



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Câmpus de Ilha Solteira

LUÍS FABIANO BARONE MARTINS

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS BIO-INSPIRADOS NA  
PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE  
AMORTECIMENTO E DISPOSITIVO FACTS UPFC**

**Ilha Solteira**

**2017**

LUÍS FABIANO BARONE MARTINS

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS BIO-INSPIRADOS NA  
PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE  
AMORTECIMENTO E DISPOSITIVO FACTS UPFC**

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

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- M386a Martins, Luís Fabiano Barone.  
Aplicação de algoritmos bio-inspirados na parametrização dos controladores suplementares de amortecimento e dispositivo FACTS UPFC / Luís Fabiano Barone Martins. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
192 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017
- Orientador: Percival Bueno De Araujo
- Inclui bibliografia
1. Estabilidade a pequenas perturbações. 2. Modelo de sensibilidade de corrente. 3. Unified power flow controller. 4. Metaheurísticas. 5. Algoritmos bio-inspirados.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: Aplicação de Algoritmos Bio-Inspirados na Parametrização dos Controladores Suplementares de Amortecimento e Dispositivo FACTS UPFC

**AUTOR: LUIS FABIANO BARONE MARTINS**

**ORIENTADOR: PERCIVAL BUENO DE ARAUJO**

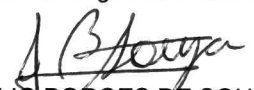
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JULIO BORGES DE SOUZA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia



Prof. Dr. MARCELO FAVORETTO CASTOLDI  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ilha Solteira, 22 de agosto de 2017

*À Pérola Lima Martins*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Grande Arquiteto do Universo por me guiar até aqui.

Aos meus pais, Matilde e Lourival, pelo esforço que empenharam em minha educação, muitas vezes trocando seus projetos pelos meus.

À minha filha Pérola pela inspiração.

À minha esposa Thaís pelo amor, dedicação e sobretudo compreensão, sem os quais nada disso seria realizado.

Ao meu orientador, professor Percival, pela oportunidade de fazer parte de sua equipe e não menos, por sua amizade e paciência.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa: Danilo e Maxwell pela acolhida inicial; Bruno, Ednei e André pela parceria e; Elenilson, em especial, pelo apoio nos momentos críticos.

A todos os professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica, que fizeram parte direta ou indiretamente da execução deste trabalho.

Ao Instituto Federal do Paraná pelo aporte financeiro e afastamento de minhas atividades presenciais os quais foram imprescindíveis na conclusão deste trabalho.

*"A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isto, mas o que ele se torna com isto."*

**John Ruskin (1819 – 1900)**

## RESUMO

Neste trabalho são apresentados quatro métodos de otimização bio-inspirados, Colônia de Abelhas Artificiais, Otimização por Enxame de Partículas, Algoritmo dos Vagalumes e um híbrido aqui denominado por *Bee* – PSO, que combina particularidades dos outros três. Estes métodos são utilizados no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores Proporcional-Integral e Suplementares de Amortecimento (Estabilizadores de Sistemas de Potência e o conjunto *Unified Power Flow Controller – Power Oscillation Damping*). O objetivo é inserir amortecimento adicional aos modos oscilatórios de baixa frequência e, conseqüentemente, garantir a estabilidade do sistema elétrico frente a pequenas perturbações. São considerados três cenários que englobam duas configurações de instalação dos controladores suplementares e duas condições de carregamento, uma fixa e outra variável. Uma formulação por injeções de corrente do *dispositivo Unified Power Flow Controller* é sugerida e incorporada ao Modelo de Sensibilidade de Corrente, utilizado para representar o sistema elétrico de potência. Análises estática e dinâmica foram realizadas nos sistemas teste Simétrico de Duas Áreas e *New England* para validar o modelo de injeções de corrente proposto para o *Unified Power Flow Controller* e determinar qual dos algoritmos apresentados é o mais eficiente no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores. Dos resultados obtidos foi possível concluir que a versão híbrida proposta neste trabalho possui desempenho superior na maioria dos cenários analisados, fornecendo soluções com amortecimento suficiente, mesmo quando pequenas variações no carregamento do sistema são consideradas.

**Palavras-chave:** Modelo de sensibilidade de corrente. Unified power flow controller. Estabilizadores de sistemas de potência. Power oscillation damping. Algoritmos bio-inspirados.



## ABSTRACT

In this work four bio-inspired optimization methods, Artificial Bee Colony, Particle Swarm Optimization, Firefly Algorithm, and a hybrid called Bee – PSO, which combines the characteristics of the other three are presented. These methods are used in the coordinated adjustment of the parameters of Proportional-Integral and Supplementary Damping Controllers (Power System Stabilizers and the Unified Power Flow Controller - Power Oscillation Damping). The goal is to insert additional damping into the low-frequency oscillatory modes and thus ensure the stability of the electrical system against minor disturbances. Three scenarios are considered that include two installation configurations of the supplementary controllers and two charging conditions, one fixed and one variable. A current injection formulation of the Unified Power Flow Controller is suggested and incorporated into the Current Sensitivity Model used to represent the electric power system. Static and dynamic analyzes were performed in the Two-Zone Symmetric and New England test systems to validate the proposed current injection model for the Unified Power Flow Controller and to determine which of the presented algorithms is the most efficient in the coordinated adjustment of the parameters of the controllers. From the results obtained it was possible to conclude that the hybrid version proposed in this work has superior performance in most scenarios analyzed, providing solutions with sufficient damping, even when small variations in system loading are considered.

**Keywords:** Current sensitivity model. Unified power flow controller. Power system stabilizers. Power oscillation damping. Bio-inspired algorithms.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do UPFC.....	39
Figura 2 – Representação do UPFC para o Modelo de Injeção de Corrente.....	40
Figura 3 – Representação da fonte de tensão série por uma fonte de corrente.....	41
Figura 4 – Transformação da fonte de corrente série.....	44
Figura 5 – Diagrama fasorial devido a inclusão do UPFC.....	46
Figura 6 – Representação do Modelo de Injeções de Corrente para o UPFC.....	46
Figura 7 – Estrutura do sistema de controle do UPFC.....	48
Figura 8 – Controle dos fluxos de potência pelo UPFC.....	49
Figura 9 – Diagrama unifilar do gerador síncrono da barra $k$ .....	52
Figura 10 – Diagrama fasorial do gerador $k$ .....	54
Figura 11 – Fluxo de corrente no sistema multimáquinas.....	56
Figura 12 – Balanço nodal de correntes na barra $k$ .....	60
Figura 13 – Regulador Automático de Tensão.....	68
Figura 14 – Estrutura do controlador ESP.....	74
Figura 15 – Divisão dos blocos <i>washout</i> e avanço/atraso.....	75
Figura 16 – Estrutura do controlador POD.....	79
Figura 17 – Modelo dinâmico do UPFC equipado com POD.....	79
Figura 18 – Topologia global ou <i>gbest</i> .....	103
Figura 19 – Topologia local ou <i>lbest</i> .....	104
Figura 20 – Região do espaço desejada para os autovalores de interesse.....	112
Figura 21 – Diagrama unifilar do sistema Simétrico de Duas Áreas.....	115
Figura 22 – Fatores de participação dos geradores em relação aos modos oscilatórios dominantes do sistema teste Simétrico de Duas Áreas.....	126
Figura 23 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento mínimos para o cenário B do sistema teste Simétrico de Duas Áreas.....	128

Figura 24 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento mínimos para o cenário C do sistema teste Simétrico de Duas Áreas.....	129
Figura 25 – Posição dos autovalores para os cenários avaliados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas. ....	133
Figura 26 – Variação angular $\Delta\omega_4 - \Delta\omega_1$ para os cenários analisados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas. ....	133
Figura 27 – Amortecimentos dos modos oscilatórios com alteração do carregamento do SEP no sistema teste Simétrico de Duas Áreas.....	134
Figura 28 – Diagrama unifilar do sistema <i>New England</i> .....	135
Figura 29 – Perfil de tensão do sistema para a faixa de carregamento especificada: a) sem atuação e b) com atuação do UPFC. ....	137
Figura 30 – Controle de potência ativa realizado pelo UPFC. ....	138
Figura 31 – Fatores de participação para os modos oscilatórios locais do sistema <i>New England</i> . ....	141
Figura 32 – Fatores de participação para o modo oscilatório interárea do sistema <i>New England</i> . ....	142
Figura 33 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento mínimos para o cenário B do sistema teste <i>New England</i> .....	145
Figura 34 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento para o cenário C. ....	146
Figura 35 – Posição dos autovalores para os cenários avaliados no sistema teste <i>New England</i> . ....	151
Figura 36 – Variação angular $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$ para os cenários analisados no sistema teste <i>New England</i> . ....	152
Figura 37 – Amortecimentos dos modos oscilatórios com alteração do carregamento do SEP no sistema teste <i>New England</i> .....	153

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definições das faixas de amortecimento utilizadas.....	115
Tabela 2 – Valores das variáveis da estrutura de controle do UPFC para caso base. ....	116
Tabela 3 – Magnitude e ângulo das tensões – caso base. ....	116
Tabela 4 – Fluxos de potência nas LTs próximas à instalação do UPFC – caso base. ....	117
Tabela 5 – Ganhos e constantes de tempo dos controladores PI do UPFC para o sistema Simétrico de Duas Áreas. ....	117
Tabela 6 – Valores das variáveis da estrutura de controle do UPFC exercendo os controles de tensão e fluxo de potência.....	118
Tabela 7 – Magnitudes e ângulos das tensões para o caso analisado. ....	118
Tabela 8 – Fluxos de potência, ativa e reativa, controlados pelo UPFC. ....	119
Tabela 9 – Geração de potências ativa e reativa do sistema, para os dois casos analisados. ....	119
Tabela 10 – Autovalores dominantes, frequências naturais e coeficientes de amortecimento – caso base para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas. ....	120
Tabela 11 – Valores atribuídos aos parâmetros dos métodos ABC, FA, SPSO e Bee-PSO para os casos analisados no sistema Simétrico de Duas Áreas.....	121
Tabela 12 – Limites dos parâmetros dos controladores ESPs, PI – UPFC e POD para o sistema Simétrico de Duas Áreas. ....	121
Tabela 13 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas. ....	122
Tabela 14 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos do modo interárea obtidos pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas. .	124
Tabela 15 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas. ....	126
Tabela 16 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos do modo interárea obtidos pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas. .	127

Tabela 17 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos do modo interárea obtidos pelos algoritmos no cenário C para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas. .	128
Tabela 18 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos ESPs e POD ajustados pelo algoritmo de melhor desempenho para os cenários analisados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas.....	130
Tabela 19 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos controladores PIs ajustados pelo algoritmo de melhor desempenho para os cenários analisados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas. ....	130
Tabela 20 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário A do sistema Simétrico de Duas Áreas.....	131
Tabela 21 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário B do sistema Simétrico de Duas Áreas. ....	131
Tabela 22 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário C do sistema Simétrico de Duas Áreas.....	132
Tabela 23 – Parâmetros dos controladores PI do UPFC para o sistema <i>New England</i> .....	136
Tabela 24 – Perfil de tensões do sistema <i>New England</i> para o caso base.....	137
Tabela 25 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o caso base do sistema <i>New England</i> .....	139
Tabela 26 – Valores atribuídos aos parâmetros dos métodos ABC, FA, SPSO e Bee-PSO nos casos analisados.....	140
Tabela 27 – Limites dos parâmetros dos controladores ESPs, PI – UPFC e POD.....	140
Tabela 28 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste <i>New England</i> . ....	142
Tabela 29 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos dos modos L1, L2, L3 e I1 obtidos pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste <i>New England</i> .....	143
Tabela 30 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste <i>New England</i> . ....	144
Tabela 31 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos dos modos oscilatórios de interesse obtidos pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste <i>New England</i> . ....	144

Tabela 32 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos dos modos oscilatórios de interesse obtidos pelos algoritmos no cenário C para o sistema teste <i>New England</i> . .....	146
Tabela 33 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos ESPs e POD ajustados pelo <i>Bee</i> – PSO para os cenários analisados no sistema teste <i>New England</i> ......	147
Tabela 34 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos controladores PIs ajustados pelo <i>Bee</i> – PSO para os cenários analisados.....	147
Tabela 35 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário A no sistema teste <i>New England</i> ......	148
Tabela 36 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário B no sistema teste <i>New England</i> ......	150
Tabela 37 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário C no sistema teste <i>New England</i> ......	150
Tabela 38 – Dados das linhas de transmissão do sistema Simétrico de Duas Áreas.....	172
Tabela 39 – Dados dos geradores síncronos do sistema Simétrico de Duas Áreas.....	172
Tabela 40 – Dados dos reguladores automáticos de tensão do sistema Simétrico de Duas Áreas. .....	173
Tabela 41 – Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema Simétrico de Duas Áreas. ....	173
Tabela 42 – Dados das linhas de transmissão do sistema <i>New England</i> ......	174
Tabela 43 – Dados dos geradores síncronos do sistema <i>New England</i> ......	175
Tabela 44 – Dados dos reguladores automáticos de tensão (Sistema de Duas Áreas)......	175
Tabela 45 – Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema <i>New England</i> ......	175

## LISTA DE SIGLAS

ABC	Artificial Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimization
AG	Algoritmo Genético
APSO	Accelerated Particle Swarm Optimization
BA	Bat Algorithm
BFO	Bacterial Foraging Optimization
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CS	Cuckoo Search
CSC	Convertible Static Compensator
DE	Differential Evolution
DMC	Decentralized Modal Control
ESP	Estabilizadores de Sistemas de Potência
FA	Firefly Algorithm
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FPE	Fluxo de Potência expandido
GTO	Gate Turn-Off
GUPFC	Generalized Power Flow Controller
HVDC	High Voltage Direct Current

IA	Inteligência Artificial
IE	Inteligência de Enxames
IPFC	Interline Power Flow Controller
LT	Linha de Transmissão
MBI	Máquina – Barramento Infinito
MHP	Modelo de Heffron e Phillips
MSC	Modelo de Sensibilidade de Corrente
MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
PI	Proporcional – Integral
POD	Power Oscillation Damping
PSO	Particle Swarm Optimization
RAT	Regulador Automático de Tensão
SA	Simulated Annealing
SPSO	Standard Particle Swarm Optimization
SCR	Silicon Controlled Rectifier
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Shunt Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Condensador
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Voltage Source Converter



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\hat{z}_{km}$	Impedância entre as barras $k$ e $m$
$\hat{y}_{km}$	Admitância entre as barras $k$ e $m$
$r_{km}$	Resistência entre as barras $k$ e $m$
$x_{km}$	Reatância entre as barras $k$ e $m$
$b_{km}$	Susceptância entre as barras $k$ e $m$
$\hat{I}_{sh}$	Corrente complexa da fonte em derivação do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$I_p$	Componente de $\hat{I}_{sh}$ em fase com a tensão na barra $k$ de instalação do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$I_q$	Componente de $\hat{I}_{sh}$ em quadratura com a tensão na barra $k$ de instalação do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$\hat{V}_S$	Tensão complexa da fonte em série do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$\hat{V}_k$	Tensão complexa na barra $k$
$\hat{V}_m$	Tensão complexa na barra $m$
$\hat{I}_{km}$	Corrente complexa que flui da barra $k$ para a barra $m$
$\hat{I}_k$	Corrente complexa injetada na barra $k$
$\hat{S}_S$	Potência complexa da fonte de tensão série do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$\hat{S}_{sh}$	Potência complexa da fonte de corrente em derivação do <i>Unified Power Flow Controller</i>

$\hat{i}_k^{\text{upfc}}$	Corrente complexa injetada na barra $k$ pelo <i>Unified Power Flow Controller</i>
$\hat{i}_m^{\text{upfc}}$	Corrente complexa injetada na barra $m$ pelo <i>Unified Power Flow Controller</i>
$V_p$	Componente de $\hat{V}_S$ em quadratura com a tensão na barra $k$ de instalação do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$V_q$	Componente de $\hat{V}_S$ em fase com a tensão na barra $k$ de instalação do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$P_m^{\text{ctrl}}$	Fluxo de potência ativa controlado pelo <i>Unified Power Flow Controller</i> que flui da barra $m$
$Q_m^{\text{ctrl}}$	Fluxo de potência reativa controlado pelo <i>Unified Power Flow Controller</i> que flui da barra $m$
$P_m^{\text{ref}}$	Fluxo de potência ativa especificado para o <i>Unified Power Flow Controller</i> que flui da barra $m$
$Q_m^{\text{ref}}$	Fluxo de potência reativa especificado para o <i>Unified Power Flow Controller</i> que flui da barra $m$
$V_k^{\text{ref}}$	Tensão especificada na barra $k$ para o <i>Unified Power Flow Controller</i>
$K1^u, K2^u, K3^u$	Ganhos dos controladores Proporcional-Integral do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$T1^u, T2^u, T3^u$	Constantes de tempo dos controladores Proporcional-Integral do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$K_m$	Ganho referente ao atraso no processamento dos sinais de controle do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$T_m$	Constante de tempo referente ao atraso no processamento dos sinais de controle do <i>Unified Power Flow Controller</i>

$V_{\text{sup}}$	Sinal proveniente do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$(r, m)$	Sistema de coordenadas fixo
$(d, q)$	Sistema de coordenadas rotativo
$\hat{E}'_k$	Tensão interna do gerador conectado à barra $k$
$\hat{I}_{Gk}$	Corrente fornecida pelo gerador conectado à barra $k$
$x'_{dk}$	Reatância transitória de eixo direto do gerador conectado à barra $k$
$x_{qk}$	Reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador conectado à barra $k$
$x_{dk}$	Reatância síncrona de eixo direto do gerador conectado à barra $k$
$\delta$	Ângulo entre os eixos rotativo e fixo
$\hat{E}_{ak}$	Tensão que define a posição do sistema de coordenadas rotativo
$V_{dk}$	Tensão terminal de eixo direto do gerador conectado à barra $k$
$V_{qk}$	Tensão terminal de eixo em quadratura do gerador conectado à barra $k$
$E'_{dk}$	Tensão interna de eixo direto do gerador conectado à barra $k$
$E'_{qk}$	Tensão interna de eixo em quadratura do gerador conectado à barra $k$
$\hat{S}_{Lk}$	Potência complexa requerida pela carga na barra $k$
$P_{Lk}$	Potência ativa requerida pela carga na barra $k$
$Q_{Lk}$	Potência reativa requerida pela carga na barra $k$
$\hat{I}_{Lk}$	Corrente complexa requerida pela carga na barra $k$
$R1_{Gk}, R2_{Gk}, R3_{Gk}, R4_{Gk}$	Coefficientes de sensibilidade da componente real da corrente do gerador conectado à barra $k$

$M1_{Gk}, M2_{Gk}, M3_{Gk}, M4_{Gk}$	Coeficientes de sensibilidade da componente imaginária da corrente do gerador conectado à barra $k$
$R1_{km}, R2_{km}, R3_{km}, R4_{km}$	Coeficientes de sensibilidade da componente real da corrente circulante entre as barras $k$ e $m$
$M1_{km}, M2_{km}, M3_{km}, M4_{km}$	Coeficientes de sensibilidade da componente imaginária da corrente circulante entre as barras $k$ e $m$
$R1_{Lk}, R2_{Lk}, R3_{Lk}, R4_{Lk}$	Coeficientes de sensibilidade da componente real da corrente consumida pela carga conectada à barra $k$
$M1_{Lk}, M2_{Lk}, M3_{Lk}, M4_{Lk}$	Coeficientes de sensibilidade da componente imaginária da corrente consumida pela carga conectada à barra $k$
$\hat{I}_k^{ger}$	Corrente complexa injetada pelo gerador conectado à barra $k$ desprezando-se as reatâncias internas
$R1_k^{ger}, R2_k^{ger}, R3_k^{ger}, R4_k^{ger}$	Coeficientes de sensibilidade da componente real da corrente injetada pelo gerador conectado à barra $k$ desprezando-se as reatâncias internas
$M1_k^{ger}, M2_k^{ger}, M3_k^{ger}, M4_k^{ger}$	Coeficientes de sensibilidade da componente imaginária da corrente injetada pelo gerador conectado à barra $k$ desprezando-se as reatâncias internas
$P_k^{calc}$	Potência ativa calculada na barra $k$
$Q_k^{calc}$	Potência reativa calculada na barra $k$
$I_{rk}^{calc}$	Componente real da corrente calculada na barra $k$
$I_{mk}^{calc}$	Componente imaginária da corrente calculada na barra $k$
$P_k^{esp}$	Potência ativa especificada na barra $k$
$Q_k^{esp}$	Potência reativa especificada na barra $k$
$I_{rk}^{esp}$	Componente real da corrente especificada na barra $k$

$I_{mk}^{esp}$	Componente imaginária da corrente especificada na barra $k$
$\Delta$	Pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio
$J1^{upfc}, J2^{upfc}, J3^{upfc}, J4^{upfc}$	Matrizes Jacobianas do fluxo de carga expandido por injeções de corrente considerando a dinâmica do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$\omega_k$	Velocidade angular do gerador conectado à barra $k$
$\omega_0$	Velocidade síncrona
$M_k$	Constante de inércia do gerador conectado à barra $k$
$D_k$	Coefficiente de amortecimento do gerador conectado à barra $k$
$P_k^m$	Potência mecânica do gerador conectado à barra $k$
$K1_k, K2_k, K3_k$	Coefficientes de potência elétrica do gerador conectado à barra $k$
$T'_{d0k}$	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto
$E_{fdk}$	Tensão aplicada ao circuito de campo do gerador síncrono
$K_e$	Ganho do regulador automático de tensão
$T_e$	Constante de tempo do Regulador Automático de Tensão
$V_k^E$	Tensão suplementar de saída da estrutura de controle do Estabilizador de Sistemas de Potência instalado no gerador conectado à barra $k$
$K42_k, K46_k, K47_k$	Coefficientes de sensibilidade do Regulador Automático de Tensão do gerador conectado à barra $k$
$x$	Vetor de variáveis de estado
$y$	Vetor de variáveis algébricas
$u$	Vetor de variáveis de entradas
$A$	Matriz de estados do sistema

$B$	Matriz de entradas do sistema
$J1, J2, J3, J4$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Corrente
$B1, B2$	Matrizes de entradas do Modelo de Sensibilidade de Corrente
$J1_U, J2_U, J3_U, J4_U$	Matrizes jacobianas do modelo de sensibilidade de corrente considerando a inclusão do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$x_U$	Vetor de variáveis de estado considerando a inclusão do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$u_U$	Vetor de variáveis de entrada considerando a inclusão do <i>Unified Power Flow Controller</i>
$K_k^E$	Ganho estabilizante conectado ao Estabilizador de Sistemas de Potência instalado no gerador conectado à barra $k$
$T_{1k}^E, T_{2k}^E, T_{3k}^E, T_{4k}^E$	Constantes de tempo do controlador Avanço-Atraso conectado ao Estabilizador de Sistemas de Potência instalado no gerador conectado à barra $k$
$T_W$	Constante de tempo do filtro washout
$\dot{V}_{1k}, \dot{V}_{2k}, \dot{V}_{3k}$	Variáveis de estados referentes ao Estabilizador de Sistemas de Potência instalado no gerador conectado à barra $k$
$K11_k, K12_k$	Coeficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{V}_{1k}$
$K21_k, K22_k, K23_k$	Coeficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{V}_{2k}$
$K31_k, K32_k, K33_k, K34_k$	Coeficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{V}_{3k}$
$K41_k, K42_k, K43_k, K44_k, K45_k, K46_k, K47_k$	Coeficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{E}_{fdk}$

$x_E$	Vetor de variáveis de estado considerando a inclusão dos Estabilizadores de Sistemas de Potência
$J1_E, J2_E, J3_E$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão dos Estabilizadores de Sistemas de Potência
$B2_E$	Matriz de entrada do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão dos Estabilizadores de Sistemas de Potência
$K^P$	Ganho estabilizante conectado ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$T_1^P, T_2^P, T_3^P, T_4^P$	Constantes de tempo do controlador Avanço-Atraso conectado ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$\dot{Y}_{1k}, \dot{Y}_{2k}, \dot{Y}_{3k}$	Variáveis de estados referentes ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$A1_{km}, A2_{km}, A3_{km}$	Coefficientes de sensibilidade de potência ativa
$C11_k, C12_k, C13_k, C14_k, C15_k$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{Y}_{1k}$
$C21_k, C22_k, C23_k, C24_k, C25_k, C26_k$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{Y}_{2k}$
$C31_k, C32_k, C33_k, C34_k, C35_k, C36_k, C37_k$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{Y}_{3k}$
$J1_P, J2_P, J3_P$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$B1_P$	Matriz de entrada do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$x_P$	Vetor de variáveis de estado considerando a inclusão do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>

$J1_T, J2_T, J3_T$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do <i>Unified Power Flow Controller</i> e dos controladores suplementares de amortecimento
$B1_T$	Matriz de entrada do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do <i>Unified Power Flow Controller</i> e dos controladores suplementares de amortecimento
$x_T$	Vetor de variáveis de estado considerando a inclusão do <i>Unified Power Flow Controller</i> e dos controladores suplementares de amortecimento
$z_i$	População inicial do algoritmo de otimização
$N$	Tamanho da população
$D$	Número de parâmetros de otimização
$it$	Número de iterações
$fit_i$	Valor da função <i>fitness</i> (aptidão) para a solução $z_i$
$F(z_i)$	Valor da função objetivo para a solução $z_i$
$\alpha$	Número aleatório no intervalo [0, 1]
$\phi_{ij}$	Número aleatório no intervalo [-1, 1]
$z_{ij}^{\min}$	Limite inferior de cada parâmetro de otimização
$z_{ij}^{\max}$	Limite superior de cada parâmetro de otimização
$\beta$	Atratividade relativa
$\beta_0$	Atratividade à distância nula
$\gamma$	Coefficiente de absorção de luz
$I(r)$	Intensidade luminosa em função da distância



$\Gamma$	Distância característica
$\varepsilon_i$	Vetor de números aleatórios gerado por uma distribuição gaussiana
$p_i^*$	Vetor das melhores posições individuais das partículas
$v_i$	Vetor velocidade das partículas
$p_{\text{best}}^*$	Melhor posição encontrada por qualquer vizinho da partícula
$c_1, c_2$	Constantes de ponderação
$w$	Coefficiente de inércia
$\chi$	Coefficiente de constrição
$\xi$	Coefficiente de amortecimento

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>30</b>
1.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	34
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	35
<b>2</b>	<b>O UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER .....</b>	<b>37</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	37
2.2	UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC).....	38
2.3	MODELO DE INJEÇÕES DE CORRENTE PARA O UPFC .....	39
2.4	POTÊNCIA ATIVA INJETADA PELO CONVERSOR SÉRIE .....	41
2.5	POTÊNCIA ATIVA INJETADA PELO CONVERSOR EM DERIVAÇÃO.....	42
2.6	CORRENTE COMPLEXA INJETADA PELO UPFC NA BARRA INICIAL DE INSTALAÇÃO .....	43
2.7	CONTROLE DO UPFC .....	46
2.8	CONTROLES DO FLUXO DE POTÊNCIA E DA TENSÃO EXECUTADOS PELO UPFC .....	48
2.9	CONCLUSÕES.....	50
<b>3</b>	<b>MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....</b>	<b>51</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	51
3.2	MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS.....	52
<b>3.2.1</b>	<b>Equações gerais.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Correntes circulantes em um sistema multimáquinas .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Linearização das equações.....</b>	<b>57</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Balço nodal de correntes no sistema multimáquinas.....</b>	<b>58</b>
3.3	RESOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA UTILIZANDO O MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE.....	60
<b>3.3.1</b>	<b>Formulação inicial.....</b>	<b>60</b>

3.3.2	<b>Equações dos resíduos de correntes.....</b>	<b>61</b>
3.3.3	<b>Inclusão do UPFC no fluxo de potência .....</b>	<b>63</b>
3.4	<b>EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE.....</b>	<b>66</b>
3.4.1	<b>Equações de movimento da máquina síncrona.....</b>	<b>66</b>
3.4.2	<b>Dinâmica do circuito de campo da máquina síncrona.....</b>	<b>67</b>
3.4.3	<b>Equação da excitatriz estática .....</b>	<b>67</b>
3.5	<b>REPRESENTAÇÃO DO MSC PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS NA FORMA DE ESPAÇO DE ESTADOS.....</b>	<b>69</b>
3.6	<b>INCLUSÃO DO UPFC NO MSC.....</b>	<b>70</b>
3.7	<b>CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO.....</b>	<b>73</b>
3.7.1	<b>Estabilizadores de Sistemas de Potência .....</b>	<b>73</b>
3.7.2	<b>Inclusão do ESP no MSC .....</b>	<b>75</b>
3.7.3	<b>Power Oscillation Damping.....</b>	<b>78</b>
3.7.4	<b>Inclusão do POD no MSC.....</b>	<b>79</b>
3.7.5	<b>Inclusão dos controladores ESPs e do conjunto UPFC – POD no MSC .....</b>	<b>84</b>
3.8	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
4	<b>TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA A PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES .....</b>	<b>89</b>
4.1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>89</b>
4.2	<b>ALGORITMO COLÔNIA DE ABELHAS ARTIFICIAIS.....</b>	<b>90</b>
4.2.1	<b>O comportamento de enxames de abelhas .....</b>	<b>90</b>
4.2.2	<b>Algoritmo .....</b>	<b>92</b>
4.3	<b>ALGORITMO DOS VAGALUMES.....</b>	<b>95</b>
4.3.1	<b>Fundamentos biológicos.....</b>	<b>95</b>
4.3.2	<b>Estrutura do Algoritmo dos Vagalumes.....</b>	<b>96</b>
4.3.3	<b>Atratividade .....</b>	<b>98</b>
4.3.4	<b>Distância e movimento .....</b>	<b>99</b>
4.4	<b>OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS.....</b>	<b>101</b>
4.4.1	<b>Algoritmo original.....</b>	<b>101</b>

4.4.2	<b>Topologias de comunicação do enxame.....</b>	<b>103</b>
4.4.3	<b>Coefficiente de inércia .....</b>	<b>105</b>
4.4.4	<b>Coefficiente de restrição .....</b>	<b>106</b>
4.4.5	<b>Standard PSO 2006 .....</b>	<b>106</b>
4.5	<b>O ALGORITMO PROPOSTO.....</b>	<b>107</b>
4.6	<b>FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>111</b>
4.7	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>114</b>
5.1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>114</b>
5.2	<b>SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS .....</b>	<b>115</b>
5.2.1	<b>Análise do sistema elétrico de potência .....</b>	<b>115</b>
5.2.2	<b>Desempenho dos métodos .....</b>	<b>120</b>
5.2.3	<b>Análise da estabilidade a pequenas perturbações .....</b>	<b>130</b>
5.3	<b>SISTEMA NEW ENGLAND .....</b>	<b>135</b>
5.3.1	<b>Análise do sistema elétrico de potência .....</b>	<b>136</b>
5.3.2	<b>Desempenho dos métodos .....</b>	<b>140</b>
5.3.3	<b>Análise da estabilidade a pequenas perturbações .....</b>	<b>147</b>
5.4	<b>CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....</b>	<b>153</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>156</b>
6.1	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>158</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>160</b>
	<b>ANEXO A – DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS .....</b>	<b>172</b>
	<b>ANEXO B – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND .....</b>	<b>174</b>
	<b>APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS.....</b>	<b>177</b>
	<b>APÊNDICE B – COEFICIENTES DO MSC DO UPFC.....</b>	<b>180</b>
	<b>B.1 COEFICIENTES REAIS NA BARRA INICIAL DE INSTALAÇÃO .....</b>	<b>180</b>

B.2 COEFICIENTES IMAGINÁRIOS NA BARRA INICIAL DE INSTALAÇÃO .....	181
B.3 COEFICIENTES REAIS NA BARRA FINAL DE INSTALAÇÃO .....	182
B.4 COEFICIENTES IMAGINÁRIOS NA BARRA FINAL DE INSTALAÇÃO .....	183
<b>APÊNDICE C – COEFICIENTES DO MSC .....</b>	<b>185</b>
C.1 COEFICIENTES DOS GERADORES .....	185
<b>C.1.1 Coeficientes reais .....</b>	<b>185</b>
<b>C.1.2 Coeficientes imaginários .....</b>	<b>185</b>
C.2 COEFICIENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	186
<b>C.2.1 Coeficientes reais .....</b>	<b>186</b>
<b>C.2.2 Coeficientes imaginários .....</b>	<b>186</b>
C.3 COEFICIENTES DAS CARGAS .....	187
<b>C.3.1 Coeficientes reais .....</b>	<b>187</b>
<b>C.3.2 Coeficientes imaginários .....</b>	<b>187</b>
C.4 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO DO ROTOR .....	188
C.5 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DA TENSÃO INTERNA DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	188
C.6 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DA EXCITATRIZ ESTÁTICA .....	189
C.7 COEFICIENTES DOS ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA .....	189
<b>C.7.1 Coeficientes das variáveis de estado .....</b>	<b>189</b>
<b>C.7.2 Coeficientes da equação da excitatriz estática .....</b>	<b>190</b>
C.8 COEFICIENTES DO POWER OSCILLATION DAMPING.....	190
<b>C.8.1 Coeficientes das variáveis do sinal de entrada do POD .....</b>	<b>190</b>
<b>C.8.2 Coeficientes das variáveis de estado .....</b>	<b>191</b>
<b>C.8.3 Coeficientes da equação da tensão em quadratura do conversor série .....</b>	<b>192</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A manutenção de níveis adequados de segurança e qualidade dos sistemas elétricos torna necessário um profundo conhecimento dos seus limites de operação para, em muitos casos, tomar ações capazes de elevar suas margens de estabilidade. As fases de planejamento e controle da operação requerem análises de segurança cada vez mais confiáveis a fim de se evitar as instabilidades nos sistemas de potência.

Considerando um sistema elétrico de potência (SEP) em equilíbrio, diz-se que o mesmo é estável se, após alguma perturbação, o sistema retornar ao mesmo ou outro ponto de equilíbrio aceitável. Porém, se alguma variável do sistema mantiver um crescimento sustentado no tempo, afastando-se do equilíbrio, diz-se que o sistema é instável.

É impossível mensurar todas as perturbações que podem ocorrer em um sistema elétrico, entretanto uma das formas de classificá-las é quanto à intensidade da variação do fluxo de potência pelo sistema. Esta variação pode ser grande ou pequena, lenta ou rápida. Para pequenas perturbações, o sistema tende a oscilar em torno do seu ponto de equilíbrio inicial e, sendo ele estável, voltar às mesmas condições ou nas proximidades deste ponto.

Segundo Kundur (1994), como a variação em relação à posição de equilíbrio é pequena, é possível realizar a linearização das equações que descrevem o SEP em torno deste ponto e utilizar todas as técnicas relacionadas à solução de sistemas lineares. Neste caso os estudos referentes à estabilidade são chamados de “estabilidade dinâmica” ou de “estabilidade a pequenas perturbações”.

Em estudos de estabilidade a pequenas perturbações de sistemas do tipo máquina síncrona conectada a um barramento infinito (MBI), o modelo linear de Heffron e Phillips (MHP) é uma ferramenta largamente empregada (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003). Este modelo foi expandido para sistemas multimáquinas e fornece resultados confiáveis (MOUSSA; YU, 1974; MACLEOD, 1992; LEANDRO; BARROS; MOTA, 1994).

Algumas características do MHP, entre elas a eliminação do sistema de transmissão externo e a necessidade da manutenção do barramento infinito, representam importantes limitações ao uso deste modelo, sobretudo quando o objetivo é a flexibilização dos SEPs por meio do uso de controladores *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS) (HINGORANI; GYUGYI, 1999).

As limitações impostas pelo MHP motivaram o uso de novas modelagens lineares como o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) (DECKMANN; DA COSTA, 1994) e o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (FORTES; ARAUJO; MACEDO, 2016; PÁDUA JÚNIOR et al., 2013). A grande vantagem destes modelos é a manutenção da integridade do SEP, pois não há a redução às barras internas dos geradores.

O MSC é baseado na Lei de Kirchoff para correntes onde é enunciado que o balanço nodal de correntes em todas as barras do SEP deve ser atendido em qualquer instante de tempo. Em Sauer e Pai (1998) o cálculo das correntes é feito indiretamente pela divisão da potência pela respectiva tensão. Neste trabalho as correntes são calculadas diretamente das equações da rede elétrica.

A importância de um modelo baseado no balanço nodal de correntes pode ser compreendida observando-se que muitos dispositivos do SEP são modelados como injeções de corrente. Por exemplo, para alguns dispositivos FACTS verifica-se que o uso de um modelo baseado em injeções de correntes pode apresentar uma série de vantagens em relação aos modelos baseados em injeções de potência, sobretudo no que diz respeito à velocidade de convergência dos problemas de fluxo de potência (FREITAS; MORELATO, 2001; SON; LASSETER, 2004; VINKOVIC; MIHALIC, 2008; ADEPOJU; KOMOLAFE, 2011).

Atualmente é comum os SEPs serem interligados e caracterizados por longas linhas de transmissão. Este fato, aliado ao alto carregamento e à atuação de reguladores automáticos de tensão (RATs) de ação contínua, faz com que surjam oscilações de baixa frequência, fracamente amortecidas ou até mesmo instáveis. As oscilações existentes em uma mesma área (locais – 0,8 a 1,8 Hz) e entre diferentes áreas (interárea – 0,2 a 0,8 Hz) (LARSEN; SWANN, 1981) podem comprometer a estabilidade do SEP devendo, portanto, se buscar formas de amortecê-las.

Para contornar os efeitos negativos na estabilidade dos SEPs causados pela ação dos RATs um controlador suplementar é incluído junto ao sistema de excitação das máquinas síncronas, denominado estabilizador de sistemas de potência (ESP). Seu objetivo é inserir torque elétrico em fase com as variações da velocidade angular do rotor (torque de amortecimento) ao SEP (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981). Quando bem ajustado, este controlador possui atuação destacada, principalmente, sobre os modos locais de oscilação. Entretanto, em alguns casos, o ESP pode não introduzir o amortecimento necessário aos modos oscilatórios do tipo interárea (CAI; ERLICH, 2005).

A evolução tecnológica da eletrônica de potência possibilitou a criação de uma gama de dispositivos denominados de FACTS que garantem um melhor aproveitamento dos sistemas de transmissão, tornando o SEP mais flexível e aumentando a sua margem de estabilidade (WATANABE et al., 1998; HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999; PASERBA, 2004).

O conceito FACTS foi definido em Hingorani (1988) quando foi proposto o uso de dispositivos semicondutores para controlar sistemas de potência em corrente alternada (CA). O objetivo era conseguir futuramente o mesmo grau de controle e flexibilidade alcançado pelos sistemas de transmissão *High Voltage Direct Current* (HVDC). Isso seria possível com o uso maciço de tiristores de potência e o desenvolvimento de novos dispositivos semicondutores com ângulo de corte e de disparo controlados.

Valle (2010) destaca que estes dispositivos FACTS podem ser classificados comumente de duas formas: em grupos e em gerações. É mostrado nos trabalhos de Hingorani e Gyugyi, (2000) e Paserba (2004) que a maneira de instalar o dispositivo implica em qual grupo ele é classificado: dispositivos em série; dispositivos em derivação (*shunt*); associação de dispositivos em série e em derivação e combinação de dispositivos série-série. A classificação em gerações leva em conta os tipos de dispositivos semicondutores utilizados em seu controle e podem ser divididos em quatro gerações distintas.

Estudos posteriores permitiram concluir que se a estes dispositivos forem adicionados controladores do tipo *Power Oscillation Damping* (POD), o conjunto FACTS – POD será capaz de inserir amortecimento suplementar às oscilações do SEP, em especial às do tipo interárea (GYUGYI et al., 1995; NOROOZIAN; ANDERSSON, 1995; HINGORANI; GYUGYI, 1999; DIXON et al., 2005; FURINI, 2008, 2011).

Neste trabalho será utilizado um dispositivo FACTS pertencente à terceira geração que é denominado de *Unified Power Flow Controller* (UPFC). Esta geração de dispositivos integra equipamentos série e em derivação em uma mesma linha de transmissão.

Em Furini (2008) é frisado que as principais funções de um UPFC quando conectado a um SEP é realizar o controle do fluxo de potência e da tensão no barramento onde está instalado, bem como realizar a compensação de reativos nesta linha de transmissão. Esse controle estático dos parâmetros do SEP possibilita que eventuais problemas de tensão (normalmente subtensões) na região de instalação do dispositivo sejam minimizados ou, em



alguns casos, até mesmo corrigidos (VALLE; ARAUJO; MENEZES, 2013; MARTINS et al., 2016).

Além da flexibilidade conferida aos sistemas onde se encontra instalado, vários trabalhos mostram que o UPFC também pode se tornar uma opção adequada para a melhora da estabilidade a pequenas perturbações de um SEP quando se utiliza adicionalmente sinais suplementares de estabilização em sua malha de controle (AYRES et al., 2010; FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011; VALLE; ARAUJO; MENEZES, 2013; MARTINS et al., 2016).

A correta parametrização dos controladores suplementares é fundamental para inserção de amortecimento suficiente para garantir a estabilidade dos SEPs. Várias abordagens têm sido utilizadas com sucesso para atingir esse objetivo, incluindo o método dos resíduos (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998), o critério de estabilidade de Nyquist (ZHENENKO; FARAH, 1984) e o método *Decentralized Modal Control* (DMC) (ARAUJO; ZANETTA, 2001; VALLE; ARAUJO, 2015). O ajuste coordenado e simultâneo destes dispositivos é um problema complexo de otimização, com múltiplos mínimos locais. Assim, além da abordagem focada na teoria de controle clássico, inúmeros estudos foram realizados empregando diferentes técnicas de otimização para a obtenção de ajustes adequados. Dentre estas técnicas, destacam-se as estocásticas bio-inspiradas como as baseadas no Algoritmo Genético (AG) (ABIDO, 2001; HASSAN et al., 2014), o *Particle Swarm Optimization* (PSO) (AL-AWAMI; ABDELMAGID; ABIDO, 2007; SHAYEGHI; SAFARI; SHAYANFAR, 2010), o algoritmo *Artificial Bee Colony* (ABC) (ABEDINIA; WYNS; GHASEMI, 2011; MARTINS et al., 2016), e o *Firefly Algorithm* (FA) (PANDEY; GUPTA, 2015).

Todas as abordagens de busca utilizadas pelos algoritmos citados são inspiradas em comportamentos observados na natureza. O AG e o PSO são fundamentados, respectivamente, na biologia evolutiva (GOLDBERG, 1989; HOLLAND, 1992) e na dinâmica de voo dos pássaros (KENNEDY; EBERHART, 1995). No caso do ABC, sua inspiração vem do comportamento de forrageamento de enxames de abelhas melíferas (KARABOGA, 2005) enquanto que o FA é baseado na frequência e intensidade da luz emitida por vagalumes (YANG, 2008b; YANG, 2009b).

Este trabalho investiga o desempenho do dispositivo FACTS UPFC nos controles do fluxo de potências ativa e reativa e da magnitude da tensão em seus terminais de instalação, visando corrigir eventuais problemas de tensão no SEP em uma faixa de carregamento especificada. Também são avaliadas a sua influência e sua atuação simultânea aos controladores adicionais (ESPs e POD), na estabilidade do SEP frente a pequenas perturbações.

Para tanto o SEP é representado pelo MSC. Em função disso, é proposto um modelo para o UPFC (válido para análises estática e dinâmica), também linear, baseado em injeção de correntes. Estas correntes são calculadas por uma formulação expandida do fluxo de potência e, diferente do proposto em (KOPCAK; DA COSTA; DA SILVA, 2007), utiliza os resíduos das equações de injeção de correntes expressas em coordenadas polares. O sistema de controle utilizado pelo UPFC é constituído por controladores do tipo proporcional-integral (PI) semelhante ao apresentado em Valle e Araujo (2015), porém acoplados também ao conversor Fonte de Tensão (VSC) em derivação.

O ajuste coordenado e simultâneo dos controladores suplementares de amortecimento (UPFC – POD e ESPs) e dos controladores PI do UPFC, diferente do proposto em Valle e Araujo (2015) onde seus parâmetros são considerados fixos, é um problema multimodal de resolução complexa. Quando utilizados nesta classe de problemas, os algoritmos bio-inspirados têm, em geral, a tendência de ficarem presos em regiões do espaço de busca que contêm mínimos locais. Para tentar contornar esta dificuldade, é proposto um algoritmo híbrido denominado *Bee* – PSO e seu desempenho é comparado ao dos algoritmos bio-inspirados PSO, ABC e FA, dos quais empresta algumas características.

A parametrização destes controladores é formulada como um problema multiobjetivo planejado para otimizar duas funções baseadas nos autovalores de interesse do SEP, compreendendo o fator de amortecimento mínimo desejado e a distância entre os autovalores de interesse desejados e calculados, considerando três pontos de operação com carregamentos especificados. Os controladores são automaticamente sintonizados com a otimização desta função que desloca simultaneamente os modos eletromecânicos de todas as máquinas para uma região predeterminada do plano complexo, garantindo a estabilidade do SEP na região de operação desejada. Os desempenhos dos algoritmos propostos são avaliados nos sistemas multimáquinas conhecidos como Simétrico de Duas Áreas (SAUER; PAI, 1998) e New England (ARAUJO; ZANETTA, 2001) sob diferentes condições de carregamento.

## 1.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Neste contexto, as principais contribuições desse trabalho são:

- i) Apresentar um novo modelo de injeções de corrente para o UPFC;

- ii) Utilizar uma ferramenta de fluxo de potência expandido (FPE) baseada em resíduos de correntes na forma polar para determinar as injeções do UPFC;
- iii) Incluir controladores PI na malha de controle do conversor em derivação do UPFC;
- iv) Representar o SEP e seus controladores suplementares de amortecimento (PI – UPFC – POD e ESPs) por meio do MSC;
- v) Propor o algoritmo híbrido *Bee* – PSO e implementá-lo juntamente com os métodos estocásticos bio-inspirados ABC, PSO e FA, para realizar a parametrização dos controladores suplementares de amortecimento;
- vi) Comparar seus desempenhos no que tange ao ajuste coordenado dentro de uma faixa de operação dos parâmetros dos controladores ESPs e UPFC-POD e dos controladores PI do UPFC.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No que se refere à organização, este texto é estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentado o dispositivo FACTS UPFC e um modelo matemático baseado em suas injeções de corrente nas barras de instalação, para representá-lo em programas de fluxo de potência. Em seguida é exibida a formulação para a estrutura do sistema de controle utilizada, que emprega controladores do tipo Proporcional-Integral (PI), nos conversores em série e em derivação, e obtidas as equações dinâmicas que permitem modelar o dispositivo em programas de análise de estabilidade a pequenas perturbações.

No Capítulo 3 é desenvolvido o Modelo de Sensibilidade de Corrente para sistemas multimáquinas. Suas equações algébricas, fundamentadas no balanço nodal de correntes, são utilizadas no método de Newton-Raphson para resolver o problema do fluxo de potência. Depois, utilizando os conceitos do FPE em Kopcak, da Costa e da Silva (2007), as equações de injeções de corrente e dos controles do UPFC são adicionadas ao modelo para que um ponto de operação mais “realista” do SEP possa ser determinado. Finalmente, as equações dinâmicas que representam os controladores ESPs e o conjunto UPFC-POD são incluídas no MSC.

No Capítulo 4 são apresentadas as técnicas de otimização estocástica bio-inspiradas ABC, PSO e FA e, baseadas nelas, é proposto o algoritmo híbrido *Bee* – PSO. Estes quatro algoritmos são empregados na parametrização coordenada e simultânea dos controladores ESPs e do conjunto PI – UPFC – POD e seus desempenhos são comparados.

No Capítulo 5 são apresentadas as simulações e discussões sobre os resultados das análises estática e dinâmica obtidas nos sistemas testes Simétrico de Duas Áreas e *New England* (todos os modelos matemáticos foram implementados computacionalmente utilizando-se o software MATLAB<sup>®</sup>).

No Capítulo 6 são feitas as considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

Seguem os Anexos A e B, relativos aos dados dos sistemas teste Simétrico de Duas Áreas e *New England*, respectivamente. Nos Apêndices A, B e C, são citados, nesta ordem, os trabalhos publicados e submetidos pelo autor além dos coeficientes de sensibilidade, do modelo de injeções de corrente do UPFC e do MSC, necessários para uma melhor compreensão do trabalho.

# 1 O UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER

## 2.1 INTRODUÇÃO

A tecnologia FACTS, baseada em semicondutores de potência, vem sendo utilizada para melhorar a controlabilidade e a flexibilidade na transmissão de energia, maximizando a utilização das linhas de transmissão (LTs) existentes por meio do controle de seus parâmetros (HINGORANI; GYUGYI, 1999).

