o algoritmo PSO, é menor do que o esperado ($\xi_{local} \leq 0,05$). Se o ajuste dos controladores ESPs e POD é realizado com o algoritmo BF-PSO, o coeficiente de amortecimento é menor do que o esperado ($\xi_{local} \leq 0,05$) no modo 4, com a diminuição de 10% nos carregamentos do sistema.

Por meio de análises na Figura 29 e das Tabelas 25 e 29 é possível afirmar que o sistema teste *New England* sem alterações em seu carregamento é mais amortecido com os ajustes

Figura 29 - Comparação de níveis de amortecimento considerando variações de cargas nos barramentos do sistema teste *New England*



definidos pelo algoritmo PSO ($\xi_6 = 0,0577$ - Tabela 24) se comparado com os ajustes definidos pelo algoritmo BF-PSO ($\xi_6 = 0,0550$ - Tabela 24). Porém, se notar o sistema teste *New England* considerando as variações de carregamentos é possível verificar que o menor amortecimento global ocorre ao se ajustar os controladores ESPs e POD com o algoritmo PSO.

5.5 CONCLUSÕES

Nesse capítulo, foram utilizadas técnicas de localização e ajuste de parâmetros dos controladores ESPs e POD para analisar a estabilidade de pequenas perturbações dos sistemas teste Sul-Brasileiro, simétrico de duas áreas e *New England*, nos quais (considerando os dados no Anexo A) eram instáveis e se tornaram estáveis com os dispositivos e métodos propostos.

Necessariamente para este processo, devem ser avaliadas as possíveis localizações dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD, que neste trabalho foram definidas por meio dos fatores de participação e da distância entre zero e polo da FTMA do controlador POD. Após determinar a localização, foram utilizados os métodos de otimização PSO e BF-PSO para ajustar os parâmetros dos controladores ESPs e POD. Ambos os métodos de otimização foram eficientes para inserir amortecimento de forma coordenada e desejada nas oscilações de baixa

freqüência dos sistemas teste Sul-Brasileiro, simétrico de duas áreas e *New England*.

Os ajustes obtidos por meio dos algoritmos PSO e BF-PSO são diferentes, apesar de posicionar os polos de interesse na mesma região do semiplano complexo. Este fato se deve pelas diferentes características dos algoritmos, aleatoriedade das condições iniciais (constantes T_1 , T_2 e K) e do ajuste simultâneo entre os controladores ESPs e POD.

Se comparar os algoritmos PSO e BF-PSO nos SEPs analisados, verifica-se que as soluções encontradas com o algoritmo BF-PSO são mais próximas das soluções desejadas. Este fato pode ser justificado pela característica do algoritmo BF-PSO em refinar soluções encontradas. Ou seja, o algoritmo BF-PSO possui um mecanismo de busca local melhor do que o algoritmo PSO, o que lhe confere no geral uma maior aproximação dos resultados desejados.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, propostas para trabalhos futuros e as considerações finais.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentou discussões relacionadas à estabilidade a pequenas perturbações no SEP, considerando a atuação simultânea de diversos dispositivos de controle, com o objetivo de aumentar os níveis de amortecimento dos modos oscilatórios de baixa frequência nos sistemas teste analisados.

Para a representação do SEP foi utilizado o MSP, considerando os modelos de geradores síncronos de terceira ordem e dos RATs de primeira ordem. Foram incluídos no MSP os modelos dinâmicos do ESP, do dispositivo FACTS TCSC e de seu controlador de amortecimento POD. Este modelo linear foi desenvolvido para o sistema multimáquinas e, portanto, pode ser utilizado para análise da estabilidade a pequenas perturbações em SEPs independente da quantidade de ESPs e/ou conjunto TCSC-POD a serem alocados.

Foram analisados os sistemas teste Sul-Brasileiro, simétrico de duas áreas e *New England*, os quais são instáveis por falta de amortecimento para os pontos de operação considerados. Os ESPs e o conjunto TCSC-POD tem como objetivo tornar os sistemas teste estáveis, por meio da introdução de amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência presentes nos SEPs. Porém, o uso dos ESPs e do conjunto TCSC-POD foi limitado de acordo com a característica de cada sistema teste, sendo o uso dos ESPs responsável para amortecer os modos oscilatórios do tipo local e o conjunto TCSC-POD os modos oscilatórios do tipo interárea. É característico do sistema teste Sul-Brasileiro a presença somente de modos oscilatórios do tipo local e, portanto, foram utilizados somente os ESPs. Já nos sistemas teste simétrico de duas áreas e *New England* foi utilizado os ESPs e o conjunto TCSC-POD, devido a presença de modos oscilatórios dos tipos local e interárea.

De acordo com cada um dos sistemas teste, foram verificadas as melhores localizações para instalação dos ESPs e do conjunto TCSC-POD. Para os ESPs foram utilizados os fatores de participação, sendo a maior participação sobre um determinado modo oscilatório de interesse o melhor local de instalação. No caso do conjunto TCSC-POD, a maior distância entre o polo de interesse e o zero da FTMA foi o indicativo para sua instalação. Outro fator determinante foi a posição do zero da FTMA, o qual pode influenciar no deslocamento do polo da FTME.

