

**EDNEI LUIZ MIOTTO**

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO BIOINSPIRADO NOVEL  
BAT ALGORITHM NA PARAMETRIZAÇÃO DOS  
CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE  
AMORTECIMENTO E DISPOSITIVO FACTS GUPFC**

**Ilha Solteira**

**2018**

**EDNEI LUIZ MIOTTO**

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO BIOINSPIRADO NOVEL  
BAT ALGORITHM NA PARAMETRIZAÇÃO DOS  
CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE  
AMORTECIMENTO E DISPOSITIVO FACTS GUPFC**

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**

**2018**

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M669a Miotto, Ednei Luiz.  
Aplicação do algoritmo bioinspirado *novel bat algorithm* na parametrização dos controladores suplementares de amortecimento e dispositivo FACTS GUPFC / Ednei Luiz Miotto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018  
180 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2018

Orientador: Percival Bueno de Araujo  
Inclui bibliografia

1. Modelo de sensibilidade de potência. 2. *Generalized unified power flow controller*. 3. Estabilizadores de sistemas de potência. 4. *Power oscillation damping*. 5. Algoritmos bioinspirados. 6. *Novel bat algorithm*.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: APLICAÇÃO DO ALGORITMO BIOINSPIRADO NOVEL BAT ALGORITHM NA  
PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE  
AMORTECIMENTO E DISPOSITIVO FACTS GUPFC

**AUTOR: EDNEI LUIZ MIOTTO**

**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



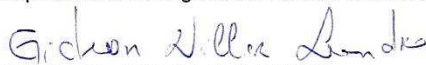
Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ROMAN KUIAVA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. GIDEON VILLAR LEANDRO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Paraná

Ilha Solteira, 18 de outubro de 2018

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha querida esposa Edna, minha maior incentivadora, com quem compartilho minha vida, meus sonhos, e cujo amor, companheirismo e solidariedade me foram fundamentais em cada passo dessa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Percival Bueno de Araujo, pela orientação e dedicação concedidas na realização deste trabalho e, principalmente, pela confiança e amizade.

À professora Dra. Anna Diva Plasencia Lotufo e ao professor Dr. Carlos Roberto Minussi, pelas valorosas contribuições concedidas na banca de qualificação do presente trabalho.

A toda a equipe da Seção Técnica de Pós-Graduação, sempre prestativos e dispostos a ajudar.

Aos demais professores do programa de pós-graduação: Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão, Prof. Dr. Francisco Villarreal Alvarado, Prof. Dr. Júlio Borges de Souza, Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin, Prof. Dr. Marcos Júlio Rider Flores e Prof. Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira, pelos ensinamentos.

A todos os colegas da pós-graduação com quem tive o prazer de conviver durante este período tão importante da minha vida, Luiz Fabiano, Elenilson, Bruno, Carlos Pupin, André, obrigado pela parceria.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) que me concedeu a oportunidade de afastamento para que eu pudesse me dedicar exclusivamente ao doutorado.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UNESP Campus de Ilha Solteira (PPGEE-UNESP), pela oportunidade de realizar o sonho do doutorado numa Instituição pública e de qualidade.

A minha querida mãe que soube superar todas as dificuldades que a vida lhe impôs para que todos os seus filhos estudassem. Sem a força dela eu não estaria aqui hoje.

A Deus.

*“Não teme enfrentar, não teme ouvir, não teme o desvelamento do mundo. Não teme o encontro com o povo. Não teme o diálogo com ele, de que resulta o crescente saber de ambos. Não se sente dono do tempo, nem dono dos homens, nem libertador dos oprimidos. Com eles se compromete, dentro do tempo, para com eles lutar”.*