Dentre a gama de dispositivos FACTS existentes, o UPFC se destaca pela sua versatilidade. Sua estrutura é constituída por uma combinação de conversores do tipo fonte de tensão, em série e em derivação, que podem controlar, de forma independente ou simultânea, os fluxos das potências ativa e reativa e a tensão da barra onde está conectado, abrindo novos horizontes no controle da transmissão de energia (GYUGYI, 1992; NOROOZIAN et al., 1997; HINGORANI; GYUGYI, 1999).

A principal vantagem dos controladores FACTS baseados em semicondutores de potência sobre controladores eletromecânicos é a sua velocidade de atuação. Portanto, as capacidades do UPFC precisam ser exploradas não só para o controle de tensão e fluxo de potência em regime estacionário, mas também para melhorar a estabilidade do SEP.

Nos últimos anos, o uso do UPFC para amortecimento de oscilações eletromecânicas recebeu a atenção de inúmeros pesquisadores, que utilizaram abordagens variadas para a sua modelagem e controle (NABAVI-NIAKI; IRAVANI, 1996; HUANG et al., 2000; WANG, 2000; SON; LASSETER, 2004; FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011). Talvez a abordagem mais comum seja a modelagem empregando injeções de potência (PAL, 2002; FARSANGI; SONG; LEE, 2004; PAL; CHAUDHURI, 2005). Esta modelagem utiliza as injeções de potências ativa e reativa do UPFC como entradas de controle negligenciando sua dinâmica e tem como principais vantagens a simplicidade e eficiência computacional.

Embora eficaz do ponto de vista de controle de alto nível, essa abordagem pressupõe que o UPFC é ideal, ou seja, em caso de alterações nos parâmetros da rede, deve ser capaz de fornecer instantaneamente as potências ativa e reativa necessárias para a manutenção do controle especificado. Nos casos em que a dinâmica do UPFC é considerada, uma das abordagens de controle mais comum é a que usa controladores do tipo Proporcional Integral (PI) (WANG, 2000; TAMBEY; KOTHARI, 2003; KANNAN; JAYARAM; SALAMA, 2004;

GHOLIPOUR; SAADATE, 2005; MARTINS et al., 2016). O controle PI é simples de implementar e muito eficaz no amortecimento de um modo oscilatório quando ajustado corretamente (GUO; CROW; SARANGAPANI, 2009).

Outra formulação bastante comum para o UPFC é a que utiliza injeções de corrente para encontrar variáveis de controle que satisfaçam as condições de interface com a rede (PADIYAR; UMA RAO, 1999; HUANG et al., 2000; WANG, 2000; SON; LASSETER, 2004; MARTINS et al., 2016). Dentre elas é possível citar as usadas nos trabalhos de (SON; LASSETER, 2004) e de (MARTINS et al., 2016), onde foi proposto um modelo de injeções de corrente para estudar os efeitos do UPFC sobre as oscilações eletromecânicas de baixa frequência do SEP.

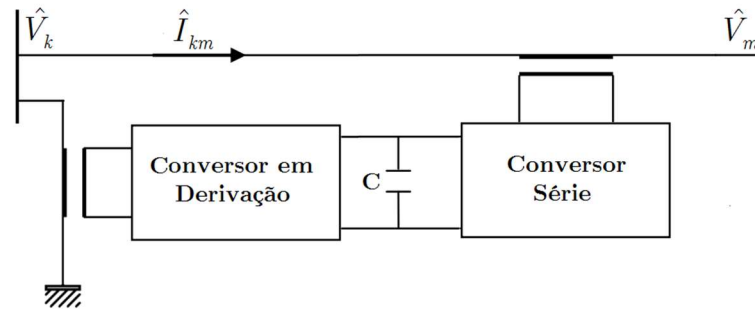
Neste capítulo o UPFC utilizará controladores do tipo PI e será representado por um modelo de injeções de corrente nas barras de instalação para posterior inclusão ao Modelo de Sensibilidade de Corrente, que será apresentado no Capítulo 3.

## 2.2 UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC)

O UPFC é um dispositivo da família dos FACTS de terceira geração constituído por dois conversores *Voltage Source Converter* (VSC) que geram tensões trifásicas senoidais na frequência da rede com a amplitude e o ângulo de fase controláveis (WATANABE et al., 1998; HINGORANI; GYUGYI, 1999). Estes conversores fazem uso da família de tiristores *Gate Turn-Off* (GTO). Estas chaves se caracterizam por possuir elevada velocidade de chaveamento e, além de poderem ser ligadas como o *Silicon Controlled Rectifier* (SCR), podem ser desligadas sem a necessidade que a amplitude da corrente passe por zero.

O UPFC pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 1 sendo um VSC em série e outro em derivação com a LT, ligados ao sistema CA através de transformadores de acoplamento. Os conversores estão conectados por meio de um elo em corrente contínua com a presença de um capacitor  $C$ .

Figura 1 – Diagrama de blocos do UPFC.



Fonte: Adaptada de Furini (2011).

Segundo Gyugyi et al. (1995) a principal função do conversor série é inserir na linha uma tensão  $\hat{V}_s$  com a amplitude e o ângulo de fase controlados, o que garante o controle sobre o fluxo de potência pela linha.

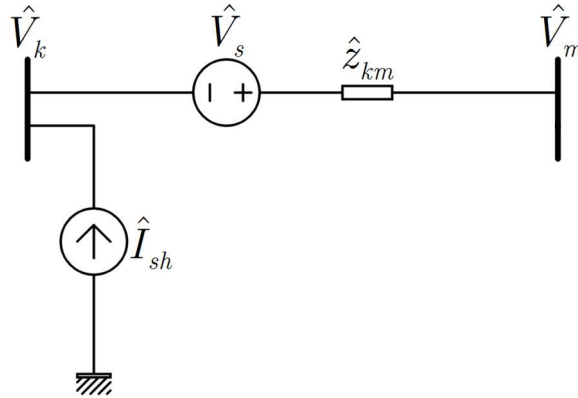
Um dos papéis do conversor em derivação é fornecer a potência ativa ao elo de corrente contínua disponibilizando-a ao conversor série no momento em que esta for solicitada. Além disso, o conversor pode regular automaticamente a tensão do barramento onde está conectado fixando-a em um nível especificado (WANG; SWIFT; LI, 1998).

Uma das características mais importantes do UPFC é possuir um controle capaz de realizar a compensação da potência ativa sem utilizar dispositivos armazenadores/dissipadores de energia. Esta função é realizada pelo elo em corrente contínua (CC) que permite que a potência ativa flua livremente entre os conversores série e em derivação. Uma das desvantagens deste tipo de controle é a obrigatoriedade de que a energia injetada/consumida por um dos conversores seja consumida/injetada pelo outro (GYUGYI et al., 1995; FURINI, 2008).

### 2.3 MODELO DE INJEÇÕES DE CORRENTE PARA O UPFC

O modelo por injeções de corrente do UPFC é obtido realizando algumas modificações no modelo de injeções de potência proposto em (NOROOZIAN et al., 1997). O circuito equivalente do UPFC conectado a um SEP pode ser representado por uma fonte de tensão ideal, conectada entre os nós  $k$  e  $m$ , em série com uma impedância  $\hat{Z}_{km}$  e uma fonte de corrente ideal  $\hat{I}_{sh}$  em derivação com a LT conforme impresso na Figura 2 (MENG; SO, 2000; FURINI, 2008).

Figura 2 – Representação do UPFC para o Modelo de Injeção de Corrente.



Fonte: Elaboração do autor.

A impedância de acoplamento  $\hat{Z}_{km}$  em série com a fonte de tensão do conversor série  $\hat{V}_s$  pode ser representada por uma admitância  $\hat{y}_{km}$  conforme expressão (1).

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{km} &= r_{km} + jx_{km}, \quad r_{km} = 0, \\ \hat{y}_{km} &= \frac{1}{jx_{km}} = -j \frac{1}{x_{km}} = jb_{km} \end{aligned} \quad (1)$$

Na equação (1) as constantes  $r_{km}$ ,  $x_{km}$  e  $b_{km}$  representam, respectivamente, a resistência, a reatância e a susceptância do transformador de acoplamento.

De acordo com a equação (2), a amplitude da tensão do conversor série é controlada pelo parâmetro  $r$  e a defasagem angular por  $\varphi$ .

$$\hat{V}_s = \hat{r} \hat{V}_k = (r \angle \varphi) (V_k \angle \theta_k) = r V_k \angle (\theta_k + \varphi) \quad (2)$$

Com o objetivo de se calcular as injeções de corrente em cada barra, a fonte de tensão série pode ser convertida em uma fonte de corrente  $\hat{I}_S$ , como pode ser visualizado na Figura 3.

A corrente  $\hat{I}_S$  é dada pela expressão (3).

$$\hat{I}_S = \hat{V}_s \hat{y}_{km} = r V_k \angle (\theta_k + \varphi) j b_{km} = I_{Sr} + j I_{Sm} \quad (3)$$

Após manipulação, a equação (3) se torna (4).

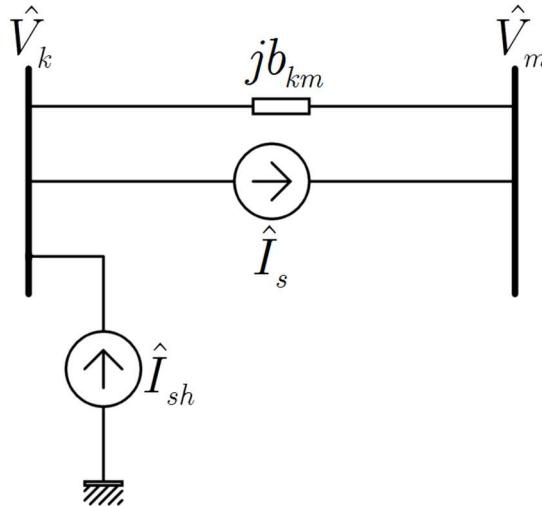
$$\hat{I}_S = -r V_k b_{km} \left[ (\cos \varphi \sin \theta_k + \sin \varphi \cos \theta_k) + j (\sin \varphi \sin \theta_k - \cos \varphi \cos \theta_k) \right] \quad (4)$$



Assim como a tensão do conversor em série, a corrente em derivação  $\hat{I}_{sh}$ , expressão (5), também pode ser decomposta em uma componente em fase,  $I_p$ , e outra em quadratura,  $I_q$ , com a tensão terminal da barra inicial de instalação do UPFC ( $\hat{V}_k$ ).

$$\hat{I}_{sh} = (I_p - jI_q) \angle \theta_k \quad (5)$$

Figura 3 – Representação da fonte de tensão série por uma fonte de corrente.



Fonte: Elaboração do autor.

Em Furini (2008) fica evidenciada pela equação (5) a possibilidade de controle da magnitude da tensão por meio da injeção de reativos pelo conversor em derivação.

#### 2.4 POTÊNCIA ATIVA INJETADA PELO CONVERSOR SÉRIE

O conversor em série injeta uma potência complexa conjugada na linha de transmissão dada pela equação (6).

$$\hat{S}_S^* = P_S - jQ_S = \hat{V}_S^* \hat{I}_{km} \quad (6)$$

É possível determinar a tensão sobre a reatância do transformador de acoplamento, Figura 2, como em (7).

$$\hat{V}_{trafo} = \hat{V}_k + \hat{V}_S - \hat{V}_m \quad (7)$$

Deste modo, a corrente  $\hat{I}_{km}$  que flui da barra  $k$  para a barra  $m$ , pode ser expressa pela equação (8).

$$\hat{I}_{km} = (\hat{V}_n - \hat{V}_m) \hat{y}_{km} = \hat{V}_{\text{trafo}} \hat{y}_{km} = (\hat{V}_k + \hat{V}_s - \hat{V}_m) j b_{km} \quad (8)$$

Substituindo as equações (2) e (8) em (6) chega-se à equação (9).

$$\hat{S}_s^* = r V_k b_{km} \left\{ [V_k \sin \varphi - V_m \sin(\theta_{km} + \varphi)] + j [r V_k + V_k \cos \varphi - V_m \cos(\theta_{km} + \varphi)] \right\} \quad (9)$$

Separando da potência complexa  $\hat{S}_s$  a potência ativa  $P_s$  e a potência reativa  $Q_s$  obtêm-se as equações (10) e (11).

$$P_s = r V_k b_{km} [V_k \sin \varphi - V_m \sin(\theta_{km} + \varphi)] \quad (10)$$

$$Q_s = -r V_k b_{km} [r V_k + V_k \cos \varphi - V_m \cos(\theta_{km} + \varphi)] \quad (11)$$

## 2.5 POTÊNCIA ATIVA INJETADA PELO CONVERTOR EM DERIVAÇÃO

Como relatado anteriormente, toda a potência ativa injetada por um dos conversores deve ser consumida pelo outro através da interligação em corrente contínua entre ambos. Considerando o UPFC um dispositivo ideal, isto é, sem perdas ativas, e que na modelagem proposta o conversor série está injetando potência no sistema elétrico (equação (6)), o conversor em derivação deverá absorver esta potência. Com isso a equação da potência complexa do conversor em derivação pode ser expressa por (12).

$$\hat{S}_{sh}^* = \hat{V}_{sh}^* (-\hat{I}_{sh}) \quad (12)$$

A tensão  $\hat{V}_{sh}$  pode ser expressa pela equação (13).

$$\hat{V}_{sh} = V_k \angle \theta_k \quad (13)$$

Substituindo as equações (5) e (13) em (12) encontra-se à expressão (14).

$$\hat{S}_{sh}^* = V_k \angle (-\theta_k) \left[ -(I_p - j I_q) \angle \theta_k \right] \quad (14)$$

Realizando as manipulações algébricas convenientes, a potência complexa absorvida pelo conversor em derivação, expressa em (14), pode ser decomposta em uma parcela de potência reativa e outra de potência ativa  $P_{sh}$  conforme (15).

$$P_{sh} = -V_k I_p \quad (15)$$

Como a potência gerada por um dos conversores deve ser consumida pelo outro, é possível assumir que a equação (16) se verifica.

$$P_{sh} = P_S \quad (16)$$

Substituindo as equações (10) e (15) em (16) é possível definir pela expressão (17) a corrente de controle  $I_p$  em função dos parâmetros do conversor série.

$$I_p = -rb_{km} [V_k \sen \varphi + V_m \sen(\theta_{km} + \varphi)] \quad (17)$$

Deste modo o conversor em derivação ficará incumbido de manter o balanço de potência ativa.

## 2.6 CORRENTE COMPLEXA INJETADA PELO UPFC NA BARRA INICIAL DE INSTALAÇÃO

A fonte de corrente  $\hat{I}_S$ , resultado da transformação da fonte de tensão série, mostrada na Figura 3, conectada entre as barras  $k$  e  $m$  pode ser dividida em duas fontes de corrente em derivação de acordo com a Figura 4.

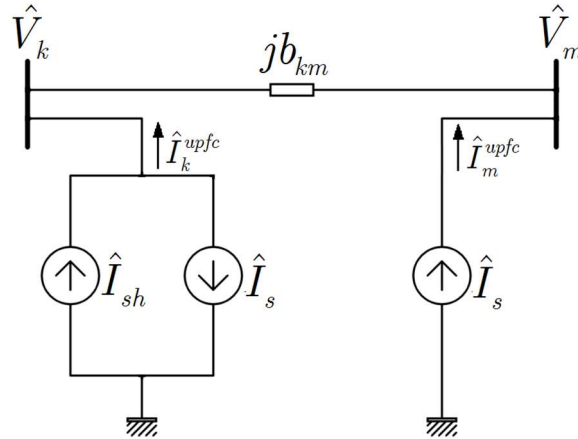
A corrente  $\hat{I}_k^{\text{upfc}}$  injetada pelo UPFC na barra  $k$  é definida na equação (18).

$$\hat{I}_k^{\text{upfc}} = \hat{I}_{sh} - \hat{I}_S \quad (18)$$

Utilizando as equações (3) e (5) em (18) chega-se à equação (19).

$$\hat{I}_k^{\text{upfc}} = (I_p \cos \theta_k + I_q \sen \theta_k) + j(I_p \sen \theta_k - I_q \cos \theta_k) - (I_{Sr} + jI_{Sm}) \quad (19)$$

Figura 4 – Transformação da fonte de corrente série.



Fonte: Elaboração do autor.

Separando as partes real e imaginária de (19) encontram-se as correntes  $I_{rk}^{\text{upfc}}$  e  $I_{mk}^{\text{upfc}}$  em (20) e (21), respectivamente.

$$I_{rk}^{\text{upfc}} = (I_p \cos \theta_k + I_q \sin \theta_k) - I_{Sr} \quad (20)$$

$$I_{mk}^{\text{upfc}} = (I_p \sin \theta_k - I_q \cos \theta_k) - I_{Sm} \quad (21)$$

Substituindo a expressão de  $I_s$  e  $I_p$ , respectivamente (4) e (17), em (20) e (21) é possível determinar as componentes de  $\hat{I}_k^{\text{upfc}}$  no sistema de coordenadas fixo  $(r, m)$  representado pelas equações (22) e (23).

$$I_{rk}^{\text{upfc}} = r V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi) \cos \theta_k + (r V_k b_{km} \cos \varphi + I_q) \sin \theta_k \quad (22)$$

$$I_{mk}^{\text{upfc}} = r V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi) \sin \theta_k - (r V_k b_{km} \cos \theta_k + I_q) \cos \theta_k \quad (23)$$

A corrente  $\hat{I}_m$  injetada na barra  $m$  pelo UPFC é definida como em (24).

$$\hat{I}_m^{\text{upfc}} = \hat{I}_s \quad (24)$$

A corrente  $\hat{I}_m^{\text{upfc}}$  pode ser desmembrada em parte real e parte imaginária como mostrado em (25) e (26).

$$I_{rm}^{\text{upfc}} = -r V_k b_{km} (\cos \varphi \sin \theta_k + \sin \varphi \cos \theta_k) \quad (25)$$

$$I_{mm}^{\text{upfc}} = -rV_k b_{km} (\text{sen } \varphi \text{sen } \theta_k - \text{cos } \varphi \text{cos } \theta_k) \quad (26)$$

As equações (22), (23), (25) e (26) representam o modelo de injeção de corrente para o UPFC podendo ser utilizadas em problemas de fluxo de potência modelados pelo balanço de correntes nas barras.

Entretanto, para que o modelo consiga também representar o UPFC para análises dinâmicas é necessário que as correntes injetadas sejam representadas em função de seus parâmetros de controle. Para tal, será utilizado o diagrama fasorial da Figura 5, como apresentado em Huang et al. (2000), onde a tensão  $\hat{V}_s$  é decomposta em dois componentes, um em fase ( $V_q$ ) e outro em quadratura ( $V_p$ ) com a tensão  $\hat{V}_k$  na barra inicial de instalação do dispositivo.

As tensões  $V_p$  e  $V_q$  podem ser representadas pelas expressões (27) e (28).

$$V_p = rV_k \text{sen } \varphi \quad (27)$$

$$V_q = rV_k \text{cos } \varphi \quad (28)$$

Isolando os parâmetros  $r$  e  $\varphi$  no sistema de equações formado por (27) e (28) obtêm-se (29) e (30).

$$r = \frac{\sqrt{V_p^2 + V_q^2}}{V_k} \quad (29)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{V_p}{V_q}\right) \quad (30)$$

A substituição das expressões (29) e (30) em (22), (23), (25) e (26) geram o conjunto de equações (31) a (34).

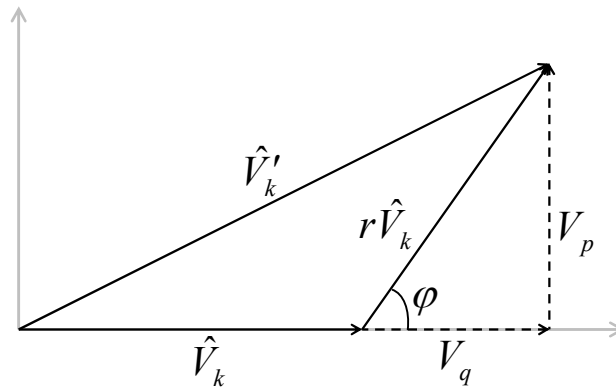
$$I_{rk}^{\text{upfc}} = \frac{V_m}{V_k} b_{km} (V_p \text{cos } \theta_{km} + V_q \text{sen } \theta_{km}) \text{cos } \theta_k + (V_q b_{km} + I_q) \text{sen } \theta_k \quad (31)$$

$$I_{mk}^{\text{upfc}} = \frac{V_m}{V_k} b_{km} (V_p \text{cos } \theta_{km} + V_q \text{sen } \theta_{km}) \text{sen } \theta_k - (V_q b_{km} + I_q) \text{cos } \theta_k \quad (32)$$

$$I_{rm}^{\text{upfc}} = -b_{km} (V_p \cos \theta_k + V_q \sin \theta_k) \quad (33)$$

$$I_{mm}^{\text{upfc}} = -b_{km} (V_p \sin \theta_k - V_q \cos \theta_k) \quad (34)$$

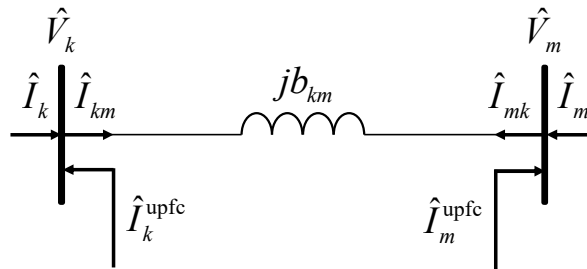
Figura 5 – Diagrama fasorial devido a inclusão do UPFC.



Fonte: Adaptada de Huang et al. (2000).

Na Figura 6 é exibida a representação do modelo de injeção de corrente para o UPFC. Ela é apropriada tanto para estudos de estabilidade a pequenas perturbações quanto para análises envolvendo estabilidade transitória.

Figura 6 – Representação do Modelo de Injeções de Corrente para o UPFC.



Fonte: Elaboração do autor.

## 2.7 CONTROLE DO UPFC

A principal função do UPFC quando inserido a um SEP é trazer maior flexibilidade na sua operação. Isso se deve à possibilidade de especificar a tensão na barra inicial de instalação ( $\hat{V}_k$ ) e os fluxos de potência ativa ( $P_m^{\text{ctrl}}$ ) e reativa ( $Q_m^{\text{ctrl}}$ ) na barra final de instalação.

Para que isso seja possível é necessário incluir ao dispositivo estruturas de controle que modulem adequadamente as variáveis controláveis por meio dos controles de  $V_p$ ,  $V_q$  e  $I_q$ . A

estrutura escolhida será a de um controlador PI (Proporcional Integral) como a proposta em Valle, Menezes e Araujo (2013).

Na Figura 7 é definida a estrutura de controle para representar a dinâmica do UPFC. Nesta estrutura, formada por controladores PI, o trio de constantes  $K1^u$ ,  $K2^u$  e  $K3^u$  representam seus ganhos (em p.u.) e  $T1^u$ ,  $T2^u$  e  $T3^u$  suas constantes de tempo (em segundos). A constante de tempo  $T_m$  referem-se aos atrasos inerentes ao processamento dos sinais pelo controle do UPFC e estão dentro da faixa entre 1 ms e 10 ms (HINGORANI; GYUGYI, 1999). Além disso, existe um sinal suplementar  $V_{sup}$  proveniente do controlador POD que, no caso deste trabalho, modula a componente em quadratura  $V_p$  da tensão  $\hat{V}_S$  inserida pelo conversor em série do dispositivo. Vale ressaltar que este sinal poderia ser utilizado para modificar tanto a componente em fase  $V_q$  da tensão  $\hat{V}_S$  quanto a componente em quadratura  $I_q$  da fonte de corrente em derivação  $\hat{I}_{sh}$  conectada à barra  $k$ .

As equações diferenciais dos controladores do UPFC, exibidas de (35) a (40), são obtidas por meio da modelagem adequada de cada uma de suas variáveis de controle mostradas no diagrama de blocos da Figura 7.

$$\dot{V}_p = \frac{K1^u}{T_m} (P_m^{ref} - P_m^{ctrl}) + \frac{1}{T_m} (X_1 - V_p - V_{sup}) \quad (35)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{K1^u}{T1^u} (P_m^{ref} - P_m^{ctrl}) \quad (36)$$

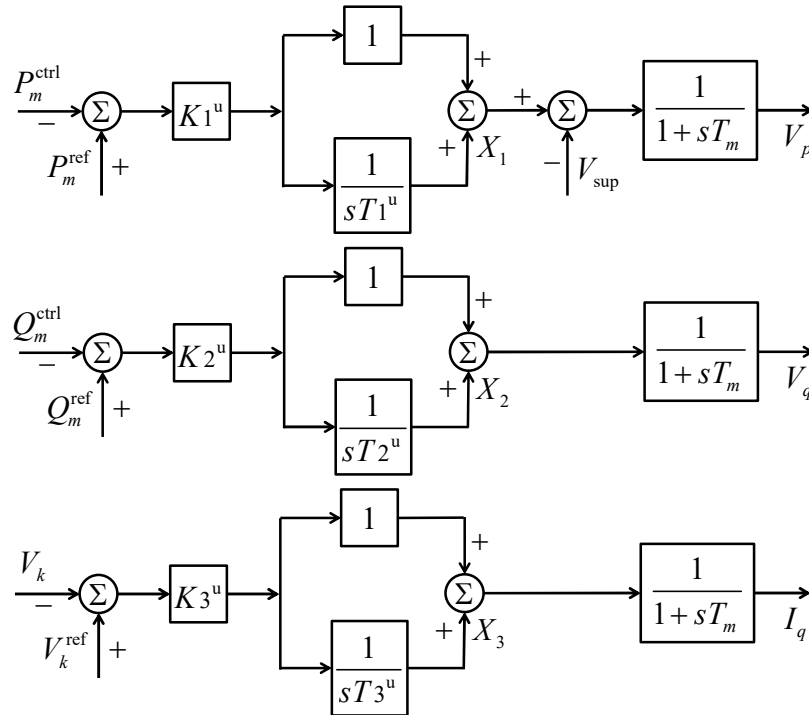
$$\dot{V}_q = \frac{K2^u}{T_m} (Q_m^{ref} - Q_m^{ctrl}) + \frac{1}{T_m} (X_2 - V_q) \quad (37)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{K2^u}{T2^u} (Q_m^{ref} - Q_m^{ctrl}) \quad (38)$$

$$\dot{I}_q = \frac{K3^u}{T_m} (V_k^{ref} - V_k) + \frac{1}{T_m} (X_3 - I_q) \quad (39)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{K3^u}{T3^u} (V_k^{ref} - V_k) \quad (40)$$

Figura 7 – Estrutura do sistema de controle do UPFC.



Fonte: Elaboração do autor.

Na série de expressões mostradas de (35) a (40),  $P_m^{\text{ref}}$  e  $Q_m^{\text{ref}}$  são as magnitudes dos fluxos de potências ativa e reativa estabelecidos pelo operador do sistema para a linha de transmissão conectada na barra  $m$  (barra final de instalação do UPFC). A tensão de referência na barra  $k$  (barra inicial de instalação do dispositivo) é representada por  $V_k^{\text{ref}}$  e a efetiva na mesma barra por  $V_k$  e  $P_m^{\text{ctrl}}$  e  $Q_m^{\text{ctrl}}$  são os fluxos reais de potências ativa e reativa, nesta ordem, na linha de transmissão controlada.

## 2.8 CONTROLES DO FLUXO DE POTÊNCIA E DA TENSÃO EXECUTADOS PELO UPFC

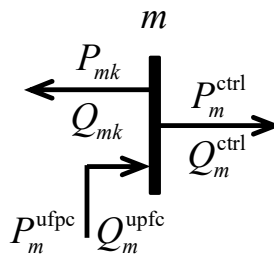
Como mencionado anteriormente, o UPFC possui dois conversores, um em série e outro em derivação, o que lhe permite realizar o controle de quatro variáveis:  $V_p$ ,  $V_q$ ,  $I_p$  e  $I_q$ , responsáveis pela injeção de corrente nas barras de instalação. Entretanto, para manter a diferença entre a potência ativa entregue por um conversor e a consumida pelo outro igual a zero é necessário fazer com que a variável  $I_p$ , expressão (17), se torne uma variável dependente das restantes  $V_p$ ,  $V_q$  e  $I_q$ . Desta forma, restam três variáveis independentes que tornam possível



o controle dos fluxos de potências ativa e reativa da linha de transmissão adjacente à barra final de instalação do dispositivo e da tensão na barra inicial de sua instalação.

Para que o controle dos fluxos pelo UPFC seja possível é necessário que  $P_m^{\text{ctrl}}$  e  $Q_m^{\text{ctrl}}$  sejam equacionadas em função das tensões e reatâncias do SEP e das variáveis de controle do dispositivo. Para isso serão analisados os balanços de potências ativa e reativa mostrados na Figura 8 e representados pelo conjunto das equações (41) e (42) onde  $P_{mk}$  e  $Q_{mk}$  são definidas como sendo as potências ativa e reativa, nesta ordem, que fluem da barra  $m$  para a barra  $k$ .

Figura 8 – Controle dos fluxos de potência pelo UPFC.



Fonte: Elaboração do autor.

$$0 = P_m^{\text{ctrl}} - P_m^{\text{upfc}} + P_{mk} \quad (41)$$

$$0 = Q_m^{\text{ctrl}} - Q_m^{\text{upfc}} + Q_{mk} \quad (42)$$

A potência complexa injetada pelo UPFC na barra  $m$  é definida como na equação (43).

$$P_m^{\text{upfc}} + jQ_m^{\text{upfc}} = \hat{V}_m \left( \hat{I}_m^{\text{upfc}} \right)^* = (V_m \cos \theta_m + jV_m \text{sen} \theta_m) (I_{rm}^{\text{upfc}} - jI_{mm}^{\text{upfc}}) \quad (43)$$

Separando as partes real e imaginária de (43) obtêm-se (44) e (45).

$$P_m^{\text{upfc}} = V_m I_{rm}^{\text{upfc}} \cos \theta_m + V_m I_{mm}^{\text{upfc}} \text{sen} \theta_m \quad (44)$$

$$Q_m^{\text{upfc}} = -V_m I_{mm}^{\text{upfc}} \cos \theta_m + V_m I_{rm}^{\text{upfc}} \text{sen} \theta_m \quad (45)$$

Substituindo as equações (33) e (34) em (44) e (45) determinam-se as equações (46) e (47) das potências injetadas pelo UPFC na barra  $m$ .

$$P_m^{\text{upfc}} = -V_m b_{km} \left( V_p \cos \theta_{km} + V_q \text{sen} \theta_{km} \right) \quad (46)$$

$$Q_m^{\text{upfc}} = V_m b_{km} (V_p \text{sen } \theta_{km} - V_q \text{cos } \theta_{km}) \quad (47)$$

O próximo passo é definir os fluxos de potência da barra  $m$  para a barra  $k$  da Figura 6 conforme (48) e (49).

$$P_{mk} = V_k V_m b_{km} \text{sen } \theta_{km} \quad (48)$$

$$Q_{mk} = b_{km} (V_k V_m \text{cos } \theta_{km} - V_m^2) \quad (49)$$

Finalmente, substituindo (46), (47), (48) e (49) no conjunto de equações (41) e (42) obtêm-se os fluxos de potências ativa e reativa controlados pelo UPFC (equações (50) e (51)).

$$P_m^{\text{ctrl}} = -V_m b_{km} [V_p \text{cos } \theta_{km} + (V_q - V_k) \text{sen } \theta_{km}] \quad (50)$$

$$Q_m^{\text{ctrl}} = V_m b_{km} [V_p \text{sen } \theta_{km} + (V_q - V_k) \text{cos } \theta_{km} + V_m] \quad (51)$$

As expressões (50) e (51) são as entradas do sistema de controle do dispositivo representado pela Figura 7 e devem ser substituídas no conjunto de equações (35) a (39).

## 2.9 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi realizada uma breve descrição do princípio de funcionamento do dispositivo FACTS UPFC. Além disso, foram apresentados os equacionamentos envolvidos para sua inclusão na modelagem de um SEP.

Este equacionamento deu origem às equações de injeções de corrente nas barras de instalação do UPFC que podem ser utilizadas tanto em análises estáticas quanto em análises dinâmicas de um sistema de potência.

Na modelagem matemática apresentada, o dispositivo foi representado por uma fonte de tensão em série com a linha de transmissão conectada à barra inicial de instalação e uma fonte de corrente em derivação com esta barra, ambas ajustáveis. Também foi modelada uma estrutura de controle utilizando controladores do tipo PI responsável pelo gerenciamento do fluxo de potência na barra  $m$  e da tensão na barra  $k$ .

## 2 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo inicialmente será realizado o equacionamento básico de um gerador síncrono, constituído por três enrolamentos no estator (fases a, b e c) e um enrolamento no rotor (enrolamento de campo), instalado em um sistema multimáquinas genérico.

As grandezas relacionadas com os enrolamentos do estator são medidas em um sistema de coordenadas fixo ( $r, m$ ), enquanto que o enrolamento de campo se move a uma velocidade angular  $\omega$  junto com o rotor. Deste modo, suas grandezas são medidas em um sistema de coordenadas rotativo ( $d, q$ ), definido para cada gerador. Então, por conveniência, será utilizada uma transformação de coordenadas baseada na Transformada de Park (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003), para referir as grandezas de interesse a um único sistema de coordenadas.

O equacionamento desenvolvido para o gerador será utilizado para definir o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (PÁDUA JÚNIOR et al., 2013) para sistemas multimáquinas, cuja formulação parte da premissa de que o balanço nodal de correntes em cada barra de um SEP deve ser satisfeito em qualquer instante de tempo considerado.

O MSC será incorporado às equações do método de Newton-Raphson para se determinar um ponto de operação mais realista para o SEP. Esta abordagem, inspirada na ferramenta de fluxo de potência expandido (FENG; AJJARAPU; LONG, 2000; ZHU; ZHOU; ZHANG, 2000; KOPCAK, 2007; KOPCAK; DA COSTA; DA SILVA, 2007; VALLE; ARAUJO, 2013; VALLE, 2014) tornará factível a consideração das características dinâmicas de dispositivos FACTS conectados à rede.

A partir deste ponto de equilíbrio determinado com o método de Newton-Raphson e, em conjunto com análise modal, será realizada a análise de estabilidade a pequenas perturbações, foco deste trabalho.

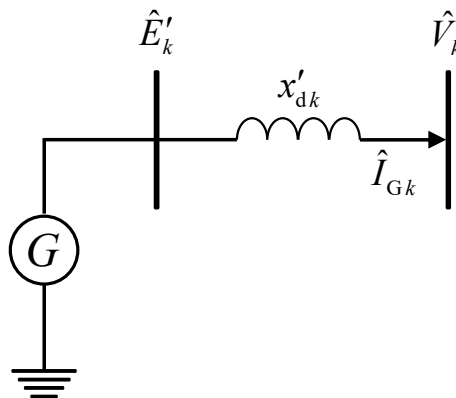
### 3.2 MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

As correntes envolvidas no balanço nodal de um SEP multimáquinas são descritas por equações algébricas não lineares. Estas equações serão deduzidas para posterior linearização e inclusão no MSC multimáquinas.

#### 3.2.1 Equações gerais

Para a determinação das equações gerais do MSC referente a um sistema multimáquinas considere o diagrama unifilar do gerador síncrono conectado a uma barra genérica  $k$ , conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama unifilar do gerador síncrono da barra  $k$ .



Fonte: Elaboração do autor.

As grandezas  $\hat{E}'_k$ ,  $\hat{V}_k$  e  $\hat{I}_{Gk}$  correspondem, respectivamente, à tensão interna do gerador  $k$ , à tensão na barra  $k$  e à corrente entregue pelo gerador ao SEP. A reatância transitória de eixo direto do gerador é representada por  $x'_{dk}$ .

A tensão interna do gerador síncrono  $\hat{E}'_k$  pode ser obtida diretamente da análise do diagrama unifilar representado na Figura 9, cuja expressão é dada na equação (52).

$$\hat{E}'_k = \hat{V}_k + jx'_{dk}\hat{I}_{Gk} \quad (52)$$

Em Kundur (1994) e Anderson e Fouad (2003) é definida uma tensão  $\hat{E}_{ak}$ , localizada no eixo de quadratura da máquina síncrona, que determina a posição do sistema de coordenadas rotativo ( $d_k, q_k$ ) em relação ao sistema de coordenadas fixo ( $r, m$ ) para cada gerador conforme a equação (53).

$$\hat{E}_{ak} = \hat{V}_k + jx_{qk} \hat{I}_{Gk} \quad (53)$$

Na equação (53), a grandeza  $x_{qk}$  corresponde à reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador  $k$ .

A tensão  $\hat{V}_k$ , utilizada na equação (52), também pode ser escrita na sua forma cartesiana de acordo com a equação (54), com  $V_k$  sendo o valor da sua magnitude e o ângulo  $\theta_k$  a sua fase.

$$\hat{V}_k = V_k \angle \theta_k = V_k (\cos \theta_k + j \sen \theta_k) = V_{rk} + jV_{mk} \quad (54)$$

A corrente  $\hat{I}_k$  pode ser escrita no sistema de coordenadas fixo de acordo com a equação (55), em que os índices  $r$  e  $m$  indicam as componentes nos eixos real e imaginário, respectivamente.

$$\hat{I}_{Gk} = I_{Grk} + jI_{Gmk} \quad (55)$$

As matrizes de transformação de coordenadas (operadores lineares) que relacionam as grandezas do sistema de coordenadas rotativo (d, q) com o sistema de coordenadas estático (r, m) e vice-versa, onde  $\delta$  é o ângulo entre os eixos  $q$  e  $r$ , são dadas em (56) e (57), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sen(\delta) & -\cos(\delta) \\ \cos(\delta) & \sen(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sen(\delta) & \cos(\delta) \\ -\cos(\delta) & \sen(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (57)$$

Aplicando as matrizes de transformação de coordenadas nas expressões (52), (53), (54) e (55) são obtidas as componentes de eixo direto e de eixo em quadratura da tensão interna do gerador, da tensão  $\hat{E}_{ak}$  e da tensão e corrente terminal do gerador  $k$  conforme mostradas no conjunto de equações (58) a (65).

$$E'_{dk} = V_{dk} - x'_{dk} I_{Gqk} \quad (58)$$

$$E'_{qk} = V_{qk} + x'_{dk} I_{Gdk} \quad (59)$$

$$E_{adk} = V_{dk} - x_{qk} I_{Gqk} \quad (60)$$

$$E_{aqk} = V_{qk} + x_{qk} I_{Gdk} \quad (61)$$

$$V_{dk} = V_{rk} \sin \delta_k - V_{mk} \cos \delta_k = V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (62)$$

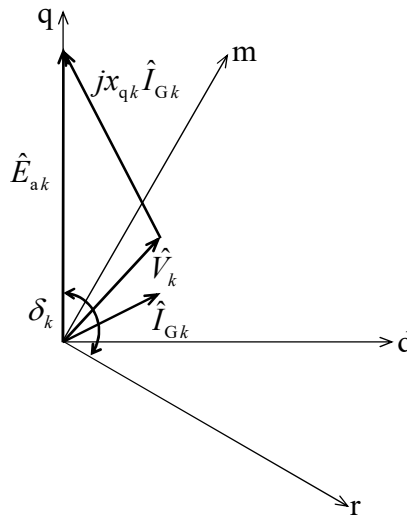
$$V_{qk} = V_{rk} \cos \delta_k + V_{mk} \sin \delta_k = V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (63)$$

$$I_{Gdk} = I_{Grk} \sin \delta_k - I_{Gmk} \cos \delta_k \quad (64)$$

$$I_{Gqk} = I_{Grk} \cos \delta_k + I_{Gmk} \sin \delta_k \quad (65)$$

A tensão  $\hat{E}_{ak}$ , Figura 10, está em fase com o eixo em quadratura; como consequência, a componente sobre o eixo  $q$  possui a magnitude do módulo desta tensão enquanto que a componente sobre o eixo direto  $E_{ad}$  é zero.

Figura 10 – Diagrama fasorial do gerador  $k$ .



Fonte: Elaboração do autor.

Com esta consideração e rearranjando as equações em (60) e (61) são escritas as equações (66) e (67).

$$V_{dk} = x_{qk} I_{Gqk} \quad (66)$$

$$V_{qk} = E_{ak} - x_{qk} I_{Gdk} \quad (67)$$

Utilizando as equações (58), (59), (62), (63), (66) e (67), é possível escrever as componentes da tensão terminal  $\hat{V}_k$  no sistema de coordenadas rotativo conforme a série de equações composta por (68) e (69).

$$V_{dk} = V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k) = E'_{dk} + x'_{dk} I_{Gqk} = x_{qk} I_{Gqk} \quad (68)$$

$$V_{qk} = V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k) = E'_{qk} - x'_{dk} I_{Gdk} = E_{ak} - x_{qk} I_{Gdk} \quad (69)$$

As componentes da corrente injetada pelo gerador  $k$  nos eixos direto e em quadratura representadas pelas equações (70) são determinadas a partir das equações (68).

$$I_{Gdk} = \frac{(E'_{qk} - V_{qk})}{x'_{dk}} \quad (70)$$

$$I_{Gqk} = \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \quad (71)$$

### 3.2.2 Correntes circulantes em um sistema multimáquinas

A construção do MSC envolve a realização do balanço nodal de correntes em cada barra constituinte de um sistema multimáquinas. Desta forma, é essencial que sejam equacionadas todas as correntes incluídas neste balanço em um único sistema de coordenadas, fixo ou rotativo.

Por facilidade, para esta modelagem será adotado o sistema de coordenadas fixo, ou  $(r, m)$ , visto que será necessário realizar a conversão apenas das componentes de eixo direto e em quadratura da corrente terminal dos geradores, representadas por (70).

Aplicando a matriz de transformação inversa  $(T^{-1})$  apresentada em (57) nestas componentes, chega-se à sua representação no sistema  $(r, m)$  como mostrado em (72) e (73).

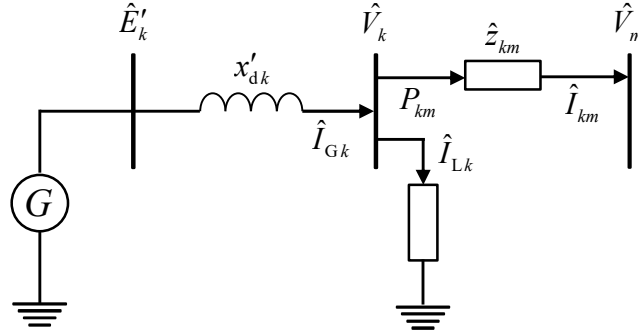
$$I_{Grk} = \text{sen} \delta_k \frac{(E'_{qk} - V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k))}{x'_{dk}} + \text{cos} \delta_k \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (72)$$

$$I_{Gmk} = -\text{cos} \delta_k \frac{(E'_{qk} - V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k))}{x'_{dk}} + \text{sen} \delta_k \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (73)$$

O fluxo de corrente  $\hat{I}_{km}$  em uma linha de transmissão entre uma barra  $k$  e uma barra  $m$  mostrado na Figura 11 é dado pela equação (74).

$$\hat{I}_{km} = \frac{(\hat{V}_k - \hat{V}_m)}{\hat{Z}_{km}} = (\hat{V}_k - \hat{V}_m) \hat{y}_{km} = (\hat{V}_k - \hat{V}_m)(g_{km} + jb_{km}) \quad (74)$$

Figura 11 – Fluxo de corrente no sistema multimáquinas.



Fonte: Elaboração do autor.

A tensão na barra  $m$  pode ser determinada de maneira análoga à da barra  $k$ , como visualizado em (75).

$$\hat{V}_m = V_m \angle \theta_m = V_m \cos \theta_m + jV_m \sin \theta_m = V_{rm} + jV_{mm} \quad (75)$$

O fasor da corrente  $\hat{I}_{km}$  mostrado em (76) é obtido a partir da substituição das expressões (54) e (75) em (74).

$$\hat{I}_{km} = [V_k (\cos \theta_k + j \sin \theta_k) - V_m (\cos \theta_m - j \sin \theta_m)](g_{km} + jb_{km}) \quad (76)$$

Desenvolvendo (76) e separando sua parte real da imaginária obtêm-se as componentes da corrente  $\hat{I}_{km}$  no sistema de coordenadas fixo representadas por (77) e (78).

$$I_{rkm} = V_k (g_{km} \cos \theta_k - b_{km} \sin \theta_k) - V_m (g_{km} \cos \theta_m - b_{km} \sin \theta_m) \quad (77)$$

$$I_{mkm} = V_k (g_{km} \sin \theta_k + b_{km} \cos \theta_k) - V_m (g_{km} \sin \theta_m + b_{km} \cos \theta_m) \quad (78)$$

Caso uma carga seja conectada à barra  $k$ , sua corrente circulante pode ser calculada por (79), onde  $\hat{S}_{Lk}$  é a potência complexa requerida pela carga.

$$\hat{I}_{Lk} = \left( \frac{\hat{S}_{Lk}}{\hat{V}_k} \right)^* = \frac{P_{Lk} - jQ_{Lk}}{\hat{V}_k^*} \quad (79)$$



As componentes, real e imaginária, da corrente consumida pela carga, representadas respectivamente por  $I_{Lrk}$  e  $I_{Lmk}$ , podem ser determinadas utilizando (54) em (79) conforme mostrado em (80) e (81).

$$I_{Lrk} = \frac{P_{Lk} \cos \theta_k + jQ_{Lk} \sen \theta_k}{V_k} \quad (80)$$

$$I_{Lmk} = \frac{P_{Lk} \sen \theta_k - jQ_{Lk} \cos \theta_k}{V_k} \quad (81)$$

### 3.2.3 Linearização das equações

Estudos sobre a estabilidade a pequenas perturbações podem ser realizados utilizando-se equações lineares. Em vista disso as equações algébricas e diferenciais que representam o SEP serão linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio. Para tanto será utilizada a expansão em série de Taylor desprezando-se os termos de ordem maior ou igual a dois.

Supondo pequenas variações ao redor de um ponto de operação do sistema é possível linearizar as séries de equações compostas por (72), (73), (77), (78), (80) e (81), conforme o conjunto de equações (82) a (87).

$$\Delta I_{Grk} = \frac{\partial I_{Grk}}{\partial E'_{qk}} \Delta E'_{qk} + \frac{\partial I_{Grk}}{\partial \delta_k} \Delta \delta_k + \frac{\partial I_{Grk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{Grk}}{\partial V_k} \Delta V_k \quad (82)$$

$$\Delta I_{Gmk} = \frac{\partial I_{Gmk}}{\partial E'_{qk}} \Delta E'_{qk} + \frac{\partial I_{Gmk}}{\partial \delta_k} \Delta \delta_k + \frac{\partial I_{Gmk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{Gmk}}{\partial V_k} \Delta V_k \quad (83)$$

$$\Delta I_{rkm} = \frac{\partial I_{rkm}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{rkm}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial I_{rkm}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{rkm}}{\partial V_m} \Delta V_m \quad (84)$$

$$\Delta I_{mkm} = \frac{\partial I_{mkm}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{mkm}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial I_{mkm}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{mkm}}{\partial V_m} \Delta V_m \quad (85)$$

$$\Delta I_{Lrk} = \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial P_{Lk}} \Delta P_{Lk} + \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial Q_{Lk}} \Delta Q_{Lk} \quad (86)$$

$$\Delta I_{Lmk} = \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial P_{Lk}} \Delta P_{Lk} + \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial Q_{Lk}} \Delta Q_{Lk} \quad (87)$$

Resolvendo as derivadas parciais indicadas são definidos os coeficientes de sensibilidade de corrente real ( $R1_{Gk}$ ,  $R2_{Gk}$ ,  $R3_{Gk}$  e  $R4_{Gk}$ ) e imaginária ( $M1_{Gk}$ ,  $M2_{Gk}$ ,  $M3_{Gk}$  e  $M4_{Gk}$ ) do gerador, das componentes real ( $R1_{km}$ ,  $R2_{km}$ ,  $R3_{km}$  e  $R4_{km}$ ) e imaginária ( $M1_{km}$ ,  $M2_{km}$ ,  $M3_{km}$  e  $M4_{km}$ ) da corrente entre as barras  $k$  e  $m$  e das partes real ( $R1_{Lk}$ ,  $R2_{Lk}$ ,  $R3_{Lk}$  e  $R4_{Lk}$ ) e imaginária ( $M1_{Lk}$ ,  $M2_{Lk}$ ,  $M3_{Lk}$  e  $M4_{Lk}$ ) da corrente demandada pela carga conectada à barra  $k$ , representados no conjunto de equações rotuladas de (88) a (93).

$$\Delta I_{Grk} = R1_{Gk} \Delta E'_{qk} + R2_{Gk} \Delta \delta_k + R3_{Gk} \Delta V_k + R4_{Gk} \Delta \theta_k \quad (88)$$

$$\Delta I_{Gmk} = M1_{Gk} \Delta E'_{qk} + M2_{Gk} \Delta \delta_k + M3_{Gk} \Delta V_k + M4_{Gk} \Delta \theta_k \quad (89)$$

$$\Delta I_{rkm} = R1_{km} \Delta \theta_k + R2_{km} \Delta \theta_m + R3_{km} \Delta V_k + R4_{km} \Delta V_m \quad (90)$$

$$\Delta I_{mkm} = M1_{km} \Delta \theta_k + M2_{km} \Delta \theta_m + M3_{km} \Delta V_k + M4_{km} \Delta V_m \quad (91)$$

$$\Delta I_{Lrk} = R1_{Lk} \Delta \theta_k + R2_{Lk} \Delta V_k + R3_{Lk} \Delta P_{Lk} + R4_{Lk} \Delta Q_{Lk} \quad (92)$$

$$\Delta I_{Lmk} = M1_{Lk} \Delta \theta_k + M2_{Lk} \Delta V_k + M3_{Lk} \Delta P_{Lk} + M4_{Lk} \Delta Q_{Lk} \quad (93)$$

### 3.2.4 Balanço nodal de correntes no sistema multimáquinas

O conceito fundamental do MSC é o atendimento instantâneo do equilíbrio nodal de correntes em cada barra do SEP, ou seja, mesmo quando perturbado a lei de *Kirchhoff* das correntes deve ser satisfeita em todas as barras do SEP. Vale ressaltar que o cálculo das correntes utilizado neste trabalho é diferente do apresentado em Sauer e Pai (1998), que utiliza as equações de potência para calcular as equações de corrente.