Com as localizações definidas foram utilizados dois métodos de otimização para o ajuste coordenado de parâmetros (constantes de tempo e ganho) entre os controladores instalados nos sistemas teste analisados. Estes métodos são baseados em enxame de partículas e foram chamados de PSO e BF-PSO. A função objetivo e os limites permitidos das constantes de tempo e ganho são iguais para os algoritmos PSO e BF-PSO. A função objetivo teve como

finalidade posicionar os polos de interesse em uma região definida a partir dos coeficientes de amortecimento desejados ($\xi_{local} \geq 0,05$ e $\xi_{inter\acute{a}rea} \geq 0,1$).

O algoritmo BF-PSO é um algoritmo BFO com a substituição da etapa de eliminação pelas formas de movimentação do algoritmo PSO. A etapa de eliminação de um algoritmo BFO consiste na eliminação dos piores indivíduos e duplicados os melhores em seu lugar (classificação em ordem decrescente da função objetivo). Não necessariamente, para o caso deste trabalho, os melhores indivíduos são direcionados para regiões com valores desejados para a função objetivo.

Nos sistemas teste analisados (Sul-Brasileiro, simétrico de duas áreas e *New England*) se tornaram estáveis (com aumento dos coeficientes de amortecimento) após a instalação (definidas pelos fatores de participação e pela distância entre polo de interesse e zero) e ajuste de parâmetros dos controladores ESPs e POD com os métodos de otimização PSO e BF-PSO. Ao se comparar os ajustes obtidos pelos algoritmos PSO e BF-PSO em cada um dos sistemas teste, observou-se que os valores obtidos para as constantes de tempo e ganho dos controladores são diferentes. Este fato é devido à influência exercida pelos controladores, em sua grande maioria, em todos os modos oscilatórios de cada sistema teste. Também contribui para valores diferentes no ajuste, os valores iniciais de constantes de tempo e ganho serem aleatórios (dentro dos limites permitidos) a cada execução dos algoritmos PSO e BF-PSO.

A atuação conjunta de diversos ESPs e/ou do conjunto TCSC-POD aumentaram os níveis de amortecimento, contribuindo para manutenção da estabilidade a pequenas perturbações, de forma satisfatória. É importante ressaltar que os algoritmos PSO e BF-PSO foram desenvolvidos individualmente e são totalmente independentes da quantidade de dispositivos de controle (ESPs e/ou conjunto TCSC-POD), o que lhe confere como uma ferramenta de ajuste de parâmetros em SEPs de maior porte.

Os algoritmos PSO e BF-PSO definem as constantes de tempo e ganho dos controladores ESPs e/ou do conjunto TCSC-POD, para um determinado ponto de operação, de modo a obter coeficientes de amortecimento desejados ($\xi_{local} \geq 0,05$ e $\xi_{inter\acute{a}rea} \geq 0,1$) nos modos oscilatórios de interesse. A alteração dos pontos de operação dos sistemas teste analisados modificou os níveis de amortecimento (mantendo os ajustes para o ponto de operação inicial) e, em alguns casos, os coeficientes de amortecimento são menores do que o desejado. Este fato ocorre por não levar em consideração a modificação do ponto de operação dos SEPs nos algoritmos PSO e BF-PSO.

Os algoritmos PSO e BF-PSO desenvolvidos podem ser utilizados para outros tipos de controladores, por exemplo o proporcional-integral-derivativo. Neste caso, as únicas alterações

seriam com relação à função objetivo, valores iniciais e a substituição da modelagem no MSP pela função de transferência da planta na qual o controlador é instalado.

Com relação aos tempos computacionais, a solução do problema a partir do algoritmo PSO é mais rápida com relação ao algoritmo BF-PSO em SEPs de menor complexidade, que neste trabalho foi o caso do sistema Sul-Brasileiro e simétrico de duas áreas. No entanto, em SEPs de maior complexidade (no caso do sistema teste *New England*) a solução a partir do algoritmo BF-PSO foi mais rápida quando comparada com o algoritmo PSO. Este fato é devido ao algoritmo BF-PSO ser mais estruturado computacionalmente do que o algoritmo PSO, o que justifica as relações encontradas em SEPs de menor ou maior complexidade.

Como trabalhos futuros são sugeridos os seguintes temas:

- Utilizar os algoritmos PSO e BF-PSO em SEPs de maior complexidade;
- Inserir nos algoritmos PSO e BF-PSO a determinação da localização dos ESPs e do conjunto TCSC-POD;
- Modificar os algoritmos PSO e BF-PSO para obter ajustes de parâmetros de modo a manter os níveis de amortecimento desejado ($\xi_{local} \geq 0,05$ e $\xi_{inter\acute{a}rea} \geq 0,1$) após mudanças no ponto de operação.