***Paulo Freire***





## RESUMO

Este trabalho apresenta o *Novel Bat Algorithm* com uma nova técnica para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento (Estabilizadores de Sistemas de Potência e do conjunto *Generalized Unified Power Flow Controller – Power Oscillation Damping*) em sistemas elétricos de potência multimáquinas. O objetivo principal é inserir amortecimento adicional aos modos oscilatórios de baixa frequência e, conseqüentemente, garantir a estabilidade do sistema elétrico frente a pequenas perturbações. Para representar o sistema elétrico de potência será utilizado o Modelo de Sensibilidade de Potência. Desse modo, todos os seus dispositivos e componentes foram modelados por injeções de potência. Análises estáticas e dinâmicas foram realizadas em dois sistemas teste, sendo: o Sistema Simétrico de Duas Áreas e o Sistema *New England*. A eficiência do dispositivo FACTS *Generalized Unified Power Flow Controller* atuando em conjunto com uma estrutura de controle baseada em controladores Proporcional – Integral foi criteriosamente avaliada para o controle de fluxos de potências ativa e reativa, para a melhoria do perfil de tensão do sistema elétrico e na redução das perdas no sistema de transmissão. O desempenho do *Novel Bat Algorithm*, no que concerne ao ajuste dos parâmetros dos controladores, foi comparado a outros quatro algoritmos bio-inspirados bastante difundidos na literatura: *Particle Swarm Optimization*, *Bacterial Foraging Optimization*, *Bat Algorithm* e o Algoritmo Genético com Elitismo. Os resultados demonstraram que o *Novel Bat Algorithm* foi mais eficiente que as demais técnicas avaliadas, obtendo soluções com amortecimento satisfatório, mesmo quando variações nos cenários de carregamento do sistema são consideradas, sendo, portanto, credenciado como ferramenta promissora para a análise da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas elétricos de potência multimáquinas.

**Palavras-Chave:** Modelo de sensibilidade de potência. *Generalized unified power flow controller*. Estabilizadores de sistemas de potência. *Power oscillation damping*. Algoritmos bioinspirados. *Novel bat algorithm*.

## ABSTRACT

This work presents the Novel Bat Algorithm as a new technique for the to perform the coordinated tuning of the parameters of the supplementary damping controllers (Power Systems Stabilizers and Generalized Unified Power Flow Controller - Power Oscillation Damping) in multi-machine electric power systems. The main objective is to insert damping to low-frequency oscillations and thus ensure the stability of the electrical system against minor disturbances. The Power Sensitivity Model is used to represent the system. Thus, all devices and their components are modeled by power injection. Static and dynamic analyzes were performed in the two systems: the two-areas symmetric, and the New England. The performance of the proposed methodology (Novel Bat Algorithm), for tuning of the parameters of the controllers was compared to four other algorithms, presented in the literature: The Particle Swarm Optimization method, Bacterial Foraging Optimization method, Bat Algorithm method and a Genetic Algorithm with elitism. The results demonstrated that the Novel Bat Algorithm was more effective than the other techniques presented, generating robust solutions when variations on the scenarios of loads were considered, and therefore accredited it as a tool in the analysis of the study of small-signal stability.