Realizando o balanço incremental das correntes, real e imaginária, em uma barra  $k$  do SEP mostrada na Figura 12 é possível obter o conjunto de expressões (94) e (95), com  $\Omega_k$  representando o conjunto de todas as linhas de transmissão ligadas à barra  $k$ .

$$\Delta I_{Grk} - \Delta I_{Lrk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{rkm} = 0 \quad (94)$$

$$\Delta I_{Gmk} - \Delta I_{Lmk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{mkm} = 0 \quad (95)$$

O balanço incremental de corrente na barra  $k$  pode ser representado pelas equações (94) e (95), sendo que  $\Delta I_{Grk}$  e  $\Delta I_{Gmk}$  são as variações das correntes, real e imaginária, injetadas

pelo gerador no nó  $k$ ;  $\Delta I_{rkm}$  e  $\Delta I_{mk}$  são as variações das correntes, real e imaginária, na linha de transmissão  $k-m$ ;  $\Delta I_{Lrk}$  e  $\Delta I_{Lmk}$  são as variações das correntes, real e imaginária, de uma possível carga instalada na barra  $k$ .

Substituindo o equacionamento (88) a (93) nas equações (94) e (95) obtêm-se (96) e (97).

$$0 = R1_{Gk} \Delta E'_{qk} + R2_{Gk} \Delta \delta_k + \left( R3_{Gk} - R1_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} R1_{km} \right) \Delta \theta_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} R2_{km} \right) \Delta \theta_m + \left( R4_{Gk} - R2_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} R3_{km} \right) \Delta V_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} R4_{km} \right) \Delta V_m - R3_{Lk} \Delta P_{Lk} - R4_{Lk} \Delta Q_{Lk} \quad (96)$$

$$0 = M1_{Gk} \Delta E'_{qk} + M2_{Gk} \Delta \delta_k + \left( M3_{Gk} - M1_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} M1_{km} \right) \Delta \theta_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} M2_{km} \right) \Delta \theta_m + \left( M4_{Gk} - M2_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} M3_{km} \right) \Delta V_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} M4_{km} \right) \Delta V_m - M3_{Lk} \Delta P_{Lk} - M4_{Lk} \Delta Q_{Lk} \quad (97)$$

As equações mostradas em (96) e (97) representam o balanço nodal linearizado de correntes, real e imaginária, em uma barra  $k$ , que relaciona as variáveis algébricas e variáveis de estado do SEP.

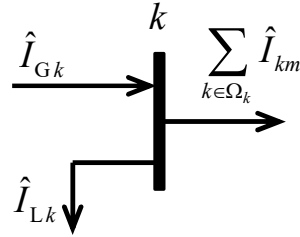
Tomando como referência o equacionamento exibido em (96) e (97) é possível determinar (98) e (99).

$$\Delta I_{rk} = R1_{Gk} \Delta E'_{qk} + R2_{Gk} \Delta \delta_k + \left( R3_{Gk} - R1_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} R1_{km} \right) \Delta \theta_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} R2_{km} \right) \Delta \theta_m + \left( R4_{Gk} - R2_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} R3_{km} \right) \Delta V_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} R4_{km} \right) \Delta V_m - R3_{Lk} \Delta P_{Lk} - R4_{Lk} \Delta Q_{Lk} \quad (98)$$

$$\Delta I_{mk} = M1_{Gk} \Delta E'_{qk} + M2_{Gk} \Delta \delta_k + \left( M3_{Gk} - M1_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} M1_{km} \right) \Delta \theta_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} M2_{km} \right) \Delta \theta_m + \left( M4_{Gk} - M2_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} M3_{km} \right) \Delta V_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} M4_{km} \right) \Delta V_m - M3_{Lk} \Delta P_{Lk} - M4_{Lk} \Delta Q_{Lk} \quad (99)$$

Nas equações (98) e (99) são apresentados os *mismatches* das componentes, real ( $\Delta I_{rk}$ ) e imaginária ( $\Delta I_{mk}$ ), da corrente em uma barra genérica  $k$  do SEP com a inclusão dos efeitos da variação da corrente de carga nesta barra que devem ir a zero no FPE (esta ferramenta considera o sistema operando em regime permanente).

Figura 12 – Balanço nodal de correntes na barra  $k$ .



Fonte: Elaboração do autor.

### 3.3 RESOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA UTILIZANDO O MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

Nesta seção é mostrado o procedimento para utilizar as equações algébricas do Modelo de Sensibilidade de Corrente para resolução do problema do fluxo de potência.

#### 3.3.1 Formulação inicial

Neste trabalho, para a determinação do ponto de operação por meio da resolução do fluxo de potência, os geradores são considerados ideais. Dito de outra forma, suas tensões e reatâncias internas são desprezadas. Estas considerações implicam em que as componentes das correntes injetadas ( $I_{rk}^{\text{ger}}$  e  $I_{mk}^{\text{ger}}$ ) passem a ser dadas por (100) e (101).

$$I_{rk}^{\text{ger}} = \frac{P_{Gk} \cos \theta_k + Q_{Gk} \text{sen} \theta_k}{V_k} \quad (100)$$

$$I_{mk}^{\text{ger}} = \frac{P_{Gk} \text{sen} \theta_k - Q_{Gk} \cos \theta_k}{V_k} \quad (101)$$

Nas equações (100) e (101), as variáveis  $P_{Gk}$  e  $Q_{Gk}$  representam as potências, ativa e reativa, injetadas pelo gerador conectado à barra  $k$ . Com isso, o balanço incremental de corrente exibido em (94) e (95) pode ser representado por (102) e (103).

$$\Delta I_{rk}^{\text{ger}} - \Delta I_{Lrk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{rkm} = 0 \quad (102)$$

$$\Delta I_{mk}^{\text{ger}} - \Delta I_{Lmk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{mkm} = 0 \quad (103)$$

A linearização das equações (100) e (101) com a substituição das derivadas parciais por “coeficientes de sensibilidade”, reais ( $R1_k^{\text{ger}}$ ,  $R2_k^{\text{ger}}$ ,  $R3_k^{\text{ger}}$  e  $R4_k^{\text{ger}}$ ) e imaginários ( $M1_k^{\text{ger}}$ ,  $M2_k^{\text{ger}}$ ,  $M3_k^{\text{ger}}$  e  $M4_k^{\text{ger}}$ ), leva às expressões (104) e (105).

$$\Delta I_{rk}^{\text{ger}} = R1_k^{\text{ger}} \Delta \theta_k + R2_k^{\text{ger}} \Delta V_k + R3_k^{\text{ger}} \Delta P_{Gk} + R4_k^{\text{ger}} \Delta Q_{Gk} \quad (104)$$

$$\Delta I_{mk}^{\text{ger}} = M1_k^{\text{ger}} \Delta \theta_k + M2_k^{\text{ger}} \Delta V_k + M3_k^{\text{ger}} \Delta P_{Gk} + M4_k^{\text{ger}} \Delta Q_{Gk} \quad (105)$$

É interessante notar que as componentes, real ( $I_{rk}^{\text{ger}}$ ) e imaginária ( $I_{mk}^{\text{ger}}$ ), da corrente injetada na barra  $k$ , mostradas em (100) e (101) possuem o mesmo equacionamento que as componentes da corrente consumida por uma carga expressas em (80) e (81), diferenciando-se apenas as variáveis de potência utilizadas.

Outro aspecto importante diz respeito às variáveis do sistema. Como o problema do fluxo de potência é estático, variações nas cargas ( $\Delta P_{Lk}$  e  $\Delta Q_{Lk}$ ) e nas gerações ( $\Delta P_{Gk}$  e  $\Delta Q_{Gk}$ ) apenas terão impacto em análises de estabilidade. Isso permite desprezar os termos associados a essas variações em (92), (93), (104) e (105). Assumindo estas considerações e substituindo (90), (91), (92), (93), (104) e (105) em (102) e (103) pode-se reescrever as equações linearizadas das componentes da corrente na barra  $k$  ( $\Delta I_{rk}$  e  $\Delta I_{mk}$ ), exibidas em (98) e (99), como no conjunto de equações (106) e (107).

$$\begin{aligned} \Delta I_{rk} = & \left( R1_k^{\text{ger}} - R1_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} R1_{km} \right) \Delta \theta_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} R2_{km} \right) \Delta \theta_m \\ & + \left( R2_k^{\text{ger}} - R2_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} R3_{km} \right) \Delta V_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} R4_{km} \right) \Delta V_m \end{aligned} \quad (106)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{mk} = & \left( M1_k^{\text{ger}} - M1_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} M1_{km} \right) \Delta \theta_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} M2_{km} \right) \Delta \theta_m + \\ & + \left( M2_k^{\text{ger}} - M2_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} M3_{km} \right) \Delta V_k - \left( \sum_{m \in \Omega_k} M4_{km} \right) \Delta V_m \end{aligned} \quad (107)$$

### 3.3.2 Equações dos resíduos de correntes

Os resíduos das potências, ativa ( $\Delta P_k$ ) e reativa ( $\Delta Q_k$ ), e das componentes, real ( $\Delta I_{rk}$ ) e imaginária ( $\Delta I_{mk}$ ), da corrente em uma barra  $k$  de um SEP são dados pelas equações (108) a (111).

$$\Delta P_k = P_k^{\text{esp}} - P_k^{\text{calc}} \quad (108)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{esp}} - Q_k^{\text{calc}} \quad (109)$$

$$\Delta I_{rk} = I_{rk}^{\text{esp}} - I_{rk}^{\text{calc}} \quad (110)$$

$$\Delta I_{mk} = I_{mk}^{\text{esp}} - I_{mk}^{\text{calc}} \quad (111)$$

Nas equações (108) – (111),  $P_k^{\text{calc}}$ ,  $Q_k^{\text{calc}}$ ,  $I_{rk}^{\text{calc}}$ ,  $I_{mk}^{\text{calc}}$ ,  $P_k^{\text{esp}}$ ,  $Q_k^{\text{esp}}$ ,  $I_{rk}^{\text{esp}}$  e  $I_{mk}^{\text{esp}}$  são, respectivamente, as potências ativa e reativa e as partes, real e imaginária das correntes, calculadas e especificadas na barra  $k$ . As potências ativas e reativas, especificadas e calculadas nesta barra, são determinadas por (112) a (115), nesta ordem.

$$P_k^{\text{esp}} = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (112)$$

$$Q_k^{\text{esp}} = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (113)$$

$$P_k^{\text{calc}} = V_k \left( I_{rk}^{\text{calc}} \cos \theta_k + I_{mk}^{\text{calc}} \text{sen} \theta_k \right) \quad (114)$$

$$Q_k^{\text{calc}} = V_k \left( I_{rk}^{\text{calc}} \text{sen} \theta_k - I_{mk}^{\text{calc}} \cos \theta_k \right) \quad (115)$$

A manipulação dos conjuntos de equações (108) – (111) e (114) – (115) possibilita a representação em (116) e (117) das componentes dos resíduos de corrente em função dos resíduos de potências ativa e reativa, inerentes à formulação convencional do problema de fluxo de potência.

$$\Delta I_{rk} = \frac{\Delta P_k \cos \theta_k + \Delta Q_k \text{sen} \theta_k}{V_k} \quad (116)$$

$$\Delta I_{mk} = \frac{\Delta P_k \text{sen} \theta_k - \Delta Q_k \cos \theta_k}{V_k} \quad (117)$$

Os resíduos de correntes indicados nas equações (116) – (117) são calculados de modo a formar o vetor de resíduos, mostrado no lado esquerdo das equações (106) e (107). Colocando (106) e (107) em sua forma matricial e substituindo os coeficientes do lado direito da equação por suas derivadas parciais por questão de simplificação, o sistema linearizado utilizado para determinar as variáveis algébricas do fluxo de potência é representado por (118).

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_k \cos \theta_k + \Delta Q_k \sin \theta_k}{V_k} \\ \frac{\Delta P_m \cos \theta_m + \Delta Q_m \sin \theta_m}{V_m} \\ \frac{\Delta P_k \sin \theta_k - \Delta Q_k \cos \theta_k}{V_k} \\ \frac{\Delta P_m \sin \theta_m - \Delta Q_m \cos \theta_m}{V_m} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \end{bmatrix} \quad (118)$$

### 3.3.3 Inclusão do UPFC no fluxo de potência

No capítulo anterior foram apresentadas as equações do modelo de injeções de corrente do UPFC, bem como as equações diferenciais que retratam seu comportamento dinâmico.

Para que seja possível observar a atuação deste dispositivo no SEP é necessário que suas equações sejam inseridas no fluxo de potência. Para tanto, é necessário supor que suas variáveis de estado sejam consideradas constantes em relação ao tempo, o que tornam suas derivadas temporais nulas. Esta observação permite que, em um ponto de operação do SEP, suas equações diferenciais sejam consideradas algébricas. Deste modo o problema fica limitado à determinação dos zeros de um conjunto de expressões algébricas não lineares que podem ser encontrados utilizando-se o algoritmo de Newton-Raphson, da mesma forma como em um fluxo de potência convencional (KOPCAK, 2007). Como neste trabalho a modelagem do fluxo de potência foi realizada por injeções de corrente, a essência do problema é satisfazer todos os resíduos de corrente nas barras onde o UPFC estiver instalado, como o mostrado nas equações (119) e (120).

$$\begin{cases} I_{rk}^{\text{ger}} + I_{rk}^{\text{upfc}} - I_{Lrk} - \sum_{m \in \Omega_k} I_{rkm} = 0 \\ I_{mk}^{\text{ger}} + I_{mk}^{\text{upfc}} - I_{Lmk} - \sum_{m \in \Omega_k} I_{mkm} = 0 \end{cases} \quad (119)$$

$$\begin{cases} I_{rm}^{\text{ger}} + I_{rm}^{\text{upfc}} - I_{Lrm} - \sum_{k \in \Omega_m} I_{rmk} = 0 \\ I_{mm}^{\text{ger}} + I_{mm}^{\text{upfc}} - I_{Lmm} - \sum_{k \in \Omega_m} I_{mmk} = 0 \end{cases} \quad (120)$$

Nas equações (119) e (120),  $I_{rk}^{\text{upfc}}$ ,  $I_{mk}^{\text{upfc}}$ ,  $I_{rm}^{\text{upfc}}$  e  $I_{mm}^{\text{upfc}}$  são as componentes, real e imaginária, das injeções de corrente nas barras  $k$  e  $m$  de instalação do UPFC devido às fontes

de tensão controláveis que representam seus conversores. É importante comentar que nas demais barras do SEP, os resíduos das componentes das correntes não diferem do fluxo de potência utilizado neste trabalho.

A estratégia de considerar que equações diferenciais se tornem equações algébricas, para um dado ponto de equilíbrio, é fundamentada na ferramenta de FPE (KOPCAK, 2007). Esta ferramenta considera que o sistema está funcionando em regime permanente, o que possibilita que as equações diferenciais dos dispositivos incluídos ao SEP (neste caso o UPFC) possam ser tratadas como equações algébricas. Desta forma, o fluxo de potência por injeções de corrente, baseado no método de Newton-Raphson pode ser utilizado, e as equações diferenciais do UPFC inseridas em conjunto com as equações algébricas que representam o sistema. Trabalhos relacionados a esse método utilizando o fluxo de potência convencional podem ser vistos em Kopcak *et al.* (2007), Kopcak (2007) e Valle e Araujo (2013).

Utilizando esta ferramenta, as equações do fluxo de potência formuladas por injeções de corrente, onde as variáveis dinâmicas do UPFC estão expandidas, são exibidas para as duas barras de instalação do dispositivo como na equação (121).

A matriz jacobiana apresentada em (121) é dividida em quatro blocos. O bloco  $J4^{upfc}$  tem sua construção muito parecida com a da jacobiana do fluxo de potência apresentada em (118). Entretanto, o diferencial está nos elementos marcados com o sinal (\*), onde são somadas as parcelas referentes às derivadas que relacionam as injeções das componentes, real e imaginária, das correntes injetadas pelo UPFC.



$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_p \\ \Delta \dot{X}_1 \\ \Delta \dot{V}_q \\ \Delta \dot{X}_2 \\ \Delta \dot{I}_q \\ \Delta \dot{X}_3 \\ \Delta I_{rk} \\ \Delta I_{rm} \\ \Delta I_{mk} \\ \Delta I_{mm} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \overbrace{\begin{matrix} \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial V_p} & \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial X_1} & \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial V_q} & \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial X_2} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial I_q} & \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial X_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}}^{J1^{upfc}} & \overbrace{\begin{matrix} \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_m} \end{matrix}}^{J2^{upfc}} \\ \overbrace{\begin{matrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial I_q} & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial I_q} & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \end{matrix}}^{J3^{upfc}} & \overbrace{\begin{matrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_m} \end{matrix}}^{J4^{upfc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_3 \\ \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \end{bmatrix} \quad (121)$$

As equações referentes ao desenvolvimento das derivadas parciais que compõem a matriz jacobiana (121) estão inseridas no Apêndice B. Após determinar a solução do fluxo de potência com a inclusão das equações diferenciais do UPFC (transformadas em equações algébricas), é possível ter uma visão completa desse dispositivo, visto que a nova Jacobiana do SEP inclui as informações do comportamento dinâmico do UPFC. Com isso, a ferramenta do FPE permite que a mesma modelagem do dispositivo possa ser usada tanto em análises estáticas, como em análises de estabilidade a pequenas perturbações do SEP.

### 3.4 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

Na sequência serão apresentadas as equações diferenciais linearizadas responsáveis pelas características dinâmicas dos geradores síncronos para a inclusão no Modelo de Sensibilidade de Corrente.

#### 3.4.1 Equações de movimento da máquina síncrona

De acordo com (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003), a equação de balanço (*swing*) de um gerador síncrono pode ser separada em duas equações diferenciais de primeira ordem que exibem o comportamento dinâmico das suas variáveis mecânicas (velocidade angular  $\omega_k$  e deslocamento angular  $\delta_k$  do rotor). As formas linearizadas destas equações são dadas nas equações (122) e (123).

$$\Delta\dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} \Delta P_k^m - \frac{1}{M_k} \Delta P_{Gk} - \frac{D_k}{M_k} \Delta\omega_k \quad (122)$$

$$\Delta\dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta\omega_k \quad (123)$$

Em (122) e (123),  $\omega_0$  é a velocidade síncrona,  $M_k$  é a constante de inércia e  $D_k$  se refere ao amortecimento inerente ao SEP. A potência mecânica de entrada do gerador  $k$  é representada por  $P_k^m$ .

A potência ativa disponível na barra  $k$  pode ser calculada em função da tensão e corrente terminal ( $\hat{V}_k$  e  $\hat{I}_{Gk}$ ) do gerador como em (124).

$$P_{Gk} = V_{dk} I_{Gdk} + V_{qk} I_{Gqk} \quad (124)$$

Com isso, a equação (124) representa o fluxo de potência ativa em função das tensões e correntes “referidas” ao sistema de coordenadas (d, q).

Substituindo as equações (62), (63), (70) e (71) em (124) chega-se a equação (125), cuja forma linearizada é dada em (126).

$$P_{Gk} = \frac{V_k}{2} \left[ V_k \left( \frac{1}{x'_{dk}} - \frac{1}{x_{qk}} \right) \text{sen}(2\delta_k - 2\theta_k) + 2E'_{qk} \frac{1}{x'_{dk}} \text{sen}(\delta_k - \theta_k) \right] \quad (125)$$

$$\Delta P_{Gk} = K1_k \Delta \delta_k + K2_k \Delta E'_{qk} + K3_k \Delta V_k - K1_k \Delta \theta_k \quad (126)$$

A substituição da equação (126) em (122) resulta nas variações incrementais da velocidade angular do rotor, de acordo com (127).

$$\Delta \dot{\omega}_k = -\frac{1}{M_k} \left( D_k \Delta \omega_k + K1_k \Delta \delta_k + K2_k \Delta E'_{qk} + K3_k \Delta V_k - K1_k \Delta \theta_k - \Delta P_k^m \right) \quad (127)$$

### 3.4.2 Dinâmica do circuito de campo da máquina síncrona

Considerando os efeitos da dinâmica do circuito de campo do gerador, as variações da tensão interna do gerador podem ser expressas de acordo com a equação (128) (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003).

$$T'_{d0k} \dot{E}'_{qk} = E_{fdk} - \left[ E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk}) I_{Gdk} \right] \quad (128)$$

Na equação (128), a grandeza  $T'_{d0k}$  é a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto,  $E_{fdk}$  representa a tensão aplicada ao circuito de campo do gerador síncrono e  $x_{dk}$  é a reatância síncrona de eixo direto.

Substituindo a tensão  $V_{qk}$  de (63) na corrente  $I_{Gdk}$  de (70) e o resultado em (128), determina-se (129).

$$\dot{E}'_{qk} = \frac{1}{T'_{d0k}} \left[ E_{fdk} - E'_{qk} \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} + V_k \left( \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} - 1 \right) \cos(\delta_k - \theta_k) \right] \quad (129)$$

A linearização da equação (129) resulta nas variações incrementais da tensão interna do gerador  $k$  e é mostrada em (130).

$$\Delta \dot{E}'_{qk} = -\frac{K4_k}{T'_{d0k}} \Delta E'_{qk} + \frac{K5_k}{T'_{d0k}} \Delta \delta_k + \frac{K6_k}{T'_{d0k}} \Delta V_k - \frac{K5_k}{T'_{d0k}} \Delta \theta_k + \frac{1}{T'_{d0k}} \Delta E_{fdk} \quad (130)$$

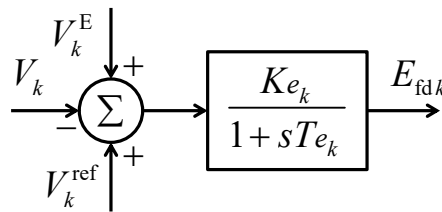
Na equação (130),  $K5_k$  e  $K6_k$  são denominados de coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono (FURINI, 2008).

### 3.4.3 Equação da excitatriz estática

A magnitude da tensão terminal de um gerador síncrono normalmente é controlada por um sistema de excitação, comumente chamado de Regulador Automático de Tensão (RAT). Este controle é realizado por meio da modulação da tensão de campo  $E_{fd}$ , mantendo-se assim a magnitude da tensão terminal ( $V_k$ ) em níveis pré-determinados ( $V_k^{\text{ref}}$ ).

Dentre os vários modelos existentes para o RAT, nos estudos da estabilidade a pequenas perturbações é usual a utilização de uma representação formada por um bloco de primeira ordem com ganho  $Ke$  e constante de tempo  $Te$ , conforme o diagrama de blocos mostrado na Figura 13 (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; DECKMANN; DA COSTA, 1994; KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003).

Figura 13 – Regulador Automático de Tensão.



Fonte: Elaboração do autor.

A partir do diagrama de blocos mostrado na Figura 13 pode-se escrever a equação (131), que representa a dinâmica da tensão de campo do gerador  $k$  no domínio da frequência, enquanto que a equação (132) representa esta mesma tensão no domínio do tempo.

$$E_{fdk} = \frac{Ke_k}{1 + sTe_k} (V_k^{\text{ref}} - V_k + V_k^E) \quad (131)$$

$$\dot{E}_{fdk} = -\frac{E_{fdk}}{Te_k} + \frac{Ke_k}{Te_k} (V_k^{\text{ref}} - V_k + V_k^E) \quad (132)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, a forma linearizada da tensão de campo do gerador  $k$  é dada pela equação (133).

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = K42_k \Delta E_{fdk} + K46_k \Delta V_k + K47_k \Delta V_k^{\text{ref}} + \frac{Ke_k}{Te_k} \Delta V_k^E \quad (133)$$

Caso nenhum sinal suplementar seja aplicado à malha de controle do RAT, a tensão suplementar  $V_k^E$  e seu desvio  $\Delta V_k^E$  assumem o valor zero nas equações (131) – (133).

### 3.5 REPRESENTAÇÃO DO MSC PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS NA FORMA DE ESPAÇO DE ESTADOS

O uso das equações diferenciais (123), (127), (130) e (133), e das equações algébricas (96) e (97) permite representar o sistema multimáquinas utilizando o MSC no domínio do tempo.

Para a representação no domínio do tempo, equações (134) a (137), foi considerado um sistema multimáquinas formado por  $NG$  geradores e  $NB$  barras. Além disso, considerou-se que  $\Delta \mathbf{x}$  é o vetor de variáveis de estado,  $\Delta \mathbf{y}$  é o vetor de variáveis algébricas e  $\Delta \mathbf{u}$  é o vetor de entradas do SEP multimáquinas.

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (134)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \left[ \left[ \Delta \omega_1 \quad \Delta \delta_1 \quad \Delta E'_{q1} \quad \Delta E'_{fd1} \right] \cdots \left[ \Delta \omega_{NG} \quad \Delta \delta_{NG} \quad \Delta E'_{qNG} \quad \Delta E'_{fdNG} \right] \right]^T \quad (135)$$

$$\Delta \mathbf{u} = \left[ \left[ \Delta P_1^m \quad \Delta V_1^{\text{ref}} \quad \Delta P_{L1} \quad \Delta Q_{L1} \right] \cdots \left[ \Delta P_{NG}^m \quad \Delta V_{NG}^{\text{ref}} \quad \Delta P_{LNG} \quad \Delta Q_{LNG} \right] \right]^T \quad (136)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \left[ \left[ \Delta \theta_1 \quad \Delta V_1 \right] \cdots \left[ \Delta \theta_{NB} \quad \Delta V_{NB} \right] \right]^T \quad (137)$$

Na equação (134),  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  correspondem, respectivamente, às matrizes de estados e de entradas do SEP.

A representação completa do MSC para sistemas multimáquinas no domínio do tempo é realizada utilizando-se as formulações matriciais (138) e (139), considerando  $k = \{1, \dots, NG\}$  e  $l = \{1, \dots, NB\}$ .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_k \\ \Delta \dot{\delta}_k \\ \Delta \dot{E}'_{qk} \\ \Delta \dot{E}'_{fdk} \end{bmatrix}}_{\Delta \dot{\mathbf{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{D_k}{M_k} & -\frac{K1_k}{M_k} & -\frac{K2_k}{M_k} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K5_k}{T'_{d0k}} & -\frac{K4_k}{T'_{d0k}} & \frac{1}{T'_{d0k}} \\ 0 & 0 & 0 & K42_k \end{bmatrix}}_{\mathbf{J1}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E'_{fdk} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{K1_k}{M_k} & -\frac{K3_k}{M_k} \\ 0 & 0 \\ -\frac{K5_k}{T'_{d0k}} & \frac{K6_k}{T'_{d0k}} \\ 0 & K46_k \end{bmatrix}}_{\mathbf{J2}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{y}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{M_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K47_k & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B1}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{u}} \quad (138)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{R2}_{Gk} & \mathbf{R1}_{Gk} & 0 \\ 0 & \mathbf{M2}_{Gk} & \mathbf{M1}_{Gk} & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{J3}} \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E'_{fdk} \end{bmatrix} + \mathbf{J4} \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & R3_{Lk} & R4_{Lk} \\ 0 & 0 & M3_{Lk} & M4_{Lk} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B2}} \begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \end{bmatrix} \quad (139)$$

Devido à complexidade das expressões (138) e (139) e para facilitar a notação, é usual utilizar uma forma matricial mais compacta para representá-las, conforme (140).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1} & \mathbf{J2} \\ \mathbf{J3} & \mathbf{J4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B1} \\ \mathbf{B2} \end{bmatrix} [\Delta \mathbf{u}] \quad (140)$$

A eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta \mathbf{y}$  da equação (140) permite realizar a representação na forma de espaço de estados mostrada na equação (134) onde a matriz de estados  $\mathbf{A}$  e a matriz de entradas  $\mathbf{B}$  são definidas em (141) e (142).

$$\mathbf{A} = \mathbf{J1} - \mathbf{J2J4}^{-1}\mathbf{J3} \quad (141)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B1} - \mathbf{J2J4}^{-1}\mathbf{B2} \quad (142)$$

### 3.6 INCLUSÃO DO UPFC NO MSC

Visto que as características dinâmicas do UPFC já foram consideradas em (121), os dados deste controlador já estão contidos nas submatrizes  $\mathbf{J1}^{\text{upfc}}$ ,  $\mathbf{J2}^{\text{upfc}}$ ,  $\mathbf{J3}^{\text{upfc}}$  e  $\mathbf{J4}^{\text{upfc}}$  que podem ser incluídas diretamente no MSC, conforme as equações (143) e (144).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_k \\ \Delta \dot{\delta}_k \\ \dot{E}'_{qk} \\ \Delta \dot{E}_{fdk} \\ \Delta \dot{V}_p \\ \Delta \dot{X}_1 \\ \Delta \dot{V}_q \\ \Delta \dot{X}_2 \\ \Delta \dot{I}_q \\ \Delta \dot{X}_3 \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_u \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{J1} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial V_p} & \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial X_1} & \frac{\partial \dot{V}_p}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial V_q} & \frac{\partial \dot{V}_q}{\partial X_2} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial I_q} & \frac{\partial \dot{I}_q}{\partial X_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J1}_u} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_3 \\ \Delta \mathbf{x}_u \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{x}_u} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{J2} \\ \mathbf{J2}_u \end{bmatrix}}_{\mathbf{J2}_u} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix}}_{\Delta \theta_l} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B1} \\ \mathbf{B1}_u \end{bmatrix}}_{\mathbf{B1}_u} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta \mathbf{u}_u \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{u}_u} \quad (143)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{0} \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{J3}_{J3_U} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial I_q} & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial I_q} & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_3 \end{bmatrix} + \underbrace{J4}_{J4_U} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} + \underbrace{B2}_{B2_U} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (144)$$



É importante ressaltar que a matriz  $\mathbf{J4}^{\text{upfc}}$  é a mesma apresentada anteriormente em (121). Quer dizer, é a matriz do fluxo de potência por injeções de corrente acrescidas das derivadas relativas ao UPFC nos respectivos elementos.

Colocando as equações matriciais (143) e (144) na forma compacta, obtém-se (145).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_U \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1}_U & \mathbf{J2}_U \\ \mathbf{J3}_U & \mathbf{J4}_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_U \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B1}_U \\ \mathbf{B2}_U \end{bmatrix} [\Delta \mathbf{u}_U] \quad (145)$$

Eliminando-se o vetor de variáveis algébricas  $\Delta \mathbf{y}$ , é obtida a formulação do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa pela equação (146).

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_U = (\mathbf{J1}_U - \mathbf{J2}_U \mathbf{J4}_U^{-1} \mathbf{J3}_U) \Delta \mathbf{x}_U + (\mathbf{B1}_U - \mathbf{J2}_U \mathbf{J4}_U^{-1} \mathbf{B2}_U) \Delta \mathbf{u}_U \quad (146)$$

### 3.7 CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO

Nesta seção serão exibidas as configurações dos controladores ESP e POD utilizadas neste trabalho. Serão abordados os procedimentos para a inclusão dos modelos destes controladores no MSC. O ESP será conectado à malha de controle de tensão dos geradores síncronos visando fornecer amortecimento adicional aos modos locais de oscilação. O controlador POD será inserido na malha de controle do dispositivo FACTS UPFC com o objetivo de fornecer maior amortecimento às oscilações de modo interárea do SEP.

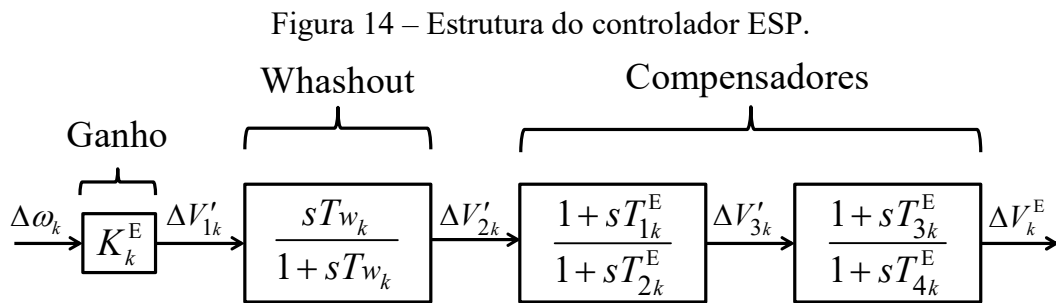
#### 3.7.1 Estabilizadores de Sistemas de Potência

A partir das décadas de 1940 e 1950 os geradores síncronos produzidos possuíam altos valores de reatância síncrona. Isso levou à uma diminuição do torque de sincronização, acarretando em máquinas com fraca estabilidade em regime transitório. (PAL; CHAUDHURI, 2005) Para tentar contornar este problema de estabilidade, foram introduzidos nos SEPs reguladores de tensão de atuação rápida e contínua. Sua instalação eliminou o efeito da alta reação de armadura, mas também criou outro problema. Oscilações de pequena magnitude e baixa frequência (0,8 a 1,8 Hz) começaram a surgir e, muitas vezes persistiam por longos períodos de tempo sendo que, em alguns casos impunham limitações na capacidade de transferência de potência dos SEPs. Este problema ocorria geralmente quando o gerador

operava em condições de elevado carregamento e estava conectada ao SEP por meio de uma rede de transmissão fraca. Nesta situação, o RAT produz torque de amortecimento negativo, o que pode levar o SEP à instabilidade. Os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) foram desenvolvidos para auxiliar no amortecimento destas oscilações através da modulação do sistema de excitação dos geradores (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981).

Deste modo, o ESP introduz um sinal externo de estabilização à malha de controle do RAT, o que resulta em um torque de amortecimento no gerador contrário às flutuações da velocidade do rotor (PAL; CHAUDHURI, 2005).

A estrutura básica do ESP é mostrada na Figura 14 e é normalmente constituída de um ganho, um filtro *washout* e dois blocos de compensação de fase.



O ganho  $K_k^E$  determina a quantidade de amortecimento introduzida pelo ESP. Idealmente, o ganho deve ser fixado em um valor correspondente ao máximo de amortecimento; no entanto, muitas vezes é limitado por outros fatores (KUNDUR, 1994).

O bloco de *washout* funciona como um filtro passa-alta com uma constante de tempo  $T_w$  convenientemente ajustada para permitir que o controlador só atue em períodos transitórios. O valor de  $T_w$  não é crítico e pode estar situado na faixa entre 1 a 20 segundos. A principal consideração a ser feita é que esta constante seja grande o suficiente para não alterar os sinais de estabilização nas frequências de interesse, porém não a ponto de levar a saída do gerador a excursões de tensão indesejáveis durante condições de desconexão do sistema (KUNDUR, 1994).

O bloco de compensação de fase fornece as características de avanço de fase apropriadas para compensar o atraso de fase entre a saída da malha de controle do RAT e o torque produzido pelo gerador. Na Figura 14 são mostrados dois blocos de primeira ordem no

qual as constantes de tempo  $T_{1k}^E$ ,  $T_{2k}^E$ ,  $T_{3k}^E$  e  $T_{4k}^E$  respondem pela compensação de fase desejada, sendo usual na literatura considerar  $T_{1k}^E = T_{3k}^E$  e  $T_{2k}^E = T_{4k}^E$  (KUNDUR, 1994).

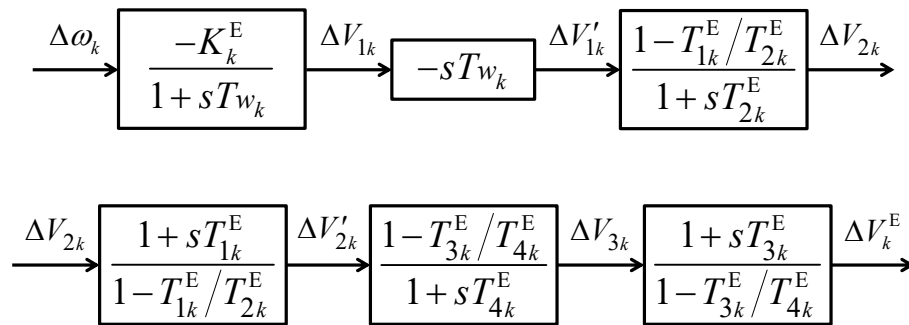
Na prática, dois ou mais blocos de primeira ordem podem ser utilizados para conseguir a compensação de fase desejada. Normalmente, a faixa de frequência de interesse é de 0,7 a 2,0 Hz, e a estrutura de avanço de fase deve proporcionar uma compensação sobre toda esta faixa. O controlador deve ser capaz de compensar as características de fase mesmo com alterações das condições do sistema. Conseqüentemente, um compromisso deve ser assumido no ajuste das constantes de tempo para que uma característica aceitável de compensação seja alcançada para diferentes condições de operação do SEP.

Uma vez que a principal função do ESP é controlar as oscilações do rotor, a velocidade de rotor ( $\Delta\omega_k$ ) tem sido o sinal de entrada mais frequentemente recomendado na literatura e será o utilizado neste trabalho (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003). O sinal de saída ( $\Delta V_k^E$ ) é adicionado à malha de controle de tensão do gerador síncrono.

### 3.7.2 Inclusão do ESP no MSC

Considere a expansão do diagrama de blocos que representa o modelo do ESP, da Figura 14, exibida na Figura 15.

Figura 15 – Divisão dos blocos *washout* e avanço/atraso.



Fonte: Elaboração do autor.

Esta ampliação faz com que o desempenho dinâmico do ESP seja descrito por três novas variáveis de estado ( $\Delta V_{1k}$ ,  $\Delta V_{2k}$  e  $\Delta V_{3k}$ ) cujas equações serão incluídas no MSC.

A partir do diagrama de blocos da Figura 7 são escritas as expressões das novas variáveis de estado e do sinal de saída ( $\Delta V_k^E$ ), conforme as equações (147) – (150).

$$\Delta \dot{V}_{1k} = -\frac{1}{T_{w_k}} \left( K_k^E \Delta \omega_k + \Delta V_{1k} \right) \quad (147)$$

$$\Delta \dot{V}_{2k} = -\frac{1}{T_{2k}^E} \left[ \left( 1 - \frac{T_{1k}^E}{T_{2k}^E} \right) \cdot \left( K_k^E \Delta \omega_k + \Delta V_{1k} \right) - \Delta V_{2k} \right] \quad (148)$$

$$\Delta \dot{V}_{3k} = -\frac{1}{T_{4k}^E} \left\{ \left( 1 - \frac{T_{3k}^E}{T_{4k}^E} \right) \left[ \Delta V_{2k} + \frac{T_{1k}^E}{T_{2k}^E} \left( K_k^E \Delta \omega_k + \Delta V_{1k} \right) \right] - \Delta V_{3k} \right\} \quad (149)$$

$$\Delta V_k^E = \Delta V_{3k} + \frac{T_{3k}^E}{T_{4k}^E} \left[ \Delta V_{2k} + \frac{T_{1k}^E}{T_{2k}^E} \left( K_k^E \cdot \Delta \omega_k + \Delta V_{1k} \right) \right] \quad (150)$$

O procedimento para a inclusão do ESP ao MSC termina com a adição do sinal suplementar ( $\Delta V_k^E$ ) à malha de controle do RAT da Figura 13. Com isso é possível obter a equação (151) linearizada para a tensão de campo.

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = -\frac{1}{T_{e_k}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{e_k}}{T_{e_k}} \Delta V_k^{\text{ref}} - \frac{K_{e_k}}{T_{e_k}} \Delta V_k + \Delta V_{3k} + \frac{T_{3k}^E}{T_{4k}^E} \left[ \Delta V_{2k} + \frac{T_{1k}^E}{T_{2k}^E} \left( K_k^E \Delta \omega_k + \Delta V_{1k} \right) \right] \quad (151)$$

Expandindo o conjunto de equações (147) – (149) que representam a dinâmica do ESP e a equação (151) e substituindo nas mesmas os termos que multiplicam os respectivos desvios por coeficientes de sensibilidade (ver Apêndice C) é possível obter as equações (152) – (155).

$$\Delta \dot{V}_{1k} = K_{11k} \Delta \omega_k + K_{12k} \Delta V_{1k} \quad (152)$$

$$\Delta \dot{V}_{2k} = K_{21k} \Delta \omega_k + K_{22k} \Delta V_{1k} + K_{23k} \Delta V_{2k} \quad (153)$$

$$\Delta \dot{V}_{3k} = K_{31k} \Delta \omega_k + K_{32k} \Delta V_{1k} + K_{33k} \Delta V_{2k} + K_{34k} \Delta V_{3k} \quad (154)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{fdk} = & K_{41k} \Delta \omega_k + K_{42k} \Delta E_{fdk} + K_{43k} \Delta V_{1k} + K_{44k} \Delta V_{2k} + K_{45k} \Delta V_{3k} + K_{46k} \Delta V_k + \\ & + K_{47k} \Delta V_k^{\text{ref}} \end{aligned} \quad (155)$$

As equações dinâmicas do ESP, representadas por (152) – (155), são incluídas na formulação geral do MSC mostrada em (138) e (139) dando origem às equações (156) e (157).

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_k \\ \Delta \dot{\delta}_k \\ \Delta \dot{E}'_{qk} \\ \Delta \dot{E}'_{fdk} \\ \Delta \dot{V}_{1k} \\ \Delta \dot{V}_{2k} \\ \Delta \dot{V}_{3k} \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{D_k}{M_k} & -\frac{K1_k}{M_k} & -\frac{K2_k}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K5_k}{T'_{d0k}} & -\frac{K4_k}{T'_{d0k}} & \frac{1}{T'_{d0k}} & 0 & 0 & 0 \\ K41_k & 0 & 0 & K42_k & K43_k & K44_k & K45_k \\ K11_k & 0 & 0 & 0 & K12_k & 0 & 0 \\ K21_k & 0 & 0 & 0 & K22_k & K23_k & 0 \\ K31_k & 0 & 0 & 0 & K32_k & K33_k & K34_k \end{bmatrix}}_{\mathbf{J1}_E} \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E'_{fdk} \\ \Delta V_{1k} \\ \Delta V_{2k} \\ \Delta V_{3k} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{K1_k}{M_k} & -\frac{K3_k}{M_k} \\ 0 & 0 \\ -\frac{K5_k}{T'_{d0k}} & \frac{K6_k}{T'_{d0k}} \\ 0 & K46_k \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{J2}_E} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix}}_{\Delta y} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{M_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K47_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B1}_E} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \end{bmatrix}}_{\Delta u} \quad (156)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{R2}_{Gk} & \mathbf{R1}_{Gk} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M2}_{Gk} & \mathbf{M1}_{Gk} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{J3}_E} \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E'_{fdk} \end{bmatrix} + \mathbf{J4} \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\mathbf{R3}_{Lk} & -\mathbf{R4}_{Lk} \\ 0 & 0 & -\mathbf{M3}_{Lk} & -\mathbf{M4}_{Lk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \end{bmatrix} \quad (157)
\end{aligned}$$

As equações (156) e (157) podem ser representadas na sua forma compacta de acordo com (158).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_E \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1}_E & \mathbf{J2}_E \\ \mathbf{J3}_E & \mathbf{J4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_E \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B1}_E \\ \mathbf{B2} \end{bmatrix} [\Delta \mathbf{u}] \quad (158)$$

A eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta \mathbf{y}$  da equação (158) resulta na formulação do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa por (159).

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_E = (\mathbf{J1}_E - \mathbf{J2}_E \mathbf{J4}^{-1} \mathbf{J3}_E) \Delta \mathbf{x}_E + (\mathbf{B1}_E - \mathbf{J2}_E \mathbf{J4}^{-1} \mathbf{B2}) \Delta \mathbf{u} \quad (159)$$

É importante observar que a inclusão das equações do controlador ESP ao MSC acrescenta somente o coeficiente  $K_{41k}$  à formulação geral apresentada em (138).

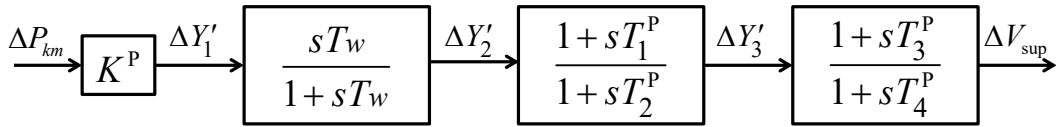
### 3.7.3 Power Oscillation Damping

Nos atuais sistemas de potência, interligados por longas linhas de transmissão, começaram a surgir oscilações de baixa frequência entre diferentes áreas, denominadas de modo de oscilação interárea. Estas oscilações são caracterizadas por frequências na faixa entre 0,1 a 0,8 Hz (LARSEN; SWANN: 1981; KLEIN et al., 1991). Para este tipo de oscilação, o ESP convencional, baseado em um sinal de entrada disponível localmente e aplicado na malha de controle de tensão do gerador, pode não ser suficientemente eficaz para se introduzir amortecimento. Nesta situação, os dispositivos FACTS, graças à sua capacidade de melhorar a controlabilidade, a segurança, a estabilidade e a flexibilidade dos sistemas em que está instalado oferecem uma solução alternativa (NGUIMFACK-NDONGMO et al., 2014).

Os FACTS não são capazes de introduzir amortecimento adicional suficiente para o sistema operar dentro de uma faixa segura. Contudo, se a estes dispositivos forem adicionados o controlador *Power Oscillation Damping* (POD), o conjunto FACTS – POD será capaz de inserir amortecimento suplementar às oscilações do SEP, em especial às do tipo interárea (PUPIN; PINA; ARAUJO, 2009).

A estrutura básica do controlador POD utilizada neste trabalho é semelhante à de um ESP convencional e é apresentada na Figura 16. Ela é responsável por inserir um sinal suplementar ( $\Delta V_{\text{sup}}$ ) na malha de controle do dispositivo UPFC, que modula a componente de eixo em quadratura  $V_p$  do conversor secundário do FACTS estudado.

Figura 16 – Estrutura do controlador POD.



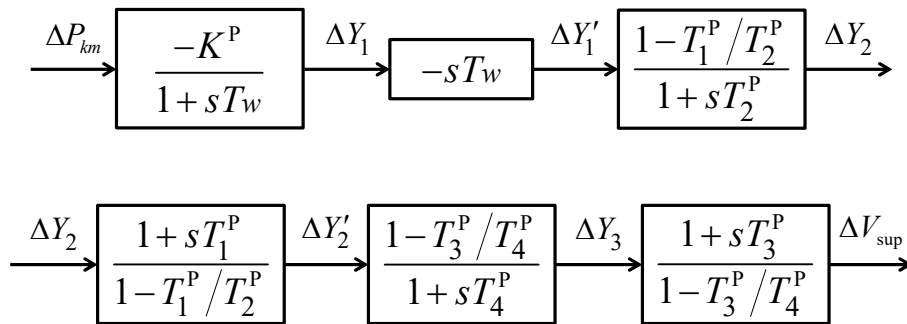
Fonte: Elaboração do autor.

A estrutura utilizada, assim como a do ESP adotada, é formada por um ganho estabilizante ( $K^P$ ), um filtro *washout* com constante de tempo  $T_w$ , e por blocos de avanço/atraso de fase onde os valores das constantes de tempo ( $T_1^P$ ,  $T_2^P$ ,  $T_3^P$  e  $T_4^P$ ) usualmente são considerados  $T_1^P = T_3^P$  e  $T_2^P = T_4^P$ . O sinal utilizado como entrada para o controlador é a variação do fluxo de potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) em uma linha de transmissão adjacente à instalação do UPFC, que está disponível localmente, o que reduz significativamente seus custos de implantação.