REFERÊNCIAS

- ABIDO, M. A. Optimal power flow using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, United Kingdom, v. 24, n. 7, p. 563–571, 2002. ISSN 0142-0615.
- AKAGI, H.; WATANABE, E.; AREDES, M. *Combined series and shunt power conditioners*. New Jersey: IEEE Press-John Wiley, 2007. 109 p.
- ALAM, M.; RAZZAK, M.; SHAFIULLAH, M.; CHOWDHURY, A. Application of TCSC and SVC in damping oscillations in bangladesh power system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL COMPUTER ENGINEERING-ICECE, 7., 2012. Dhaka: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. p. 571–574.
- ALI, A.; MAJHI, S. Design of optimum PID controller by bacterial foraging strategy. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY-ICIT, 6., 2006. Mumbai: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006. p. 601–605.
- ALI, E.; ABD-ELAZIM, S. TCSC damping controller design based on bacteria foraging optimization algorithm for a multimachine power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, United Kingdom, v. 37, n. 1, p. 23–30, 2012. ISSN 0142-0615.
- ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. 2. ed. Iowa: Iowa State University, 2003. 568 p.
- ARAUJO, P. B.; ZANETA, L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. *International Journal of Electric Power System & Energy Systems*, United Kingdom, v. 23, n. 3, p. 173–178, 2001. ISSN 0142-0615.
- BASKARAN, S.; KARPAGAM, N.; DEVARAJ, D. Optimization of UPFC controllable parameters for stability enhancement with real-coded genetic algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ENGINEERING, SCIENCE AND MANAGEMENT-ICAESM, 2012. *Conferenre...* Tamil Nadu: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. p. 250–255.
- BRATTON, D.; KENNEDY, J. Defining a standard for particle swarm optimization. In: SWARM INTELLIGENCE SYMPOSIUM-SIS, 2., 2007, Honolulu. *Symposium...* Honolulu: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. p. 120–127.
- CASTRO, M. S.; AYRES, H. M.; KOPCAK, I.; COSTA, V. F. A. da. Influência do modo de operação do SSSC na estabilidade de ângulo de sistemas elétricos de potência. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Germany, v. 18, n. 3, p. 347–360, 2007.
- DECKMANN, S. M.; COSTA, V. F. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, United States, v. 9, n. 2, p. 965–971, 1994. ISSN 0885-8950.
- DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, United States, v. 88, n. 4, p. 316–329, 1969. ISSN 0018-9510.

- ESLAMI, M.; SHAREEF, H.; MOHAMED, A.; KHAJEHZADEH, M. An efficient particle swarm optimization technique with chaotic sequence for optimal tuning and placement of PSS in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, United Kingdom, v. 43, n. 1, p. 1467–1478, 2012. ISSN 0142-0615.
- ESMAILI, M.; HOOSHMAND, R.; PARASTEGARI, M.; PANAH, P. G.; AZIZKHANI, S. New coordinated design of SVC and PSS for multi-machine power system using BF-PSO algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATICS-ICEEI, 4., 2013, Selangor. *Conference...* Selangor: Procedia Technology, 2013. p. 65–74. ISSN 2212-0173.
- FEBRES, C. A. T.; ARAUJO, P. B. Damping of low-frequency oscillations by supplementary control of power system stabilizers. *Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, Petrópolis, v. 9, p. 223–232, 2008. ISSN 2179-8451.
- FURINI, M. A. *Projeto de controladores suplementares de amortecimento utilizando redes neurais artificiais*. 2011. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.
- FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. D. A comparative study of the damping oscillation function of TCSC and UPFC. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 4., 2008, Bogotá. *Conference...* Bogotá: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. p. 1–6.
- 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 Electric Power System & Energy Systems*, United Kingdom, v. 33, n. 3, p. 615–622, 2011. ISSN 0142-0615.
- GAMA, C.; ÄNGQUIST, L.; INGESTRÖM, G.; NOROOZIAN, M. Commissioning and operative experience of TCSC for damping power oscillation in the brazilian north-south interconnection. In: CIGRE SESSION, 1., 2000, Paris. *Proceedings...* Paris: Electra, 2000.
- GYUGYI, L.; SEN, K.; SCHAUDER, C. D. The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1115–1123, 1999. ISSN 0885-8977.
- HINGORANI, S. M.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system*. United Kingdom: IEEE Press-John Wiley, 1999. 432 p.
- IEEE STANDARDS. *IEEE recommended practice for specifying thyristor-controlled series capacitors*. New York: [s.n.], 2009. 1-98 p.
- JABR, R.; PAL, B.; MARTINS, N.; FERRAZ, J. Robust and coordinated tuning of power system stabiliser gains using sequential linear programming. *Generation, Transmission and Distribution*, Stevenage, v. 4, n. 8, p. 893–904, 2010. ISSN 1751-8687.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 2., 1995, Perth. *Conference...* Perth: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995. v. 4, p. 1942–1948.
- KORANI, W.; DORRAH, H.; EMARA, H. Bacterial foraging oriented by particle