**Keywords:** Power sensitivity model. Generalized unified power flow controller. Power systems stabilizers. Power oscillation damping. Bio-inspired algorithms. Small-signal stability. Novel bat algorithm.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de dispositivos FACTS Série e <i>Shunt</i> em operação:.....	32
Figura 2 - Diagrama esquemático do GUPFC.....	35
Figura 3 - Circuito equivalente do GUPFC.....	36
Figura 4 - Contribuição série e Shunt nas barras do GUPFC.....	40
Figura 5 - Diagrama fasorial das tensões série injetadas.....	43
Figura 6 - Modelo completo de injeção de potência do GUPFC.....	45
Figura 7 - Estrutura do sistema de controle do GUPFC.....	46
Figura 8 - Sistema de controle para componente em quadratura do conversor VSC2.....	47
Figura 9 - Sistema de controle para componente em fase do conversor VSC2.....	47
Figura 10 - Sistema de controle para componente em quadratura do conversor VSC3.....	48
Figura 11 - Sistema de controle para componente em fase do conversor VSC3.....	48
Figura 12 - Sistema de controle para a corrente em quadratura do conversor VSC1.....	49
Figura 13 - Controle dos fluxos de potência pelo GUPFC.....	51
Figura 14 - Enrolamento do gerador síncrono trifásico (2 pólos).....	57
Figura 15 - Diagrama unifilar do gerador síncrono.....	58
Figura 16 - Potências no sistema multimáquinas.....	60
Figura 17 - Sistema de excitação (RAT) do gerador síncrono.....	64
Figura 18 - Estrutura do controlador ESP.....	72
Figura 19 - Divisão do bloco <i>Washout</i> .....	73
Figura 20 - Divisão do primeiro bloco de avanço/atraso de fase.....	73
Figura 21 - Divisão do segundo bloco de avanço/atraso de fase.....	74
Figura 22 - Estrutura do POD.....	80
Figura 23 - Modelo dinâmico do GUPFC equipado com POD.....	81
Figura 24 - Fluxograma do Algoritmo do Morcego (BA).....	97
Figura 25 - Estrutura de funcionamento do algoritmo NBA para o ajuste de controladores suplementares de amortecimento ESP e GUPFC-POD.....	104
Figura 26 - Representação de um indivíduo no NBA.....	106
Figura 27- Região de localização dos autovalores desejados.....	108
Figura 28 - Diagrama Unifilar: Sistema simétrico de duas áreas sem controladores.....	110
Figura 29 - Perfil de tensão: Sistema simétrico de duas áreas sem a atuação de controladores.....	112
Figura 30 - Diagrama Unifilar: Sistema simétrico de duas áreas com GUPFC instalado.....	114
Figura 31 - Fatores de participação de cada gerador em cada modo oscilatório do sistema simétrico de duas áreas.....	120
Figura 32 – Número de cálculos da $F_o$ : PSO, BFO, GA, BA e NBA (Sistema Simétrico de Duas Áreas).....	124
Figura 33 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 2,5% nas cargas do SEP).....	127

Figura 34 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 5% nas cargas do SEP).....	128
Figura 35 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 7,5% nas cargas do SEP).....	129
Figura 36 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 10% nas cargas do SEP).....	131
Figura 37 - Alocação dos autovalores de interesse considerando 24 diferentes cenários de carga. ....	132
Figura 38 - Variação da velocidade angular do gerador G1 do sistema simétrico de duas áreas .....	133
Figura 39 - Variação angular do gerador G1 do sistema simétrico de duas áreas .....	134
Figura 40 - Fluxo de potência ativa entre as barra 6 e 7 do sistema simétrico de duas áreas .....	134
Figura 41 - Diagrama Unifilar: Sistema <i>New England</i> .....	135
Figura 42 - Perfil de tensão: Sistema <i>New England</i> sem a atuação de controladores.....	137
Figura 43 - Perfil de tensão: Sistema <i>New England</i> - comparação entre o Caso Base e o Caso II. ....	139
Figura 44 - Fatores de participação de cada gerador em cada modo oscilatório do sistema <i>New England</i> .....	144
Figura 45 - Número de cálculos da Fo: PSO, BFO, GA, BA e NBA (Sistema <i>New England</i> ). ....	146
Figura 46 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 2,5% nas cargas do SEP).....	149
Figura 47 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 5,0% nas cargas do SEP).....	149
Figura 48 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 7,5% nas cargas do SEP).....	150
Figura 49 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 10,0% nas cargas do SEP).....	150
Figura 50 - Variações das velocidades angulares dos geradores do sistema <i>New England</i> .....	151
Figura 51 - Variações angulares dos geradores do sistema <i>New England</i> .....	151
Figura 52 - Fluxo de potência ativa entre as barras 37 e 38 do sistema <i>New England</i> .....	152