### 3.7.4 Inclusão do POD no MSC

O procedimento para inclusão do controlador POD no MSC é feito de maneira análoga ao realizado para o ESP. Isso implica em ampliar o diagrama de blocos da Figura 16 conforme o mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Modelo dinâmico do UPFC equipado com POD.



Fonte: Elaboração do autor.

Pela análise da Figura 17 é possível determinar as equações diferenciais que representam o modelo dinâmico do controlador POD, de acordo com o exibido pelo conjunto de equações (160) – (162).

$$\Delta \dot{Y}_1 = -\frac{1}{T_w^P} (K^P \Delta P_{km} + \Delta Y_1) \quad (160)$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = -\frac{1}{T_2^p} \left[ \left( 1 - \frac{T_1^p}{T_2^p} \right) (K^p \Delta P_{km} + \Delta Y_1) - \Delta Y_2 \right] \quad (161)$$

$$\Delta \dot{Y}_3 = -\frac{1}{T_4^p} \left\{ \left( 1 - \frac{T_3^p}{T_4^p} \right) \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_1^p}{T_2^p} (K^p \Delta P_{km} + \Delta Y_1) \right] - \Delta Y_3 \right\} \quad (162)$$

O sinal suplementar de saída do controlador POD é mostrado em (163).

$$\Delta V_{\text{sup}} = \Delta Y_3 + \frac{T_3^p}{T_4^p} \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_1^p}{T_2^p} (K^p \Delta P_{km} + \Delta Y_1) \right] \quad (163)$$

Finalmente a equação (163), que representa o sinal suplementar de saída do POD, é substituída na equação (35) que descreve a dinâmica da tensão de controle em quadratura do conversor série do UPFC dando origem à equação (164).

$$\Delta \dot{V}_p = \frac{1}{T_m} \left\{ K1^u (\Delta P_m^{\text{ref}} - \Delta P_m^{\text{ctrl}}) + (\Delta X_1 - \Delta V_p) - \left[ \Delta Y_3 + \frac{T_3^p}{T_4^p} \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_1^p}{T_2^p} (K^p \Delta P_{km} + \Delta Y_1) \right] \right] \right\} \quad (164)$$

O sinal de entrada do controlador POD é o fluxo de potência ativa (na sua forma linearizada  $-\Delta P_{km}$ ) em uma linha de transmissão adjacente à instalação do UPFC, dado pela equação (165).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (165)$$

Os coeficientes de sensibilidade de potência ativa ( $A1_{km}$ ,  $A2_{km}$  e  $A3_{km}$ ), como o mostrado em Da Costa (1992), são dados no Apêndice C.

A manipulação adequada do conjunto de equações diferenciais que regem o comportamento do POD, (160) – (162), e da tensão em quadratura do conversor em série mostrada em (164), resulta na série de equações (166) – (169) com os termos que multiplicam os respectivos desvios apresentados no Apêndice C.

$$\Delta \dot{Y}_1 = C11 \Delta \theta_k + C12 \Delta \theta_m + C13 \Delta V_k + C14 \Delta V_m + C15 \Delta Y_1 \quad (166)$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = C21 \Delta \theta_k + C22 \Delta \theta_m + C23 \Delta V_k + C24 \Delta V_m + C25 \Delta Y_1 + C26 \Delta Y_2 \quad (167)$$

$$\Delta \dot{Y}_3 = C31 \Delta \theta_k + C32 \Delta \theta_m + C33 \Delta V_k + C34 \Delta V_m + C35 \Delta Y_1 + C36 \Delta Y_2 + C37 \Delta Y_3 \quad (168)$$



$$\Delta \dot{V}_p = \frac{1}{T_m} \left[ K1^u \left( \Delta P_m^{\text{ref}} - \Delta P_m^{\text{ctrl}} \right) + \Delta X_1 - \Delta V_p \right] + C41 \Delta \theta_k + C42 \Delta \theta_m + C43 \Delta V_k + C44 \Delta V_m + C45 \Delta Y_1 + C46 \Delta Y_2 + C47 \Delta Y_3 \quad (169)$$

Com a inserção das equações (166) – (168) e dos elementos complementares da expressão (35), em (143) e (144), é possível definir a representação do conjunto UPFC/POD no MSC, que fica representado pelas equações matriciais (170) e (171).

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_k \\ \Delta\dot{\delta}_k \\ \dot{E}'_{qk} \\ \Delta\dot{E}'_{fdk} \\ \Delta\dot{V}_p \\ \Delta\dot{X}_1 \\ \Delta\dot{V}_q \\ \Delta\dot{X}_2 \\ \Delta\dot{I}_q \\ \Delta\dot{X}_3 \\ \Delta\dot{Y}_1 \\ \Delta\dot{Y}_2 \\ \Delta\dot{Y}_3 \end{bmatrix}}_{\Delta\dot{x}_p} = \underbrace{\begin{bmatrix} J1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{J1_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} J2 \\ C11 & C12 & C13 & C14 \\ C21 & C22 & C23 & C24 \\ C31 & C32 & C33 & C34 \end{bmatrix}}_{J2_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} B1 \\ K1^u/T_m \\ K1^u/T1^u \\ K2^u/T_m \\ K2^u/T2^u \\ K3^u/T_m \\ K3^u/T3^u \end{bmatrix}}_{B1_p} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\omega_k \\ \Delta\delta_k \\ \dot{E}'_{qk} \\ \Delta\dot{E}'_{fdk} \\ \Delta\dot{V}_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_3 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix}}_{\Delta x_p} \quad (170)
\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\mathbf{J3}}_{\mathbf{J3}_p} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial I_q} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial I_q} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E'_{fdk} \\ \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_3 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} + \mathbf{B2} \begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (171)$$

É necessário que sejam adicionadas aos elementos assinalados pelo sinal ( $\otimes$ ), em  $\mathbf{J2}_p$ , os elementos referentes aos coeficientes do POD da equação (35).

Escrevendo na forma compacta, as equações (170) e (171) são definidas como em (172).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_p \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1}_p & \mathbf{J2}_p \\ \mathbf{J3}_p & \mathbf{J4}_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_p \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B1}_p \\ \mathbf{B2}_U \end{bmatrix} [\Delta \mathbf{u}_U] \quad (172)$$

A eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta \mathbf{y}$  da equação (172) resulta na formulação do sistema multimáquinas com a inclusão do conjunto UPFC – POD no espaço de estados, expressa por (173).

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_p = (\mathbf{J1}_p - \mathbf{J2}_p \mathbf{J4}_U^{-1} \mathbf{J3}_p) \Delta \mathbf{x}_p + (\mathbf{B1}_p - \mathbf{J2}_p \mathbf{J4}_U^{-1} \mathbf{B2}_U) \Delta \mathbf{u}_U \quad (173)$$

### 3.7.5 Inclusão dos controladores ESPs e do conjunto UPFC – POD no MSC

Para o estudo de um SEP modelado pelo MSC com a inclusão das máquinas síncronas, RATs, ESPs e do conjunto PI – UPFC – POD é necessário que as equações (156) e (157) sejam adicionadas às equações (170) e (171) dando origem à representação exibida nas expressões matriciais (174) e (175).



$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\mathbf{J3}}_{\mathbf{J3}_T} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial I_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial V_q} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mk}}{\partial I_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_p} & 0 & \frac{\partial \Delta I_{mm}}{\partial V_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{J3}_T} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ E'_{qk} \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_3 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \\ \Delta V_{1k} \\ \Delta V_{2k} \\ \Delta V_{3k} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{x}_T} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mk}^*}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{mm}^*}{\partial V_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} + \mathbf{B2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_k^m \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta P_{Lk} \\ \Delta Q_{Lk} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta P_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta Q_m^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \\ \Delta V_k^{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (175)$$

Finalmente, a equação (176) mostra a forma compacta das equações (174) e (175) que descrevem a modelagem completa de todos os componentes considerados no SEP.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_T \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1}_T & \mathbf{J2}_T \\ \mathbf{J3}_T & \mathbf{J4}_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_T \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B1}_T \\ \mathbf{B2}_U \end{bmatrix} [\Delta \mathbf{u}_U] \quad (176)$$

Novamente eliminando o vetor de variáveis algébricas  $\Delta \mathbf{y}$  resulta na formulação completa do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa por (177).

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_T = (\mathbf{J1}_T - \mathbf{J2}_T \mathbf{J4}_U^{-1} \mathbf{J3}_T) \Delta \mathbf{x}_T + (\mathbf{B1}_T - \mathbf{J2}_T \mathbf{J4}_U^{-1} \mathbf{B2}_U) \Delta \mathbf{u}_U \quad (177)$$

### 3.8 CONCLUSÕES

Neste Capítulo foi apresentada a modelagem matemática dos componentes do SEP utilizados neste trabalho e sua inclusão no Modelo de Sensibilidade de Corrente, considerando um sistema multimáquinas. Este modelo é linear e fundamenta-se no balanço nodal de correntes. Além disto, possui características que tornam possível a inclusão de modelos de novos dispositivos sem que a modelagem anterior seja desprezada; ou seja, a cada novo dispositivo representado, ocorre um aumento de elementos e/ou submatrizes em relação à modelagem inicial. Ao final, o SEP fica representado por um conjunto de variáveis de estado e de variáveis algébricas.

Após a construção das equações algébricas do MSC, as equações de injeção de corrente em conjunto com as equações diferenciais da estrutura de controle do UPFC são incluídas em uma formulação do SEP. Esta formulação é baseada nos resíduos de corrente nas barras e o ponto de operação deste sistema é encontrado com o algoritmo de Newton-Raphson, inspirando-se na ferramenta do FPE.

Após a finalização do MSC com a inclusão da dinâmica dos geradores e RATs, as submatrizes  $\mathbf{J1}^{upfc}$ ,  $\mathbf{J2}^{upfc}$ ,  $\mathbf{J3}^{upfc}$  e  $\mathbf{J4}^{upfc}$  do modelo de injeções de corrente do UPFC apresentado no Capítulo 2, foram incluídas diretamente no modelo.

Finalmente, foi considerada a inclusão dos modelos matemáticos dos controladores suplementares. Primeiro a do controlador POD, em seguida a dos ESPs separadamente e, por fim, foram incluídos simultaneamente o UPFC com sua estrutura de controle, o POD e os ESPs.

No próximo Capítulo serão apresentadas técnicas de otimização estocástica bio-inspiradas para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs e POD visando a operação do sistema com adequado amortecimento de seus modos oscilatórios de baixa frequência.



## 4 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA A PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES

### 4.1 INTRODUÇÃO

A Inteligência de Enxames (IE) estuda o comportamento coletivo de indivíduos dentro de sistemas auto-organizados e descentralizados (BENI; WANG, 1993). Faz parte de um ramo da inteligência artificial (IA), que se tornou bastante popular na última década (BLUM; LI, 2008).

A IE é inspirada no comportamento coletivo de enxames sociais como formigas, cupins, abelhas, vermes, bando de pássaros e cardumes de peixes entre outros. Embora estes enxames sejam formados por indivíduos relativamente pouco sofisticados, eles exibem um comportamento coordenado que direciona os enxames para seus objetivos desejados. Isso geralmente resulta em um comportamento de auto-organização de todo o sistema. Deste modo, a IE é, essencialmente, a auto-organização de sistemas formados por múltiplos agentes, baseados em regras de interação simples entre indivíduos. Por exemplo, cupins e minhocas são capazes de construir ninhos sofisticados, enquanto formigas e abelhas utilizam este comportamento coletivo na busca de alimentos. Tipicamente, formigas interagem umas com as outras por meio de trilhas de feromônios, a fim de encontrar o caminho mais curto entre seu ninho e as fontes de alimento. Em uma colônia de abelhas, o papel de informante é desempenhado por abelhas exploradoras, que são as responsáveis pela busca de novas áreas promissoras de fontes de alimento. Neste caso, a comunicação entre as abelhas é realizada na "área de dança" da colmeia e coordenada pelas abelhas exploradoras. Durante a descoberta das novas fontes de alimentos, uma escolha entre a diversificação (coleta de novas informações) e a intensificação (o uso da informação existente) deve ser realizada pela colônia de abelhas (BEEKMAN; SWORD; SIMPSON, 2008). Ou seja, a colônia de abelhas deve escolher entre explorar as fontes de alimentos existentes ou procurar novas fontes, de modo a maximizar a ingestão total de néctar, minimizando os esforços globais de forrageamento.

Nos últimos anos, vários métodos que utilizam o conceito de IE estão sendo utilizados para solução dos mais variados problemas de otimização. Dentre esses métodos pode-se

destacar a otimização por colônia de formigas (ACO - do inglês *Ant Colony Optimization*) (DORIGO; DI CARO, 1999), otimização por enxame de partículas (PSO - do inglês *Particle Swarm Optimization*) (KENNEDY; EBERHART, 1995) e colônia de abelhas artificiais (ABC – do inglês *Artificial Bee Colony*) (KARABOGA, 2005). Atualmente, algumas das técnicas de otimização por inteligência de enxame mais promissoras incluem o algoritmo dos vagalumes (FA - do inglês *Firefly Algorithm*) (YANG, 2008a, 2009a), a busca dos pássaros cuco (CS – do inglês *Cuckoo Search*) (YANG; DEB, 2009) e o algoritmo dos morcegos (BA – do inglês *Bat Algorithm*) (YANG, 2010b).

Neste capítulo, serão apresentadas as meta-heurísticas ABC, PSO e FA, já utilizadas na solução dos mais variados problemas de engenharia, para a parametrização coordenada de controladores ESPs e do conjunto PI–UPFC–POD. Além disso, será proposto um algoritmo híbrido que, supõe-se, será capaz de contornar algumas limitações dos algoritmos clássicos já citados.

## 4.2 ALGORITMO COLÔNIA DE ABELHAS ARTIFICIAIS

### 4.2.1 O comportamento de enxames de abelhas

O forrageamento realizado pelas abelhas forrageiras consiste na busca por novas fontes de alimento, exploração das fontes conhecidas, recrutamento de abelhas para intensificação da exploração de boas fontes e o abandono de fontes com recursos esgotados.

O modelo mínimo de seleção de forrageiras<sup>1</sup> para o aparecimento da inteligência coletiva em enxames de abelhas melíferas é composto por três componentes essenciais: fontes de alimentos, abelhas campeiras (operárias) e abelhas não campeiras (exploradoras e observadoras) (KARABOGA, 2005).

O interesse por uma fonte de alimento depende de fatores como sua proximidade da colmeia, a sua abundância e a facilidade de extração deste alimento. Por uma questão de simplicidade, a importância de uma fonte de alimento pode ser representada por um único valor (SEELEY, 1995).

---

<sup>1</sup>As abelhas forrageiras são as responsáveis pela coleta do néctar das flores e armazenamento em uma espécie de “estômago especial” até que elas retornem para a colmeia.

As abelhas campeiras, também denominadas de operárias, estão associadas a uma determinada fonte de alimento já explorada por elas. Elas trazem consigo informações sobre essa fonte específica como a sua distância e direção ao ninho, a rentabilidade desta fonte e, quando retornam à colmeia, compartilham essas informações com uma certa probabilidade (KARABOGA, 2005).

As abelhas não campeiras estão continuamente observando uma nova fonte de alimento para explorar. Existem dois tipos destas abelhas: as exploradoras, que buscam novas fontes de alimento em torno da colmeia e as observadoras à espera na colmeia para escolher as melhores fontes de alimento através das informações compartilhadas pelas operárias. A troca de informações entre as abelhas é a ocorrência mais importante na formação do conhecimento coletivo. Ao examinar uma colmeia é possível distinguir entre algumas partes que comumente existem em todas elas. A mais importante é a área de dança, pois está relacionada à troca de informações sobre qualidade das fontes de alimentos entre os agentes (KARABOGA, 2005).

Desde que informações sobre as melhores fontes de alimentos sejam compartilhadas pelas abelhas operárias na área de dança para as abelhas observadoras, estas poderão decidir aproveitar as fontes mais abundantes. A probabilidade das abelhas operárias compartilharem suas informações é proporcional à abundância da fonte. Este compartilhamento se dá através de uma dança que tem duração proporcional à qualidade da fonte. Assim, quanto mais proveitosa for a fonte de alimento, maior será o recrutamento (TERESHKO; LOENGAROV, 2005).

Depois de identificar uma fonte de alimento, a abelha memoriza sua localização e, em seguida, começa imediatamente a explorá-la, tornando-se uma operária. Após isso leva uma carga de néctar desta fonte à colmeia para armazenamento tendo três opções ao fim desta tarefa:

- i) Torna-se novamente uma abelha exploradora depois de abandonar a fonte de alimento;
- ii) Recruta abelhas exploradoras na área de dança antes de retornar à fonte que estava explorando, ou;
- iii) Continua a trabalhar na mesma fonte de alimento, sem recrutar novas abelhas (KARABOGA, 2005).

É importante salientar que nem todas as abelhas iniciam o forrageamento ao mesmo tempo. Quando analisado o caso das abelhas, as características do conceito de auto-organização podem ser descritas da seguinte forma:

- i) O *feedback* positivo pode ser observado na relação proporcional entre o aumento da quantidade de néctar das fontes de alimento e o aumento das abelhas observadoras.
- ii) O *feedback* negativo no abandono da exploração de fontes de alimento com pequena quantidade de néctar.
- iii) As variações podem ser observadas no processo de busca aleatória de novas fontes de alimento realizadas pelas abelhas exploradoras.
- iv) As interações múltiplas ocorrem quando as abelhas compartilham suas informações a respeito das fontes de alimento na área de dança da colmeia (KARABOGA, 2005).

#### 4.2.2 Algoritmo

O algoritmo Colônia de Abelhas Artificiais (ABC) explora um comportamento inteligente específico de um enxame de abelhas, o forrageamento, e pode ser utilizado para a solução de problemas de otimização multidimensionais e multimodais (KARABOGA; AKAY, 2009).

O algoritmo ABC simula três grupos de abelhas: operárias (campeiras), exploradoras e observadoras (não campeiras). Metade da colônia é formada por abelhas operárias e a outra metade por observadoras. Para cada fonte de alimento, há apenas uma abelha operária. Em outras palavras, o número de abelhas utilizadas é igual ao número de fontes de alimentos ao redor da colmeia. A operária cuja fonte de alimento esgotou se torna uma abelha exploradora (KARABOGA, 2005; KARABOGA; BASTURK, 2007a).

Cada ciclo da busca realizada pelo algoritmo consiste em três etapas: posicionar as abelhas operárias e observadoras sobre as fontes de alimento, calcular a quantidade de néctar destas fontes; e determinar as abelhas exploradoras direcionando-as para possíveis fontes de alimento. A posição da fonte de alimento representa uma possível solução para o problema a ser otimizado e a quantidade de néctar presente corresponde à qualidade desta solução.

O número de abelhas operárias ou abelhas observadoras é igual ao número de soluções na população. No primeiro passo, o ABC gera uma população inicial distribuída aleatoriamente de  $N$  soluções (posições das fontes de alimento), onde  $N$  denota o tamanho da população. Cada solução  $\mathbf{z}_i = [\mathbf{z}_1 \ \mathbf{z}_2 \ \cdots \ \mathbf{z}_N]^t$  é um vetor  $D$ -dimensional. Aqui,  $D$  é o número de parâmetros de otimização. Após a inicialização, o conjunto de posições (soluções) é submetido a repetidas iterações ( $it$ ) dos processos de busca das abelhas operárias, observadoras e exploradoras.

Cada operária produz uma modificação na posição (solução) em sua memória dependendo da informação local (informação visual) e avalia a quantidade de néctar (valor da função objetivo) da nova fonte (nova solução). A nova posição é calculada de acordo com a expressão (178) (KARABOGA; BASTURK, 2007a, 2007b).

$$u_{ij} = z_{ij} + \phi_{ij} (z_{ij} - z_{kj}) \quad (178)$$

Em (178),  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$  e  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$  são índices escolhidos aleatoriamente com  $k \neq j$ . O parâmetro  $\phi_{ij}$  é um número aleatório entre  $[-1, 1]$  que controla a produção de fontes de alimento na vizinhança de  $z$ , e representa a comparação entre a posição de duas fontes de alimento visíveis por uma abelha. Como pode ser visto em (178), à medida que a diferença entre os parâmetros  $z_{ij}$  e  $z_{ik}$  diminui, a perturbação na posição  $z_{ij}$  também diminui. Assim, conforme as possíveis soluções se aproximam de uma a solução ótima (local ou global) no espaço de busca, o comprimento do passo é reduzido de forma adaptativa. Caso um parâmetro produzido por esta operação exceda a limites pré-estabelecidos, ele deve ser ajustado para um valor aceitável, ou seja, se  $z_{ij} > z_{ij}^{\max}$  então  $z_{ij} = z_{ij}^{\max}$  ou, se  $z_{ij} < z_{ij}^{\min}$  então  $z_{ij} = z_{ij}^{\min}$  (KARABOGA; BASTURK, 2007a, 2007b; AKAY; KARABOGA, 2012).

Desde que a disponibilidade de néctar da nova fonte seja maior que a da anterior, a abelha memoriza a nova posição e esquece a antiga. Caso contrário, ela mantém a posição da anterior em sua memória. Após terminarem o processo de busca, todas as operárias compartilham as informações sobre a localização e a quantidade de néctar das fontes do alimento com as abelhas observadoras na “área da dança” da colmeia. As observadoras avaliam estas informações e escolhem uma fonte baseada em uma probabilidade  $\Upsilon_i$ , proporcional às suas reservas de néctar, como mostrado pela equação (179).

$$\Upsilon_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^N fit_n} \quad (179)$$

Na equação (179),  $fit_i$  é o valor da função *fitness* (aptidão) para a solução  $z_i$ , calculada a partir da função objetivo  $F(z_i)$  pela equação (180) (AKAY; KARABOGA, 2012). Assim, quanto maior a quantidade de néctar armazenado em uma fonte de alimento, maior será a probabilidade com que seja escolhida pelas abelhas observadoras.

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + F(z_i)} & \text{se } F(z_i) \geq 0 \\ 1 + |F(z_i)| & \text{se } F(z_i) < 0 \end{cases} \quad (180)$$

Do mesmo modo que as operárias, as abelhas observadoras produzem uma modificação na posição da fonte de alimento armazenada em sua memória e verificam o volume de néctar da fonte candidata. Desde que haja mais néctar do que na anterior, a abelha memoriza a nova posição no lugar da antiga.

A fonte de alimento que esgotou sua reserva de néctar é abandonada pela abelha (operária ou observadora) e substituída por uma nova, encontrada por uma abelha exploradora. As abelhas exploradoras escolhem aleatoriamente as fontes de alimento uma vez que não têm qualquer orientação de outros indivíduos. Este comportamento gera muitas vezes soluções de baixa qualidade, porém, ocasionalmente, podem descobrir acidentalmente novas fontes de alimento de ótima qualidade. No caso das abelhas artificiais, as exploradoras podem descobrir rapidamente um conjunto de soluções viáveis do problema (KARABOGA; BASTURK, 2007a).

No algoritmo ABC original, uma das abelhas operárias é selecionada e classificada como exploradora. Sua seleção é controlada por um parâmetro denominado  $lmt$ . Se uma solução, que representa uma fonte de alimento, não é melhorada em um determinado número de tentativas, ela é abandonada pela abelha operária e esta é convertida em exploradora. O número de tentativas para o abandono de uma fonte de alimento é igual ao valor de  $lmt$ , que é um importante parâmetro de controle do ABC. Supondo que a posição da fonte abandonada seja  $z_i$ , a abelha exploradora define cada coordenada da localização da nova fonte de alimento segundo a equação (181) (KARABOGA; BASTURK, 2007a).

$$z_{ij} = z_{ij}^{\min} + \alpha (z_{ij}^{\max} - z_{ij}^{\min}) \quad (181)$$

Na expressão (181),  $z_{ij}^{\min}$  e  $z_{ij}^{\max}$  são, respectivamente, os limites inferior e superior de cada parâmetro de otimização e  $\alpha$  é um número aleatório no intervalo  $[0, 1]$ .

No Algoritmo 1 é mostrado o pseudocódigo detalhado do método ABC.

---

**Algoritmo 1 – Pseudocódigo do algoritmo *Artificial Bee Colony* (ABC)**

---

- 1 Inicialize a população de soluções  $x_i$  utilizando a equação (181);
- 2 Avalie a população de soluções;

```

3   $it = 1$ ;
4  Repita
5      Gere novas soluções  $u_{ij}$  para as operárias usando (178) e as avalie;
6      Aplique um processo de seleção gulosa entre  $u_{ij}$  e  $z_{ij}$ ;
7      Calcule a probabilidade  $Y_i$  para as soluções  $z_{ij}$  utilizando (179);
8      Gere as novas soluções  $u_{ij}$  nas vizinhanças de  $z_{ij}$  para as observadoras utilizando (178)
9      ;
10     Aplique um processo de seleção gulosa entre  $u_{ij}$  e  $z_{ij}$ ;
11     Determine as soluções abandonadas, se existirem, e as substitua por novas soluções
12     geradas aleatoriamente utilizando (181);
13     Memorize a melhor solução encontrada até o momento;
14      $it = it + 1$ ;
15 Até  $it = it^{max}$ ;

```

---

Do exposto, é possível afirmar que o algoritmo ABC realiza quatro tipos de seleção: a) Na fase das abelhas observadoras realiza uma seleção global, escolhendo as soluções de acordo com probabilidades, expressão (179); b) Seleção local ao definir uma solução vizinha  $k$  ao aplicar a equação (178); c) Seleção local gulosa ao determinar se uma solução será substituída ou não de acordo com avaliação da solução gerada com a equação (179), e; d) Seleção aleatória na fase das abelhas exploradoras utilizando (181) (KARABOGA; BASTURK, 2007b; KARABOGA; AKAY, 2009).

### 4.3 ALGORITMO DOS VAGALUMES

#### 4.3.1 Fundamentos biológicos

Os vagalumes são besouros pertencentes a família dos *Coleoptera* e *Lampyridae* e estão entre os mais fascinantes dos insetos (LEWIS; CRATSLEY, 2008). Atualmente, são conhecidas mais de 2.000 espécies em todo o mundo, a maioria encontradas em regiões de clima quente. Inúmeros trabalhos têm sido gerados sobre seu comportamento na natureza (STREHLER; TOTTER, 1952; SELIGER; MCELROY, 1960; DE WET et al., 1987; BRASIER; TATE; HABENER, 1989).

Estes insetos são caracterizados pela emissão de flashes de luz curtos e rítmicos, produzidos por um processo bioquímico de bioluminescência originário em órgãos fotogênicos. Essa luz intermitente pode servir como sinal de cortejo para o acasalamento e de alerta sobre potenciais predadores. Nota-se em algumas espécies que alguns adultos não possuem a

bioluminescência, atraindo seus companheiros por meio de feromônios, semelhante às formigas (YANG, 2009a).

A maioria das espécies de vagalumes depende de sinais bioluminescentes para iniciar o ritual de acasalamento. Normalmente, os primeiros a emitirem sinais são os machos voando, que tentam atrair as fêmeas que não voam. Em resposta, as fêmeas emitem luzes contínuas ou intermitentes. Ambos os parceiros de acasalamento produzem padrões de emissão de luz distintos que são precisamente cronometrados, a fim de codificar informações como a identidade da espécie e seu sexo. As fêmeas são atraídas de acordo com as diferenças comportamentais no sinal de acasalamento. Normalmente, elas preferem os machos que produzem os flashes mais brilhantes. É conhecido que a intensidade do flash varia com a distância a partir da sua origem. Felizmente, em algumas espécies, as fêmeas não conseguem distinguir entre flashes intensos emitidos a uma grande distância de flashes tênues produzidos em locais mais próximos. No sentido da seleção natural, em que apenas o indivíduo mais forte pode sobreviver, os sinais de flash evoluíram como mecanismo de defesa com a função de alertar potenciais predadores (FISTER et al., 2013).

A vida social de um grupo de vagalumes não é apenas dedicada ao forrageamento, mas também para a reprodução. As decisões coletivas estão intimamente ligadas às características do flash de luz emitido, que podem ser associadas à função objetivo a ser otimizada, e são a principal base biológica para o desenvolvimento do algoritmo dos vagalumes (YANG, 2009a; FISTER et al., 2013).

#### **4.3.2 Estrutura do Algoritmo dos Vagalumes**

A estrutura do algoritmo dos vagalumes (FA) é baseada em três regras (YANG, 2008a): (i) Todos os vagalumes são do mesmo sexo, de modo que um vagalume será atraído por outros, independentemente do seu sexo; (ii) A atratividade entre eles é proporcional ao seu brilho, assim, para quaisquer dois vagalumes piscando, o menos brilhante vai se mover em direção ao mais brilhante. A atratividade é proporcional ao brilho que diminui à medida que aumenta a distância entre eles. Caso não haja nenhum vagalume mais brilhante, ambos se moverão aleatoriamente; (iii) O brilho de um vagalume é afetado ou determinado pelo panorama da função objetivo. Para um problema de maximização, o brilho pode simplesmente ser



proporcional ao valor da função objetivo (YANG, 2010c). Outras formas de brilho podem ser definidas de forma semelhante à função de aptidão em algoritmos genéticos.

Baseados nestas três regras, é possível definir o pseudocódigo básico do FA, mostrado no Algoritmo 2. Em certo sentido, existe alguma semelhança conceitual entre o FA e o algoritmo de Forrageamento Bacteriano (BFO – do inglês *Bacterial Foraging Optimization*) (PASSINO, 2002; GAZI; PASSINO, 2004). No BFO, a atração entre as bactérias baseia-se em parte na sua aptidão e em parte na sua distância, enquanto que no FA a atratividade está relacionada à sua função objetivo e ao decaimento monotônico da atratividade com a distância. No entanto, os agentes no FA têm visibilidade ajustável e são mais versáteis nas variações de atratividade, o que geralmente leva a maior mobilidade e, portanto, o espaço de busca é explorado com mais eficiência.

---

Algoritmo 2 – Pseudocódigo do algoritmo *Firefly Algorithm* (FA)

---

- 1: Função objetivo  $F(\mathbf{z})$ ,  $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_1 \ \cdots \ \mathbf{z}_D]^T$
  - 2: Gere a população inicial de vagalumes  $\mathbf{z}_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ )
  - 3: A intensidade luminosa  $I_i$  em  $\mathbf{z}_i$  é determinada por  $F(\mathbf{z}_i)$
  - 4: Defina o coeficiente de absorção de luz  $\gamma$
  - 5: **Enquanto** o critério de parada não é satisfeito, **faça**;
  - 7:     **Para**  $i = 1$  até  $N$  vagalumes **faça**;
  - 8:         **Para**  $j = 1$  até  $N$  vagalumes **faça**;
  - 9:             **Se**  $F(\mathbf{z}_j) < F(\mathbf{z}_i)$ , **então**;
  - 10:                 Mova o vagalume  $i$  na direção de  $j$ ;
  - 11:             **Fim do se**
  - 12:             Varie a atratividade com a distância  $r_{ij}$  por meio de  $e^{-\gamma r_{ij}}$
  - 13:             Avalie as novas soluções e atualize a intensidade luminosa
  - 14:         **Fim laço**  $j$
  - 15:     **Fim laço**  $i$
  - 16:     Classifique os vagalumes e encontre a melhor solução global atual  $\mathbf{p}_{\text{best}}^*$
  - 17: **Fim do enquanto**
  - 18: Processe os resultados
-

### 4.3.3 Atratividade

No FA há duas questões importantes: a variação da intensidade da luz e a formulação da atratividade. Por simplicidade, é possível supor que a atratividade de um vagalume é determinada pelo seu brilho que, por sua vez, está associado à função objetivo.

No caso mais simples envolvendo problemas de maximização, a intensidade de luz ( $I$ ), emitida por um vagalume, em uma localização particular ( $\mathbf{z}$ ) pode ser definida como  $I(\mathbf{z}) \propto F(\mathbf{z})$ . No entanto, a atratividade ( $\beta$ ) é relativa, pois deve ser avaliada pelos olhos do espectador ou pelos outros vagalumes. Assim, variará com a distância ( $r_{ij}$ ) entre os vagalumes  $i$  e  $j$ . Além disso, a intensidade da luz observada diminui com o aumento da distância de sua fonte, e também é absorvida pelo meio. Por isso deve ser permitido que a atratividade varie com o grau de absorção do meio. Na forma mais simples, a intensidade da luz ( $I(r)$ ) varia de acordo com a lei do quadrado inverso, isto é,  $I(r) = I_s/r^2$  onde  $I_s$  é a intensidade de luz na fonte. Para um determinado meio com um coeficiente fixo de absorção de luz ( $\gamma$ ), a intensidade luminosa varia com a distância entre os vagalumes, ou seja,  $I = I_0 e^{-\gamma r}$ , sendo  $I_0$  a intensidade luminosa original. Para evitar a singularidade em  $r = 0$  na expressão  $I_s/r^2$ , o efeito combinado da lei do quadrado inverso e da absorção pode ser aproximado usando a equação (182).

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (182)$$

Em algumas situações, pode ser necessário o uso de uma função com taxa de decaimento mais lenta. Nestes casos, é possível utilizar a equação (183).

$$I(r) = \frac{I_0}{1 + \gamma r^2} \quad (183)$$

Como a atração de um vagalume é proporcional à intensidade luminosa vista pelos vagalumes adjacentes, é possível definir sua atratividade utilizando (184).

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (184)$$

Na equação (184),  $\beta_0$  é a atratividade em  $r = 0$ . Como na maioria das vezes é mais rápido calcular  $1/(1 + r^2)$  do que uma função exponencial, a função proposta em (184), pode, se necessário, ser substituída por (185).

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2} \quad (185)$$

A equação (184) define uma distância característica  $\Gamma = 1/\sqrt{\gamma}$  sobre a qual a atratividade muda significativamente de  $\beta_0$  para  $\beta_0 e^{-1}$ . Assim, na implementação, a forma real da função de atratividade ( $\beta(r)$ ) pode ser quaisquer funções monotonicamente decrescentes, tais como a forma generalizada proposta em (186).

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (186)$$

Em (186), para um  $\gamma$  fixo, o comprimento característico é definido como  $\Gamma = \gamma^{-1/m}$ . Deste modo, se  $m \rightarrow \infty$ ,  $\Gamma \rightarrow 1$ . Por outro lado, para uma dada escala de comprimento característico ( $\Gamma$ ) em um problema de otimização, o coeficiente de absorção pode assumir um valor típico dado por (187).

$$\gamma = \frac{1}{\Gamma^m} \quad (187)$$

#### 4.3.4 Distância e movimento

No FA clássico, a distância entre quaisquer dois vagalumes,  $\mathbf{z}_i$  e  $\mathbf{z}_j$ , é expressa como sendo a distância euclidiana, como mostrado na equação (188).

$$r_{ij} = \|\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=n} (z_{ik} - z_{jk})^2} \quad (188)$$

Em (188),  $n$  indica a dimensionalidade do problema. O movimento do  $i$ -ésimo vagalume é direcionado para o vagalume mais brilhante (atraente)  $j$ . Deste modo, a equação (189) pode ser aplicada.

$$\mathbf{z}_i^{(it+1)} = \mathbf{z}_i^{(it)} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{z}_j^{(it)} - \mathbf{z}_i^{(it)}) + \alpha \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (189)$$

Na equação (189),  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  é um vetor de números aleatórios gerado por uma distribuição gaussiana e  $\alpha$  é um coeficiente adimensional de randomização pertencente ao intervalo  $[0, 1]$ . Pela sua análise, conclui-se que os movimentos dos vagalumes são compostos por três termos:

a posição atual do  $i$ -ésimo vagalume, a atratividade por outro vagalume e um passeio aleatório. Quando  $\beta_0 = 0$ , o movimento depende somente do passeio aleatório. Por outro lado, o parâmetro  $\gamma$  tem grande influência sobre a velocidade de convergência. Embora o valor deste parâmetro pode, teoricamente, assumir qualquer valor no intervalo  $[0, \infty[$ , sua definição depende do problema a ser otimizado. Tipicamente, seu valor varia de 0,01 a 100 (YANG, 2009a).

Em resumo, o FA é controlado por três parâmetros: o coeficiente de randomização  $\alpha$ , pela atratividade  $\beta$  e pelo coeficiente de absorção  $\gamma$ . De acordo com a configuração destes parâmetros, o FA padrão pode assumir o comportamento dos algoritmos PSO, Evolução Diferencial (DE – do inglês *Differential Evolution*) (STORN; PRICE, 1997) e Recozimento Simulado (SA – do inglês *Simulated Annealing*) (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983). De fato, quando  $\beta_0 = 0$ , a equação (189) torna-se essencialmente uma versão do SA paralelo, e o cronograma de recozimento é controlado pelo parâmetro  $\alpha$ . Por outro lado, se  $\gamma = 0$  e  $\beta_0 \in [0,1]$  o FA assume o comportamento de uma versão simplificada do DE sem mutação e com taxa de cruzamento controlada por  $\beta_0$ . Além disso, quando  $\gamma = 0$  e  $\mathbf{z}_j$  é substituído pela melhor solução global  $\mathbf{p}_{\text{best}}^*$ , então a equação (189) apresenta-se como uma variante do PSO, também conhecida por Otimização por Enxame de Partículas Acelerada (APSO - do inglês *Accelerated Particle Swarm Optimization*) (YANG, 2008a; YANG, 2010a; YANG; DEB; FONG, 2011). Portanto, o FA padrão inclui os algoritmos DE, PSO e SA como seus casos especiais. Como resultado, a FA pode ter todas as vantagens desses três algoritmos.

## 4.4 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

### 4.4.1 Algoritmo original

O algoritmo PSO original, proposto em Kennedy e Eberhart (1995), foi inspirado no comportamento social de algumas espécies de animais que trabalham em conjunto para localização de posições desejáveis, como por exemplo, um bando de pássaros em busca de alimento em determinada região. Esse comportamento de busca foi associado à otimização de funções não-lineares contínuas, onde cada pássaro (partícula) representa uma potencial solução do problema em questão. As partículas (indivíduos) buscam os melhores pontos utilizando o compartilhamento de informações sobre as melhores regiões do espaço de busca. O desempenho de cada partícula (sua proximidade com o ótimo global) é calculado de acordo com a função objetivo do problema de otimização estudado.

Nas implementações mais comuns do PSO, o movimento de cada partícula no interior do espaço de busca é definido por meio de uma combinação entre as posições da solução atual e da melhor solução encontrada, pelo indivíduo e por sua vizinhança, definida como um subconjunto de partículas com as quais é capaz de se comunicar. O primeiro modelo de PSO usou a distância Euclidiana entre as partículas para determinar quais eram suficientemente próximas para se comunicarem. Quando o foco das pesquisas migrou da modelagem biológica para a otimização matemática, este modelo de vizinhança foi abandonado em favor de outros com menores custos computacionais. Com isso, começaram a ser usadas vizinhanças topológicas não relacionadas à localização das partículas, incluindo a que veio a ser conhecida como vizinhança global, ou modelo *gbest*, onde a totalidade das partículas estão conectadas e são capazes de obter informações uma das outras (BRATTON; KENNEDY, 2007).

O movimento de uma partícula  $i$ , pertencente a um enxame de  $N$  indivíduos é composto por três vetores D-dimensionais: a sua posição no espaço de busca  $\mathbf{z}_i = [z_{i1} \ z_{i2} \ \dots \ z_{iD}]$ , a melhor posição que encontrou individualmente  $\mathbf{p}_i^* = [p_{i1}^* \ p_{i2}^* \ \dots \ p_{iD}^*]$  e sua velocidade  $\mathbf{v}_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{iD}]$ . A inicialização da posição e velocidade das partículas é feita de forma aleatória dentro do espaço de busca.

A atualização da posição de todas as partículas do enxame é realizada, a cada iteração  $it$ , de acordo com as equações (190) e (191).

$$\mathbf{v}_{ij}^{(it+1)} = \mathbf{v}_{ij}^{(it)} + c_1 r_1 \underbrace{\left( \mathbf{p}_{ij}^* - \mathbf{z}_{ij}^{(it)} \right)}_{\text{fator cognitivo}} + c_2 r_2 \underbrace{\left( \mathbf{p}_{\text{best } j}^* - \mathbf{z}_{ij}^{(it)} \right)}_{\text{fator social}} \quad (190)$$

$$\mathbf{z}_{ij}^{(it+1)} = \mathbf{z}_{ij}^{(it)} + \mathbf{v}_{ij}^{(it+1)} \quad (191)$$

Nas equações (190) e (191),  $c_1$  e  $c_2$  são constantes de ponderação tipicamente ajustadas em 2,  $r_1$  e  $r_2$  são números aleatórios independentes no intervalo entre  $[0, 1]$ , gerados a cada iteração para cada dimensão individual  $j = \{1, 2, \dots, D\}$ , e  $\mathbf{p}_{\text{best } j}^*$  é a melhor posição encontrada por qualquer vizinho da partícula.

Após alterar suas posições, cada partícula atualiza sua melhor posição individual usando a equação (192) (assumindo um problema de minimização).

$$\mathbf{p}_i^{*(it+1)} = \begin{cases} \mathbf{p}_i^{*(it)} & \text{se } F(\mathbf{p}_i^{*(it)}) \leq F(\mathbf{x}_i^{(it+1)}) \\ \mathbf{x}_i^{(it+1)} & \text{se } F(\mathbf{p}_i^{*(it)}) > F(\mathbf{x}_i^{(it+1)}) \end{cases} \quad (192)$$

Finalmente, a melhor posição global do enxame para a próxima iteração ( $\mathbf{p}_{\text{best}}^{*(it+1)}$ ), é definida como sendo a melhor posição individual atual ( $\mathbf{p}_i^{*(it)}$ ) que minimiza (em problemas de minimização) a função objetivo  $F(\mathbf{p}_i^{*(it)})$ .

Este modelo utiliza a topologia referida como *gbest* (melhor global) visto que todo o enxame é considerado como vizinhança da partícula. O pseudocódigo do PSO é mostrado no Algoritmo 3.

---

**Algoritmo 3 – Pseudocódigo do algoritmo Otimização por Enxame de Partículas (PSO)**

---

- 1: Função objetivo  $F(\mathbf{z})$ ,  $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_1 \ \dots \ \mathbf{z}_D]^T$ ;
- 2: Gere o enxame inicial  $\mathbf{z}_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ );
- 3: Avalie o enxame com  $F(\mathbf{z})$ ;
- 4:  $it = 1$ ;
- 5: **Enquanto**  $it \leq it^{\max}$ , **faça**;
- 6:     **Para**  $i = 1$  até  $N$  partículas **faça**;
- 7:         Atualize  $\mathbf{v}_i$  utilizando (190);
- 8:         Atualize  $\mathbf{z}_i$  utilizando (191);
- 9:         **Se**  $F(\mathbf{p}_i^*) < F(\mathbf{z}_i)$ , **então**;
- 10:              $\mathbf{p}_i^* = \mathbf{z}_i$
- 11:         **Fim do Se**;
- 12:     **Fim do Para**;
- 13:     Atualize  $\mathbf{p}_{\text{best}}$ ;
- 14:      $it = it + 1$ ;

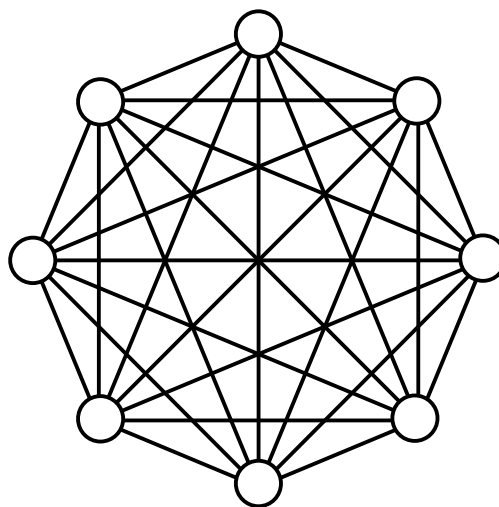
- 15: **Fim do Enquanto;**  
 16: **Processe os resultados;**
- 

As velocidades das partículas no algoritmo original foram fixadas num valor máximo definido por  $v_{\max}$ . Sem esta limitação, o sistema estava propenso a entrar em um “estado de explosão”, onde as velocidades e, conseqüentemente as posições das partículas aumentam rapidamente, tendendo ao infinito. A adoção do parâmetro  $v_{\max}$  impede que o sistema entre neste estado limitando a velocidade de todas as partículas a esse valor (BRATTON; KENNEDY, 2007).

#### 4.4.2 Topologias de comunicação do enxame

A primeira versão do PSO publicada em Kennedy e Eberhart (1995) utilizou uma topologia que ficou conhecida como *gbest*. A fonte de influência social em cada partícula foi o indivíduo com melhor desempenho em toda a população. Isso equivale a uma rede social onde cada indivíduo está conectado a todos os outros, como o observado na Figura 18. Esta topologia foi adotada nas primeiras aplicações do algoritmo que envolviam funções com gradientes suaves. Entretanto, muitos problemas possuem funções complexas com interações entre variáveis e outras características que não podem ser representadas por gradientes deste tipo. O modelo de vizinhança *lbest*, ou topologia local, foi proposto em Eberhart e Kennedy, 1995) como uma maneira de lidar com estes problemas mais difíceis.

Figura 18 – Topologia global ou *gbest*.

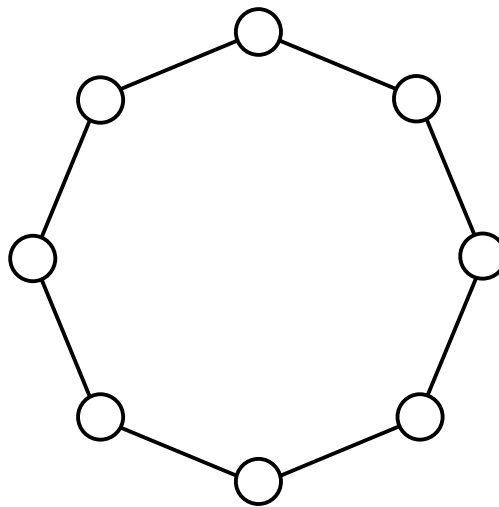


Fonte: Adaptado de Kennedy e Mendes (2003).

Nesta estrutura de vizinhança, cada indivíduo está conectado a seus vizinhos imediatos na matriz populacional, por exemplo, o terceiro indivíduo na população interage com o segundo e com o quarto. Além disso, cada indivíduo é incluído em sua própria vizinhança, de modo que seja fonte de influência sobre si mesmo caso encontre a melhor solução do problema nesta região. Muitos trabalhos sobre o PSO usam o termo topologia local para descrever qualquer modelo de enxame sem comunicação global. O modelo *lbest*, mostrado na Figura 19, é também conhecido como topologia em anel e pode ser considerado uma das formas mais simples de uma topologia local.

Uma grande vantagem da topologia em anel é a de que os subconjuntos de partículas podem pesquisar diversas regiões do espaço de busca do problema. À medida que partículas de uma parte da população se influenciam mutuamente para se concentrarem num ótimo local, outra parte da população poderia procurar em torno de outro ponto (KENNEDY; MENDES, 2003). Este processo torna sua taxa de convergência mais lenta em relação ao modelo *gbest*, porém, dificulta que o algoritmo fique preso em ótimos locais.

Figura 19 – Topologia local ou *lbest*.



Fonte: Adaptado de Kennedy e Mendes (2003).

A maior velocidade de convergência da topologia *gbest* parece indicar um desempenho superior, mas isso é enganoso. Enquanto os resultados para a topologia global são realmente superiores em muitos problemas de otimização unimodais, a qualidade dos resultados determinados pela topologia em anel aparece no decorrer do processo iterativo, particularmente em problemas multimodais (BRATTON; KENNEDY, 2007).



#### 4.4.3 Coeficiente de inércia

Pouco tempo após as primeiras publicações sobre o PSO, em um esforço para melhorar o equilíbrio entre os processos de diversificação e intensificação do algoritmo, foi introduzido um novo parâmetro, evitando simultaneamente a necessidade de fixação de uma velocidade máxima para as partículas, artifício considerado artificial e difícil de equilibrar (SHI; EBERHART, 1998). Um único valor para  $v_{\max}$  não era necessariamente aplicável a todos os tipos de problemas visto que, espaços de busca muito amplos exigiam valores maiores para garantir uma exploração adequada, enquanto que espaços menores exigiam valores muito pequenos para evitar o comportamento explosivo citado anteriormente. Determinar um valor apropriado de  $v_{\max}$  para um problema específico era crítico, uma vez que um valor mal escolhido poderia resultar em um desempenho insatisfatório, entretanto, não havia uma metodologia simples e confiável para escolher este valor além da tentativa e erro (BRATTON; KENNEDY, 2007).