- swarm optimization strategy for PID tuning. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE IN ROBOTICS AND AUTOMATION-CIRA, 8., 2009, Daejeon. *Symposium...* Daejeon: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. p. 445–450.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: MacGraw-Hill, 1994. 1176 p.
- LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers, part I: general concepts, part II: performance objectives and tuning concepts, part III: practical considerations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, United States, PAS-100, n. 12, p. 3017–3046, 1981. ISSN 0018-9510.
- LEE, K.; EL-SHARKAWI, M. *Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems*. New Jersey: IEEE Press-John Wiley, 2008. 586 p.
- LIN, Y. F.; XU, Z.; HUANG, Y. Power oscillation damping controller design for TCSC based on the test signal method. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL, 3., 2005, San Francisco. *Meeting...* San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. p. 1671–1675.
- 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. *IEEE Transactions on Power System*, United States, v. 5, n. 4, p. 74–82, 1990. ISSN 0885-8950.
- MARTINS, N.; PELLANDA, P. C.; ROMMES, J. Computation of transfer function dominant zeros with applications to oscillation damping control of large power systems. *IEEE Transactions on Power System*, United States, v. 22, n. 4, p. 1657–1664, 2007. ISSN 0885-8950.
- MARTINS, N.; PINTO, H.; LIMA, L. T. G. Efficient methods for finding transfer function zeros of power systems. *IEEE Transactions on Power System*, United States, v. 7, n. 3, p. 1350–1361, 1992. ISSN 0885-8950.
- MENEZES, M. M. *Ajuste de parâmetros de controladores (POD) através de redes neurais artificiais em dispositivos FACTS TCSC e SSSC*. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.
- MIHALIC, R.; PAPIC, I. Static synchronous series compensator-a mean for dynamic power flow control in electric power systems. *Electric Power Systems Research*, Switzerland, v. 45, n. 1, p. 65–72, 1998. ISSN 0378-7796.
- MOURA, R. F. *Análise dos zeros da FTMA e ajuste de parâmetros de controladores suplementares de amortecimento acoplado ao dispositivo FACTS UPFC*. 2012. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
- MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Estudo das limitações impostas ao amortecimento de oscilações eletromecânicas pelos zeros da FTMA de controladores suplementares. *Controle & Automação*, Heidelberg, v. 23, n. 2, p. 190–201, 2012. ISSN

0103-1759.

NGUYEN, T. T.; GIANTO, R. Neural networks for adaptive control coordination of ESPs and FACTS devices multimachine power system. *Generation, Transmission and Distribution*, United Kingdom, v. 2, n. 3, p. 355–372, 2008. ISSN 1751-8687.

NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. Damping of power system oscillations by use of controllable components. *IEEE Transactions Power Delivery*, United States, v. 9, n. 4, p. 2046–2054, 1994. ISSN 0885-8977.

PASSINO, K. M. Distributed optimization and control using only a germ of intelligence. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT CONTROL, 8., 2000, Prata. *Symposium...* Prata: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. p. 5–13.

PASSINO, K. M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE Control Systems*, Sydney, v. 22, n. 3, p. 52–67, 2002.

PELANDA, P. C.; SAVELLI, D. C.; MACEDO, N. J. P.; MARTINS, N.; COSTA, G. S. Síntese de sinais e escolha de estrutura dos estabilizadores dos TCSCs da interligação norte-sul considerando robustez a perturbações externas. In: SIMPÓSIO DE PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA-SEPOPE, 10., 2006, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: [s.n.], 2006.

PEREIRA, A. L. *Utilização de redes neurais artificiais no ajuste de controladores suplementares e dispositivo FACTS STATCOM para a melhoria da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência*. 2009. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

PEREIRA, A. L. S.; ARAUJO, P. B.; FURINI, M. A. Utilização de redes neurais artificiais no amortecimento de oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência multimáquinas. In: ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 13., 2009, Puerto Iguazú. *Proceedings...* Puerto Iguazú: [s.n.], 2009. p. 01–08.

PUPIN, C. E.; PINA, A. P.; ARAUJO, P. B. Atuação do sssc na estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA-CBQEE, 7., 2009, Blumenau. *Anais...* Blumenau: [s.n.], 2009. p. 01–06.

RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. 4. ed. New Jersey: John Wiley, 2009. 813 p.

ROGERS, G. *Power system oscillations*. New York: Springer US, 2000. 344 p.

SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357 p.

SEN, K.; SEN, M. *Introduction to FACTS controllers: theory, modeling, and applications*. New Jersey: IEEE Press-John Wiley, 2009. 521 p.

SHAYEGHI, H.; SAFARI, A.; SHAYANFAR, H. PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system. *Energy Conversion and*

Management, United Kingdom, v. 51, n. 12, p. 2930–2937, 2010. ISSN 0196-8904.

SHAYEGHI, H.; SHAYANFAR, H.; JALILZADEH, S.; SAFARI, A. A PSO based unified power flow controller for damping of power system oscillations. *Energy Conversion and Management*, United Kingdom, v. 50, n. 10, p. 2583–2592, 2009. ISSN 0196-8904.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC transmission systems (FACTS)*. United Kingdom: The Institute of Electrical Engineers, 1999. 592 p.

TALAQ, J. Optimal power system stabilizers for multi machine systems. *International Journal of Electric Power System & Energy Systems*, United Kingdom, v. 43, n. 1, p. 793–803, 2012. ISSN 0142-0615.

VALLE, D. B. *A influência do controlador GUPFC no sistema elétrico do potência visando a estabilidade a pequenas perturbações*. 2014. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia FACTS-tutorial. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Germany, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.

YANG, N.; LIU, Q.; MCCLELLY, J. D. TCSC controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power System*, United States, v. 13, n. 14, p. 1304–1310, 1998. ISSN 0885-8950.

YIXIN, N.; ON, M. L.; ZHENYU, H.; SHOUSUN, C.; BAOLIN, Z. Fuzzy logic damping controller for FACTS devices in interconnected power systems. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS-ISCAS, 19., 1999, Orlando. *Symposium...* Orlando: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. v. 5, p. 591–594.

YOSHIDA, H.; KAWATA, K.; FUKUYAMA, Y.; TAKAYAMA, S.; NAKANISHI, Y. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment. *IEEE Transactions on Power System*, United States, v. 15, n. 4, p. 1232–1239, 2000. ISSN 0885-8950.

ZHANG, X.-P.; HANDSCHIN, E.; YAO, M. Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF. *IEEE Transactions on Power System*, v. 16, n. 3, p. 367–373, 2001. ISSN 0885-8950.

ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTES

Esse apêndice fornece os dados dos geradores, reguladores automáticos de tensão, barras, linhas de transmissão e dos dados de carregamento dos sistemas testes simulados neste trabalho.

Nas Tabelas 30 a 33 são reproduzidos os dados do sistema teste Sul-Brasileiro (PEREIRA, 2009).

Tabela 30 - Dados dos geradores síncronos - sistema teste Sul-Brasileiro

Gerador	x'_d (pu)	x_q (pu)	x_d (pu)	T'_{d0} (pu)	H(s)	D(pu)
G-1	0,0457	0,1050	0,1460	6,90	37,320	0,0
G-2	0,0985	0,2979	0,4015	4,90	11,300	0,0
G-3	0,0300	0,0700	0,0973	8,27	39,460	0,0
G-4	0,0180	0,0400	0,0561	7,92	74,400	0,0
G-5	0,0215	0,0500	0,0679	10,00	57,280	0,0
G-6	0,1350	0,7700	1,0150	5,00	3,560	0,0
G-7	0,1535	0,5304	0,9130	4,89	5,060	0,0
G-8	0,1007	0,2987	0,4000	6,66	9,680	0,0
G-9	0,0550	0,1235	0,2211	9,55	20,340	0,0
G-10	0,0184	0,0525	0,0730	7,59	51,630	0,0

Tabela 31 - Dados dos reguladores automáticos de tensão - sistema teste Sul-Brasileiro

Gerador	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
K_e (pu)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
T_e (s)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabela 32 - Dados das linhas de transmissão - sistema teste Sul-Brasileiro

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
11	12	0,0007	0,0145	1,5672
11	12	0,0007	0,0145	1,5672
11	25	0,0018	0,0227	2,1230
11	33	0,0014	0,0204	2,2869
12	42	0,0000	0,0063	0,0000
1	29	0,0000	0,0135	0,0000
13	14	0,0386	0,1985	0,3425

Continuação dos dados de linha - sistema teste Sul-Brasileiro

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
13	35	0,0096	0,0491	0,0861
13	45	0,0033	0,0167	0,3019
14	15	0,0463	0,3378	0,3917
14	15	0,0463	0,3378	0,3917
14	37	0,0177	0,0910	0,1510
14	37	0,0177	0,0910	0,1510
14	37	0,0177	0,0910	0,1510
2	15	0,0000	0,0460	0,0000
15	16	0,0163	0,0835	0,1411
15	16	0,0163	0,0835	0,1411
15	39	0,0250	0,1648	0,4581
16	17	0,0163	0,0835	0,1445
16	18	0,0316	0,1621	0,2746
17	18	0,0153	0,0861	0,1328
3	18	0,0000	0,0114	0,0000
18	19	0,0306	0,1523	0,2620
18	44	0,0344	0,1760	0,3061
18	44	0,0344	0,1760	0,3061
19	20	0,0245	0,1256	0,1981
19	25	0,0000	0,0300	0,0000
20	21	0,0088	0,0415	0,5009
21	22	0,0182	0,0935	0,1602
21	22	0,0182	0,0935	0,1602
21	26	0,0000	0,0062	0,0000
22	23	0,0154	0,0776	0,1386
22	23	0,0154	0,0776	0,1386
23	24	0,0216	0,1105	0,1872
23	24	0,0216	0,1105	0,1872
23	28	0,0000	0,0062	0,0000
24	35	0,0180	0,0920	0,1556
24	35	0,0180	0,0920	0,1556
4	25	0,0000	0,0067	0,0000
25	26	0,0019	0,0280	3,1526