Este novo parâmetro, denominado de coeficiente de inércia ( $w$ ), foi concebido para substituir  $v_{\max}$ . Ele ajusta a influência das velocidades das partículas anteriores no processo de otimização. Com isso, a equação (190) pode ser reescrita como em (193).

$$v_{ij}^{(it+1)} = wv_{ij}^{(it)} + c_1r_1(p_{ij}^* - z_{ij}^{(it)}) + c_2r_2(p_{best\ j}^* - z_{ij}^{(it)}) \quad (193)$$

Quanto maior o valor do coeficiente de inércia  $w$ , maior é a capacidade do algoritmo de explorar novas regiões no espaço de busca e, conseqüentemente, menor será a dependência da solução em relação à população inicial. Por outro lado, valores muito altos de  $w$  podem inviabilizar a habilidade de exploração local do algoritmo. Além disso, é importante frisar que este aumento deve ser restringido a um valor que não leve o algoritmo a ficar “batendo” nos limites do espaço de busca do problema estudado. Este compromisso com o equilíbrio entre as buscas global e local do PSO levou muitos pesquisadores a adotar um coeficiente de inércia decrescente com o tempo (SHI; EBERHART, 1998; EBERHART; SHI, 2001; MALIK et al., 2007; XIN; CHEN; HAI, 2009).

#### 4.4.4 Coeficiente de constrição

Outra estratégia adotada para balancear as etapas de diversificação e intensificação do PSO faz uso do coeficiente de constrição  $\chi$  definido em (194) (CLERC; KENNEDY, 2002).

$$\chi = \frac{2}{\left| 2 - a - \sqrt{a^2 - 4a} \right|}, \quad a = c_1 + c_2 \quad (194)$$

Na equação (194), quando  $a < 4$ , o enxame gira lentamente e em “espiral” no entorno da melhor solução encontrada no espaço de busca sem garantia de convergência, enquanto que para  $a > 4$  a convergência é rápida e garantida (CLERC; KENNEDY, 2002). Embora seja possível ajustar os valores das constantes  $c_1$  e  $c_2$  na equação (190) no intuito de favorecer a melhor posição de uma partícula  $\mathbf{p}_i$  ou a melhor posição do enxame  $\mathbf{p}_{best}^*$ , por razões de simplicidade, a maior parte das implementações do PSO utilizam valores iguais para ambas as constantes. Considerando  $a = 4,1$ , para garantir a convergência, são obtidos os valores:  $\chi \approx 0,72984$  e  $c_1 = c_2 = 2,05$ . Assim, a nova equação da velocidade das partículas pode ser reescrita como em (195).

$$v_{ij}^{(it+1)} = \chi \left[ v_{ij}^{(it)} + c_1 r_1 \left( p_{ij}^* - z_{ij}^{(it)} \right) + c_2 r_2 \left( p_{best\ j}^* - z_{ij}^{(it)} \right) \right] \quad (195)$$

Os efeitos causados por esta constante são semelhantes aos do coeficiente de inércia. De fato, o PSO com coeficiente de constrição é um caso especial do algoritmo com coeficiente de inércia em que os valores para os parâmetros foram determinados analiticamente (EBERHART; SHI, 2000).

#### 4.4.5 Standard PSO 2006

Desde a criação do PSO, foram gerados muitos trabalhos focados em modificações e variações do algoritmo original. Este vasto número de versões causou, até determinada época, confusão na definição do algoritmo PSO padrão (BRATTON; KENNEDY, 2007). Essa necessidade de padronização levou à definição do *Standard PSO 2006* (SPSO 2006), que incorporou os mais recentes avanços até então (CLERC, 2012).

O SPSO 2006 utiliza a topologia *lbest* onde cada um dos  $N = 10 + 2\sqrt{d}$  agentes da população possuem dois vizinhos. As posições iniciais são atribuídas aleatoriamente, com uma distribuição uniforme, dentro do espaço de buscas. A velocidade inicial das partículas é definida como a diferença entre duas posições aleatórias e atualizada posteriormente utilizando a equação (193) com  $w = 1/(2 \ln 2)$  e  $c1 = c2 = 0,5 + \ln 2$ . Cada nova posição  $z_{ij}^{(it+1)}$ , calculada pela equação (191), deve permanecer dentro dos limites  $z_j^{\min} < z_{ij}^{(it+1)} < z_j^{\max}$ , caso contrário,  $z_{ij}^{(it+1)} = z_j^{\min}$  ou  $z_{ij}^{(it+1)} = z_j^{\max}$  e  $v_{ij}^{(it+1)} = 0$ .

#### 4.5 O ALGORITMO PROPOSTO

Os algoritmos PSO, FA e ABC são três métodos de IE poderosos. O ABC possui como principais características a robustez, simplicidade, flexibilidade e poucos parâmetros de controle em comparação à maioria dos algoritmos de otimização (KARABOGA; BASTURK, 2007b). No entanto, possui algumas limitações como a menor velocidade de convergência em comparação a outros algoritmos populacionais na solução de problemas unimodais, além de facilmente ficar preso em ótimos locais quando trata de problemas multimodais (KARABOGA; AKAY, 2009). Isto se deve à sua equação de busca, usada para gerar novas soluções candidatas, que possui bom desempenho no processo de diversificação mas não no de intensificação (ZHU; KWONG, 2010; GAO; LIU; HUANG, 2012).

No PSO, a posição das partículas é atualizada de acordo com a experiência individual e a experiência coletiva do enxame. Embora o PSO seja de fácil implementação, sua principal deficiência é a possibilidade de convergência prematura na resolução de problemas multimodais, que pode ocorrer quando a melhor posição do enxame ( $\mathbf{p}_{\text{best}}^*$ ) é um ótimo local e coincide com a posição atual da partícula  $i$  ( $\mathbf{z}_i^{(it)}$ ) e sua melhor posição individual ( $\mathbf{p}_i^*$ ) (LIANG et al., 2006; ZHAN et al., 2009). De fato, neste caso, o segundo e terceiro termos da equação (193) tendem a zero, conseqüentemente, a velocidade da partícula  $i$  fica dependente apenas de  $w$  e sua nova posição, obtida pela equação (191), pode continuar na região de atração deste ótimo local.

Assim como o PSO e o ABC, o FA também tem a tendência de ficar preso em ótimos locais nos problemas multimodais (COELHO; BERNERT; MARIANI, 2011; GANDOMI et al., 2013). Isso se deve principalmente ao valor constante do coeficiente de randomização  $\alpha$ ,

em (189), ao longo das iterações (YU et al., 2014). Ademais, também possui vários parâmetros de controle a serem ajustados, que influenciam substancialmente a qualidade das soluções encontradas e a eficiência do algoritmo. Estes ajustes dependem do problema a ser otimizado e são mais complexos quando os mesmos possuem inúmeros ótimos locais (CHEUNG; DING; SHEN, 2014).

O bom desempenho dos algoritmos de otimização baseados em população, como os citados ABC, FA e PSO, depende do correto equilíbrio entre os processos de diversificação e de intensificação (ZHU; KWONG, 2010; GAO; LIU; HUANG, 2012). Nestes algoritmos, a diversificação refere-se à capacidade de pesquisar o espaço de solução na busca pelo ótimo global. O processo de intensificação diz respeito à habilidade de aplicar o conhecimento sobre as boas soluções anteriores na procura de melhores soluções (TRELEA, 2003).

Portanto, equilibrar os processos de diversificação e intensificação para acelerar a velocidade de convergência e evitar o aprisionamento em ótimos locais em problemas multimodais tornou-se um objetivo importante nas pesquisas sobre algoritmos baseados em população. Neste contexto, muitas variantes do PSO têm sido propostas para tratar problemas multimodais e complexos (CHANG et al., 2005; CHAN; KUMAR; MISHRA, 2007; LI; LI, 2007; LI; YAO, 2012).

Este trabalho propõe adicionar ao SPSO, versão 2006, dois dos mecanismos de busca do ABC: o de intensificação, realizado pelas abelhas observadoras como o proposto em (GAO; LIU; HUANG, 2012), que foi inspirado no método DE e é regido pela equação (196); e o de diversificação, executado pelas abelhas exploradoras, e fundamentado no passeio aleatório da equação de busca do FA, com  $\beta_0 = 0$  e  $\alpha(it)$  definida como uma função dependente do número de iterações, como o mostrado na equação (197).

$$u_{ij} = z_{\text{best}j} + \phi_{ij} \cdot (z_{r1j} - z_{r2j}) \quad (196)$$

$$z_i = z_i + \alpha(it) \cdot \epsilon_i \quad (197)$$

Na equação (196),  $z_{\text{best}}$  é a dimensão  $j$ , pertencente ao conjunto  $\{1, 2, \dots, D\}$ , da posição com a melhor aptidão na população atual,  $\phi_{ij}$  é um número aleatório no intervalo  $[-1, 1]$  e os índices  $r1$  e  $r2$  são inteiros mutuamente exclusivos escolhidos aleatoriamente dentro do conjunto  $\{1, 2, \dots, N\}$  e diferentes do índice  $i$ .

Após o loop principal do SPSO, as melhores posições individuais do enxame serão atualizadas pela equação de intensificação, mostrada em (196), que será aplicada à melhor posição individual de cada partícula  $i$  com uma probabilidade  $\Psi_i$ , proporcional ao valor da função objetivo ( $F$ ) destas posições e definida pela equação (198).

$$\Psi_i = \frac{F(p_i^*)}{\sum_{n=1}^N F(p_n^*)} \quad (198)$$

Deste modo, serão selecionadas aleatoriamente a melhor posição de uma partícula  $k$  (diferente de  $i$ ) e uma variável  $j$  do problema de otimização. Consequentemente, a equação de intensificação pode ser reescrita como em (199).

$$u_{ij} = p_{best\ j}^* + \phi_{ij} (p_{ij}^* - p_{kj}^*) \quad (199)$$

A nova melhor posição da partícula  $i$  substituirá a anterior se esta possuir menor valor da função objetivo (em problemas de minimização). Nesta abordagem, a maior parcela das avaliações da função objetivo será realizada pelo SPSO uma vez que o uso do componente de intensificação do ABC dependerá de uma probabilidade calculada para toda partícula  $i$  a cada iteração.

Caso a melhor posição de uma partícula não puder ser melhorada após um número limite de tentativas, definido por  $lmt$ , ela deverá ser descartada. A nova posição será definida aplicando a equação de diversificação exibida em (197) como apresentado em (200).

$$p_i^* = p_i^* + \alpha(it) \varepsilon_i \quad (200)$$

Para aperfeiçoar a convergência do algoritmo, o parâmetro de randomização será reduzido gradualmente à medida que as melhores posições do enxame se aproximam, com o passar das iterações, limitado aos valores inicial e final,  $\alpha_0$  e  $\alpha_\infty$ , respectivamente. Neste trabalho, o parâmetro  $\alpha(it)$  será atualizado, a cada iteração, como o exposto em (201).

$$\alpha(it) = \alpha_\infty + (\alpha_0 - \alpha_\infty) e^{-\zeta it} \quad (201)$$

Na equação (201),  $\zeta$  é uma constante adimensional situada no intervalo ]0,1]. O pseudocódigo que descreve esta abordagem híbrida, que será denominada neste trabalho de *Bee-PSO*, é mostrado no Algoritmo 4.

---

Algoritmo 4 – Pseudocódigo do algoritmo Bee PSO

---

```

1: Função objetivo  $F(\mathbf{z})$ ,  $\mathbf{x} = [\mathbf{z}_1 \ \cdots \ \mathbf{z}_D]^T$ ;
2:  $trial_i = 0$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ );
3: Gere o enxame inicial  $\mathbf{z}_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ );
4:  $\mathbf{p}_i^* = \mathbf{z}_i$ 
5: Avalie  $F(\mathbf{z})$ ;
6:  $it = 1$ ;
7: Enquanto  $it \leq it^{\max}$ , faça;
8:   Para  $i = 1$  até  $N$  partículas faça;
9:     Atualize  $\mathbf{v}_i$  utilizando (190);
10:    Atualize  $\mathbf{z}_i$  utilizando (191);
11:    Se  $F(\mathbf{z}_i) \leq F(\mathbf{p}_i^*)$ , então;
12:       $\mathbf{p}_i^* = \mathbf{z}_i$ ;
13:    Senão;
14:       $trial_i = trial_i + 1$ ;
15:    Fim do Se;
16:  Fim do Para;
17:  Calcule a probabilidade  $\Psi_i$  para as melhores posições individuais  $\mathbf{p}_i^*$  utilizando (198);
18:  Para  $i = 1$  até  $N$  partículas faça;
19:    Se  $rand > \Psi_i$ , então;
20:      Escolha aleatoriamente as partículas  $r1$  e  $r2$  de modo que  $r1 \neq r2 \neq i$ ;
21:      Escolha aleatoriamente uma variável  $j$  do problema;
22:      Atualize  $u_{ij}$  utilizando (199);
23:      Se  $F(\mathbf{u}_i) \leq F(\mathbf{p}_i^*)$ , então;
24:         $\mathbf{p}_i^* = \mathbf{u}_i$ 
25:      Senão;
26:         $trial_i = trial_i + 1$ ;
27:      Fim do Se;
28:    Fim do Se;
29:  Fim do Para;
30:  Para  $i = 1$  até  $N$  partículas faça;
31:    Se  $trial_i > lmt$ , então;
32:      Atualize a melhor posição individual  $\mathbf{p}_i^*$  utilizando (200);
33:       $trial_i = 0$ ;
34:    Fim do Se;
35:  Fim do Para;
36:  Atualize a melhor posição do enxame  $\mathbf{p}_{\text{best}}^*$ ;
37:   $it = it + 1$ ;
38: Fim do Enquanto;
39: Processe os resultados;

```

---

#### 4.6 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A operação de um SEP dentro de limites seguros frente a pequenas perturbações impõe que os coeficientes de amortecimento ( $\xi$ ) de seus modos oscilatórios de baixa frequência assumam valores suficientemente positivos, mesmo com possíveis alterações em seu carregamento. Assim, se o modo oscilatório pouco amortecido for do tipo local, será necessária a instalação de um ESP no gerador que mais contribui em sua formação, determinado a partir dos fatores de participação propostos em Kundur (1994). No caso de modos interárea a solução a ser empregada é a instalação de um conjunto PI–UPFC–POD em uma linha de transmissão cujos critérios de escolha serão discutidos posteriormente.

Neste sentido, este trabalho propõe uma função objetivo  $F(z)$  que deverá ser capaz de conduzir a busca dos algoritmos de otimização dentro do espaço de soluções para determinar um conjunto de parâmetros dos controladores suplementares, que garantam o suficiente amortecimento do SEP mesmo com pequenas variações de seu ponto de operação. Para tanto, são considerados três níveis de carregamento: nominal ( $P^{\text{esp}} + jQ^{\text{esp}}$ ) e  $\pm 10\%$  de variação do nominal. Com isso espera-se assegurar os maiores amortecimentos possíveis para qualquer ponto de operação no interior da faixa de carregamento especificada. Além disso,  $F(z)$  deverá garantir que as frequências dos modos oscilatórios de interesse,  $\omega^{\text{calc}}$ , obtidas ao fim do processo de parametrização dos controladores, não sofram grandes alterações em relação às obtidas sem a atuação dos mesmos. Assim, para cada iteração dos algoritmos de otimização utilizados, os autovalores de interesse devem ser selecionados e direcionados para o semiplano esquerdo do plano complexo.

Partindo das considerações expostas, a cada iteração serão definidas, a partir dos coeficientes de amortecimentos desejado ( $\xi^{\text{des}}$ ) e calculado ( $\xi^{\text{calc}}$ ), as matrizes de amortecimentos  $\Delta\xi \in \mathbb{R}^q \times s$ , com  $\Delta\xi_i = |\xi^{\text{des}} - \xi_i^{\text{calc}}|$  e de distâncias  $\delta \in \mathbb{R}^n \times p$  com cada elemento  $\delta_{ij} = |\omega_{ij}^{\text{des}} - \omega_{ij}^{\text{calc}}|$ . As dimensões  $p$ ,  $q$  e  $n$  representam, nesta ordem, os números de pontos de operação considerados, de coeficientes de amortecimento de cada solução e de autovalores de interesse. Essas matrizes em conjunto com a constante adimensional  $\eta$  (definida de forma empírica), serão utilizadas como valores de entrada para avaliação de  $F(z)$ , definida em (202).

$$F(\mathbf{z}) = \min \left( \sum_{i=1}^n \Delta \xi_i + \eta \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \delta_{ij} \right) \quad (202)$$

Na metodologia proposta, considerando um SEP constituído por  $ng$  geradores equipados com  $np$  ESPs e um conjunto UPFC–POD, as meta-heurísticas descritas neste capítulo deverão ser capazes de fornecer como solução um conjunto de ganhos e de constantes de tempo para cada ESP instalado, para o POD e para os controles PI do UPFC. Desta forma, a solução obtida por cada método será representada por um vetor constituído pelos parâmetros de  $ns$  controladores suplementares conforme (203).

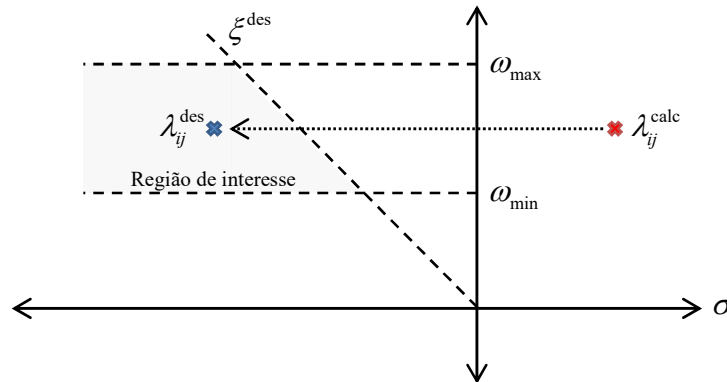
$$\mathbf{z}_i = \left[ \underbrace{T_1^u \ K_1^u \ T_3^u \ K_3^u}_{\text{UPFC}} \ \underbrace{T_1^p \ T_2^p \ K^p}_{\text{POD}} \ \underbrace{T_{11}^E \ T_{21}^E \ K_1^E}_{\text{ESP 1}} \ \cdots \ \underbrace{T_{1np}^E \ T_{2np}^E \ K_{np}^E}_{\text{ESP np}} \right] \quad (203)$$

A função objetivo (202) está sujeita às restrições (204), sendo  $K$ ,  $T_1$  e  $T_2$  o ganho e as constantes de tempo, respectivamente, dos controladores suplementares (ESPs e/ou POD) e  $k$  a representação do modo oscilatório relacionado a estes controladores.

<i>UPFC</i> :	POD:	ESPs:	
$K_{1\min}^u \leq K_1^u \leq K_{1\max}^u$	$K_{\min}^p \leq K^p \leq K_{\max}^p$	$K_{k\min}^E \leq K_k^E \leq K_{k\max}^E$	
$K_{3\min}^u \leq K_3^u \leq K_{3\max}^u$	$T_{1\min}^p \leq T_1^p \leq T_{1\max}^p$	$T_{1k\min}^E \leq T_{1k}^E \leq T_{1k\max}^E$	(204)
$T_{1\min}^u \leq T_1^u \leq T_{1\max}^u$	$T_{2\min}^p \leq T_2^p \leq T_{2\max}^p$	$T_{2k\min}^E \leq T_{2k}^E \leq T_{2k\max}^E$	
$T_{3\min}^u \leq T_3^u \leq T_{3\max}^u$			

Com a adoção dos parâmetros determinados pelos algoritmos propostos no ajuste dos controladores suplementares espera-se que os autovalores de interesse ( $\lambda_{ij}^{\text{calc}}$ ) ocupem a região do espaço mostrada na Figura 20.

Figura 20 – Região do espaço desejada para os autovalores de interesse.





Fonte: Elaboração do autor.

#### 4.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo, foram apresentados três métodos estocásticos de otimização, consolidados na literatura, que serão utilizados para o ajuste simultâneo e coordenado dos parâmetros (ganhos e constantes de tempo) de controladores ESPs e do conjunto PI–UPFC–POD: Colônia de Abelhas Artificiais, Otimização por Enxame de Partículas e Algoritmo dos Vagalumes. Nesta discussão foram abordados os princípios biológicos que os inspiraram, além de suas principais características.

Também foi proposto um algoritmo híbrido, onde os mecanismos de intensificação e de diversificação do ABC foram alterados e incluídos ao PSO padrão 2006. Estas alterações incluíram a adaptação das equações de busca do método DE no processo de intensificação e do FA no de diversificação e visaram aumentar a capacidade do algoritmo de se desvencilhar de mínimos locais.

No Capítulo 5, os resultados encontrados, a partir de simulações computacionais, pelo algoritmo *Bee*–PSO são comparados aos obtidos pelos algoritmos SPSO, ABC e FA no intuito de validar a modelagem do SEP para estudos de estabilidade a pequenas perturbações, proposta nos capítulos anteriores.

## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são discutidos os resultados das simulações realizadas em dois sistemas teste conhecidos como “Simétrico de Duas Áreas” (SAUER; PAI, 1998) e *New England* (ARAUJO; ZANETTA, 2001), cujos diagramas unifilares são mostrados nas Figura 21 e Figura 28, utilizando a teoria desenvolvida nos Capítulos anteriores. Os programas computacionais utilizados foram criados no ambiente MATLAB<sup>®</sup> e o hardware empregado nestas simulações é constituído por um processador Intel Core I5 2,4 GHz com 6,0 GB de memória RAM (DDR3 1600 MHz). Os dados obtidos com as simulações visam dar subsídios para análises estáticas e dinâmicas de SEPs quando submetidos a pequenas perturbações.

Serão investigados os efeitos da instalação do UPFC em dois sistemas, sendo um de pequeno e outro de médio porte, que possuem problemas característicos de operação, como por exemplo, tensões com valores inadequados e baixos coeficientes de amortecimento de seus modos oscilatórios. Além disso, será examinada sua habilidade no controle do fluxo de potência na linha de transmissão onde está instalado.

Os sistemas testes em estudo apresentam modos oscilatórios dos tipos local e interárea, o que torna possível a análise do modelo utilizado para ESPs simultaneamente ao conjunto PI–UPFC–POD, ambos empregando sinais locais<sup>2</sup> em suas entradas. Entretanto, para que estes controladores cumpram sua função de estabilizar o SEP quando submetidos a pequenas perturbações, é necessário que forneçam amortecimento suplementar suficiente a estes modos de oscilação eletromecânica. Para isso é necessário que os parâmetros destes controladores sejam corretamente ajustados. Neste contexto, será avaliado o desempenho no ajuste dos parâmetros dos controladores de três métodos bio-inspirados: ABC, PSO e FA, em suas versões padrão, e de um algoritmo híbrido denominado *Bee* PSO, que incorpora os mecanismos de busca do ABC e do FA ao SPSO 2006.

Quanto aos níveis de amortecimento do SEP, assim como o proposto em (VALLE, 2014) este trabalho supõe quatro faixas, visualizadas na Tabela 1.

---

<sup>2</sup>Os ESPs utilizam a variação da velocidade angular dos geradores em que estão instalados e o POD faz uso da variação do fluxo de potência ativa da linha de transmissão adjacente à instalação do UPFC.

Tabela 1 – Definições das faixas de amortecimento utilizadas.

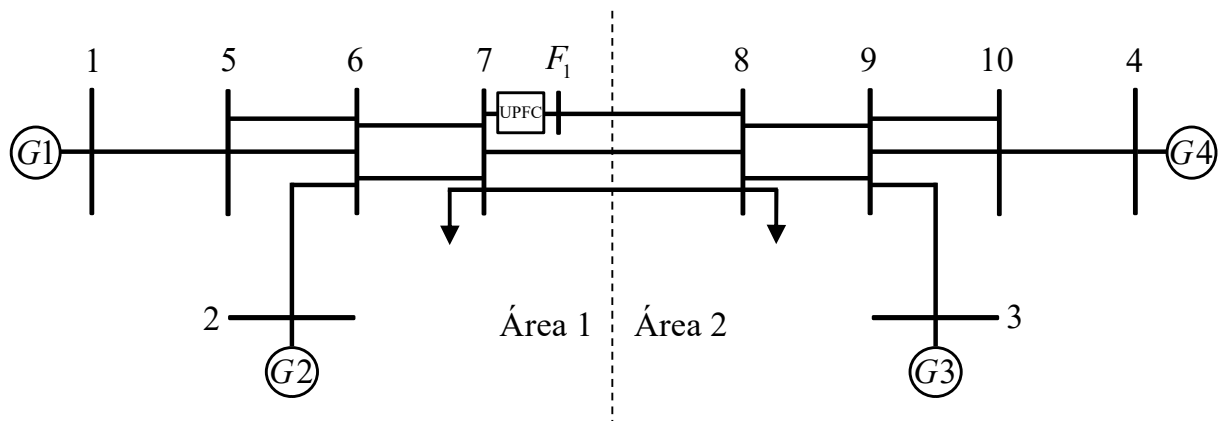
Faixa	Amortecimento
Crítica	$\xi < 3\%$
Alerta	$3\% \leq \xi < 5\%$
Segura	$5\% \leq \xi < 10\%$
Desejada	$\xi \geq 10\%$

Fonte: Adaptado de Valle (2014).

## 5.2 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

O primeiro sistema teste utilizado para as análises subseqüentes é denominado de Simétrico de Duas Áreas. Como seu nome sugere, é formado por duas áreas simétricas interligadas por três LTs longas e paralelas. Em resumo, é constituído por 4 geradores, 11 barras e 16 LTs, já considerando a inclusão de uma nova barra ( $F_1$ ) e uma nova LT ( $7 - F_1$ ) hipotéticas, utilizadas tão somente para investigar o comportamento do dispositivo UPFC. A LT  $7 - F_1$  é composta pela reatância do transformador que a acopla ao VSC2, cujo valor adotado foi de 0,05 p.u.. Os dados das barras, carregamentos do sistema, dos geradores e das LTs para o caso base estão contidos no Anexo A.

Figura 21 – Diagrama unifilar do sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Adaptado de Kundur (1994).

### 5.2.1 Análise do sistema elétrico de potência

Para analisar seu desempenho em contornar os problemas já mencionados, o conjunto PI-UPFC-POD está instalado em uma das LTs que interliga as áreas 1 e 2, entre as barras 7 e

8. Sob a ótica das análises estáticas realizadas neste texto, esta localização se justifica pelo fato da barra 7 possuir o pior nível de tensão do sistema, como pode ser observado na Tabela 3, além da grande liberdade de controle do fluxo de potência exercido pelo UPFC graças às duas LTs de folga existentes. Ademais, a LT 7 – 8 possui alta reatância indutiva em comparação as demais LTs do SEP, o que torna a interligação entre as áreas 1 e 2 eletricamente fraca, favorecendo o surgimento de modos oscilatórios do tipo interárea.

Para a situação em que o UPFC está conectado ao SEP sem exercer os controles de tensão e fluxo de potência (caso base), suas variáveis de controle assumem os valores contidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das variáveis da estrutura de controle do UPFC para caso base.

$V_p$ (p.u.)	$V_q$ (p.u.)	$I_q$ (p.u.)
-7,684e-6	3,244e-5	-2,030e-4

Fonte: Dados da pesquisa.

A análise da Tabela 2 indica que as variáveis de controle dos conversores do UPFC são desprezíveis e, desta maneira, não desempenham o controle da tensão na barra comum de instalação e nem o controle do fluxo de potência na LT adjacente à barra fictícia (7 –  $F_1$ ).

Na Tabela 3 são mostradas as magnitudes e fases das tensões de barra do sistema teste para o caso base.

Tabela 3 – Magnitude e ângulo das tensões – caso base.

Barra	Tensão (p.u.)	Fase (graus)	Barra	Tensão (p.u.)	Fase (graus)
1	1,030	9,49	6	0,969	-5,14
2	1,010	-0,40	7	<b>0,937</b>	<b>-13,70</b>
3	1,010	-10,39	8	0,953	-23,69
4	1,030	0,00	9	0,976	-15,13
5	1,005	4,94	10	1,006	-4,73

Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Tabela 3 é possível inferir que o SEP apresenta a tensão na barra 7 (0,937 pu) fora dos limites considerados aceitáveis de operação (0,95 – 1,05 pu). Esta violação dos limites da tensão pode ocasionar instabilidade de tensão caso uma perturbação de maior magnitude ocorrer no SEP.

Na Tabela 4 são apresentados os fluxos de potência e as perdas nas linhas de transmissão próximas à instalação do UPFC.

Tabela 4 – Fluxos de potência nas LTs próximas à instalação do UPFC – caso base.

LT	$P_{km}$ (MW)	$P_{mk}$ (MW)	$Q_{km}$ (MVar)	$Q_{mk}$ (MVar)	Perdas	
					$P$ (MW)	$Q$ (MVar)
7 – 8	69,65	-68,42	-22,21	5,05	1,231	-17,168
7 – 8	69,65	-68,42	-22,21	5,05	1,231	-17,168
6 – 7	688,42	-677,92	133,48	-31,29	10,49	102,19
6 – 7	688,42	-677,92	133,48	-31,29	10,49	102,19
9 – 8	701,22	-690,71	91,15	11,11	10,51	102,27
9 – 8	701,22	-690,71	91,15	11,11	10,51	102,27
F <sub>1</sub> – 8	57,56	-56,74	-19,25	-2,24	0,82	-21,59

Fonte: Dados da pesquisa.

O exame dos dados apresentados nas Tabelas 3 e 10 indica que para o sistema operar de maneira segura é necessário que a magnitude da tensão na barra 7 (0,937 pu) seja elevada para dentro da faixa aceitável de operação e, principalmente, seja eliminado o problema da instabilidade oscilatória do modo interárea.

Para solucionar estes dois problemas é proposto que um conjunto PI – UPFC – POD seja instalado na LT 7 – F<sub>1</sub> com o objetivo de elevar a tensão na barra 7, exercer o controle do fluxo de potência nesta linha e fornecer amortecimento suplementar ao modo interárea.

A fim de demonstrar as potencialidades do dispositivo e mitigar o problema estático citado, a tensão na barra 7 será ajustada em 1,0 pu e os fluxos de potência ativa e reativa na linha controlada (F<sub>1</sub> – 8) serão especificados em 60 MW e 30 MVar, respectivamente. Nesta análise, o controlador PI foi parametrizado com valores fixos de ganho (p.u.) e constantes de tempo (s) mostrados na Tabela 5. Nesta configuração, as variáveis da estrutura de controle do UPFC assumem os valores indicados na Tabela 6.

Tabela 5 – Ganhos e constantes de tempo dos controladores PI do UPFC para o sistema Simétrico de Duas Áreas.

Ganhos			Constantes de Tempo		
$K1^u$ (p.u.)	$K2^u$ (p.u.)	$K3^u$ (p.u.)	$T1^u$ (s)	$T2^u$ (s)	$T3^u$ (s)
0,01	0,01	1	0,01	0,01	0,01

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 6 – Valores das variáveis da estrutura de controle do UPFC exercendo os controles de tensão e fluxo de potência.

$V_p$ (p.u.)	$V_q$ (p.u.)	$I_q$ (p.u.)
-0,018	0,096	3,663

Fonte: Dados da pesquisa.

As informações contidas na Tabela 7 deixam claro que para o caso examinado, o UPFC foi capaz de elevar a tensão na barra 7 para 1,0 p.u. e realizar o controle do fluxo de potência de acordo com o especificado. Para isso, o VSC1 e o VSC2 do UPFC entregaram ao sistema aproximadamente 2 MVar e 366 MVar, respectivamente.

Vale mencionar que as injeções de potência reativa realizadas pelo VSC em derivação com a barra 7 se situa dentro da faixa mencionada na literatura que é de 100 a 475 MVar para o UPFC (GYUGYI et al., 1995; UZUNOVIC et al., 2001).

Tabela 7 – Magnitudes e ângulos das tensões para o caso analisado.

Barra	Tensão (p.u.)	Fase (graus)	Barra	Tensão (p.u.)	Fase (graus)
1	1,030	8,10	6	0,999	-6,25
2	1,010	-1,51	7	<b>1,000</b>	<b>-14,21</b>
3	1,010	-10,16	8	0,976	-23,21
4	1,030	0,00	9	0,987	-14,90
5	1,015	3,55	10	1,010	-4,69

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 8 são exibidos os fluxos de potência ativa e reativa nas LTs próximas à instalação do UPFC considerando-o desligado (caso base) e ligado (caso 1), enquanto que a geração de potências ativa e reativa do SEP para os casos analisados é mostrada na Tabela 9.

Pela análise dos dados da Tabela 8 é possível constatar que os fluxos de potência, ativa e reativa, foram controlados de maneira correta (caso base: 57,56 –j19,23 MVA e caso 1: 60 + j30 MVA) pelo dispositivo. Também é possível verificar a restrição de invariância de potência ativa do UPFC visto que, para os dois casos analisados, o somatório das potências ativas que entram nas barras 7 e 8 é igual à soma das cargas em 7 e 8 com as perdas nas linhas F<sub>1</sub> – 8 e 7 – 8.

Tabela 8 – Fluxos de potência, ativa e reativa, controlados pelo UPFC.

LT	$P_{km}$ (MW)	$P_{mk}$ (MW)	$Q_{km}$ (MVar)	$Q_{mk}$ (MVar)	Perdas	
					$P$ (MW)	$Q$ (MVar)
7 – 8	70,28	-69,18	-7,10	-14,05	-1,11	-21,15
7 – 8	70,28	-69,18	-7,10	-14,05	-1,11	-21,15
6 – 7	689,32	-679,78	-26,89	119,23	9,53	92,34
6 – 7	689,32	-679,78	-26,89	119,23	9,53	92,34
9 – 8	698,94	-688,89	34,12	63,55	10,05	97,66
9 – 8	698,94	-688,89	34,12	63,55	10,05	97,66
F <sub>1</sub> – 8	60,00	-58,87	30,00	-53,69	1,134	-23,69

Fonte: Dados da pesquisa.

Outra vantagem da inserção do UPFC neste sistema é a diminuição das perdas ativas, que pode ser observada na Tabela 9. Para o caso 1 houve diminuição nestas perdas de 5,54 MW, em relação ao caso base (ver Tabela 4). Além disso, houve a redução da injeção de reativos pelos geradores de 292,69 MVar (caso 1) comparando com o caso base, o que era esperado, visto que o UPFC tem a habilidade de injetar reativos no sistema graças ao banco de capacitores instalados entre seus conversores.

Tabela 9 – Geração de potências ativa e reativa do sistema, para os dois casos analisados.

Caso Base		Caso 1	
$P_G$ [MW]	$Q_G$ [MVar]	$P_G$ [MW]	$Q_G$ [MVar]
2826,30	933,07	2820,76	640,38

Fonte: Dados da pesquisa.

Uma vez resolvido o problema da tensão precária<sup>3</sup> na barra 7 do sistema teste, serão examinadas as habilidades do UPFC em fornecer amortecimento suplementar às oscilações eletromecânicas. No ponto de operação definido como caso base são determinados os autovalores da matriz de estados ( $A$ ) do SEP, sendo que os de interesse (dominantes), seus amortecimentos e frequências oscilatórias não amortecidas são mostrados na Tabela 10.

<sup>3</sup> Segundo a Revisão 6 do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST, em pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 230 kV, as faixas que caracterizam o nível de tensão precária são  $0,93 \text{ p.u.} \leq V < 0,95 \text{ p.u.}$  e  $1,05 \text{ p.u.} < V \leq 1,07 \text{ p.u.}$

Tabela 10 – Autovalores dominantes, frequências naturais e coeficientes de amortecimento – caso base para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Modo	Autovalores	$\xi$ (p.u.)	$\omega_n$ (Hz)
L1	$-0,3366 \pm j 6,2919$	0,0534	1,0028
I1	$0,0474 \pm j 4,3235$	-0,0110	0,6881
L2	$-0,2986 \pm j 5,8130$	0,0513	0,9264

Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com os valores mostrados na Tabela 10 para esta situação o SEP teste apresenta três modos eletromecânicos de oscilação, sendo dois locais (L1 e L2) com amortecimento na faixa segura e um modo interárea (I1) não amortecido, o qual é responsável pela instabilidade oscilatória.

Para elevar o amortecimento de todos os modos oscilatórios, de forma que se posicionem dentro da faixa desejada, serão analisados três cenários:

Cenário A – Um controlador suplementar de amortecimento (POD) é incluído na malha de controle do PI – UPFC visando modular a tensão em quadratura do conversor série ( $V_p$ ) para inserir o amortecimento desejado ( $\xi = 10\%$ ) ao modo I1;

Cenário B – Neste caso serão adicionados estabilizadores suplementares de potência (ESPs) às malhas de controle dos RATs dos geradores que mais contribuem na formação dos modos oscilatórios locais. Desta forma o SEP estará equipado com ESPs e com o conjunto UPFC – POD que atuarão de maneira coordenada para fornecer o amortecimento especificado ( $\xi = 10\%$ ) tanto para o modo I1 quanto para L1 e L2;

Cenário C – Aqui, a configuração de controladores do Cenário B será mantida com o objetivo de adicionar o maior amortecimento possível aos modos L1, L2 e I1 considerando três níveis de carregamento para o SEP (90%, 100% e 110%).

O sinal de entrada local adotado para o controlador POD é a variação da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) que flui pela linha 6 – 7. Em todas as simulações foi considerado  $T_w = 1$  s.

### 5.2.2 Desempenho dos métodos

Para as simulações envolvendo o sistema Simétrico de Duas Áreas os algoritmos utilizados neste trabalho adotaram uma população de 17 agentes com 8 variáveis para o cenário



A e 14 variáveis para os cenários B e C. Os demais parâmetros dos algoritmos assumem os valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores atribuídos aos parâmetros dos métodos ABC, FA, SPSO e Bee-PSO para os casos analisados no sistema Simétrico de Duas Áreas.

Caso	ABC	FA			SPSO			Bee – PSO				
	<i>lmt</i>	$\gamma$	$\beta_0$	$\alpha$	<i>w</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>w</i>	$c_1 = c_2$	<i>lmt</i>	$\alpha_0$	$\alpha_\infty$
A	68	1,0	1,0	0,25	0,72	1,19	1,19	0,72	1,19	68	0,50	0,10
B	119	1,0	1,0	0,25	0,72	1,19	1,19	0,72	1,19	119	0,50	0,10
C	119	1,0	1,0	0,25	0,72	1,19	1,19	0,72	1,19	119	0,50	0,10

Fonte: Dados da pesquisa.

Na parametrização das constantes de tempo (segundos) e dos ganhos (p.u.) dos controladores ESPs, POD e PI – UPFC são adotadas as restrições exibidas na Tabela 12. Além disso, a constante de tempo  $T_m$  assume o valor fixo de 0,001 p.u..

Tabela 12 – Limites dos parâmetros dos controladores ESPs, PI – UPFC e POD para o sistema Simétrico de Duas Áreas.

Limites	PI – UPFC				POD			ESPs		
	$T1^u$ (s)	$K1^u$ (p.u.)	$T3^u$ (s)	$K3^u$ (p.u.)	$T1^P$ (s)	$T2^P$ (s)	$K^P$ (p.u.)	$T1^E$ (s)	$T2^E$ (s)	$K^E$ (p.u.)
<b>Min.</b>	0,001	0,001	0,01	5,0	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	1,0
<b>Máx.</b>	1,000	0,500	1,00	15,0	1,00	1,00	3,0	1,00	1,00	10,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Nas simulações realizadas, considerou-se 25 ensaios para cada algoritmo, limitados a um número máximo de 2500, 5000 e 10000 avaliações da função objetivo, definida em (202), nos cenários A, B e C, respectivamente.

Nos cenários A e B, o método de melhor desempenho será aquele que obtiver o maior número de ensaios com soluções bem sucedidas, isto é, ajustes que elevem o amortecimento do(s) modo(s) oscilatório(s) de interesse ao nível especificado. Na ocorrência de métodos com igual desempenho, o desempate será feito considerando aquele que, no conjunto dos amortecimentos, alcançar os melhores resultados para: 1) o número de avaliações da função objetivo (velocidade de convergência); 2) a média; 3) a mediana; 4) o maior; 5) o menor e, finalmente; 6) para o desvio padrão.

Como já mencionado, os ensaios realizados no cenário C têm por objetivo produzir ajustes que levem o SEP a atuar com os maiores coeficientes de amortecimento possíveis. Desta forma, o algoritmo de otimização de melhor performance, neste caso, será o que atingir a maior média do conjunto de amortecimentos mínimos. Havendo resultados iguais, o método escolhido

será o que obtiver, sucessivamente: 1) a maior mediana; 2) o maior amortecimento geral; 3) o maior menor amortecimento geral e; 4) o menor desvio padrão.

Os melhores resultados para cada critério considerado serão assinalados em negrito nas Tabelas correspondentes.

#### Cenário A:

Na Tabela 13 estão os dados relativos ao número de soluções bem sucedidas (que convergiram) alcançadas pelos algoritmos no cenário A considerando uma tolerância de  $\pm 1\%$  no amortecimento desejado ( $\xi^{des}$ ) para o modo interárea. Os valores médio, mínimo e máximo da velocidade de convergência, referem-se ao número de cálculos da função objetivo necessários para o método determinar um amortecimento dentro da faixa considerada, excluindo as avaliações das tentativas em que os algoritmos não obtiveram sucesso, isto é, que não convergiram (limitados a 2500 cálculos da função objetivo).

Tabela 13 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Método	Número de soluções com $0,99\xi^{des} \leq \xi^{l1} \leq 1,01\xi^{des}$	Aval. Da Func. Obj.		
		Média	Mín.	Máx
ABC	23	625	140	2500
FA	16	844	155	2245
<b>SPSO</b>	<b>25</b>	<b>183</b>	15	330
<b>Bee – PSO</b>	<b>25</b>	281	129	651

Fonte: Dados da pesquisa.

Verificando a Tabela 13 constata-se que apenas o SPSO e o *Bee – PSO* convergiram para todos os testes realizados, porém, a versão padrão do PSO foi mais veloz, visto que exigiu um número inferior, em média, de cálculos da função objetivo para produzir parâmetros para o controlador PI – UPFC – POD que levaram o SEP a operar com o amortecimento do modo interárea no interior da região especificada.

Dando prosseguimento ao comparativo, é exposta na

Tabela 14, uma análise estatística do conjunto de amortecimentos dos modos interárea determinados pelos algoritmos de otimização empregados.

Tabela 14 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos do modo interárea obtidos pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Método	Coeficientes de Amortecimento (p.u.)				
	Maior	Menor	Média	Mediana	Desvio Padrão
ABC	0,10627	0,09912	0,10025	0,09998	0,00133
FA	0,10234	0,09827	0,01002	0,01004	0,00109
<b>SPSO</b>	<b>0,10000</b>	<b>0,09994</b>	<b>0,10000</b>	<b>0,10000</b>	<b>0,00001</b>
<b>Bee – PSO</b>	0,10020	0,09946	0,09996	0,09999	0,00015

Fonte: Dados da pesquisa.

A avaliação das informações contidas na

Tabela 14 mostra que, apesar da proximidade dos amortecimentos do modo interárea determinados pelos métodos, o SPSO apresenta melhor desempenho em todos os parâmetros avaliados. Com isso, chega-se a conclusão que o SPSO alcançou o melhor desempenho para este cenário.

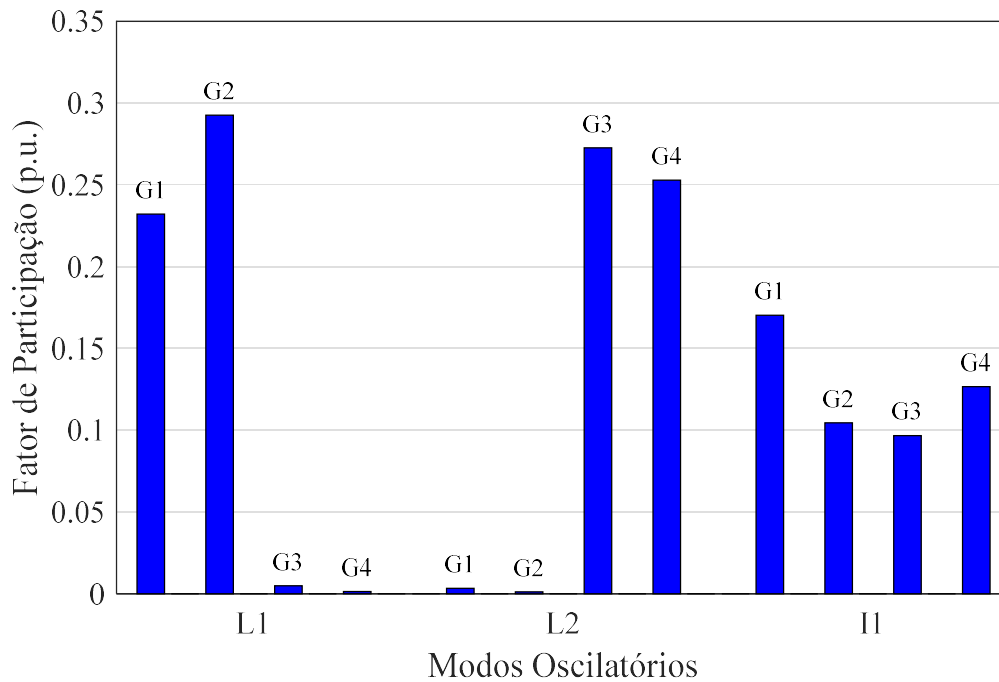
#### Cenário B:

Para determinar em quais geradores serão instalados os ESPs será necessário conhecer quais deles mais influenciam os modos oscilatórios locais. Para isso, são mostradas na Figura 22 as variáveis de estado mais participativas associadas aos modos oscilatórios L1, L2 e I1 do sistema.

Analisando a Figura 22 chega-se à conclusão de que os geradores G2 e G3 possuem as maiores participações na formação dos modos locais de oscilação L1 e L2, respectivamente. Desta forma, para assegurar que todos os modos oscilatórios do SEP se posicionem dentro da faixa desejada de amortecimento, esses geradores deverão ser equipados com controladores ESPs.

Os dados relativos ao número de sucessos encontrados nos ensaios a partir do funcionamento simultâneo dos controladores ESPs nos geradores G2 e G3 e do PI – UPFC – POD são consolidados na Tabela 15.

Figura 22 – Fatores de participação dos geradores em relação aos modos oscilatórios dominantes do sistema teste Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 15 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Método	Número de soluções com $0,99\xi^{des} \leq \xi^{min} \leq 1,01\xi^{des}$	Aval. Da Func. Obj.		
		Média	Mín.	Máx
ABC	12	1377	60	2540
FA	2	2635	1495	3775
SPSO	13	1748	374	5000
Bee – PSO	17	1582	435	4353

Fonte: Dados da pesquisa.

Por meio da observação dos dados contidos na Tabela 15 é possível realizar duas análises. Na primeira, verifica-se que o algoritmo *Bee – PSO* obteve o melhor desempenho, alcançando sucesso em 17 dos 25 ensaios ou, em outras palavras, convergiu em 68% das tentativas. Na segunda, é analisado o desempenho dos algoritmos com relação aos custos computacionais, medidos em função do número de avaliações da função objetivo. Neste quesito, verifica-se ligeira vantagem do ABC em relação ao *Bee – PSO*.

Os melhores e piores valores encontrados para os coeficientes de amortecimento mínimos resultantes dos parâmetros fornecidos pelos algoritmos de otimização bem como suas médias, medianas e desvios padrão são referidos na Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos do modo interárea obtidos pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Método	Coeficientes de Amortecimento (p.u.)				
	Maior	Menor	Média	Mediana	Desvio Padrão
<b>ABC</b>	0,10075	0,05900	<b>0,09329</b>	0,09891	<b>0,01077</b>
<b>FA</b>	0,10014	0,05591	0,08678	0,08920	0,01084
<b>SPSO</b>	0,10031	0,05703	0,08808	0,09926	0,01454
<b>Bee – PSO</b>	<b>0,10000</b>	<b>0,05917</b>	0,09314	<b>0,09964</b>	0,01176

Fonte: Dados da pesquisa.