Continuação dos dados de linha - sistema teste Sul-Brasileiro

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
25	27	0,0019	0,0274	3,0741
25	29	0,0014	0,0195	2,2505
25	36	0,0005	0,0070	0,7857
26	27	0,0005	0,0069	0,7728
26	28	0,0012	0,0175	2,0160
29	30	0,0021	0,0300	3,5289
30	38	0,0000	0,0062	0,0000
31	32	0,0022	0,0300	3,6137
31	40	0,0000	0,0062	0,0000
32	33	0,0014	0,0195	2,2441
5	33	0,0000	0,0114	0,0000
33	36	0,0005	0,0070	0,7856
6	34	0,0000	0,0871	0,0000
34	35	0,0000	0,0590	0,0000
7	35	0,0000	0,0701	0,0000
8	35	0,0000	0,0450	0,0000
35	45	0,0129	0,0657	0,1155
10	36	0,0000	0,0068	0,0000
37	38	0,0021	0,0107	0,0208
37	38	0,0021	0,0107	0,0208
37	38	0,0021	0,0107	0,0208
37	40	0,0184	0,0949	0,0000
37	40	0,0184	0,0949	0,0000
37	40	0,0184	0,0949	0,0000
9	39	0,0000	0,0236	0,0000
39	40	0,0202	0,1129	0,1993
41	42	0,0106	0,0596	0,0951
41	42	0,0106	0,0596	0,0951
41	43	0,0110	0,1184	0,2081
41	44	0,0229	0,1174	0,2087
42	43	0,0172	0,0884	0,1446
42	43	0,0172	0,0884	0,1446
43	44	0,0181	0,0929	0,1671

Tabela 33 - Dados das barras e carregamento - sistema teste Sul-Brasileiro

Barra	V (pu)	Ang(°)	P_G (MW)	Q_G (MVar)	P_L (MW)	Q_L (MVar)	B_{sh} (pu)
1	1,020	-6,887	650,00	4,92	0,00	0,00	0,00
2	1,040	-14,116	215,00	64,24	0,00	0,00	0,00
3	1,020	2,978	895,00	102,90	0,00	0,00	0,00
4	1,022	0,000	1531,60	-39,50	0,00	0,00	0,00
5	1,018	7,032	1325,00	-4,78	0,00	0,00	0,00
6	1,030	-24,566	90,00	41,09	0,00	0,00	0,00
7	1,030	-23,082	120,00	45,52	0,00	0,00	0,00
8	1,030	-21,726	241,00	75,97	0,00	0,00	0,00
9	1,000	-14,155	460,00	98,12	0,00	0,00	0,00
10	1,020	2,761	1100,00	-80,83	0,00	0,00	0,00
11	1,024	-6,928	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,50
12	1,015	-9,374	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,970	-32,316	0,00	0,00	177,00	68,00	0,00
14	1,008	-33,974	0,00	0,00	191,00	42,00	0,00
15	1,016	-19,486	0,00	0,00	171,00	18,50	0,00
16	0,994	-16,226	0,00	0,00	126,00	47,00	0,00
17	0,993	-10,611	0,00	0,00	46,00	14,70	0,00
18	1,013	-2,687	0,00	0,00	281,00	56,50	0,00
19	1,010	-10,965	0,00	0,00	279,00	60,70	0,00
20	1,002	-20,897	0,00	0,00	130,00	29,40	0,00
21	1,013	-21,092	0,00	0,00	427,00	-25,00	0,00
22	0,959	-27,583	0,00	0,00	310,00	141,00	0,00
23	0,990	-26,346	0,00	0,00	424,00	90,60	0,00
24	0,985	-28,777	0,00	0,00	117,00	53,10	0,00
25	1,029	-5,597	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,60
26	1,017	-18,762	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,021	-17,250	0,00	0,00	368,00	59,60	0,00
28	0,998	-24,318	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	1,023	-11,711	0,00	0,00	174,00	-8,00	-1,00
30	1,014	-29,224	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,50
31	1,012	-22,786	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,50
32	1,020	-9,683	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,70
33	1,029	-1,256	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Continuação dos dados das barras e carregamento - sistema teste Sul-Brasileiro

Barra	V (pu)	Ang(°)	P_G (MW)	Q_G (MVar)	P_L (MW)	Q_L (MVar)	B_{shk} (pu)
34	0,998	-28,938	0,00	0,00	125,00	39,80	0,00
35	1,002	-27,756	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	1,028	-1,330	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	1,016	-33,458	0,00	0,00	813,00	110,00	0,00
38	1,026	-32,730	0,00	0,00	612,00	-455,00	0,00
39	0,983	-20,497	0,00	0,00	404,00	135,00	0,00
40	1,018	-25,447	0,00	0,00	393,00	-111,00	0,00
41	0,983	-15,559	0,00	0,00	262,00	13,20	0,00
42	1,000	-11,566	0,00	0,00	229,00	183,00	0,00
43	0,972	-15,361	0,00	0,00	184,00	60,20	0,00
44	0,972	-13,302	0,00	0,00	139,00	53,70	0,00
45	0,969	-32,038	0,00	0,00	90,10	55,30	0,00

Nas Tabelas 34 a 37 são reproduzidos os dados do sistema teste de duas áreas (SAUER; PAI, 1998).

Tabela 34 - Dados dos geradores síncronos - sistema teste de duas áreas

Gerador	x'_d (pu)	x_q (pu)	x_d (pu)	T'_{d0} (pu)	H(s)	D(pu)
G-1	0,033	0,190	0,20	8,0	54,0	0,10
G-2	0,033	0,190	0,20	8,0	54,0	0,10
G-3	0,033	0,190	0,20	8,0	63,0	0,10
G-4	0,033	0,190	0,20	8,0	63,0	0,10

Tabela 35 - Dados dos reguladores automáticos de tensão - sistema teste de duas áreas

Gerador	G-1	G-2	G-3	G-4
K_e (pu)	200	200	200	200
T_e (s)	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabela 36 - Dados das linhas de transmissão - sistema teste de duas áreas

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
1	5	0,0010	0,0120	0,000
2	6	0,0010	0,0120	0,000
7	8	0,0220	0,2200	0,330
6	7	0,0020	0,0200	0,030
6	7	0,0020	0,0200	0,030
4	10	0,0010	0,0120	0,000
3	9	0,0010	0,0120	0,000
9	8	0,0020	0,0200	0,030
9	8	0,0020	0,0200	0,030
5	6	0,0050	0,0500	0,075
5	6	0,0050	0,0500	0,075
10	9	0,0050	0,0500	0,075
10	9	0,0050	0,0500	0,075

Tabela 37 - Dados das barras e carregamento - sistema teste de duas áreas

Barra	V (pu)	Ang(°)	P_G (MW)	Q_G (MVar)	P_L (MW)	Q_L (MVar)	B_{sh} (pu)
1	1,030	9,163	700,00	186,47	0,00	0,00	0,00
2	1,010	-0,733	700,00	316,30	0,00	0,00	0,00
3	1,010	-10,393	700,00	257,82	0,00	0,00	0,00
4	1,030	0,000	726,26	171,25	0,00	0,00	0,00
5	1,005	4,611	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,969	-5,472	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,937	-14,022	0,00	0,00	1159,00	212,00	1,00
8	0,953	-23,691	0,00	0,00	1575,00	288,00	3,50
9	0,976	-15,132	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,006	-4,728	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nas Tabelas 38 a 41 são reproduzidos os dados do sistema teste New England (ARAÚJO; ZANETA, 2001).

Tabela 38 - Dados dos geradores síncronos - sistema teste *New England*

Gerador	x'_d (pu)	x_q (pu)	x_d (pu)	T'_{d0} (pu)	H(s)	D(pu)
G-1	0,0310	0,0609	0,1000	10,20	42,0	4,00
G-2	0,0697	0,2820	0,2950	6,56	30,3	9,75
G-3	0,0531	0,2370	0,2495	5,70	35,8	10,00
G-4	0,0436	0,2580	0,2620	6,56	28,6	10,00
G-5	0,1320	0,6200	0,6700	5,40	26,0	3,00
G-6	0,0500	0,2410	0,2540	7,30	34,8	10,00
G-7	0,0490	0,2920	0,2950	5,66	26,4	8,00
G-8	0,0570	0,2800	0,2900	6,70	24,3	9,00
G-9	0,0570	0,2050	0,2106	4,79	34,5	14,00
G-10	0,0001	1e-10	1e-10	7,00	1e9	10,00

Tabela 39 - Dados dos reguladores automáticos de tensão - sistema teste *New England*

Gerador	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
K_e (pu)	5,0	6,2	5,0	5,0	40,0	5,0	40,0	5,0	40,0	0,001
T_e (s)	0,06	0,05	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	9999

Tabela 40 - Dados das linhas de transmissão - sistema teste *New England*

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
30	31	0,0035	0,0411	0,6987
30	10	0,0010	0,0250	0,7500
31	32	0,0013	0,0151	0,2572
31	25	0,0070	0,0086	0,1406
32	33	0,0013	0,0213	0,2214
32	18	0,0011	0,0133	0,2138
34	33	0,0008	0,0128	0,1342
33	14	0,0008	0,0129	0,1382
35	34	0,0002	0,0026	0,0434
36	35	0,0006	0,0092	0,1130
11	35	0,0007	0,0082	0,1389
37	38	0,0023	0,0363	0,3804