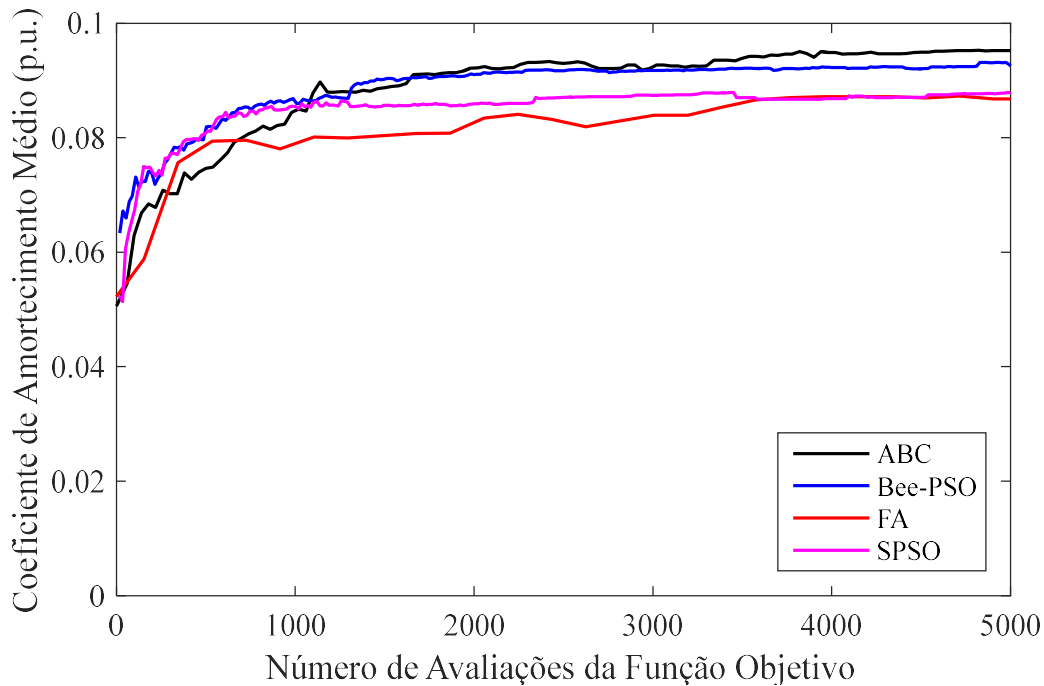
Enquanto que o amortecimento mínimo mais próximo do especificado, indicado como "Melhor", mostra a capacidade do algoritmo em encontrar o ajuste desejado, sua média, mediana e desvio padrão fornecem informações sobre a robustez do algoritmo. Assim, quanto mais próximas do desejado suas média e mediana estiverem e menor for seu desvio padrão maior será a eficiência do método em fornecer ajustes de qualidade em um único ensaio. Partindo destas premissas e observando os resultados registrados na Tabela 16, o ABC obteve a melhor média dos amortecimentos mínimos nos ensaios realizados com o menor desvio padrão enquanto que o *Bee – PSO* foi superior nos índices restantes.

As características de convergência do ABC, FA, SPSO e *Bee – PSO* na busca de ajustes para os controladores que amortecem os modos oscilatórios dominantes nos níveis especificados são mostradas na Figura 23.

A evolução média dos coeficientes de amortecimentos mínimos em função do número de cálculos da função objetivo exibida na Figura 23 corrobora a melhor performance do ABC frente ao *Bee – PSO* discutidas anteriormente a partir dos resultados da Tabela 16 e considerando os critérios estabelecidos neste trabalho.

Finalizado o exame do comportamento dos métodos para este cenário conclui-se sobre o potencial e a superioridade da abordagem de projeto para os controladores ESPs e PI – UPFC – POD utilizando o algoritmo *Bee – PSO* em comparação ao SPSO e FA e ABC.

Figura 23 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento mínimos para o cenário B do sistema teste Simétrico de Duas Áreas



Fonte: Dados da pesquisa.

### Cenário C:

Neste cenário, o interesse é investigar qual dos algoritmos de otimização fornece ajustes para os controladores suplementares que leve o amortecimento mínimo do SEP ao maior nível, em média. Considerando a mesma configuração dos controladores suplementares utilizada no cenário anterior, podem ser visualizados na Tabela 17 os dados estatísticos do total de amortecimentos mínimos resultantes dos ajustes determinados pelos algoritmos empregados.

Tabela 17 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos do modo interárea obtidos pelos algoritmos no cenário C para o sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Método	Coeficientes de Amortecimento (p.u.)				
	Maior	Menor	Média	Mediana	Desvio Padrão
ABC	0,24705	0,16147	0,21108	0,21248	0,02205
FA	<b>0,27981</b>	0,16944	0,22067	0,21829	0,02247
SPSO	0,24929	0,16377	0,21824	0,21710	0,01664
Bee – PSO	0,24715	<b>0,21836</b>	<b>0,22559</b>	<b>0,22281</b>	<b>0,00993</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

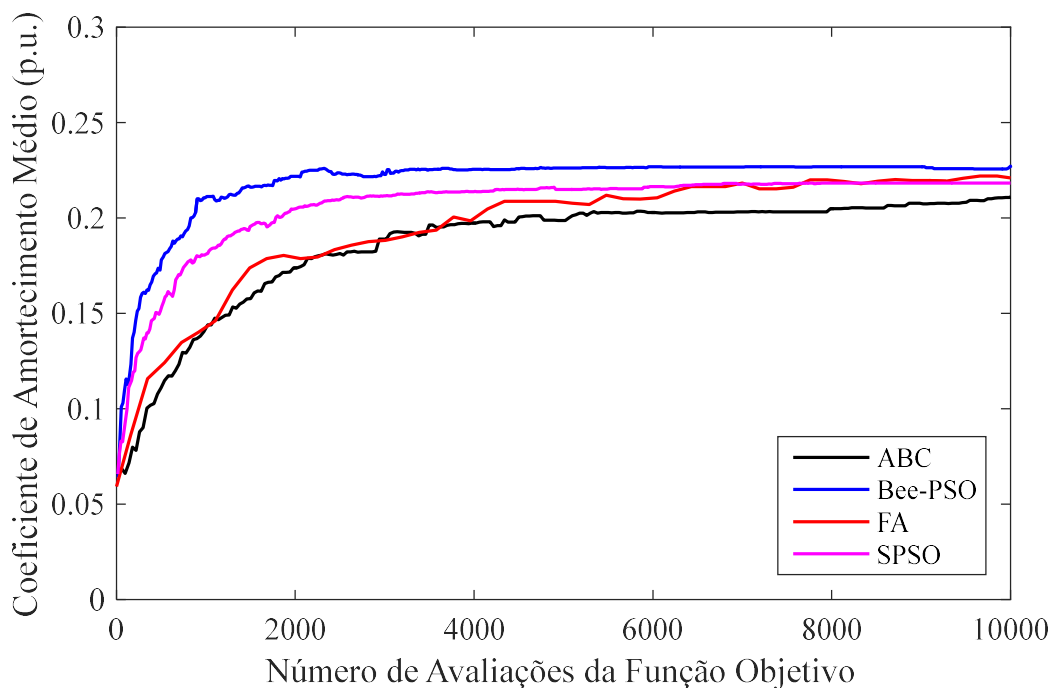
O exame da Tabela 17 demonstra que os ajustes determinados pelo *Bee – PSO* elevaram o amortecimento mínimo do SEP, em média, ao maior nível dentre todos os métodos



analisados. O algoritmo *Bee* – PSO também apresentou resultados melhores para a mediana e desvio padrão além de obter o maior “pior” amortecimento mínimo. Entretanto, o maior amortecimento mínimo foi conseguido por um ajuste fornecido pelo FA. É importante ressaltar que neste cenário, os métodos consideraram três pontos de operação diferentes para o SEP com carregamentos de 90%, 100% (nominal) e 110%.

É apresentada graficamente na Figura 24 uma comparação em termos do avanço médio dos coeficientes de amortecimento mínimos, para três pontos de operação, ao longo das avaliações da função objetivo para os quatro algoritmos analisados.

Figura 24 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento mínimos para o cenário C do sistema teste Simétrico de Duas Áreas



Fonte: Dados da pesquisa.

A necessidade de um menor número de avaliações da função objetivo para alcançar maiores amortecimentos mínimos mostrada pelos gráficos da Figura 24 reforça a predominância dos parâmetros calculados pelo *Bee* – PSO frente aos outros métodos bio-inspirados utilizados. Com isso, no cenário C, a melhor performance foi atingida pelo *Bee* – PSO assim como no cenário anterior.

Dentro da sistemática proposta, o algoritmo híbrido proposto neste trabalho logrou desempenho superior ao ABC, FA e SPSO em dois dos três cenários estabelecidos, sendo superado apenas no cenário A, por pequena margem, pelo SPSO.

### 5.2.3 Análise da estabilidade a pequenas perturbações

Definida a opção pelo SPSO no cenário A e pelo *Bee* – PSO nos outros cenários, o conjunto de parâmetros utilizados para o ajuste dos controladores foi o obtido no ensaio que apresentou o menor valor da função objetivo, transcorridos 2500, 5000 e 10000 cálculos para os cenários A, B e C, nesta ordem. São mostrados nas Tabelas 18 e 19 os parâmetros de ajuste dos controladores ESPs, UPFC–POD e PIs fornecidos pelo algoritmo SPSO e *Bee* – PSO nos ensaios escolhidos para os três cenários estudados.

Tabela 18 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos ESPs e POD ajustados pelo algoritmo de melhor desempenho para os cenários analisados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Disp.	Cenário A			Cenário B			Cenário C		
	Melhor Desempenho			Melhor Desempenho			Melhor Desempenho		
	SPSO ensaio 11			<i>Bee</i> – PSO ensaio 25			<i>Bee</i> – PSO ensaio 24		
	T1	T2	K	T1	T2	K	T1	T2	K
ESP 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESP 2	-	-	-	0,1638	0,0454	1,000	0,2628	0,1374	5,288
ESP 3	-	-	-	0,3092	0,1870	1,693	0,9906	0,6287	8,359
ESP 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
POD	0,0711	0,7811	1,617	0,0177	0,3671	0,405	0,1240	0,5982	2,036

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 19 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos controladores PIs ajustados pelo algoritmo de melhor desempenho para os cenários analisados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas.

Cenário	T1 = T2	T3	K1 = K2	K3	T <sub>m</sub>
A	0,1001	0,6830	0,082	5,000	0,001
B	0,1050	0,2500	0,063	6,968	0,001
C	0,8610	0,1240	0,026	13,807	0,001

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da parametrização obtida pelo SPSO e *Bee* – PSO apresentada nas Tabelas 18 e 19 o sistema Simétrico de Duas Áreas passa a trabalhar com os autovalores de interesse, coeficientes de amortecimento e suas respectivas frequências conforme mostrados nas Tabelas 20, 21 e 22 nos cenários A, B e C.

Tabela 20 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário A do sistema Simétrico de Duas Áreas.

<b>Modos</b>	<b>Autovalor</b>	<b><math>\omega_{ni}</math> (Hz)</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>
L1	$-0,3474 \pm j 5,8136$	0,9269	0,0596
I1	$-0,4323 \pm j 4,3018$	0,6881	0,1000
L2	$-0,4889 \pm j 6,3775$	1,0180	0,0764

Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Tabela 20, percebe-se que os parâmetros calculados pelo algoritmo SPSO fixou o amortecimento do modo oscilatório interárea em 10%, conforme especificado em projeto o que levou o SEP para a região de estabilidade. Comparando as Tabelas 10 e 20, observa-se que no método empregado, as frequências naturais não amortecidas pouco se alteraram, o que era esperado, já que a função objetivo utilizada exerce controle sobre estas variáveis. A respeito dos amortecimentos dos modos locais, nota-se que L1 pouco se alterou enquanto que L2 teve um incremento de aproximadamente 49%. Este efeito não se deve ao controlador POD, que possui pouca influência sobre estes modos, e sim ao UPFC que injetou reativos no sistema para elevar o perfil de tensão, o que desta forma contribuiu positivamente para o aumento.

Tabela 21 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário B do sistema Simétrico de Duas Áreas.

<b>Modos</b>	<b>Autovalor</b>	<b><math>\omega_{ni}</math> (Hz)</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>
L1	$-0,5822 \pm j 5,7915$	0,9264	0,1000
I1	$-0,4324 \pm j 4,3018$	0,6881	0,1000
L2	$-0,6297 \pm j 6,2692$	1,0028	0,0999

Fonte: Dados da pesquisa.

Examinando os resultados obtidos com o *Bee* – PSO para o cenário B, expostos na Tabela 21, verifica-se um aumento da margem de estabilidade do SEP, graças à inclusão de ESPs nos geradores G1 e G2. Isso faz com que todos os modos oscilatórios de interesse experimentem o amortecimento especificado de 10%, garantindo maior segurança na operação do sistema. Além disso as frequências dos modos oscilatórios não sofrem nenhuma alteração o que mais uma vez comprova a eficiência da função objetivo escolhida.

No cenário C, a função objetivo guiou o *Bee* – PSO no espaço de soluções visando um ajuste para os controladores suplementares capaz de fornecer o maior amortecimento possível ao SEP considerando três condições de carregamento diferentes, a saber: diminuição de 10%, nominal e incremento de 10%.

Tabela 22 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário C do sistema Simétrico de Duas Áreas.

<b>Modos</b>	<b>Autovalor</b>	<b><math>\omega_{ni}</math> (Hz)</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>
L1	$-2,2465 \pm j 5,8376$	0,9953	0,3587
I1	$-1,4147 \pm j 4,2046$	0,7060	0,3189
L2	$-1,6878 \pm j 6,0694$	1,0026	0,2679

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados contidos na Tabela 22 referem-se ao ponto de operação no carregamento nominal do sistema. Sua análise mostra a elevada margem de carregamento que o ajuste calculado pelo *Bee* – PSO proporcionou ao SEP em questão. Quanto às frequências dos modos de interesse, observa-se pequenas alterações que não comprometem de forma alguma a integridade da operação do sistema.

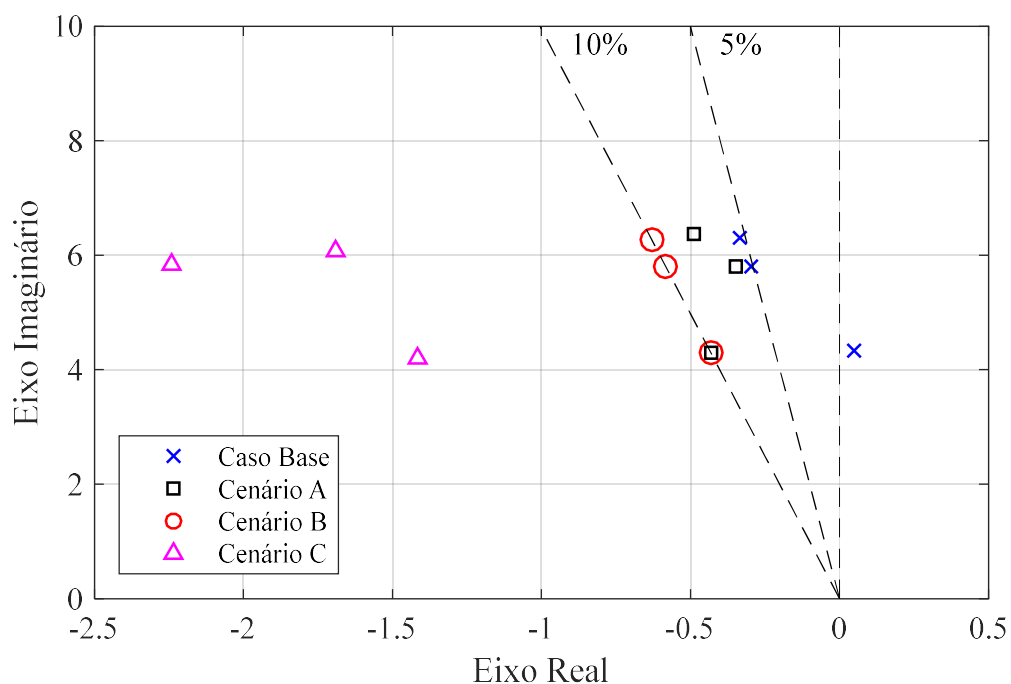
Na Figura 25 é mostrada a localização dos autovalores de interesse no plano complexo considerando a atuação de ESPs nos geradores síncronos G2 e G3 e do conjunto PI – UPFC – POD instalado na LT 7 – 8 no sistema teste Simétrico de Duas Áreas operando no carregamento nominal considerando o caso base e os três cenários estudados.

Fica claro pela observação da Figura 25 que em todos os cenários analisados o SEP operou na região de estabilidade, porém, a maior margem foi obtida para o cenário C conforme já discutido.

Na Figura 26 são mostrados a resposta da variação da velocidade angular do gerador 1 contra o gerador de referência (G4) após uma perturbação em degrau de 0,05 p.u. na potência mecânica de entrada do gerador de referência.

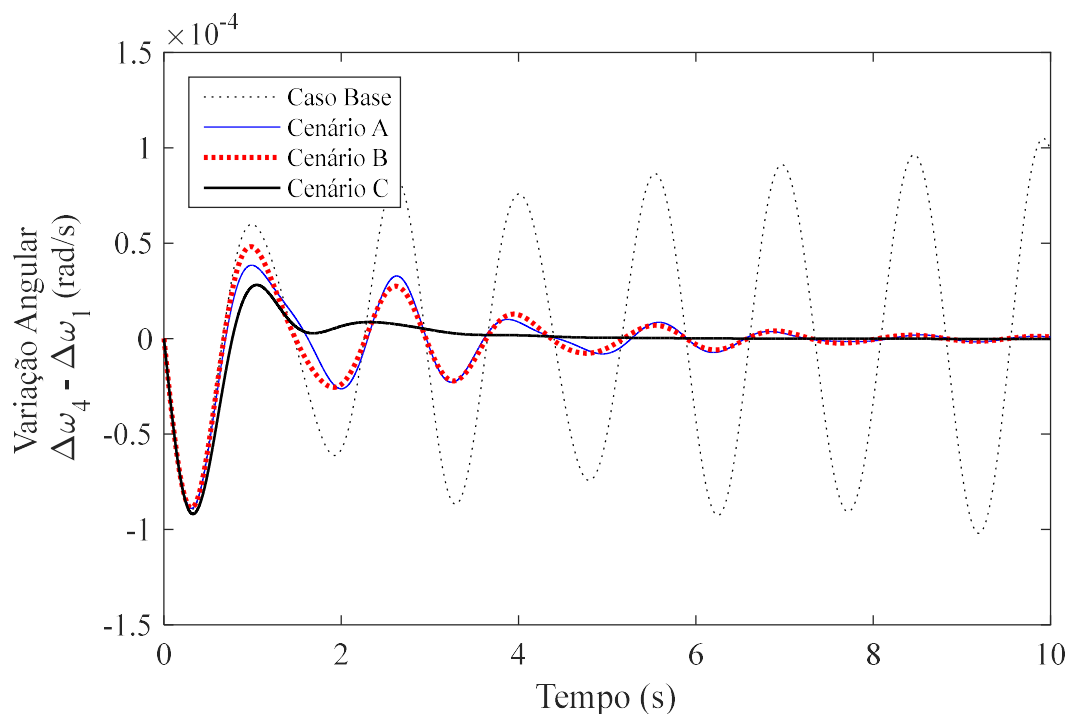
A verificação da Figura 26 reforça que o SEP antes instável para a condição do caso base passa a ser bem amortecido para as condições dos cenários A, B e C. É interessante notar que quando incluídos os ESPs (cenário B), configurados para inserir 10% de amortecimento aos modos L1 e L2, eles pouco contribuíram no aumento do amortecimento do sistema, o que era previsto, pois antes da inclusão, os modos L1 e L2 já possuíam amortecimentos próximos ao do modo I1. Assim, conclui-se que a configuração do cenário A já seria suficiente para garantir boa margem de estabilidade ao SEP. Já para o cenário C, observa-se a elevada margem de estabilidade, já verificada na Figura 25, em comparação aos cenários A e B.

Figura 25 – Posição dos autovalores para os cenários avaliados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Dados da pesquisa.

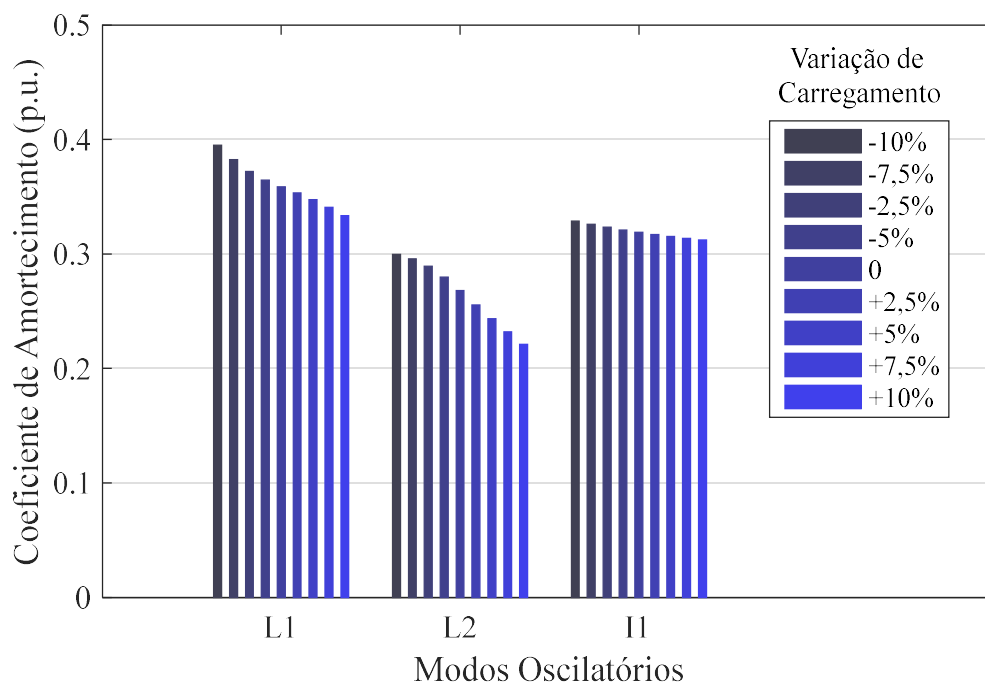
Figura 26 – Variação angular  $\Delta\omega_4 - \Delta\omega_1$  para os cenários analisados no sistema teste Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Dados da pesquisa.

No funcionamento cotidiano, os SEPs estão sujeitos a variações de carregamento o que implica na necessidade de verificação da margem de estabilidade a pequenas perturbações em outros pontos de operação. Para tentar garantir um nível de amortecimento mínimo no entorno do carregamento nominal, a função objetivo utilizada pelos métodos de otimização, no cenário C, considera três diferentes carregamentos para calcular os parâmetros dos controladores suplementares. São mostrados na Figura 27 os coeficientes de amortecimento dos modos oscilatórios de interesse, resultantes da parametrização dos controladores com as constantes de tempo e ganhos fornecidos pelo *Bee* – PSO em nove situações de carregamento.

Figura 27 – Amortecimentos dos modos oscilatórios com alteração do carregamento do SEP no sistema teste Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Dados da pesquisa.

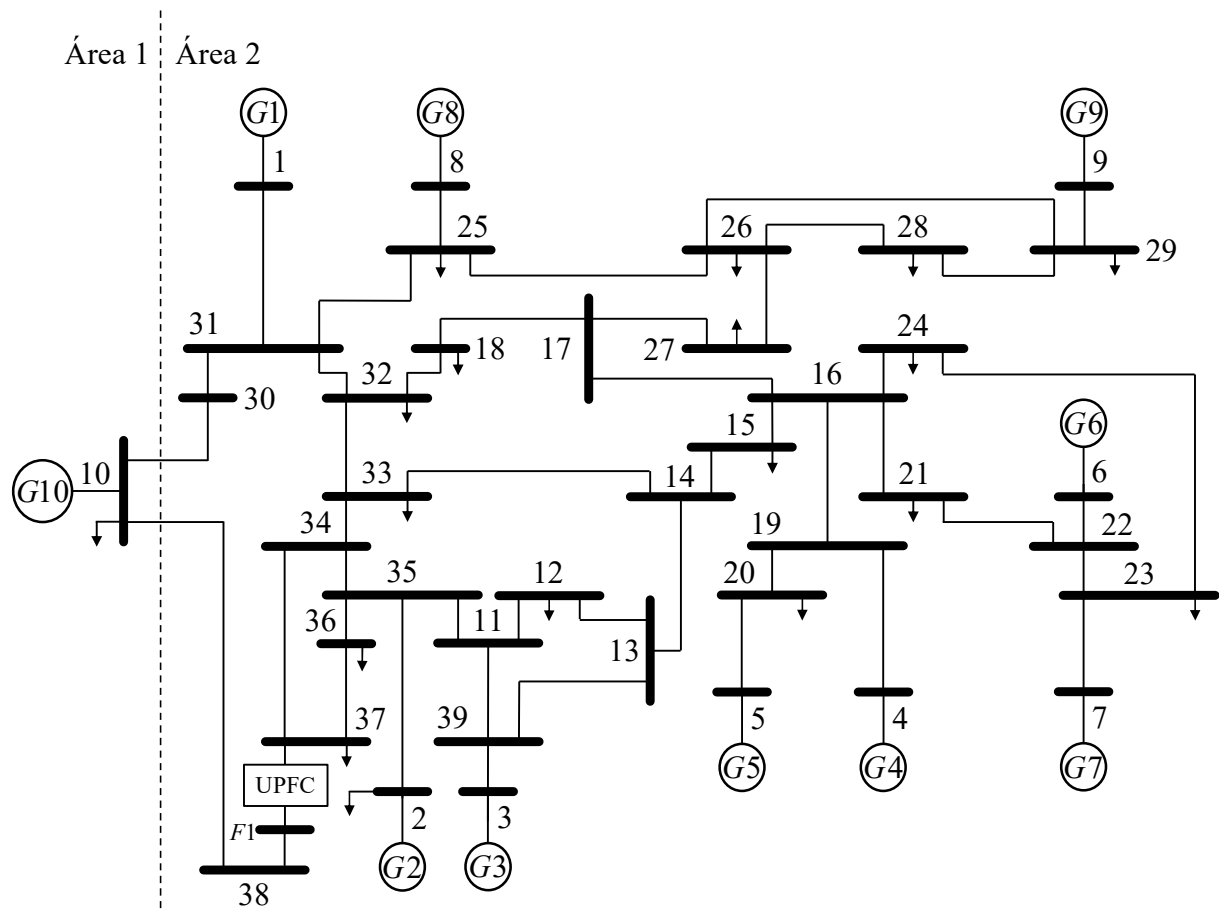
Analisando a Figura 27 é possível concluir que, para os três modos mostrados, os maiores e menores amortecimentos (39% e 33% para L1, 30% e 22% para L2 e 33% e 31% para I1) ocorrem quando o carregamento do SEP assume os níveis mínimo e máximo considerados pelos algoritmos de otimização, isto é, -10% e +10%, ambos do nominal. Para os outros pontos de operação verificados, os amortecimentos se situam entre os valores já mencionados. Embora a margem de estabilidade deste sistema com o ajuste escolhido seja elevada em todos os carregamentos verificados (mínimo de aproximadamente 22% para L2, já mostrado na Tabela 17), vale ressaltar a importância desta verificação visto que, para este caso, com o aumento do carregamento houve diminuição considerável do amortecimento dos modos

L1 e L2, 15% e 27%, respectivamente. Para o modo interárea, esta diminuição foi menos acentuada, ficando em torno de 6%.

### 5.3 SISTEMA NEW ENGLAND

O SEP teste conhecido como New England (ARAÚJO; ZANETTA, 2001), representado pelo diagrama unifilar mostrado na Figura 28, é constituído por 10 geradores, 40 barras e 47 linhas de transmissão (LTs), já considerando a inclusão de uma nova barra ( $F_1$ ) e uma nova LT (37- $F_1$ ) fictícias, utilizadas exclusivamente para realizar simulações com o UPFC. Seus dados, considerando o caso base definido na sequência, podem ser acessados no Anexo B.

Figura 28 – Diagrama unifilar do sistema *New England*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3.1 Análise do sistema elétrico de potência

O conjunto PI–UPFC–POD está convenientemente posicionado entre as barras 37 e 38, próximo a uma das LTs que interligam as áreas 1 e 2 do SEP, local este propício ao surgimento de modos oscilatórios do tipo interárea (PAL; CHAUDHURI, 2005). Além disso, a alta reatância indutiva desta LT em comparação às demais, possibilita maior margem de compensação reativa pelo UPFC. Consequentemente, a qualidade desta posição torna possível elevar as tensões de barra inferiores a 0,95 p.u. e introduzir amortecimento suplementar ao modo interárea.

Entre as barras 37 e  $F_1$  foi considerada a reatância do transformador que acopla o VSC2 a LT, cujo valor adotado foi de 0,01 pu. Os valores dos parâmetros do controlador PI ( $K1^u$ ,  $K2^u$ ,  $K3^u$ ,  $T1^u$ ,  $T2^u$  e  $T3^u$ ) serão determinados pelos algoritmos de otimização e  $T_m$  foi fixado em 0,001 p.u..

Para avaliar a capacidade de controle do UPFC, os valores dos ganhos (p.u.) e constantes de tempo (segundos) dos controladores PI acoplados foram considerados fixos, e podem ser analisados na Tabela 23.

Tabela 23 – Parâmetros dos controladores PI do UPFC para o sistema *New England*.

Ganhos			Constantes de Tempo		
$K1^u$ (p.u.)	$K2^u$ (p.u.)	$K3^u$ (p.u.)	$T1^u$ (s)	$T2^u$ (s)	$T3^u$ (s)
0,01	0,01	1,0	0,01	0,01	0,01

Fonte: Dados da pesquisa.

Quando o UPFC é inserido ao SEP e não desempenha suas funções de controle sobre a tensão e o fluxo de potência (situação que será chamada de caso base), as variáveis de controle relacionadas aos VSCs apresentam valores próximos de zero, confirmando a inexistência de injeções de potência pelo dispositivo. Nessa condição de operação, o fluxo de potência na linha  $F_1 - 38$  é  $-16,41 - j121,50$  MVA e a tensão na barra 37 é 0,94 pu. Na Tabela 24 pode-se verificar o perfil de tensões do sistema para este caso.

Analisando a Tabela 24 é possível inferir que o SEP apresenta as tensões nas barras 12, 15, 33, 34, 36 e 37 fora dos limites aceitáveis de operação (0,95 – 1,05 p.u.). Esta violação dos limites pode ocasionar instabilidade de tensão caso uma perturbação de maior magnitude ocorra no SEP. Para ajustar as tensões das barras do SEP dentro dos limites recomendáveis, o fluxo de potência na LT  $F_1 - 38$  e a magnitude da tensão na barra 37, controlados pelo UPFC,



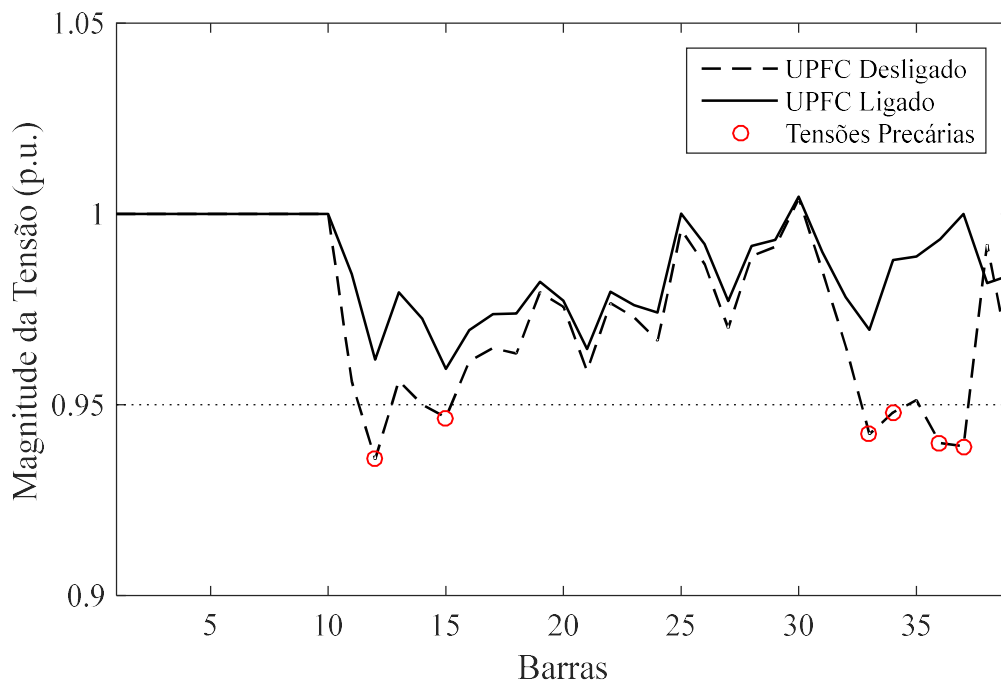
foram ajustados em  $-75 - j150$  MVA e 1.0 p.u., respectivamente. Os perfis de tensão das barras do sistema antes (caso base) e depois da atuação do UPFC podem ser observados na Figura 29.

Tabela 24 – Perfil de tensões do sistema *New England* para o caso base.

Barra	Tensão (p.u.)	Barra	Tensão (p.u.)	Barra	Tensão (p.u.)	Barra	Tensão (p.u.)
1	1,0	11	0,9561	21	0,9589	31	0,9851
2	1,0	12	0,9357	22	0,9766	32	0,9652
3	1,0	13	0,9563	23	0,9729	33	0,9423
4	1,0	14	0,9500	24	0,9667	34	0,9480
5	1,0	15	0,9466	25	0,9959	35	0,9512
6	1,0	16	0,9614	26	0,9868	36	0,9400
7	1,0	17	0,9648	27	0,9701	37	0,9391
8	1,0	18	0,9634	28	0,9890	38	0,9920
9	1,0	19	0,9794	29	0,9914	39	0,9608
10	1,0	20	0,9756	30	1,004	$F_1$	0,9518

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 29 – Perfil de tensão do sistema para a faixa de carregamento especificada: a) sem atuação e b) com atuação do UPFC.



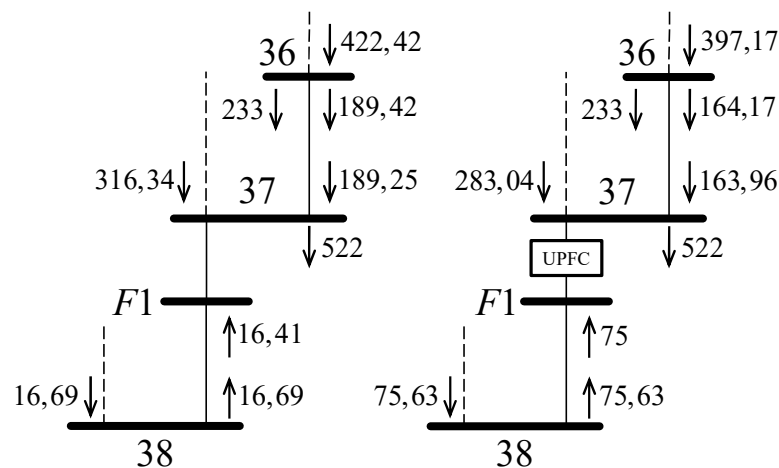
Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Figura 29 constata-se que o problema de subtensão nas barras assinaladas foi corrigido. Nessa condição de operação, as variáveis de controle do UPFC assumem os valores (em p.u.) de  $V_p = -0,101$ ,  $V_q = -0,094$  e  $I_q = 2,882$ .

Os fluxos de potência ativa próximos à barra fictícia para os dois casos analisados são mostrados na Figura 30.

A comparação entre os fluxos antes e depois da instalação do UPFC permite constatar que o mesmo não fornece potência ativa ao SEP uma vez que toda potência ativa gerada (consumida) pelo conversor VSC1 é absorvida (gerada) pelo VSC2. Desta forma o dispositivo remaneja os fluxos ativos de modo a conseguir implementar o controle especificado. Com os dados apresentados na Figura 30 é possível realizar o balanço nodal de potência ativa (em MW) nas barras de instalação do UPFC e, assim, validar o controle dos fluxos realizado pelo dispositivo.

Figura 30 – Controle de potência ativa realizado pelo UPFC.



Fonte: Dados da pesquisa.

A comparação entre os fluxos antes e depois da instalação do UPFC permite constatar que o mesmo não fornece potência ativa ao SEP uma vez que toda potência ativa gerada (consumida) pelo conversor VSC1 é absorvida (gerada) pelo VSC2. Desta forma o dispositivo remaneja os fluxos ativos de modo a conseguir implementar o controle especificado. Com os dados apresentados na Figura 30 é possível realizar o balanço nodal de potência ativa (em MW) nas barras de instalação do UPFC e, assim, validar o controle dos fluxos realizado pelo dispositivo.

Para o caso base analisado (UPFC desligado), os autovalores de interesse da matriz de estado do EPS são apresentados na Tabela 25, bem como as frequências de oscilação ( $\omega_{ni}$ ) e os coeficientes de amortecimento ( $\xi$ ) associados.

Os autovalores expostos na Tabela 25 indicam que o SEP teste apresenta, neste ponto de operação, oito modos oscilatórios locais sendo três instáveis (L1 a L3) e cinco fracamente

amortecidos, sendo três na faixa crítica (L4, L5 e L7) e dois na faixa de alerta (L6 e L8). Além disso ocorre um modo interárea (I1) fracamente amortecido na região crítica. Em vista disso, fica caracterizada a instabilidade oscilatória do SEP para a condição de operação no carregamento nominal.

Tabela 25 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o caso base do sistema *New England*.

<b>Modos</b>	<b>Autovalor</b>	<b><math>\omega_{ni}</math> (Hz)</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>
L1	$0,1717 \pm j 5,9098$	0,9410	-0,0290
L2	$0,1291 \pm j 6,3571$	1,0120	-0,0203
L3	$0,0848 \pm j 6,8490$	1,0901	-0,0124
I1	$-0,0015 \pm j 3,4821$	0,5542	0,0004
L4	$-0,1068 \pm j 6,4583$	1,0280	0,0165
L5	$-0,1982 \pm j 8,2615$	1,3152	0,0240
L6	$-0,2516 \pm j 8,3149$	1,3240	0,0302
L7	$-0,2114 \pm j 7,1701$	1,1417	0,0295
L8	$-0,2703 \pm j 8,0966$	1,2893	0,0334

Fonte: Dados da pesquisa.

No intuito de posicionar os modos oscilatórios de interesse no interior da região desejada do plano complexo (Figura 20) e avaliar o desempenho dos algoritmos bio-inspirados, serão analisados três cenários:

**Cenário A** – O controlador POD é incluído ao dispositivo PI–UPFC em combinação com ESPs conectados às malhas de controle dos RATs dos geradores que mais contribuem na formação dos modos oscilatórios locais instáveis segundo o critério dos fatores de participação proposto em Kundur (1994) de forma a introduzir o amortecimento desejado ( $\xi = 10\%$ ) aos modos I1, L1, L2 e L3 observando o carregamento nominal do SEP;

**Cenário B** – Aqui, o objetivo é elevar o amortecimento de todos os modos oscilatórios de interesse ao nível desejado ( $\xi \geq 10\%$ ) por meio da inclusão de ESPs às malhas de controle dos RATs dos geradores mais participativos na formação dos modos oscilatórios locais (L1 a L8). Desta forma, os controladores suplementares de amortecimento atuarão de maneira coordenada e simultânea considerando o ponto de operação nominal do SEP (100% de carregamento);

**Cenário C** – Neste caso, será utilizada a configuração de controladores do Cenário B visando fornecer o maior amortecimento possível a todos os modos oscilatórios de interesse considerando três pontos de operação para o SEP (90%, 100% e 110% de carregamento).

O sinal de entrada local adotado para o controlador POD é a variação da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) que flui pela linha 37 – 34. Em todas as simulações a constante de tempo do filtro *washout* ( $T_w$ ) dos ESPs foi fixada em um segundo.

### 5.3.2 Desempenho dos métodos

Todos os algoritmos bio-inspirados experimentados neste trabalho utilizaram uma população de 21 agentes com 16 variáveis para o cenário A e 31 variáveis para os cenários B e C. Os valores atribuídos aos demais parâmetros dos algoritmos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Valores atribuídos aos parâmetros dos métodos ABC, FA, SPSO e Bee-PSO nos casos analisados.

Caso	ABC	FA			SPSO			Bee – PSO				
	<i>lmt</i>	$\gamma$	$\beta_0$	$\alpha$	<i>w</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>w</i>	$c_1 = c_2$	<i>lmt</i>	$\alpha_0$	$\alpha_\infty$
A	160	1,0	1,0	0,25	0,72	1,19	1,19	0,72	1,19	160	0,50	0,10
B	310	1,0	1,0	0,25	0,72	1,19	1,19	0,72	1,19	310	0,50	0,10
C	310	1,0	1,0	0,25	0,72	1,19	1,19	0,72	1,19	310	0,50	0,10

Fonte: Dados da pesquisa.

As restrições impostas aos algoritmos de otimização para a determinação de um ajuste das constantes de tempo (segundos) e dos ganhos (p.u.) dos ESPs, POD e PI – UPFC são dadas na Tabela 27. A constante de tempo  $T_m$  foi fixada em 0,001 p.u..

Tabela 27 – Limites dos parâmetros dos controladores ESPs, PI – UPFC e POD.

Limites	PI – UPFC				POD			ESPs		
	$T1^u$ (s)	$K1^u$ (p.u.)	$T3^u$ (s)	$K3^u$ (p.u.)	$T1^P$ (s)	$T2^P$ (s)	$K^P$ (p.u.)	$T1^E$ (s)	$T2^E$ (s)	$K^E$ (p.u.)
<b>Min.</b>	0,001	0,001	0,01	1,0	0,01	0,25	0,1	0,50	0,01	1,0
<b>Máx.</b>	0,100	0,500	1,00	10,0	0,25	0,60	0,5	1,50	0,50	15,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Para aferir o desempenho dos algoritmos, todos foram executados 25 vezes em cada cenário proposto utilizando a função objetivo definida no capítulo anterior. Em todos os testes o número máximo de cálculos da função objetivo foi fixado em 25000.

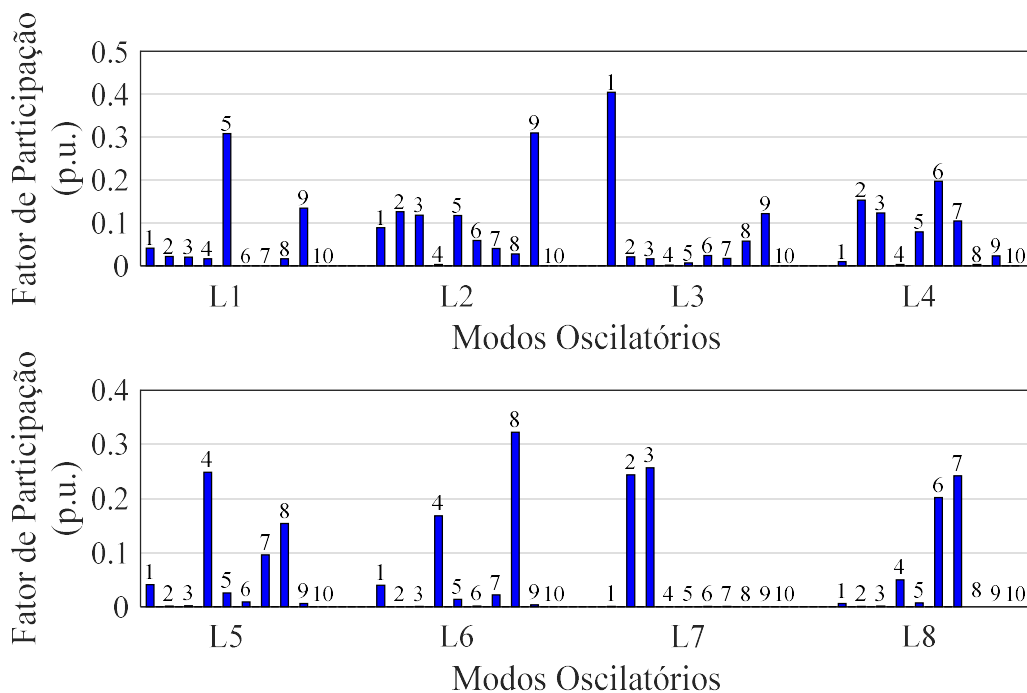
Os critérios para definir o algoritmo de melhor desempenho, nos cenários A e B, serão nesta ordem: 1) maior número de testes convergidos, isto é, ajustes que elevem o amortecimento do(s) modo(s) oscilatório(s) de interesse ao nível especificado considerando uma tolerância de 1% ( $9\% \leq \xi \leq 11\%$ ); 2) menor número de cálculos da função objetivo (maior velocidade de

convergência); 3) média mais próxima do amortecimento especificado; 4) mediana mais próxima do amortecimento especificado; 5) maior valor do conjunto de amortecimentos obtidos nos ensaios mais próximo do especificado; 7) menor valor do conjunto de amortecimentos obtidos nos ensaios mais próximo do especificado; 8) menor desvio padrão. No cenário C são utilizados os critérios três a oito, ou seja, o primeiro e segundo são desconsiderados.

#### Cenário A:

Para iniciar o exame deste cenário é essencial definir a localização dos controladores ESPs no sistema teste *New England* de forma a inserir amortecimento adicional aos modos locais L1, L2, L3 e interárea I1. Para tanto, são utilizados os fatores de participação destes modos, mostrados nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Fatores de participação para os modos oscilatórios locais do sistema *New England*.

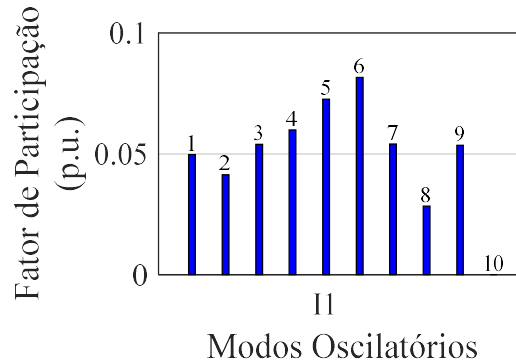


Fonte: Dados da pesquisa.

A partir do exame da Figura 31, pode-se dizer que os ESPs deverão ser instalados nos geradores G1, G5 e G9, os quais exercem as maiores influências nos modos oscilatórios L3, L1 e L2, nesta ordem. Já para o modo oscilatório do tipo interárea, há uma maior distribuição da participação entre todos os geradores, que pode ser vista na Figura 32, assim, neste sistema, um

gerador específico tem pequena influência neste modo, justificando tecnicamente o uso do conjunto PI – UPFC – POD para amortecê-lo.

Figura 32 – Fatores de participação para o modo oscilatório interárea do sistema *New England*.



Fonte: Dados da pesquisa.

Para examinar a eficiência dos algoritmos, a princípio será observado o número de soluções bem sucedidas em cada conjunto de 25 ensaios, ou seja, ajustes que implicaram no amortecimento desejado ( $\xi = 10\%$ ) dos modos L1, L2, L3 e I1. A análise subsequente avaliará a velocidade de convergência dos algoritmos levando em conta a média do número de avaliações da função objetivo necessárias para que os coeficientes de amortecimento dos modos L1, L2, L3 e I1 se situem dentro da faixa de  $\pm 10\%$  do amortecimento desejado. Estas informações estão impressas na Tabela 28.

Tabela 28 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste *New England*.

Método	Número de soluções com $0,9\xi^{des} \leq \xi \leq 1,1\xi^{des}$	Aval. Da Func. Obj.		
		Média	Mín.	Máx
ABC	18	6786	1035	22664
FA	7	10279	5897	23357
SPSO	15	8923	2090	24526
<b>Bee – PSO</b>	<b>21</b>	8371	968	18993

Fonte: Dados da pesquisa.

Pelo mostrado na Tabela 28 percebe-se que o algoritmo *Bee – PSO* é o que alcançou o maior número de êxitos no conjunto de ensaios, sendo seguido pelo ABC, SPSO e FA. Todavia, é superado pelo ABC no número médio de avaliações da função objetivo necessárias para determinar soluções bem sucedidas.

Os resultados apresentados na Tabela 29 expõem um comparativo geral da performance de cada algoritmo após 25 ensaios considerando os valores dos coeficientes de

amortecimento dos modos L1, L2, L3 e I1 obtidos após 25000 avaliações da função objetivo.

Tabela 29 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos dos modos L1, L2, L3 e I1 obtidos pelos algoritmos no cenário A para o sistema teste *New England*.

Método	Coeficientes de Amortecimento (p.u.)				
	Maior	Menor	Média	Mediana	Desvio Padrão
ABC	0,1189	<b>0,0335</b>	<b>0,0968</b>	<b>0,1000</b>	0,0206
FA	0,1322	0,0274	0,0852	0,0942	0,0253
SPSO	<b>0,1000</b>	0,0122	0,0898	<b>0,1000</b>	0,0213
<i>Bee</i> – PSO	0,1016	0,0125	0,0919	<b>0,1000</b>	<b>0,0146</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando os dados da Tabela 29 é possível verificar que a média dos amortecimentos dos modos considerados para este cenário é superior para os ajustes fornecidos pelo ABC havendo empate nos valores da medianas obtidas com o ABC, SPSO e *Bee* – PSO. Entretanto, as parametrizações calculadas pelo *Bee* – PSO produzem valores de amortecimentos menos dispersos, como comprova o menor valor do desvio padrão.

Embora haja um certo equilíbrio entre os desempenhos do *Bee* – PSO e do ABC para este cenário, o primeiro leva vantagem, visto que foi superior no primeiro critério adotado, ou seja, gerou um número maior de soluções bem sucedidas.

#### Cenário B:

Neste cenário, além de amortecer os modos analisados no cenário anterior, propõe-se fazer o mesmo com os de interesse restantes (L4, L5, L6, L7 e L8), ou seja, deseja-se mover os modos oscilatórios L1 a L8 e I1 para a região do plano complexo onde o amortecimento desejado esteja entre 9% e 10% sem que haja grande alteração em suas frequências originais. Assim, é necessário definir quais geradores receberão a instalação de novos ESPs. De acordo com os fatores de participação contidos na Figura 31, os geradores indicados para receber estes controladores seriam G6, G4, G8, G3 e G7, respectivamente. Entretanto, resultados experimentais sugerem que o modo L4 é mais sensibilizado quando o ESP está instalado em G2. Desta forma, adotou-se esta opção.

São apresentados na Tabela 30 os resultados relativos ao número de ensaios bem-sucedidos considerando a operação coordenada dos controladores ESPs nos geradores G1 a G5 e G7 a G9 e do PI – UPFC – POD.

Tabela 30 – Número de soluções bem sucedidas determinadas pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste *New England*.

Método	Número de soluções com $0,9\xi^{des} \leq \xi^{min} \leq 1,1\xi^{des}$	Aval. Da Func. Obj.		
		Média	Mín.	Máx
ABC	10	7796	1300	22303
FA	6	13233	6551	21561
SPSO	15	9066	2646	24654
<b>Bee – PSO</b>	<b>22</b>	<b>6808</b>	988	23287

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota-se nos dados exibidos na Tabela 30, que o algoritmo *Bee – PSO* atingiu nos testes realizados um maior índice de sucesso que seus pares, necessitando, em média, de menor número de avaliações da função objetivo.

Os melhores e piores valores, as médias, medianas e desvios padrão dos coeficientes de amortecimentos dos modos L1 a L8 e I1 atingidos nos ensaios executados pelos métodos *Bee – PSO*, ABC, SPSO e FA estão registrados na Tabela 31.

Tabela 31 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos dos modos oscilatórios de interesse obtidos pelos algoritmos no cenário B para o sistema teste *New England*.

Método	Coeficientes de Amortecimento (p.u.)				
	Maior	Menor	Média	Mediana	Desvio Padrão
ABC	<b>0,1000</b>	0,0449	0,0811	0,0823	0,0153
FA	0,1011	0,0494	0,0803	0,0806	0,0140
SPSO	<b>0,1000</b>	0,0435	0,0871	0,0938	0,0150
<b>Bee – PSO</b>	0,1002	<b>0,0737</b>	<b>0,0961</b>	<b>0,1000</b>	<b>0,0075</b>

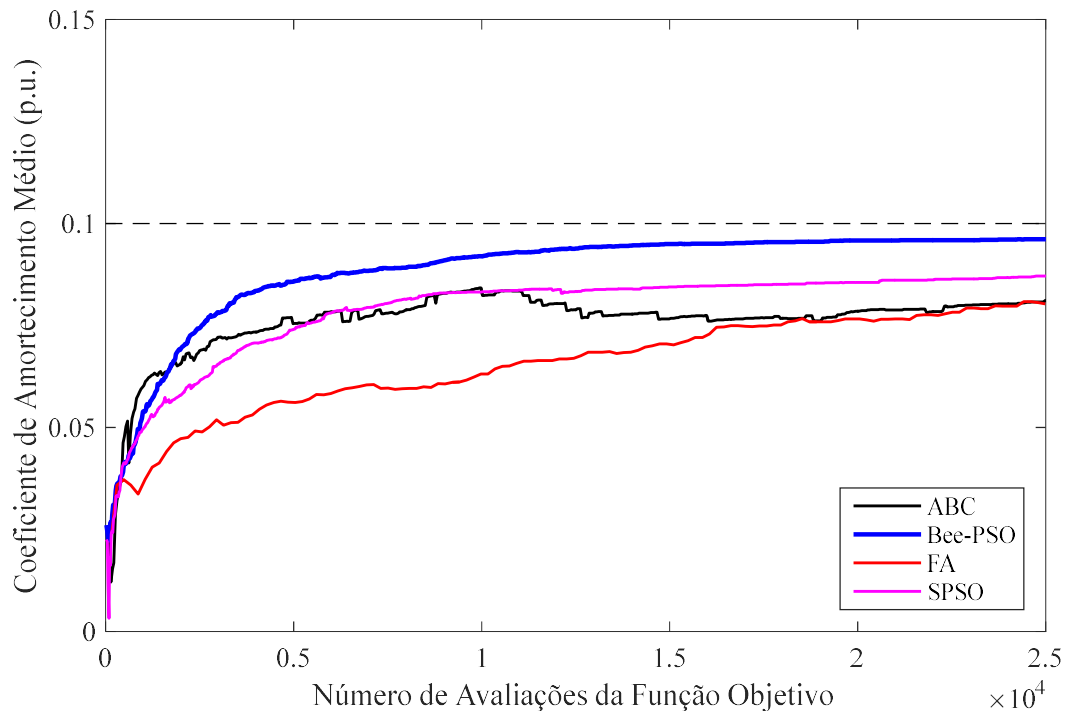
Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com a Tabela 31, o conjunto de ensaios realizados com o *Bee – PSO* calculou ajustes para os ESPs e PI – UPFC – POD que elevou, em média, o amortecimento dos modos de interesse a um patamar mais próximo ao do especificado. Esta proeminência acentua-se quando observados os outros parâmetros estatísticos já que não obteve melhor resultado em apenas um deles.

No interesse de reforçar as conclusões já apresentadas, são mostradas na Figura 33 as curvas de convergência das médias dos coeficientes de amortecimento para os quatro algoritmos propostos.



Figura 33 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento mínimos para o cenário B do sistema teste *New England*.



Fonte: Dados da pesquisa.

Avaliando a Figura 31, conclui-se que, a partir de aproximadamente 2500 avaliações da função objetivo, os ajustes fornecidos pelo *Bee* – PSO levam o SEP a operar, em média, com amortecimentos mais próximos do especificado que todos os outros métodos comparados. Esta constatação, somada às outras anteriores, ratifica a maior eficiência e velocidade do *Bee* – PSO no cenário B.

#### Cenário C:

O objetivo dos testes realizados neste cenário é determinar qual dos métodos de otimização bio-inspirados aplicados neste trabalho são mais competentes em calcular um conjunto de parâmetros para os controladores suplementares que implique no maior amortecimento mínimo médio do sistema teste *New England*.

Os dados contidos na Tabela 32 oferecem um panorama estatístico geral dos resultados determinados por cada algoritmo após 25000 avaliações da função objetivo.

Examinando os resultados estatísticos do conjunto de amortecimentos mínimos produzidos pelos ensaios, após 25000 avaliações da função objetivo, apresentados na Tabela

32, verifica-se que o *Bee* – PSO se sobressai em relação aos outros algoritmos em todos os itens considerados (melhor, pior, média, mediana e desvio padrão).

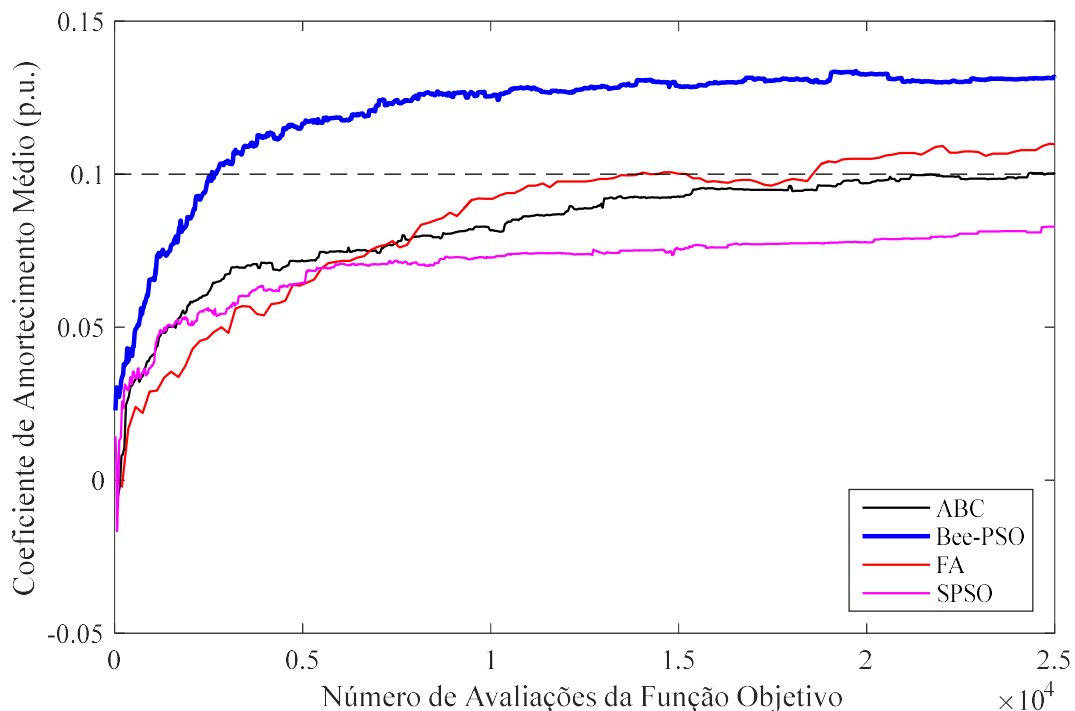
Tabela 32 – Parâmetros estatísticos do conjunto de amortecimentos dos modos oscilatórios de interesse obtidos pelos algoritmos no cenário C para o sistema teste *New England*.

Método	Coeficientes de Amortecimento (p.u.)				
	Maior	Menor	Média	Mediana	Desvio Padrão
ABC	0,1335	0,0732	0,1010	0,1017	0,0164
FA	0,1385	0,0662	0,1096	0,1113	0,0177
SPSO	0,1377	0,0175	0,0829	0,0811	0,0308
<b><i>Bee</i> – PSO</b>	<b>0,1632</b>	<b>0,1026</b>	<b>0,1314</b>	<b>0,1274</b>	<b>0,0149</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Outro fator a ser avaliado é a evolução média, em função do número de cálculos da função objetivo, dos amortecimentos mínimos obtidos com os ajustes fornecidos pelos algoritmos, o que pode ser verificado pela Figura 34. Seu exame reforça a superioridade da variante híbrida do PSO, visto que a mesma fornece ajustes que levam o SEP teste a operar com maiores níveis de amortecimento, em média, para qualquer número de avaliações da função objetivo considerada. Desta forma, os resultados obtidos pelo *Bee* – PSO o qualificam como o método de melhor desempenho no cenário C.

Figura 34 – Evolução média dos coeficientes de amortecimento para o cenário C.



Fonte: Dados da pesquisa.

Diante da metodologia sugerida nesta tese, o *Bee* – PSO atingiu a melhor performance em todos os cenários examinados no sistema teste *New England*. Isto posto, os parâmetros calculados pela variante do PSO serão os utilizados na parametrização dos controladores ESPs e PI – UPFC – POD.

### 5.3.3 Análise da estabilidade a pequenas perturbações

O conjunto de parâmetros utilizados para o ajuste dos controladores suplementares em cada cenário foi o obtido no ensaio factível, ou seja, bem-sucedido, que apresentou o menor valor para a função objetivo, decorridas 25000 avaliações. Estes parâmetros estão contidos nas Tabelas 33 e 34.

Tabela 33 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos ESPs e POD ajustados pelo *Bee* – PSO para os cenários analisados no sistema teste *New England*.

Disp.	Cenário A			Cenário B			Cenário C		
	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>K</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>K</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>K</i>
ESP 1	1,1112	0,0702	8,715	1,1908	0,0500	9,187	1,4765	0,0885	13,943
ESP 2	-	-	-	1,1862	0,1275	1,000	0,7922	0,0504	13,344
ESP 3	-	-	-	1,0011	0,2020	8,619	0,8971	0,1272	8,840
ESP 4	-	-	-	0,5578	0,0729	3,024	0,6574	0,0881	5,568
ESP 5	0,8127	0,2123	1,968	0,5320	0,1586	2,596	1,2696	0,1752	3,239
ESP 7	-	-	-	0,8959	0,0888	0,509	0,9296	0,1896	1,342
ESP 8	-	-	-	0,9260	0,1053	1,635	1,3649	0,1147	14,500
ESP 9	0,5231	0,1411	2,228	1,4603	0,4417	1,004	0,5374	0,1423	2,616
POD	0,2455	0,5097	0,177	0,1278	0,4602	0,453	0,1872	0,4776	0,445

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 34 – Ganhos (p.u.) e constantes de tempo (s) dos controladores PIs ajustados pelo *Bee* – PSO para os cenários analisados.

Cenário	<i>T1 = T2</i>	<i>T3</i>	<i>K1 = K2</i>	<i>K3</i>	<i>T<sub>m</sub></i>
A	0,0723	1,0000	0,0146	9,9925	0,001
B	0,0811	0,4211	0,0303	7,9215	0,001
C	0,0555	0,0213	0,0307	8,8459	0,001

Fonte: Dados da pesquisa.

Após o projeto dos controladores ESPs e PI – UPFC – POD com os ganhos e constantes de tempo contidos nas Tabelas 33 e 34, obtêm-se para o sistema *New England* seus autovalores de interesse, bem como suas frequências e coeficientes de amortecimento relacionados, segundo o exibido nas Tabelas 35, 36 e 37 para os cenários A, B e C, respectivamente.

Tabela 35 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário A no sistema teste *New England*.

<b>Modos</b>	<b>Autovalor</b>	<b><math>\omega_{ni}</math> (Hz)</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>
<b>L1</b>	$-0,5912 \pm j 5,887$	0,9417	<b>0,0999</b>
<b>L2</b>	$-0,6359 \pm j 6,3267$	1,0120	<b>0,1000</b>
<b>L3</b>	$-0,6849 \pm j 6,8149$	1,0901	<b>0,1000</b>
<b>I1</b>	$-0,3482 \pm j 3,4646$	0,5542	<b>0,1000</b>
L4	$-0,3016 \pm j 6,4345$	1,0252	0,0468
L5	$-0,2748 \pm j 8,1945$	1,3049	0,0335
L6	$-0,3824 \pm j 8,4069$	1,3394	0,0454
L7	$-0,2423 \pm j 7,2316$	1,1516	0,0335
L8	$-0,359 \pm j 8,1807$	1,3033	0,0438

Fonte: Dados da pesquisa.

Observando a Tabela 35, constata-se que o sistema teste passa a ser estável para a configuração proposta no cenário A, isto é, posteriormente a instalação dos ESPs nos geradores G1, G5 e G9 e do controlador PI – UPFC – POD. De acordo com o relacionado nesta tabela, os três modos locais instáveis (L1, L2 e L3) e o modo interárea (I1), fracamente amortecido, para o caso base, atingiram o amortecimento especificado em projeto ( $\xi = 10\%$ ) no ensaio escolhido. Deste modo, conclui-se que os parâmetros determinados com o *Bee* – PSO forneceram o amortecimento desejado para todos os modos de interesse no cenário A.

Pela confrontação dos resultados mostrados nas Tabelas 25 e 35, verifica-se que o ajuste utilizado não causou grandes alterações nas frequências dos modos oscilatórios do SEP. Adicionalmente, é mostrado que esta configuração também contribuiu com o aumento do amortecimento dos modos restantes (L4 a L8) de forma que L4, L5, e L7 foram deslocados da faixa crítica para o interior da faixa de alerta e L6 e L8 para a proximidade da faixa segura.

Ao se avaliar os dados impressos na

Tabela 36 pode-se afirmar que os coeficientes de amortecimento de todos os modos de interesse estão de acordo com o definido no projeto do algoritmo *Bee* – PSO. Além disso, as frequências naturais não amortecidas sofrem pequenos desvios (<3%) quando comparadas às relacionadas aos modos de interesse do caso base, o que pode ser visto na Tabela 25, o que mostra, mais uma vez, a eficiência do método híbrido proposto.

Tabela 36 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário B no sistema teste *New England*.

<b>Modos</b>	<b>Autovalor</b>	<b><math>\omega_{ni}</math> (Hz)</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>
<b>L1</b>	-0,6217 ± j 6,0384	0,9661	<b>0,1024</b>
<b>L2</b>	-0,655 ± j 6,3371	1,0140	<b>0,1028</b>
<b>L3</b>	-0,7039 ± j 6,9535	1,1123	<b>0,1007</b>
<b>I1</b>	-0,3517 ± j 3,4663	0,5545	<b>0,1009</b>
<b>L4</b>	-0,6709 ± j 6,496	1,0394	<b>0,1027</b>
<b>L5</b>	-0,8451 ± j 8,2331	1,3172	<b>0,1021</b>
<b>L6</b>	-0,8642 ± j 8,4935	1,3588	<b>0,1012</b>
<b>L7</b>	-0,7585 ± j 7,337	1,1739	<b>0,1028</b>
<b>L8</b>	-0,8095 ± j 8,0547	1,2884	<b>0,1000</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 37 – Autovalores dominantes, frequências naturais não amortecidas e coeficientes de amortecimento para o cenário C no sistema teste *New England*.

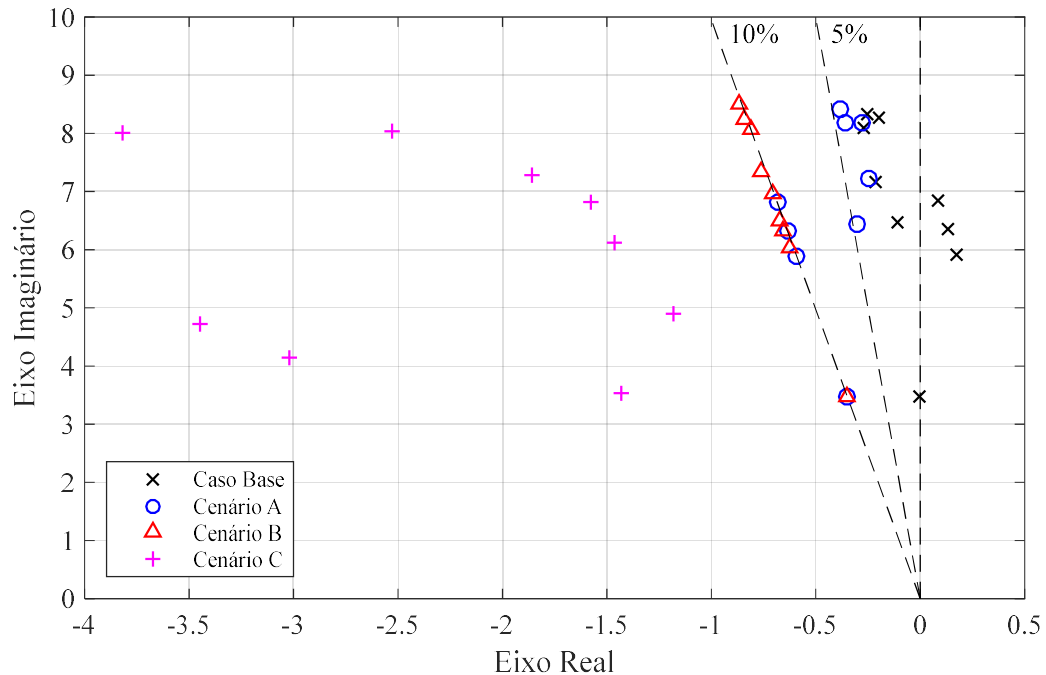
<b>Modos</b>	<b>Autovalor</b>	<b><math>\omega_{ni}</math> (Hz)</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>
<b>L1</b>	-1,1846 ± j 4,8964	0,8018	<b>0,2351</b>
<b>L2</b>	-3,0229 ± j 4,1450	0,8165	<b>0,5892</b>
<b>L3</b>	-1,4671 ± j 6,1274	1,0028	<b>0,2329</b>
<b>I1</b>	-1,4291 ± j 3,5376	0,6072	<b>0,3746</b>
<b>L4</b>	-3,4471 ± j 4,7133	0,9294	<b>0,5903</b>
<b>L5</b>	-2,5247 ± j 8,0238	1,3388	<b>0,3001</b>
<b>L6</b>	-3,8177 ± j 8,0179	1,4134	<b>0,4299</b>
<b>L7</b>	-1,5778 ± j 6,8049	1,1118	<b>0,2259</b>
<b>L8</b>	-1,8570 ± j 7,2770	1,1953	<b>0,2473</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Pelos resultados contidos na Tabela 37, no cenário C o método *Bee* – PSO entregou ajustes para os controladores suplementares de amortecimento que elevaram a margem de estabilidade frente a pequenas perturbações do sistema teste *New England* a níveis superiores aos alcançados no cenário B. Contudo, as frequências dos modos de interesse sofreram maiores desvios em relação às do caso base, o que é compreensível, dada a complexidade do problema proposto, que considerou três pontos de operação diferentes para o cálculo dos ajustes. Vale destacar que estes dados se referem ao ponto de operação para o carregamento nominal.

Visando um maior entendimento da análise da estabilidade no domínio da frequência, é apresentado na Figura 36, a partir das informações inclusas nas Tabelas 35, 36 e 37, o deslocamento dos autovalores de interesse no plano complexo para o caso base e os cenários A, B e C após a inclusão dos ESPs e do conjunto PI – UPFC – POD no ponto de operação para o carregamento nominal.

Figura 35 – Posição dos autovalores para os cenários avaliados no sistema teste *New England*.

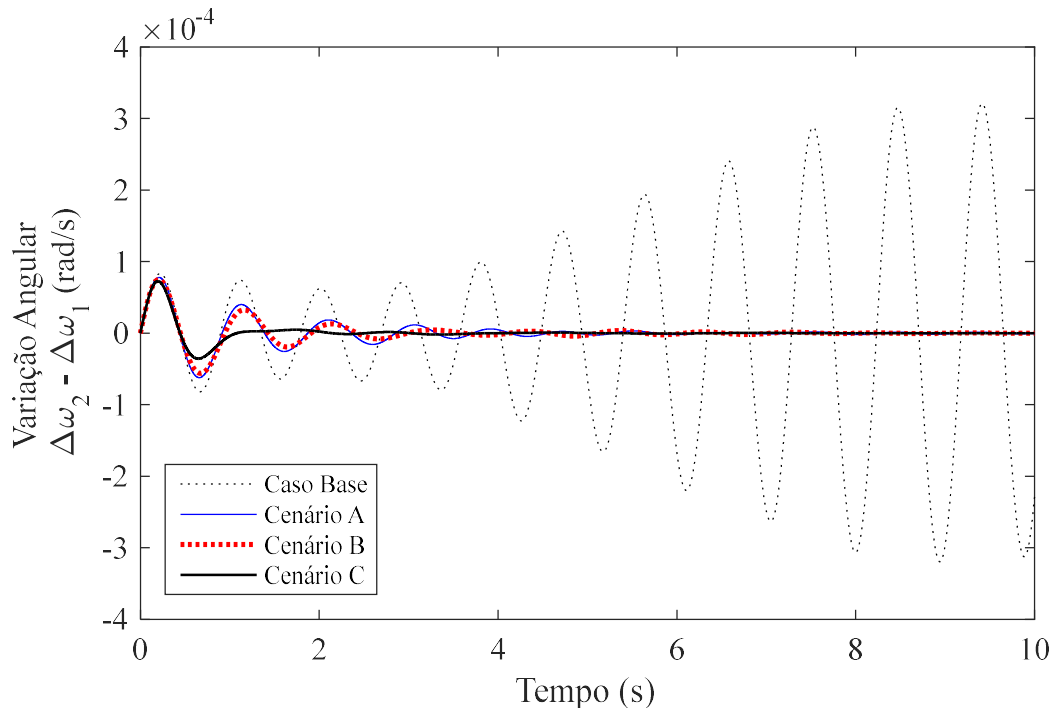


Fonte: Dados da pesquisa.

Como é possível observar por meio da Figura 35, o algoritmo *Bee* – PSO em parceria com a função objetivo proposta no capítulo anterior produziu parâmetros aos controladores suplementares que posicionaram de maneira eficiente os modos oscilatórios de interesse nas regiões desejadas do plano complexo em todos os cenários propostos. Por exemplo, no cenário A, os modos L1, L2, L3 e I1 estão posicionados no início da faixa desejada, o que também ocorre com todos os modos de interesse (L1 a L8 e I1) para o cenário B. Já no cenário C, os modos se posicionam a uma boa distância da linha limítrofe da faixa desejada, indicando grande margem de estabilidade frente a pequenas perturbações. Outra situação observada nesta figura são as frequências dos modos, indicadas por suas posições no eixo das ordenadas, que não se alteram de maneira significativa em relação ao caso base, validando mais uma vez o bom desempenho do método de parametrização *Bee* – PSO em parceria da função objetivo escolhida.

Na Figura 36 é exibido o desvio da velocidade angular do gerador G2 contra o gerador G1, após a ocorrência de uma perturbação (em degrau) de 5% na potência mecânica de G1 nos cenários A, B e C, incluindo o caso base, com o sistema operando em seu carregamento nominal.

Figura 36 – Variação angular  $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$  para os cenários analisados no sistema teste *New England*.



Fonte: Dados da pesquisa.

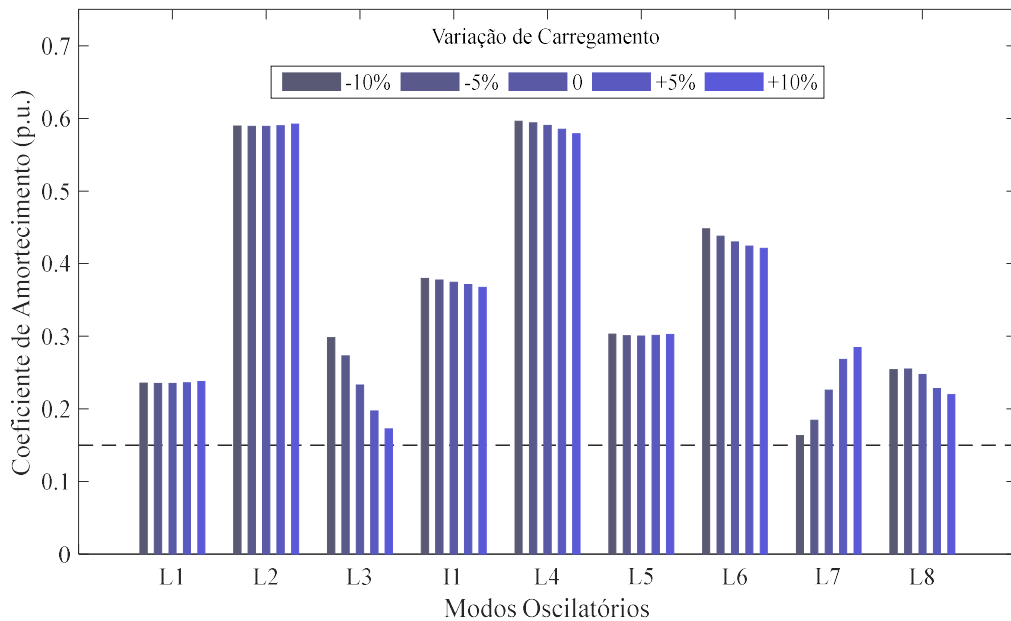
Como é possível observar na Figura 36, o sistema teste *New England* apresentou amortecimento suficiente após a pequena perturbação com os ajustes escolhidos nas configurações dos três cenários estudados, principalmente o cenário C.

Para verificar o amortecimento mínimo do SEP, com a configuração proposta no cenário C e parametrizado de acordo com as Tabelas 33 e 34, em condições de funcionamento diferentes das consideradas pelo algoritmo *Bee* – PSO no processo de otimização, mas dentro da faixa avaliada compreendida entre 90% e 110% do carregamento para o caso base, foram considerados 5 pontos de operação como mostrado na Figura 37.

Ao analisar a Figura 37, é possível concluir que o valor do amortecimento mínimo do SEP é superior a 15%, mesmo considerando a variação do carregamento. Outro aspecto relevante é a pequena variação do amortecimento dos modos, com exceção de L3 e L7, com a variação do carregamento, o que é desejável do ponto de vista da operação do SEP. Desta forma, no cenário C, o sistema *New England* opera com um elevado nível de amortecimento, mostrando a viabilidade da solução obtida pelo *Bee* – PSO.



Figura 37 – Amortecimentos dos modos oscilatórios com alteração do carregamento do SEP no sistema teste *New England*.



Fonte: Dados da pesquisa.

#### 5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O objetivo deste capítulo foi validar o modelo de injeções de corrente proposto para o SEP com a inclusão do dispositivo UPFC e sua estrutura de controle, no que se refere à solução de problemas que afetam a segurança da operação dos sistemas elétricos de potência. Também foram avaliados e comparados três métodos de otimização bio-inspirados clássicos, ABC, SPSO e FA e um híbrido, proposto nesta tese, denominado *Bee* – PSO para a obtenção dos parâmetros de ajuste dos controladores suplementares.

O primeiro sistema analisado (Simétrico de Duas Áreas) é muito utilizado em estudos de estabilidade a pequenas perturbações por possuir um modo oscilatório do tipo interárea. Neste SEP, a análise inicial consistiu em verificar a atuação do UPFC no controle da tensão da barra inicial de sua instalação e no gerenciamento do fluxo de potência na LT adjacente à sua barra final de instalação com o objetivo de promover a melhora do perfil de tensão do sistema e, mais especificamente, elevar a magnitude da tensão na barra 7 a um nível maior ou igual a 0,95 p.u.. Foi constatado que os valores especificados para a tensão e o fluxo de potência foram

suficientes para melhorar o perfil de tensão do sistema e elevar a tensão da barra 7 para 1 p.u., além de possibilitar a diminuição das perdas do sistema de transmissão.

Com a definição do ponto de operação do SEP com a atuação do PI – UPFC, foram adotadas duas configurações de instalação para os controladores suplementares em três cenários de amortecimento dos modos oscilatórios de interesse onde os desempenhos dos algoritmos bio-inspirados foram comparados.

A primeira configuração consistiu na inserção do controlador POD à malha de controle do PI – UPFC e na determinação dos seus parâmetros de ajuste visando elevar o amortecimento do modo oscilatório interárea a um patamar dentro da faixa  $(10 \pm 0,1)\%$ . Nesta situação o método SPSO obteve o melhor desempenho fornecendo, em todos os ensaios, ajustes que atenderam o amortecimento desejado com um menor número, em média, de avaliações da função objetivo.

Na segunda configuração, visando proporcionar amortecimento dentro da mesma faixa de  $(10 \pm 0,1)\%$  a todos os modos de oscilatórios dominantes do sistema, foram adicionados aos geradores 2 e 3 controladores ESPs. Sua atuação coordenada ao conjunto PI – UPFC – POD com os ajustes obtidos pelo método *Bee* – PSO, o qual demonstrou melhor performance, possibilitou que o SEP operasse com o amortecimento dentro da faixa especificada.

Finalmente, mantendo se a topologia da rede com ESPs instalados em G2 e G3 e do POD acoplado ao FACTS, os algoritmos foram configurados para determinar o maior amortecimento possível aos modos de interesse, considerando três condições de carregamento. Nesta situação, novamente o algoritmo *Bee* – PSO se sobressaiu determinado ajustes que elevaram significativamente a margem de estabilidade frente a pequenas perturbações do sistema Simétrico de Duas Áreas.

No intuito de avaliar o comportamento estático do dispositivo PI – UPFC e o comportamento dinâmico, atuando em conjunto de controladores POD e ESPs, em um sistema de maior porte, foi utilizado o sistema teste conhecido como *New England*. Para avaliar o comportamento estático do dispositivo FACTS foi proposto elevar o perfil de tensão do sistema a níveis acima de 0,95 p.u., por meio do controle de tensão e do fluxo de potência, e constatou-se que o objetivo foi alcançado. O cerne da análise dinâmica do SEP foi definir qual dos métodos bio-inspirados utilizados apresentou melhor performance na parametrização dos controladores suplementares de amortecimento já citados. Para isso, foram avaliados três cenários de amortecimento em duas configurações, com três e oito ESPs atuando em conjunto com o controlador PI – UPFC – POD.

No cenário A estabeleceu-se um amortecimento desejado na faixa de  $(10\pm 1)\%$  para os modos L1, L2, L3 e I1 e no cenário B a mesma faixa para todos os modos de interesse (I1 e L1 a L8). No último caso foi testada a capacidade dos métodos em fornecer ajustes que levassem o SEP a operar com os maiores coeficientes de amortecimento possíveis, considerando três condições de carregamento. Mais uma vez o algoritmo híbrido proposto, *Bee* – PSO, se destacou produzindo os melhores resultados assim como o ocorrido nos cenários A e B.

## 6 CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O objetivo fundamental deste trabalho foi desenvolver um modelo apropriado tanto para análises estáticas como para análises dinâmicas para um sistema elétrico de potência munido de um dispositivo FACTS UPFC, constituído por dois conversores fonte de tensão, em série e em derivação com a linha de transmissão de instalação, equipados com controladores PI e controladores suplementares de amortecimento. Para isso foi apresentado uma formulação de injeções de corrente para o UPFC que permitisse representá-lo no algoritmo de fluxo de potência expandido expresso em função dos resíduos das injeções de corrente nas barras, representadas na forma polar, utilizando o método de Newton-Raphson. Esta representação do UPFC foi incorporada a um modelo linear de um sistema elétrico multimáquinas, fundamentado no atendimento instantâneo do balanço nodal de correntes em cada barra, denominado Modelo de Sensibilidade de Corrente.

As análises estáticas consistiram em efetuar o controle da tensão na barra inicial de instalação do dispositivo e gerenciar o fluxo de potência ativa e reativa da linha de transmissão adjacente à outra barra de instalação visando melhorar o perfil de tensão dos sistemas avaliados. Nas análises dinâmicas foram examinadas a capacidade dos controladores PI – UPFC – POD e ESPs em fornecer amortecimento suplementar aos modos oscilatórios não amortecidos em duas configurações de instalação: 1) uma no ponto de operação para o carregamento nominal dos sistemas teste, ou seja, 100% de carregamento e; 2) outra considerando um ponto (carregamento nominal) e três pontos de operação com carregamentos de 90%, 100% e 110% do nominal.

Para parametrizar os controladores PI, POD e ESPs foram comparados os métodos de otimização bio-inspirados Colônia de Abelhas Artificiais, Otimização por Enxame de Partículas, Algoritmo dos Vagalumes e um híbrido destes, designado *Bee* – PSO.

As simulações do trabalho, realizadas a partir do equacionamento matemático do SEP no Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do PI – UPFC e dos controladores POD e ESPs, utilizaram os sistemas testes Simétrico de Duas Áreas e *New England*. Os critérios adotados para posicionar o conjunto PI – UPFC – POD foram baseados em evidências experimentais onde buscou-se conciliar os desempenhos estático, elevando o perfil de tensão dos sistemas e dinâmico, adicionando amortecimento suficiente ao modo

oscilatório do tipo interárea. A localização dos ESPs foi definida a partir dos fatores de participação, que fornecem uma medida da contribuição de cada gerador nos modos oscilatórios locais candidatos a receber amortecimento suplementar.

No sistema Simétrico de Duas Áreas foram avaliadas, no carregamento nominal, uma configuração utilizando o controlador PI – UPFC – POD e outra, adicionando à configuração anterior, ESPs nos geradores G2 e G3. A segunda configuração também foi empregada para avaliar o máximo amortecimento inserido, considerando três níveis de carregamentos distintos já mencionados. Já para o sistema *New England* foi adotada a operação conjunta do PI – UPFC – POD e de três ESPs instalados nos geradores G1, G5 e G9 na configuração inicial e, aditivamente a esta, foram acrescentados mais cinco ESPs nos geradores G2 a G4, G7 e G8 para a outra configuração. Em ambas foram especificados o amortecimento desejado dos modos de interesse considerando o carregamento do caso base (nominal). Da mesma forma que no sistema anterior, para a segunda configuração foi proposto um ajuste, considerando pequenas variações nos cenários de cargas (90%, 100% e 110% do nominal), dos parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimentos no intuito de alcançar o maior amortecimento mínimo para o sistema.

Foi constatada por meio destas análises a capacidade do UPFC em aumentar a segurança de operação do sistema. De acordo com o apresentado, o dispositivo efetuou de forma adequada o controle da tensão, na barra inicial de sua instalação, e o gerenciamento do fluxo de potência na linha de transmissão em que foi instalado. Além disto, a compensação reativa nas linhas de transmissão escolhidas proporcionou melhorias na estabilidade de tensão do sistema, visto que contribuiu para que as tensões ficassem dentro da faixa de  $\pm 5\%$  da tensão nominal. Observou-se também a ação benéfica do UPFC na redução das perdas ativas de transmissão.

Em se tratando da estabilidade a pequenas perturbações, quatro algoritmos foram propostos, implementados e utilizados nos sistemas teste Simétrico de Duas Áreas e *New England*. Dos resultados obtidos foi possível concluir que o algoritmo *Bee* – PSO alcançou o maior desempenho, segundo os critérios estabelecidos, na maior parte dos cenários avaliados, sendo superado pelo SPSO apenas no cenário A do sistema Simétrico de Duas Áreas. Além disso, notou-se que, com o aumento da complexidade dos problemas, a diferença de desempenho do algoritmo híbrido em relação aos outros foi aumentando, o que evidencia sua eficiência.

Os ajustes produzidos pelo SPSO e *Bee* – PSO, nos ensaios selecionados, elevaram o amortecimento dos modos de interesse aos patamares especificados nos cenários A e B nos sistemas utilizados. Finalmente, a parametrização obtida pelo *Bee* – PSO no cenário C elevou significativamente a margem de estabilidade, mostrando que o sistema se manteve estável, mesmo com diferentes cenários de cargas, com amortecimentos nunca inferiores a 15%, demonstrando a aplicabilidade do algoritmo.

Considerando o exposto até aqui, conclui-se que a representação do SEP apresentada, incluindo o modelo de injeções de corrente do UPFC e sua estrutura de controle, demonstrou desempenho adequado tanto nas análises estáticas quanto nas dinâmicas.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho consolidaram a possibilidade de utilização do Modelo de Sensibilidade de Corrente para representar os sistemas elétricos de potência em estudos de estabilidade frente a pequenas perturbações. A partir daí, como sugestão de trabalhos futuros, propõem-se:

- i) Equacionar novos dispositivos FACTS tais como o *Static Var Compensators*, o *Static Synchronous Series Compensator* e o *Static Synchronous Compensator*, incluí-los no Modelo de Sensibilidade de Corrente e comparar seus desempenhos em análises de estabilidade de tensão e frente a pequenas perturbações nos sistemas elétricos de potência;
- ii) Propor, implementar e simular novas metaheurísticas, híbridas ou não, e utilizá-las no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e POD (e em alguns casos também os PI) e comparar os resultados obtidos com outras técnicas de otimização;
- iii) Utilizar outras estruturas de controle para os conversores do *Unified Power Flow Controller* como os controladores Proporcional – Integral – Derivativo e o de Avanço/Atraso para obter as equações dinâmicas do dispositivo FACTS aplicado neste trabalho e de outros, como mencionados;
- iv) Considerar a dinâmica dos geradores e dos controladores suplementares no fluxo de potência expandido modulado por injeções de corrente e realizar simulações estáticas e dinâmicas nos sistemas elétricos de potência;

- v) Avaliar o uso de controladores robustos e/ou de ganhos fixos ajustados de maneira a garantir a estabilidade a pequenas perturbações considerando as incertezas de variações de carregamento dos sistemas.

## REFERÊNCIAS

- ABEDINIA, O.; WYNS, B.; GHASEMI, A. Robust fuzzy PSS design using ABC. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING, IEEEIC, 10, 2011, Rome. **Proceedings...**Rome: IEEE, 2011. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5874849>>. Acesso em: 22 ago. 2017.
- ABIDO, M. A. Parameter optimization of multimachine power system stabilizers using genetic local search. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 23, n. 8, p. 785–794, 2001.
- ADEPOJU, G. A.; KOMOLAFE, O. A. Analysis and modelling of static synchronous compensator (STATCOM): a comparison of power injection and current injection models in power flow study. **International Journal of Advanced Science and Technology**, Daejeon, v. 36, p. 65–76, 2011.
- AKAY, B.; KARABOGA, D. A modified Artificial Bee Colony algorithm for real-parameter optimization. **Information Sciences**, Philadelphia, v. 192, p. 120–142, 2012.
- AL-AWAMI, A. T.; ABDEL-MAGID, Y. L.; ABIDO, M. A. A particle-swarm-based approach of power system stability enhancement with unified power flow controller. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 29, n. 3, p. 251–259, 2007.
- ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability**. Piscataway: John Wiley & Sons, 2003.
- ARAUJO, P. B. ; ZANETTA, L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 23, n. 3, p. 173–178, 2001.
- AYRES, H. M.; KOPCAK, I.; CASTRO, M. S.; MILANO, F.; DA COSTA, V. F. A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 896–909, 2010.
- BEEKMAN, M.; SWORD, G.; SIMPSON, S. Biological foundations of swarm intelligence. In: BLUM, C.; MERKLE, D. (Ed.). **Swarm intelligence: introduction and applications**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 3–41.
- BENI, G.; WANG, J. Swarm intelligence in cellular robotic systems. In: DARIO, P.; SANDINI, G.; AEBISCHER, P. (Ed.). **Robots and biological systems: towards a New Bionics?**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1993. p. 703–712. NATO ASI Series (Series F: Computer and Systems Sciences, 102).
- BLUM, C.; LI, X. Swarm intelligence in optimization. **Swarm intelligence introduction and applications**. In: BLUM, C.; MERKLE, D. (Ed.). **Swarm Intelligence**. Heidelberg: Berlin Springer, 2008. p. 43-85. (Natural Computing Series).



BRASIER, A. R.; TATE, J. E.; HABENER, J. F. Optimized use of the firefly luciferase assay as a reporter gene in mammalian cell lines. **BioTechniques**, Boca Raton, v. 7, n. 10, p. 1116–1122, 1989.

BRATTON, D.; KENNEDY, J. Defining a standard for particle swarm optimization. In: 2007 IEEE SWARM INTELLIGENCE SYMPOSIUM, 2007, Honolulu. **Proceedings of the...** Honolulu: IEEE, 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4223164>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

CAI, L. J.; ERLICH, I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 1, p. 294–300, 2005.

CHAN, F. T. S.; KUMAR, V.; MISHRA, N. A CMPSO algorithm based approach to solve the multi-plant supply chain problem. In: CHAN, F. T. S.; TIWARI, M. K. (Ed.). **Swarm intelligence, focus on ant and particle swarm optimization**. Rijeka: InTech, 2007. p. 447–474.

CHANG, J.; CHU, S.; RODDICK, J. F.; PAN, J. A parallel particle swarm optimization algorithm with communication strategies. **Journal of Information Science and Engineering**, Taiwan, p. 809–818, 2005. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/215744326\\_A\\_Parallel\\_Particle\\_Swarm\\_Optimization\\_Algorithm\\_with\\_Communication\\_Strategies](https://www.researchgate.net/publication/215744326_A_Parallel_Particle_Swarm_Optimization_Algorithm_with_Communication_Strategies)>. Acesso em: 23 ago. 2017.

CHEUNG, N. J.; DING, X.-M.; SHEN, H.-B. Adaptive firefly algorithm: parameter analysis and its application. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 9, n. 11, 2014. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0112634>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

CLERC, M. Standard particle swarm optimisation. **HAL open access archive**, p. 15, 2012. Disponível em: <[http://clerc.maurice.free.fr/pso/SPSO\\_descriptions.pdf](http://clerc.maurice.free.fr/pso/SPSO_descriptions.pdf)>. Acesso em: 22 ago. 2017.

CLERC, M.; KENNEDY, J. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 6, n. 1, p. 58–73, 2002.

COELHO, L. dos S.; BERNERT, D. L. de A.; MARIANI, V. C. A chaotic firefly algorithm applied to reliability-redundancy optimization. In: IEEE Congress of Evolutionary Computation, CEC 2011, New Orleans. **Congress of the...**New Orleans: IEEE, 2011. p. 517–521. Disponível em: <<http://azadproject.ir/wp-content/uploads/2013/12/2011-O29-A-Chaotic-Firefly-Algorithm-Applied-to-Reliability-Redundancy-Optimization.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

DA COSTA, V. F. **Modelo de sensibilidade de potência para análise de oscilações de baixa frequência em sistemas de energia elétrica**. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/260484>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

DE WET, J. R.; WOOD, K. V.; DELUCA, M.; HELINSKI, D. R.; SUBRAMANI, S. Firefly luciferase gene: structure and expression in mammalian cells. **Molecular and Cellular Biology**, Washington, v. 7, n. 2, p. 725–737, 1987.

DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 965–971, 1994.

DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation Control. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-88, n. 4, p. 316–329, 1969.

DIXON, J.; MORÁN, L.; RODRÍGUEZ, J.; DOMKE, R. Reactive power compensation technologies: state-of-the-art review. **Proceedings of the IEEE**, Piscataway, v. 93, n. 12, p. 2144–2164, 2005.

DORIGO, M.; DI CARO, G. The ant colony optimization meta-heuristic. In: \_\_\_\_\_. **New ideas in optimization**. Maidenhead: McGraw-Hill, 1999. v. 2, p. 11–32.

EBERHART, R. C.; SHI, Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: PROCEEDINGS OF THE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION - CEC00 (Cat. No.00TH8512), 7, 2000, La Jolla. **Proceedings of the La Jolla: IEEE**, 2000.

EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MICRO MACHINE AND HUMAN SCIENCE, 6, 1995, Nagoya. **Proceedings of the...** Nagoya: IEEE, 1995. p. 39–43.

EBERHART, R.; SHI, Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In: PROCEEDINGS OF THE 2001 CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2000, Seoul. **Proceedings of the...** Seoul: IEEE, 2001. v. 1, p. 94–100.

FARSANGI, M. M.; SONG, Y. H.; LEE, K. Y. Choice of FACTS device control inputs for damping interarea oscillations. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 1135–1143, maio 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1295025/>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

FENG, Z.; AJJARAPU, V.; LONG, B. Identification of voltage collapse through direct equilibrium tracing. **On Power Systems, IEEE Transactions**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 342–349, 2000.

FISTER, I.; FISTER, I.; YANG, X.-S.; BREST, J. A comprehensive review of firefly algorithms. **Swarm and Evolutionary Computation**, Amsterdam, v. 13, p. 34–46, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650213000461>>. Acesso em: 5 jun. 2017.

FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H. Coordinated tuning of the parameters of PI, PSS and POD controllers using a specialized chu-beasley's genetic algorithm. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 140, p. 708–721, 2016.

FREITAS, W.; MORELATO, A. A generalised current injection approach for modelling of FACTS in power system dynamic simulation. In: AC-DC POWER TRANSMISSION, 2001. SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON (Conf. Publ. No. 485), 17, 2001, London. **Proceedings of the...** London, IEEE, 2001. p. 175-180.

FURINI, M. A. **Perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Automação) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

FURINI, M. A. **Projeto de controladores suplementares de amortecimento utilizando redes neurais artificiais**. 2011. 131 f. Tese (Doutorado em Automação) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

FURINI, M. A.; PEREIRA, A. L. S.; ARAUJO, P. B. Pole placement by coordinated tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD stabilizers. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, London, v. 33, n. 3, p. 615–622, 2011.

GANDOMI, A. H.; YANG, X. S.; TALATAHARI, S.; ALAVI, A. H. Firefly algorithm with chaos. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 18, n. 1, p. 89–98, 2013.

GAO, W.; LIU, S.; HUANG, L. A global best artificial bee colony algorithm for global optimization. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 236, n. 11, p. 2741–2753, 2012.

GAZI, V.; PASSINO, K. M. Stability Analysis of Social Foraging Swarms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics**, Piscataway, v. 34, n. 1, p. 539–557, 2004.

GHOLIPOUR, E.; SAADATE, S. Improving of Transient Stability of Power Systems Using UPFC. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1677–1682, 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1413442/>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Boston: Addison-Wesley, 1989.

GUO, J.; CROW, M. L.; SARANGAPANI, J. An Improved UPFC Control for Oscillation Damping. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 24, n. 1, p. 288–296, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4745822/>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

GYUGYI, L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. **IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 139, n. 4, p. 323, 1992. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-c.1992.0048>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

GYUGYI, L.; SCHAUDER, C. D.; WILLIAMS, S. L.; RIETMAN, T. R.; TORGERSON, D. R.; EDRIS, A. The unified power flow controller: A new approach to power transmission control. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 10, n. 2, p. 1085–1097, 1995.