Continuação dos dados das linhas de transmissão - sistema teste *New England*

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
38	10	0,0010	0,0250	1,2000
39	11	0,0004	0,0043	0,0729
39	13	0,0004	0,0043	0,0729
13	14	0,0009	0,0101	0,1723
14	15	0,0018	0,0217	0,3660
15	16	0,0009	0,0094	0,1710
16	17	0,0007	0,0089	0,1342
16	19	0,0016	0,0195	0,3040
16	21	0,0008	0,0135	0,2548
16	24	0,0003	0,0059	0,0680
17	18	0,0007	0,0082	0,1319
17	27	0,0013	0,0173	0,3216
21	22	0,0008	0,0140	0,2565
22	23	0,0006	0,0096	0,1846
23	24	0,0022	0,0350	0,3610
25	26	0,0032	0,0323	0,5130
26	27	0,0014	0,0147	0,2396
26	28	0,0043	0,0474	0,7802
26	29	0,0057	0,0625	1,0290
28	29	0,0014	0,0151	0,2490
12	11	0,0016	0,0435	0,0000
12	13	0,0016	0,0435	0,0000
2	35	0,0000	0,0250	0,0000
39	3	0,0000	0,0200	0,0000
19	4	0,0007	0,0142	0,0000
20	5	0,0009	0,0180	0,0000
22	6	0,0000	0,0143	0,0000
23	7	0,0005	0,0272	0,0000
25	8	0,0006	0,0232	0,0000
31	1	0,0000	0,0181	0,0000
29	9	0,0008	0,0156	0,0000
19	20	0,0007	0,0138	0,0000

Tabela 41 - Dados das barras e carregamento - sistema teste *New England*

Barra	V (pu)	Ang(°)	P_G (MW)	Q_G (MVar)	P_L (MW)	Q_L (MVar)
17	0,965	-8,066	-0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,964	-9,080	0,00	0,00	158,00	30,00
19	0,980	-0,873	-0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,976	-1,878	0,00	0,00	628,00	103,00
21	0,959	-4,160	-0,00	0,00	274,00	115,00
22	0,977	0,862	-0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,973	0,539	-0,00	0,00	275,00	85,00
24	0,967	-6,728	0,00	-0,00	309,00	-92,00
25	0,996	-4,826	0,00	-0,00	224,00	48,00
26	0,987	-6,104	0,00	0,00	139,00	17,00
27	0,970	-8,318	0,00	0,00	281,00	76,00
28	0,989	-2,165	-0,00	0,00	206,00	28,00
29	0,991	0,920	-0,00	0,00	284,00	27,00
30	1,004	-9,747	0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,985	-6,331	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,966	-9,439	0,00	0,00	322,00	2,00
33	0,943	-10,289	0,00	0,00	500,00	184,00
34	0,949	-8,940	-0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,952	-8,210	-0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,940	-10,778	0,00	0,00	233,00	84,00
37	0,938	-12,753	0,00	0,00	522,00	176,00
38	0,986	-12,174	-0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,961	-5,506	-0,00	0,00	0,00	0,00

APÊNDICE A - TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS PELO AUTOR

1. MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B.; PUPIN, C. E. Ajuste de parâmetros de controladores POD acoplados em dispositivos TCSC através de redes neurais. In: CONGRESS ON ELECTRIC POWER GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION - CLAGTEE, 9., 2011, Mar del Plata. *Anais...* Mar del Plata: [s.n.], 2011.
2. MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B. Ajuste Coordenado de Parâmetros dos Controladores ESP e TCSC-POD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE, 4., 2012, Goiânia. *Anais...* Goiânia: [s.n.], 2012.
3. MENEZES, M. M.; PUPIN, C. E. ; ARAUJO, P. B. Dispositivos SSSC-POD e ESP atuando de forma coordenada no Sistema Elétrico de Potência. In: CONGRESS ON ELECTRIC POWER GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION - CLAGTEE, 10., 2013, Viña del Mar. *Anais...* Viña del Mar: [s.n.], 2013.
4. MENEZES, M. M.; VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. Localização e Ajuste Coordenado de Parâmetros em Dispositivos ESP e TCSC-POD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI, 6., 2013, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: [s.n.], 2013.
5. VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B.; MENEZES, M. M. A Influência do Unified Power Flow Controller (UPFC) no Sistema Elétrico de Potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI, 6., 2013, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: [s.n.], 2013.
6. MENEZES, M. M.; VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. Otimização por enxame de partículas no ajuste dos estabilizadores do sistema elétrico de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE, 5., 2014, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: [s.n.], 2014.
7. VALLE, D. B.; MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B. Atuação do Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC) no Sistema Elétrico de Potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE, 20., 2014, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: [s.n.], 2014.
8. MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V. Bacterial Foraging Optimization Algorithm used to adjust the parameters of Power System Stabilizers and Thyristor Controlled Series Capacitor-Power Oscillation Damping controller. In: IEEE/IAS

INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 11., 2014, Juiz de Fora. *Conference...* Juiz de Fora: [s.n.], 2014.

9. MENEZES, M. M.; VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. Design of power system stabilizers and thyristor controlled series capacitor-power oscillation damping controller using particle swarm optimization - Submetido à revista International Journal Electrical Power and Energy Systems, 2014.