HASSAN, L. H.; MOGHAVVEMI, M.; ALMURIB, H. A. F.; MUTTAQI, K. M. A. Coordinated Design of PSSs and UPFC-based Stabilizer Using Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Piscataway, v. 50, n. 5, p. 2957–2966, 2014.

HINGORANI, N. G. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. **Proceedings of the IEEE**, Piscataway, v. 76, n. 4, p. 481–482, 1988. .

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. New York: Wiley-IEEE Press, 1999.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence**. Cambridge: MIT Press, 1992.

HUANG, Z.; NI, Y.; SHEN, C. M.; WU, F. F.; CHEN, S.; ZHANG, B. Application of unified power flow controller in interconnected power systems-modeling, interface, control strategy, and case study. **Power Systems, IEEE Transactions on**, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 817–824, maio 2000.

KANNAN, S.; JAYARAM, S.; SALAMA, M. M. A. Real and reactive power coordination for a unified power flow controller. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1454–1461, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1318682/>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

KARABOGA, D. **An idea based on honey bee swarm for numerical optimization**. 2005. 10 p. Disponível em: <[http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06\\_2005.pdf](http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06_2005.pdf)>. Acesso em: 22 ago. 2017.

KARABOGA, D.; AKAY, B. A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, Philadelphia, v. 214, n. 1, p. 108–132, 2009.

KARABOGA, D.; BASTURK, B. Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. In: FOUNDATIONS OF FUZZY LOGIC AND SOFT COMPUTING: INTERNATIONAL FUZZY SYSTEMS ASSOCIATION WORLD CONGRESS, IFSA, 12, 2007, Cancun. **Proceedings of the...** Berlin.; Heidelberg: Springer Berlin, 2007a. p. 789–798.

KARABOGA, D.; BASTURK, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. **Journal of Global Optimization**, New York, v. 39, n. 3, p. 459–471, 2007b.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1995, Perth. **Proceedings of the...** Perth: IEEE, 1995.

KENNEDY, J.; MENDES, R. Neighborhood topologies in fully-informed and best-of-neighborhood particle swarms. In: SMCia 2003 - PROCEEDINGS OF THE 2003 IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON SOFT COMPUTING IN INDUSTRIAL APPLICATIONS, 2003, Binghamton. **Proceedings of the...** Binghamton: IEEE, 2003. p. 45-50. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1231342>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, Washington, v. 220, n. 4598, p. 671 LP-680, 1983. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/content/220/4598/671.abstract>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

KLEIN, M.; ROGERS, G. J.; KUNDUR, P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 914–921, 1991.

KOPCAK, I. **Uma plataforma unificada para análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência**. 2007. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

KOPCAK, I.; DA COSTA, V. F.; DA SILVA, L. C. P. A generalized load flow method including the steady state characteristic of dynamic devices. In: 2007 IEEE LAUSANNE POWER TECH, 2007, Lausanne. **Proceedings of the...** Lausanne: IEEE Power Tech, 2007.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGrawHill, 1994.

LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers Part II: performance objectives and tuning concepts. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-100, n. 6, p. 3025–3033, 1981.

LEANDRO, G. V.; BARROS, P. R.; MOTA, W. S. Sinal adicional estabilizador baseado em técnicas de controle adaptativo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBA, 1994.

LEWIS, S. M.; CRATSLEY, C. K. Flash signal evolution, mate choice, and predation in fireflies. **Annual Review Entomology**, Palo Alto, v. 53, p. 293–321, 2008. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17877452>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

LI, H.; LI, L. A novel hybrid particle swarm optimization algorithm combined with harmony search for high dimensional optimization problems. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT PERVASIVE COMPUTING (IPC 2007), 2007, Jeju City. **Proceedings of the...** Jeju City: IEEE, 2007. p. 94-97. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4438402/>>. Acesso em: 23 maio 2017.

LI, X.; YAO, X. Cooperatively coevolving particle swarms for large scale optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 16, n. 2, p. 210–224, abr. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5910380/>>. Acesso em: 23 maio 2017.

LIANG, J. J.; QIN, A. K.; SUGANTHAN, P. N.; BASKAR, S. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 10, n. 3, p. 281–295, 2006.

MACLEOD, H. E. P. **Controle ótimo descentralizado para o projeto e coordenação de sinais estabilizadores em sistemas elétricos de potência**. 1992. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/111701/88140.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

MALIK, R. F.; RAHMAN, T. a; HASHIM, S. Z. M.; NGAH, R. New Particle Swarm Optimizer with Sigmoid Increasing Inertia Weight. **International Journal of Computer Science and Security**, Kuala, v. 1, n. 1, p. 35–44, 2007.

MARTINS, L. F. B.; GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B. de; FORTES, E. de V.; MIOTTO, E. L. Comparison between Artificial Bee Colony and Particle Swarm Optimization Algorithms in the tuning of PSS and UPFC-POD Controllers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 12, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IEEE, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7874534>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

MENG, Z. J.; SO, P. L. A current injection UPFC model for enhancing power system dynamic performance. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, CONFERENCE PROCEEDINGS, 2000, Singapore. **Proceedings of the...** Singapore: IEEE, 2000. p. 1544–1549.

MOUSSA, H. A. M.; YU, Y. Dynamic interaction of multimachine power system and excitation control. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, Piscataway, v. 93, n. 4, p. 1150–1158, 1974.

NABAVI-NIAKI, A.; IRAVANI, M. R. Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (upfc) for power system studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 11, n. 4, p. 1937–1943, 1996. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/544667/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

NGUIMFACK-NDONGMO, J. D. D.; KENNÉ, G.; KUATE-FOCHIE, R.; CHEUKEM, A.; FOTSIN, H. B.; LAMNABHI-LAGARRIGUE, F. A simplified nonlinear controller for transient stability enhancement of multimachine power systems using SSSC device. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 54, p. 650–657, 2014.

NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. Damping of inter-area and local modes by use of controllable components. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 10, n. 4, p. 2007–2012, 1995.

NOROOZIAN, M.; ANGQUIST, L.; GHANDHARI, M.; ANDERSSON, G. Use of UPFC for optimal power flow control. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 1629–1634, 1997.

PADIYAR, K. R.; UMA RAO, K. Modeling and control of unified power flow controller for transient stability. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 21, n. 1, p. 1–11, 1999.

PÁDUA JÚNIOR, C. R.; TAKAHASHI, A. L. M.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de Kirchhoff para correntes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI 2013, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBA, 2013.

PAL, B. C. Robust damping of interarea oscillations with unified power-flow controller. **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 149, n. 6, p. 733, 2002.

PAL, B.; CHAUDHURI, B. **Robust control in power systems**. New York: Springer, 2005.

PANDEY, R. K.; GUPTA, D. K. PSS tuning with firefly driven knowledge domain-a smart control concept. In: TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, **Anais...IEEE**, nov. 2015.

PASERBA, J. J. How FACTS controllers benefit AC transmission systems. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, PES, 2003, Dallas. **Proceedings of the...** Dallas: IEEE, 2004. p. 991-998. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1335076>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

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

PUPIN, C. E.; PINA, A. P.; ARAUJO, P. B. Estudo da estabilidade a pequenas perturbações com a atuação do dispositivo FACTS SSSC em sistemas multimáquinas. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND APPLICATIONS–DINCON, Bauru. **Anais...** Bauru: Unesp, 2009.

SAUER, P. W.; PAI, M. A. **Power system dynamics and stability**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

SEELEY, T. **The wisdom of the hive: the social physiology of honey bee colonies**. Cambridge: Harvard University Press, 1995.

SELIGER, H. H.; MCELROY, W. D. Spectral emission and quantum yield of firefly bioluminescence. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, Maryland Heights, v. 88, n. 2, p. 136–141, 1960.

SHAYEGHI, H.; SAFARI, A.; SHAYANFAR, H. A. PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system. **Energy Conversion and Management**, London, v. 51, n. 12, p. 2930–2937, 2010.

SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: 1998 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION PROCEEDINGS. IEEE WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (Cat. No.98TH8360), 1998, Xi'an **Proceedings of the...** Xi'an: IEEE, 1998. p. 2-675-679. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=699146>>.

SON, K. M.; LASSETER, R. H. A Newton-type current injection model of UPFC for studying low-frequency oscillations. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, 19, n. 2, p. 694–701, 2004.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. **Flexible AC transmission system (FACTS)**. England: The Institute of Electrical Engineers, 1999.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **Journal of Global Optimization**, New York, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1008202821328%0Ahttp://link.springer.com/10.1023/A:1008202821328>>.

STREHLER, B. L.; TOTTER, J. R. Firefly luminescence in the study of energy transfer mechanisms. I. Substrate and enzyme determination. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, Maryland Heights, v. 40, n. 1, p. 28–41, 1952. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003986152900702>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

TAMBEY, N.; KOTHARI, M. L. Damping of power system oscillations with unified power flow controller (UPFC). **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 150, n. 2, p. 129, 2003. Disponível em: <[http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd\\_20030114](http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd_20030114)>. Acesso em: 23 mar. 2017.

TERESHKO, V.; LOENGAROV, A. Collective decision-making in honey bee foraging dynamics. **Computing and Information Systems Journal**, Baton Rouge, v. 9, n. 3, p. 1–7, 2005.

TRELEA, I. C. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection. **Information Processing Letters**, Amsterdam, v. 85, n. 6, p. 317–325, 2003.

UZUNOVIC, E.; FARDANESH, B.; HOPKINS, L.; SHPERLING, B.; ZELINGHER, S.; SCHUFF, A. NYPA convertible static compensator (CSC) application phase I: STATCOM. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2001 IEEE/PES, 2001, Atlanta. **Proceedings of the...** Atlanta: IEEE, 2001. p. 1139-1143. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=971418>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

VALLE, D. B. **A influência do IPFC na estabilidade de pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.



VALLE, D. B. **A influência do controlador gupfc no sistema elétrico de potência visando a estabilidade a pequenas perturbações.** 2014. 187 f. Tese (Doutorado em Automação) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. Incorporação do controlador FACTS GUPFC no fluxo de potência. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION (CLAGTEE 2013), 9, 2013, Viña del Mar. **Congress of the...** Viña del Mar: 2013. p. 1-8.

VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, London, v. 65, p. 299–306, 2015.

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: 2013. Disponível em: < <http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/5967.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

VINKOVIC, A.; MIHALIC, R. A current-based model of the static synchronous series compensator (SSSC) for Newton–Raphson power flow. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 78, n. 10, p. 1806–1813, 2008.

WANG, H. F. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. III. Unified power flow controller. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 15, n. 3, p. 978–983, 2000. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/871362/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

WANG, H. F.; SWIFT, F. J.; LI, M. Unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. Part II: multi-machine power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1355–1360, 1998.

WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia FACTS-tutorial. **Revista Controle & Automação**, Campinas, p. 39–55, 1998.

XIN, J.; CHEN, G.; HAI, Y. A particle swarm optimizer with multi-stage linearly-decreasing inertia weight. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCES AND OPTIMIZATION, CSO 2009, **Proceedings of the...** Sanya: IEEE, 2009. p. 505-508. Disponível em: <>. Acesso em: 23 ago. 2017.

YANG, X. S. **Engineering optimisation: an introduction with metaheuristic applications.** Chichester: John Wiley & Sons, 2010a.

YANG, N.; LIU, Q.; MCCALLEY, J. D. TCSC controller design for damping interarea oscillations. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1304–1310, 1998.

YANG, X. S. **Nature-inspired metaheuristic algorithms.** Cambridge: Luniver Press, 2008a.

- YANG, X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. In: PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON STOCHASTIC ALGORITHMS: FOUNDATIONS AND APPLICATIONS, Berlin, Heidelberg. **Proceedings of the...** Heidelberg: Springer-Verlag, 2009a.
- YANG, X. S.; DEB, S.; FONG, S. Accelerated particle swarm optimization and support vector machine for business optimization and applications BT - networked digital technologies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, NDT 2011, 3, Macau. **Proceedings...** Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 53–66.
- YANG, X. S. **Nature-inspired metaheuristic algorithms**. Cambridge: Luniver Press, 2008b.
- YANG, X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. In: PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON STOCHASTIC ALGORITHMS: FOUNDATIONS AND APPLICATIONS, Heidelberg. **Proceedings of the...** Heidelberg: Springer-Verlag, 2009b. p. 169-178.
- YANG, X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In: \_\_\_\_\_. **Studies in computational intelligence**. Heidelberg: Springer, 2010b. p. 65-74.
- YANG, X. S. Firefly algorithm, Lévy flights and global optimization. In: RESEARCH AND DEVELOPMENT IN INTELLIGENT SYSTEMS, 26, INCORPORATING APPLICATIONS AND INNOVATIONS IN INTELLIGENT SYSTEMS, 27, 2010, Heidelberg. **Proceedings of the...** Heidelberg: Springer-Verlag. p 209-218.
- YANG, X. S.; DEB, S. Cuckoo search via Lévy flights. In: WORLD CONGRESS ON NATURE AND BIOLOGICALLY INSPIRED COMPUTING, NABIC 2009, Coimbatore. **Proceedings of the...** Coimbatore : IEEE, 2009. p. 210-214. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5393690>>. Acesso em: 23 ago. 2017.
- YU, S.; SU, S.; LU, Q.; HUANG, L. A novel wise step strategy for firefly algorithm. **International Journal of Computer Mathematics**, Abingdon , v. 91, n. 12, p. 2507–2513, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00207160.2014.907405>>.
- ZHAN, Z.-H.; ZHANG, J.; LI, Y.; CHUNG, H. S.-H. Adaptive particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society**, Piscataway, v. 39, n. 6, p. 1362–1381, 2009.
- ZHENENKO, G. N.; FARAH, H. B. Simultaneous optimization of the adjustable parameters in multimachine power systems. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 7, n. 2, p. 103–108, abr. 1984.
- ZHU, G.; KWONG, S. Gbest-guided artificial bee colony algorithm for numerical function optimization. **Applied Mathematics and Computation**, Philadelphia, v. 217, n. 7, p. 3166–3173, 2010.

ZHU, L.; ZHOU, S.; ZHANG, Y. Extended load-flow arithmetic for voltage stability analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, POWERCON, 2000. **Proceedings of the...** Perth: IEEE, 2000. p. 427-431. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=900095>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

## ANEXO A – DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

Nas Tabela 38 a Tabela 41 são reproduzidos os dados do Sistema de Duas Áreas, cujos dados podem ser encontrados em Sauer e Pai (1998).

Tabela 38 – Dados das linhas de transmissão do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Barra inicial	Barra final	$r$ (p.u.)	$x$ (p.u.)	$b$ (p.u.)
1	5	0,001	0,012	0
2	6	0,001	0,012	0
7	F <sub>1</sub>	0	0,05	0
F <sub>1</sub>	8	0,022	0,22	0,33
7	8	0,022	0,22	0,33
7	8	0,022	0,22	0,33
6	7	0,002	0,02	0,03
6	7	0,002	0,02	0,03
4	10	0,001	0,012	0
3	9	0,001	0,012	0
9	8	0,002	0,02	0,03
9	8	0,002	0,02	0,03
5	6	0,005	0,05	0,075
5	6	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 39 – Dados dos geradores síncronos do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Gerador	$x'_d$ (p.u.)	$x_q$ (p.u.)	$x_d$ (p.u.)	$T_{d0}$ (p.u.)	$H$ (s)	$D$ (p.u.)
G1	0,033	0,19	0,2	8	54	0,1
G2	0,033	0,19	0,2	8	54	0,1
G3	0,033	0,19	0,2	8	63	0,1
G4	0,033	0,19	0,2	8	63	0,1

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 40 – Dados dos reguladores automáticos de tensão do sistema Simétrico de Duas Áreas.

<b>Gerador</b>	G1	G2	G3	G4
<b>Ke (p.u.)</b>	200	200	200	200
<b>Te (s)</b>	0,001	0,001	0,001	0,001

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 41 – Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema Simétrico de Duas Áreas.

<b>Barra</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tensão (p.u.)</b>	<b>Fase (°)</b>	<b>P<sub>G</sub> (MW)</b>	<b>Q<sub>G</sub> (MVar)</b>	<b>P<sub>L</sub> (MW)</b>	<b>Q<sub>L</sub> (MVar)</b>	<b>Barra</b>
1	2	1,03	9,49	700,0	187,16	0,00	0,00	0
2	2	1,01	-0,40	700,0	318,37	0,00	0,00	0
3	2	1,01	-10,39	700,0	256,66	0,00	0,00	0
4	1	1,03	0,00	726,3	170,87	0,00	0,00	0
5	3	1,0046	4,94	0	0	0,00	0,00	0
6	3	0,9686	-5,14	0	0	0,00	0,00	0
7	3	0,9369	-13,70	0	0	1159	212	1
8	3	0,9532	-23,69	0	0	1575	288	3,5
9	3	0,9759	-15,13	0	0	0,00	0,00	0
10	3	1,0065	-4,73	0	0	0,00	0,00	0
11	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Dados da pesquisa.

## ANEXO B – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND

Nas Tabelas 42 a 45 são reproduzidos os dados do Sistema *New England*, cujos dados podem ser encontrados em Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 42 – Dados das linhas de transmissão do sistema *New England*.

Barra inicial	Barra final	$r$ (p.u.)	$x$ (p.u.)	$b$ (p.u.)	Barra inicial	Barra final	$r$ (p.u.)	$x$ (p.u.)	$b$ (p.u.)
30	31	0,0035	0,0411	0,6987	16	24	0,0003	0,0059	0,0680
30	10	0,0010	0,0250	0,7500	17	18	0,0007	0,0082	0,1319
31	32	0,0013	0,0151	0,2572	17	27	0,0013	0,0173	0,3216
31	25	0,0070	0,0086	0,1406	21	22	0,0008	0,0140	0,2565
32	33	0,0013	0,0213	0,2214	22	23	0,0006	0,0096	0,1846
32	18	0,0011	0,0133	0,2138	23	24	0,0022	0,0350	0,3610
33	34	0,0008	0,0128	0,1342	25	26	0,0032	0,0323	0,5130
33	14	0,0008	0,0129	0,1382	26	27	0,0014	0,0147	0,2396
34	35	0,0002	0,0026	0,0434	26	28	0,0043	0,0474	0,7802
37	34	0,0008	0,0112	0,1476	26	29	0,0057	0,0625	1,0290
35	36	0,0006	0,0092	0,1130	28	29	0,0014	0,0151	0,2490
35	11	0,0007	0,0082	0,1389	12	11	0,0016	0,0435	0,0000
36	37	0,0004	0,0046	0,0780	12	13	0,0016	0,0435	0,0000
37	F <sub>1</sub>	0,0000	0,0010	0,0000	35	2	0,0000	0,0250	0,0000
F <sub>1</sub>	38	0,0023	0,0363	0,3804	39	3	0,0000	0,0200	0,0000
38	10	0,0010	0,0250	1,2000	19	4	0,0007	0,0142	0,0000
39	11	0,0004	0,0043	0,0729	20	5	0,0009	0,0180	0,0000
39	13	0,0004	0,0043	0,0729	22	6	0,0000	0,0143	0,0000
13	14	0,0009	0,0101	0,1723	23	7	0,0005	0,0272	0,0000
14	15	0,0018	0,0217	0,3660	25	8	0,0006	0,0232	0,0000
15	16	0,0009	0,0094	0,1710	31	1	0,0000	0,0181	0,0000
16	17	0,0007	0,0089	0,1342	29	9	0,0008	0,0156	0,0000
16	19	0,0016	0,0195	0,3040	19	20	0,0007	0,0138	0,0000
16	21	0,0008	0,0135	0,2548					

Fonte: Adaptado de Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 43 – Dados dos geradores síncronos do sistema *New England*.

Gerador	$x'd$ (p.u.)	$x_q$ (p.u.)	$x_d$ (p.u.)	$T_{d0}$ (p.u.)	$H$ (s)	$D$ (p.u.)
G1	0,0310	0,0609	0,1000	10,2	42,0	4,00
G2	0,0697	0,2820	0,2950	6,56	30,3	9,75
G3	0,0531	0,2370	0,2495	5,70	35,8	10,0
G4	0,0436	0,2580	0,2620	6,56	28,6	10,0
G5	0,1320	0,6200	0,6700	5,40	26,0	3,00
G6	0,0500	0,2410	0,2540	7,30	34,8	10,0
G7	0,0490	0,2920	0,2950	5,66	26,4	8,00
G8	0,0570	0,2800	0,2900	6,70	24,3	9,00
G9	0,0570	0,2050	0,2106	4,79	34,5	14,0
G10	0,0001	1,00E-10	1,00E-10	7,00	1,0E+09	10,0

Fonte: Adaptado de Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 44 – Dados dos reguladores automáticos de tensão (Sistema de Duas Áreas).

Gerador	G1	G2	G3	G4	G4	G6	G7	G8	G9	G10
$K_e$ (pu)	5,000	6,200	5,000	5,000	40,00	5,000	40,00	5,000	40,00	0,001
$T_e$ (s)	0,06	0,05	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	9999

Fonte: Adaptado de Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 45 – Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema *New England*.

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Fase (°)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVar)
1	2	1,0000	-3,35	250	88,12	0	0
2	1	1,0000	0,00	552,58	239,29	9	5
3	2	1,0000	2,30	650	239,99	0	0
4	2	1,0000	4,50	632	141,94	0	0
5	2	1,0000	3,60	508	133,09	0	0
6	2	1,0000	6,50	650	194,56	0	0
7	2	1,0000	9,68	560	132,99	0	0
8	2	1,0000	2,72	540	37,78	0	0
9	2	1,0000	8,66	830	66,73	0	0
10	2	1,0000	-10,7	1000	174,29	1104	250
11	3	0,9561	-6,41	0	0	0	0
12	3	0,9357	-6,39	0	0	8	88
13	3	0,9563	-6,25	0	0	0	0
14	3	0,9500	-8,06	0	0	0	0
15	3	0,9466	-8,35	0	0	320	153
16	3	0,9614	-6,65	0	0	329	32
17	3	0,9648	-7,87	0	0	0	0
18	3	0,9634	-8,87	0	0	158	30
19	3	0,9794	-0,70	0	0	0	0

20	3	0,9757	-1,71	0	0	628	103
21	3	0,9589	-3,99	0	0	274	115
22	3	0,9766	1,03	0	0	0	0
23	3	0,9729	0,71	0	0	275	85
24	3	0,9667	-6,56	0	0	309	-92
25	3	0,9959	-4,49	0	0	224	48
26	3	0,9868	-5,84	0	0	139	17
27	3	0,9701	-8,08	0	0	281	76
28	3	0,9890	-1,90	0	0	206	28
29	3	0,9914	1,19	0	0	284	27
30	3	1,0040	-8,98	0	0	0	0
31	3	0,9851	-5,98	0	0	0	0
32	3	0,9652	-9,22	0	0	322	2
33	3	0,9423	-10,23	0	0	500	184
34	3	0,9480	-8,98	0	0	0	0
35	3	0,9512	-8,21	0	0	0	0
36	3	0,9400	-10,68	0	0	233	84
37	3	0,9391	-11,24	0	0	522	176
38	3	0,9920	-10,92	0	0	0	0
39	3	0,9608	-5,47	0	0	0	0
F <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Dados da pesquisa.



## APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS

1. **MARTINS, L. F. B.**; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MACEDO, L. H. Design of the PI-UPFC-POD and PSS damping controllers using an Artificial Bee Colony algorithm. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2017. p. 1 – 10. (Submetido)
2. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; **MARTINS, L. F. B.** Fluxo de Potência Ótimo Considerando o FACTS Interline Power Flow Controller. In IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016, Natal. *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2016. p. 1 – 6.
3. **MARTINS, L. F. B.**; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; GAMINO, B. R. Atuação do FACTS SSSC Modelado por Injeções de Corrente no Sistema Elétrico de Potência. In: IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016, Natal. *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2016. p. 1 – 6.
4. GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; **MARTINS, L. F. B.**; ARAUJO, P. B. Meta-Heurísticas Bio-Inspiradas Aplicadas ao Problema de Fluxo de Potência Ótimo Reativo. In: XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2016, Vitória. *Anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2016. p. 1 – 12.
5. GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MIOTTO, E. L.; **MARTINS, L. F. B.** Ajuste dos Parâmetros dos Controladores ESP e Conjunto TCSC-POD Utilizando o Algoritmo Particle Swarm Optimization. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2016, Vitória. *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática*, 2016. p. 1 – 6.
6. MIOTTO, E. L.; GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; **MARTINS, L. F. B.** Análise Estática e Dinâmica da Influência do Generalized Unified Power Flow Controller no Sistema Elétrico de Potência. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2016, Vitória. *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática*, 2016. p. 1 – 6.
7. **MARTINS, L. F. B.**; GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MIOTTO, E. L. Comparison between Artificial Bee Colony and Particle Swarm Optimization algorithms in the tuning of PSS and UPFC-POD controllers. In: 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2016, Curitiba. *2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. p. 1 – 8.
8. MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; **MARTINS, L. F. B.** Coordinated tuning of the parameters of supplementary controllers damping using bio-inspired algorithms. In: 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications

- (INDUSCON), 2016, Curitiba. 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). p. 1 – 8.
9. GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; **MARTINS, L. F. B.**; MIOTTO, E. L. Coordinated tuning of PSS and TCSC-POD controller using an Elite Genetic Algorithm. In: 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2016, Curitiba. 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2016. p. 1 – 8.
  10. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; GAMINO, B. R.; **MARTINS, L. F. B.** Analysis of the influence of PSS and IPFC-POD controllers in small-signal stability using a Simulated Annealing algorithm. In: 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2016, Curitiba. 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2016. p. 1 – 8.
  11. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; GAMINO, B. R.; **MARTINS, L. F. B.** Ajuste Coordenado dos Parâmetros dos Controladores ESP E IPFC-POD Usando um Algoritmo Multi-Start. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2016, Vitória. Anais XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016. p. 1 – 6.
  12. **MARTINS, L. F. B.**; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MIOTTO, E. L.; GAMINO, B. R. Projeto de ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESP e PI-UPFC inspirado em um algoritmo Colônia de Abelhas Artificiais. In: XIII Simpósio Brasileiro de Automação inteligente, 2017, Porto Alegre – RS. p. 1 – 8. (Aceito)
  13. FORTES, E. V.; MACEDO, L. H.; **MARTINS, L. F. B.**; ARAUJO, P. B. Projeto dos controladores suplementares de amortecimento ESP e TCSC-POD usando o algoritmo simplex de Nelder-Mead. In: XIII Simpósio Brasileiro de Automação inteligente, 2017, Porto Alegre – RS. p. 1 – 6. (Aceito)
  14. GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; MIOTTO, E. L.; **MARTINS, L. F. B.** Análise da estabilidade dinâmica em sistemas multimáquinas considerando a atuação dos controladores de amortecimento ESP e TCSC-POD ajustados pelo algoritmo Simulated Annealing. In: XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2017, Curitiba – PR. p. 1 – 6. (Aceito)
  15. **MARTINS, L. F. B.**; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MIOTTO, E. L.; GAMINO, B. R. Design of the PSSs, PI – UPFC and PI – UPFC – POD controllers using the Firefly Algorithm. In: 12<sup>th</sup> Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2017, 2017, Mar del Plata, Argentina. p. 1 – 7. (Submetido)

16. FORTES, E. V.; MACEDO, L. H.; **MARTINS, L. F. B.**; MIOTTO, E. L. Design of the PSSs, PI – UPFC and PI – UPFC – POD controllers using the Firefly Algorithm. In: 12<sup>th</sup> Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2017, 2017, Mar del Plata, Argentina. p. 1 – 6. (Submetido)
17. MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; **MARTINS, L. F. B.**; GAMINO, B. R. A Fireworks Metaheuristic for the design of PSS and TCSC-POD controllers for small-signal stability studies. In: 12<sup>th</sup> Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2017, 2017, Mar del Plata, Argentina. p. 1 – 10. (Submetido)

## APÊNDICE B – COEFICIENTES DO MSC DO UPFC

Neste apêndice são mostrados os coeficientes lineares do Modelo de Injeção de Corrente do UPFC obtidos a partir do conjunto das equações (31) a (34), deduzidas no Capítulo 2. Para tal, é definido o ângulo  $A$  conforme a equação (205).

$$A = 2 \cos \theta_k - \cos \theta_m \quad (205)$$

Este modelo possui coeficientes ativos e reativos para as barras inicial e final de instalação do dispositivo de acordo com o apresentado na sequência.

### B.1 COEFICIENTES REAIS NA BARRA INICIAL DE INSTALAÇÃO

A equação (31) pode ser linearizada em torno de um ponto de equilíbrio como mostrado na expressão (206).

$$\Delta I_{rk}^{\text{upfc}} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{rk}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_p} \Delta V_p + \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_q} \Delta V_q + \frac{\partial I_{rk}}{\partial I_q} \Delta I_q \quad (206)$$

As derivadas parciais podem ser substituídas em (206) por coeficientes de sensibilidade como mostrado em (207).

$$\Delta I_{rk}^{\text{upfc}} = R1_{Uk} \Delta \theta_k + R2_{Uk} \Delta \theta_m + R3_{Uk} \Delta V_k + R4_{Uk} \Delta V_m + R5_{Uk} \Delta V_p + R6_{Uk} \Delta V_q + R7_{Uk} \Delta I_q \quad (207)$$

Os coeficientes reais de  $\Delta I_{rk}^{\text{upfc}}$  na barra inicial  $k$  de instalação são definidos de (208) a (214).

$$R1_{Uk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial \theta_k} = -\frac{V_m}{V_k} b_{km} (V_p \sen A - V_q \cos A) + (V_q b_{km} + I_q) \cos \theta_k \quad (208)$$

$$R2_{Uk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial \theta_m} = \frac{V_m}{2V_k} b_{km} [V_p (\sen A - \sen \theta_m) - V_q (\cos A + \cos \theta_m)] \quad (209)$$

$$R3_{Uk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_k} = -\frac{V_m}{2V_k^2} b_{km} \left[ V_p (\cos A + \cos \theta_m) + V_q (\sen A - \sen \theta_m) \right] \quad (210)$$

$$R4_{Uk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_m} = \frac{1}{2V_k} b_{km} \left[ V_p (\cos A + \cos \theta_m) + V_q (\sen A - \sen \theta_m) \right] \quad (211)$$

$$R5_{Uk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_p} = \frac{V_m}{2V_k} b_{km} (\cos A + \cos \theta_m) \quad (212)$$

$$R6_{Uk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_q} = \frac{V_m}{2V_k} b_{km} (\sen A - \sen \theta_m) + b_{km} \sen \theta_k \quad (213)$$

$$R7_{Uk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial I_q} = \sen \theta_k \quad (214)$$

## B.2 COEFICIENTES IMAGINÁRIOS NA BARRA INICIAL DE INSTALAÇÃO

É possível linearizar a equação (32) em torno de um ponto de equilíbrio como mostrado na expressão (215).

$$\Delta I_{mk}^{\text{upfc}} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{mk}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_p} \Delta V_p + \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_q} \Delta V_q + \frac{\partial I_{mk}}{\partial I_q} \Delta I_q \quad (215)$$

Substituindo as derivadas parciais da equação (215) por coeficientes tem-se a expressão (216).

$$\Delta I_{mk}^{\text{upfc}} = M1_{Uk} \Delta \theta_k + M2_{Uk} \Delta \theta_m + M3_{Uk} \Delta V_k + M4_{Uk} \Delta V_m + M5_{Uk} \Delta V_p + M6_{Uk} \Delta V_q + M7_{Uk} \Delta I_q \quad (216)$$

Os coeficientes imaginários de  $\Delta I_{mk}^{\text{upfc}}$  na barra inicial de instalação são definidos em (217) a (223).

$$M1_{Uk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial \theta_k} = \frac{V_m}{V_k} (V_p \cos A + V_q \sen A) + (V_q b_{km} + I_q) \sen \theta_k \quad (217)$$

$$M2_{Uk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial \theta_m} = -\frac{V_m}{2V_k} b_{km} \left[ V_p (\cos A - \cos \theta_m) + V_q (\sin A + \sin \theta_m) \right] \quad (218)$$

$$M3_{Uk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_k} = -\frac{V_m}{2V_k^2} b_{km} \left[ V_p (\sin A + \sin \theta_m) - V_q (\cos A - \cos \theta_m) \right] \quad (219)$$

$$M4_{Uk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_m} = \frac{1}{2V_k} b_{km} \left[ V_p (\sin A + \sin \theta_m) - V_q (\cos A - \cos \theta_m) \right] \quad (220)$$

$$M5_{Uk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_p} = \frac{V_m}{2V_k} b_{km} (\sin A + \sin \theta_m) \quad (221)$$

$$M6_{Uk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_q} = -\frac{V_m}{2V_k} b_{km} (\cos A - \cos \theta_m) - b_{km} \cos \theta_k \quad (222)$$

$$M7_{Uk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial I_q} = -\cos \theta_k \quad (223)$$

### B.3 COEFICIENTES REAIS NA BARRA FINAL DE INSTALAÇÃO

Repetindo o procedimento realizado em (32) na expressão (33) chega-se à (224).

$$\Delta I_{rm}^{\text{upfc}} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{rm}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_p} \Delta V_p + \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_q} \Delta V_q + \frac{\partial I_{rm}}{\partial I_q} \Delta I_q \quad (224)$$

Trocando as derivadas parciais de (224) por coeficientes adequados resulta em (225).

$$\Delta I_{rm}^{\text{upfc}} = R1_{Um} \Delta \theta_k + R2_{Um} \Delta \theta_m + R3_{Um} \Delta V_k + R4_{Um} \Delta V_m + R5_{Um} \Delta V_p + R6_{Um} \Delta V_q + R7_{Um} \Delta I_q \quad (225)$$

Os coeficientes reais de  $\Delta I_{rm}^{\text{upfc}}$  na barra final  $m$  de instalação são definidos de (226) a (232).

$$R1_{Um} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial \theta_k} = b_{km} (V_p \text{sen } \theta_k - V_q \text{cos } \theta_k) \quad (226)$$

$$R2_{Um} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial \theta_m} = 0 \quad (227)$$

$$R3_{Um} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_k} = 0 \quad (228)$$

$$R4_{Um} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_m} = 0 \quad (229)$$

$$R5_{Um} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_p} = -b_{km} \text{cos } \theta_k \quad (230)$$

$$R6_{Um} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial V_q} = -b_{km} \text{sen } \theta_k \quad (231)$$

$$R7_{Um} = \frac{\partial I_{rm}}{\partial I_q} = 0 \quad (232)$$

#### B.4 COEFICIENTES IMAGINÁRIOS NA BARRA FINAL DE INSTALAÇÃO

Linearizando a equação (34) em torno de um ponto de equilíbrio chega-se na expressão (233).

$$\Delta I_{mm}^{\text{upfc}} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial I_{mm}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_p} \Delta V_p + \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_q} \Delta V_q + \frac{\partial I_{mm}}{\partial I_q} \Delta I_q \quad (233)$$

Alterando as derivadas parciais de (233) por coeficientes de sensibilidade resulta em (234).

$$\Delta I_{mm}^{\text{upfc}} = M1_{Um} \Delta \theta_k + M2_{Um} \Delta \theta_m + M3_{Um} \Delta V_k + M4_{Um} \Delta V_m + M5_{Um} \Delta V_p + M6_{Um} \Delta V_q + M7_{Um} \Delta I_q \quad (234)$$

Os coeficientes imaginários de  $\Delta I_{mm}^{\text{upfc}}$  na barra final de instalação são definidos de (235) a (241).

$$M1_{Um} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial \theta_k} = -b_{km} (V_p \cos \theta_k + V_q \text{sen } \theta_k) \quad (235)$$

$$M2_{Um} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial \theta_m} = 0 \quad (236)$$

$$M3_{Um} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_k} = 0 \quad (237)$$

$$M4_{Um} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_m} = 0 \quad (238)$$

$$M5_{Um} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_p} = -b_{km} \text{sen } \theta_k \quad (239)$$

$$M6_{Um} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial V_q} = b_{km} \cos \theta_k \quad (240)$$

$$M7_{Um} = \frac{\partial I_{mm}}{\partial I_q} = 0 \quad (241)$$



## APÊNDICE C – COEFICIENTES DO MSC

Este apêndice fornece as expressões dos coeficientes de sensibilidade de corrente para o sistema multimáquinas descrito no Capítulo 3.

### C.1 COEFICIENTES DOS GERADORES

#### C.1.1 Coeficientes reais

$$R1_{Gk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial E'_{qk}} = \frac{\text{sen } \delta_k}{x'_{dk}} \quad (242)$$

$$R2_{Gk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial \delta_k} = \frac{I}{x'_{dk}} E'_{qk} \cos \delta_k + \left( \frac{I}{x_{qk}} - \frac{I}{x'_{dk}} \right) V_k \cos(2\delta_k - \theta_k) \quad (243)$$

$$R3_{Gk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial \theta_k} = V_k \left[ \frac{I}{x_{qk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k - \frac{I}{x'_{dk}} \text{sen}(\delta_k - \theta_k) \text{sen } \delta_k \right] \quad (244)$$

$$R4_{Gk} = \frac{\partial I_{rk}}{\partial V_k} = -\frac{I}{x'_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \text{sen } \delta_k + \frac{I}{x_{qk}} \text{sen}(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k \quad (245)$$

#### C.1.2 Coeficientes imaginários

$$M1_{Gk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial E'_{qk}} = -\frac{\cos \delta_k}{x'_{dk}} \quad (246)$$

$$M2_{Gk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial \delta_k} = \frac{I}{x'_{dk}} E'_{qk} \text{sen } \delta_k + \left( \frac{I}{x_{qk}} - \frac{I}{x'_{dk}} \right) V_k \text{sen}(2\delta_k - \theta_k) \quad (247)$$

$$M3_{Gk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial \theta_k} = V_k \left[ \frac{I}{x'_{dk}} \text{sen}(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k - \frac{I}{x_{qk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \text{sen} \delta_k \right] \quad (248)$$

$$M4_{Gk} = \frac{\partial I_{mk}}{\partial V_k} = \frac{I}{x'_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k + \frac{I}{x_{qk}} \text{sen}(\delta_k - \theta_k) \text{sen} \delta_k \quad (249)$$

## C.2 COEFICIENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

### C.2.1 Coeficientes reais

$$R1_{km} = \frac{\partial I_{rkm}}{\partial \theta_k} = -V_k (g_{km} \text{sen} \theta_k + b_{km} \cos \theta_k) \quad (250)$$

$$R2_{km} = \frac{\partial I_{rkm}}{\partial \theta_m} = V_m (g_{km} \text{sen} \theta_m + b_{km} \cos \theta_m) \quad (251)$$

$$R3_{km} = \frac{\partial I_{rkm}}{\partial V_k} = g_{km} \cos \theta_k - b_{km} \text{sen} \theta_k \quad (252)$$

$$R4_{km} = \frac{\partial I_{rkm}}{\partial V_m} = -g_{km} \cos \theta_m + b_{km} \text{sen} \theta_m \quad (253)$$

### C.2.2 Coeficientes imaginários

$$M1_{km} = \frac{\partial I_{mkm}}{\partial \theta_k} = V_k (g_{km} \cos \theta_k - b_{km} \text{sen} \theta_k) \quad (254)$$

$$M2_{km} = \frac{\partial I_{mkm}}{\partial \theta_m} = -V_m (g_{km} \cos \theta_m - b_{km} \text{sen} \theta_m) \quad (255)$$

$$M3_{km} = \frac{\partial I_{mkm}}{\partial V_k} = g_{km} \text{sen} \theta_k + b_{km} \cos \theta_k \quad (256)$$

$$M4_{km} = \frac{\partial I_{mkm}}{\partial V_m} = -g_{km} \operatorname{sen} \theta_m - b_{km} \operatorname{cos} \theta_m \quad (257)$$

### C.3 COEFICIENTES DAS CARGAS

#### C.3.1 Coeficientes reais

$$R1_{Lk} = \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial \theta_k} = \frac{-P_{Lk} \operatorname{sen} \theta_k + Q_{Lk} \operatorname{cos} \theta_k}{V_k} \quad (258)$$

$$R2_{Lk} = \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial V_k} = -\frac{(P_{Lk} \operatorname{cos} \theta_k + Q_{Lk} \operatorname{sen} \theta_k)}{V_k^2} \quad (259)$$

$$R3_{Lk} = \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial P_{Lk}} = \frac{\operatorname{cos} \theta_k}{V_k} \quad (260)$$

$$R4_{Lk} = \frac{\partial I_{Lrk}}{\partial Q_{Lk}} = \frac{\operatorname{sen} \theta_k}{V_k} \quad (261)$$

#### C.3.2 Coeficientes imaginários

$$M1_{Lk} = \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial \theta_k} = \frac{P_{Lk} \operatorname{cos} \theta_k + Q_{Lk} \operatorname{sen} \theta_k}{V_k} \quad (262)$$

$$M2_{Lk} = \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial V_k} = -\frac{(P_{Lk} \operatorname{sen} \theta_k - Q_{Lk} \operatorname{cos} \theta_k)}{V_k^2} \quad (263)$$

$$M3_{Lk} = \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial P_{Lk}} = \frac{\operatorname{sen} \theta_k}{V_k} \quad (264)$$

$$M4_{Lk} = \frac{\partial I_{Lmk}}{\partial Q_{Lk}} = -\frac{\cos \theta_k}{V_k} \quad (265)$$

#### C.4 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO DO ROTOR

$$K1_k = \frac{1}{x'_{dk}} V_k E'_{qk} \cos(\delta_k - \theta_k) + \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k^2 \cos(2\delta_k - 2\theta_k) \quad (266)$$

$$K2_k = \frac{1}{x'_{dk}} V_k \operatorname{sen}(\delta_k - \theta_k) \quad (267)$$

$$K3_k = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \operatorname{sen}(\delta_k - \theta_k) + \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \operatorname{sen}(2\delta_k - 2\theta_k) \quad (268)$$

#### C.5 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DA TENSÃO INTERNA DA MÁQUINA SÍNCRONA

$$K4_k = \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \quad (269)$$

$$K5_k = \frac{(x'_{dk} - x_{dk})}{x'_{dk}} V_k \operatorname{sen}(\delta_k - \theta_k) \quad (270)$$

$$K6_k = \frac{(x_{dk} - x'_{dk})}{x'_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (271)$$

## C.6 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DA EXCITATRIZ ESTÁTICA

$$K_{42_k} = -\frac{1}{T_{e_k}} \quad (272)$$

$$K_{46_k} = -\frac{K_{e_k}}{T_{e_k}} \quad (273)$$

$$K_{47_k} = \frac{K_{e_k}}{T_{e_k}} \quad (274)$$

## C.7 COEFICIENTES DOS ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

### C.7.1 Coeficientes das variáveis de estado

$$K_{11_k} = -\frac{K_k^E}{T_{w_k}} \quad (275)$$

$$K_{12_k} = -\frac{1}{T_{w_k}} \quad (276)$$

$$K_{21_k} = \frac{K_k^E}{T_{2k}^E} \left( 1 - \frac{T_{1k}^E}{T_{2k}^E} \right) \quad (277)$$

$$K_{22_k} = \frac{1}{T_{2k}^E} \left( 1 - \frac{T_{1k}^E}{T_{2k}^E} \right) \quad (278)$$

$$K_{23_k} = -\frac{1}{T_{2k}^E} \quad (279)$$

$$K_{31_k} = \frac{T_{1k}^E K_k^E}{T_{2k}^E T_{4k}^E} \left( 1 - \frac{T_{3k}^E}{T_{4k}^E} \right) \quad (280)$$

$$K_{32_k} = \frac{T_{1k}^E}{T_{2k}^E T_{4k}^E} \left( 1 - \frac{T_{3k}^E}{T_{4k}^E} \right) \quad (281)$$

$$K_{33_k} = \frac{1}{T_{4k}^E} \left( 1 - \frac{T_{3k}^E}{T_{4k}^E} \right) \quad (282)$$

$$K_{34_k} = -\frac{1}{T_{4k}^E} \quad (283)$$

### C.7.2 Coeficientes da equação da excitatriz estática

$$K_{41_k} = \frac{K_{e_k} K_k^E T_{1k}^E T_{3k}^E}{T_{e_k} T_{2k}^E T_{4k}^E} \quad (284)$$

$$K_{43_k} = \frac{K_{e_k} T_{1k}^E T_{3k}^E}{T_{e_k} T_{2k}^E T_{4k}^E} \quad (285)$$

$$K_{44_k} = \frac{K_{e_k} T_{3k}^E}{T_{e_k} T_{4k}^E} \quad (286)$$

$$K_{45_k} = \frac{K_{e_k}}{T_{e_k}} \quad (287)$$

## C.8 COEFICIENTES DO POWER OSCILLATION DAMPING

### C.8.1 Coeficientes das variáveis do sinal de entrada do POD

$$A1_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial (\theta_k - \theta_m)} = V_k V_m \left[ g_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \text{cos}(\theta_k - \theta_m) \right] \quad (288)$$

$$A2_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2V_k g_{km} - V_m \left[ g_{km} \text{cos}(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) \right] \quad (289)$$

$$A3_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -V_k \left[ g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) \right] \quad (290)$$

### C.8.2 Coeficientes das variáveis de estado

$$C11 = -K^p \frac{1}{T_w} A1_{km} \quad (291)$$

$$C12 = K^p \frac{1}{T_w} A1_{km} \quad (292)$$

$$C13 = -K^p \frac{1}{T_w} A2_{km} \quad (293)$$

$$C14 = -K^p \frac{1}{T_w} A3_{km} \quad (294)$$

$$C15 = -\frac{1}{T_w} \quad (295)$$

$$C21 = K^p \frac{1}{T_2^p} \left( 1 - \frac{T_1^p}{T_2^p} \right) A1_{km} \quad (296)$$

$$C22 = -K^p \frac{1}{T_2^p} \left( 1 - \frac{T_1^p}{T_2^p} \right) A1_{km} \quad (297)$$

$$C23 = K^p \frac{1}{T_2^p} \left( 1 - \frac{T_1^p}{T_2^p} \right) A2_{km} \quad (298)$$

$$C24 = K^p \frac{1}{T_2^p} \left( 1 - \frac{T_1^p}{T_2^p} \right) A3_{km} \quad (299)$$

$$C25 = \frac{1}{T_2^p} \left( 1 - \frac{T_1^p}{T_2^p} \right) \quad (300)$$

$$C_{26} = -\frac{1}{T_2^P} \quad (301)$$

$$C_{31} = K^P \frac{T_1^P}{T_2^P T_4^P} \left(1 - \frac{T_3^P}{T_4^P}\right) A1_{km} \quad (302)$$

$$C_{32} = -K^P \frac{T_1^P}{T_2^P T_4^P} \left(1 - \frac{T_3^P}{T_4^P}\right) A1_{km} \quad (303)$$

$$C_{33} = K^P \frac{T_1^P}{T_2^P T_4^P} \left(1 - \frac{T_3^P}{T_4^P}\right) A2_{km} \quad (304)$$

$$C_{34} = K^P \frac{T_1^P}{T_2^P T_4^P} \left(1 - \frac{T_3^P}{T_4^P}\right) A3_{km} \quad (305)$$

$$C_{35} = \frac{T_1^P}{T_2^P T_4^P} \left(1 - \frac{T_3^P}{T_4^P}\right) \quad (306)$$

$$C_{36} = \frac{1}{T_4^P} \left(1 - \frac{T_3^P}{T_4^P}\right) \quad (307)$$

$$C_{37} = -\frac{1}{T_4^P} \quad (308)$$

### C.8.3 Coeficientes da equação da tensão em quadratura do conversor série

$$C_{41} = -K^P \frac{1}{T_m} \frac{T_1^P T_3^P}{T_2^P T_4^P} A1_{km} \quad (309)$$

$$C_{42} = K^P \frac{1}{T_m} \frac{T_1^P T_3^P}{T_2^P T_4^P} A1_{km} \quad (310)$$



$$C_{43} = -K^P \frac{1}{T_m} \frac{T_1^P T_3^P}{T_2^P T_4^P} A_{2_{km}} \quad (311)$$

$$C_{44} = -K^P \frac{1}{T_m} \frac{T_1^P T_3^P}{T_2^P T_4^P} A_{3_{km}} \quad (312)$$

$$C_{45} = -\frac{1}{T_m} \frac{T_1^P T_3^P}{T_2^P T_4^P} \quad (313)$$

$$C_{46} = -\frac{1}{T_m} \frac{T_3^P}{T_4^P} \quad (314)$$

$$C_{47} = -\frac{1}{T_m} \quad (315)$$