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas sem atuação de controladores.....	111
Tabela 2 - Ganhos e constantes de tempo dos controladores PI do GUPFC.....	112
Tabela 3 - Valores das variáveis de controle do GUPFC (Caso I).....	114
Tabela 4 - Magnitudes e ângulos das tensões para os quatro casos analisados.....	115
Tabela 5 - Fluxo de potência ativa e reativa para os casos analisados.....	116
Tabela 6 - Perdas de potência ativa e reativa para os casos analisados.....	117
Tabela 7 - Geração de potência ativa e reativa para os casos analisados.....	117
Tabela 8 - Autovalores dominantes e coeficiente de amortecimento para os casos analisados	118
Tabela 9 - Comparação de desempenho dos algoritmos avaliados.....	123
Tabela 10 - Parâmetros dos controladores ESPs e GUPFC-POD.....	125
Tabela 11 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação dos controladores.....	125
Tabela 12 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 2,5% nas cargas do SEP.....	127
Tabela 13 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 5,0% nas cargas do SEP.....	128
Tabela 14 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 7,5% nas cargas do SEP.....	130
Tabela 15 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 10,0% nas cargas do SEP.....	131
Tabela 16 - Valores das variáveis de controle do GUPFC (Caso base - dispositivo desligado)	136
Tabela 17 - Autovalores Dominantes, coeficiente de amortecimento, frequência naturais - Sistema <i>New England</i> (Caso base - dispositivo desligado).....	136
Tabela 18 - Magnitudes e ângulos das tensões das barras deficientes - Caso I e Caso II.....	138
Tabela 19 - Fluxos de potências ativa e reativa controlados pelo GUPFC (Sistema <i>New England</i> ).....	140
Tabela 20 - Geração de potências ativa e reativa antes e após a instalação do GUPFC (Sistema <i>New England</i> ).....	140
Tabela 21 - Autovalores dominantes e coeficientes de amortecimento para os casos analisado.....	141
Tabela 22 - Comparação de desempenho dos algoritmos avaliados.....	145
Tabela 23 - Parâmetros dos controladores ESPs e GUPFC - POD.....	147
Tabela 24 - Autovalores Dominantes, coeficiente de amortecimento, frequência naturais - Sistema <i>New England</i> . .....	148

Tabela 25 - Dados dos geradores (Sistema Simétrico de Duas Áreas) .....	167
Tabela 26 - Dados dos reguladores automáticos de tensão (Sistema Simétrico de Duas Áreas).....	167
Tabela 27 - Dados das linhas de transmissão (Sistema Simétrico de Duas Áreas).....	168
Tabela 28 - Dados das barras (Sistema Simétrico de Duas Áreas) .....	168
Tabela 29 - Dados dos geradores (Sistema <i>New England</i> ) .....	169
Tabela 30 - Dados dos reguladores automáticos de tensão (Sistema <i>New England</i> ).....	169
Tabela 31 - Dados das linhas de transmissão (Sistema <i>New England</i> ) .....	170
Tabela 32 - Dados das barras e carregamento (Sistema <i>New England</i> ) .....	171

## LISTA DE SIGLAS

BA	Bat Algorithm
BFO	Bacterial Foraging Optimization
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DMC	Decentralized Modal Control
ESP	Estabilizadores de Sistemas de Potência
FACTS	Flexible AC Transmission System
FTMA	Função de Transferência de Malha Aberta
GA	Genetic Algorithm
GUPFC	Generalized Unified Power Flow Controller
GTO	Gate Turn Off Thyristor
IPFC	Interline Power Flow Controller
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LMI	Linear Matrix Inequalities
LT	Linha de Transmissão
MBI	Máquina Barra Infinita
MHP	Modelo de Heffron e Phillips
MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
MSC	Modelo de Sensibilidade de Corrente
NBA	Novel Bat Algorithm
PSS	Power System Stabilizers
POD	Power Oscillation Damper
PI	Proporcional – Integral
PSO	Particle Swarm Optimization
RAT	Regulador Automático de Tensão
RNA	Rede Neural Artificial
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SVC	Static Var Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Shunt Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor

UPFC

Unified Power Flow Controller

VSC

Conversor Fonte de Tensão



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\tilde{I}_{sh}$	Corrente complexa da fonte em derivação do GUPFC.
$\tilde{V}_{sin}$	Tensão complexa da fonte em série do GUPFC.
$b_{in}$	Susceptância entre as barras $i$ e $n$ .
$I_q$	Componente de $\tilde{I}_{sh}$ em quadratura com a tensão na barra comum de instalação do GUPFC.
$V_{pj}$	Componente de $\tilde{V}_{sin}$ em quadratura com a tensão na barra $j$ de instalação do GUPFC.
$V_{qj}$	Componente de $\tilde{V}_{sin}$ em quadratura com a tensão na barra $j$ de instalação do GUPFC.
$V_{pk}$	Componente de $\tilde{V}_{sin}$ em quadratura com a tensão na barra $k$ de instalação do GUPFC.
$V_{qk}$	Componente de $\tilde{V}_{sin}$ em quadratura com a tensão na barra $k$ de instalação do GUPFC.
$\tilde{V}'_j$	Tensão na Barra Fictícia $j$ .
$\tilde{V}'_k$	Tensão na Barra Fictícia $k$ .
$I_{ji}$	Fluxo de Corrente entre as Barras $j$ e $i$ .
$I_{ki}$	Fluxo de Corrente entre as Barras $k$ e $i$ .
$\tilde{S}_i$	Potência Complexa Injetada na Barra $i$ .
$\tilde{V}_i$	Tensão complexa na Barra $i$ .
$\tilde{I}_i^*$	Corrente complexa conjugada injetada na barra $i$ .
$P_{ji}$	Fluxo de Potência Ativa na Linha $j - i$ .
$Q_{ji}$	Fluxo de Potência Reativa na Linha $j - i$ .
$P_{ki}$	Fluxo de Potência Ativa na Linha $k - i$ .
$Q_{ki}$	Fluxo de Potência Reativa na Linha $k - i$ .
$P_{se,i}$	Contribuição de potência ativa das fontes de tensão série controláveis injetada na barra $i$ de instalação do GUPFC.
$Q_{se,i}$	Contribuição de potência reativa das fontes de tensão série controláveis injetada na barra $i$ de instalação do GUPFC.
$P_{se,n}$	Contribuição de potência ativa das fontes de tensão série controláveis injetada nas barras $j$ e $k$ de instalação do GUPFC.

$Q_{se,n}$	Contribuição de potência reativa das fontes de tensão série controláveis injetada nas barras $j$ e $k$ de instalação do GUPFC.
$Q_{sh}$	Potência Reativa entregue pelo conversor <i>shunt</i>
$P_{sh}$	Potência Ativa entregue pelo conversor <i>shunt</i> .
$P_{inj,i}$	Injeções de Potência Ativa na Barra $i$ comum a Instalação do GUPFC.
$Q_{inj,i}$	Injeções de Potência Reativa na Barra $i$ comum a Instalação do GUPFC.
$P_{inj,n}$	Injeções de Potência Ativa na Barra $n$ de Instalação do GUPFC.
$Q_{inj,n}$	Injeções de Potência Reativa na Barra $n$ de Instalação do GUPFC.
$P_{Lj}, P_{Lk}$	Fluxos de Potência Ativa controlados nas Barras $j$ e $k$ de instalação do GUPFC.
$Q_{Lj}, Q_{Lk}$	Fluxos de Potência Reativa controlados nas Barras $j$ e $k$ de instalação do GUPFC
$P_{refk}$	Fluxos de potência ativa especificada pelo controlador do sistema para a linha conectada à barra $k$ .
$Q_{refk}$	Fluxos de potência reativa especificada pelo controlador do sistema para a linha conectada à barra $k$ .
$V_{qn}$	Componente em Fase da Fonte de Tensão Controlável Série.
$V_{pn}$	Componente em Quadratura da Fonte de Tensão Controlável Série.
$r_n$	Parâmetros de controle da magnitude da Tensão Série Injetada.
$\gamma_n$	Parâmetros de controle do ângulo da Tensão Série Injetada.
$i_q$	Componente de fase da corrente da fonte em derivação $\tilde{I}_{sh}$ .
$i_p$	Componente em quadratura da corrente da fonte em derivação $\tilde{I}_{sh}$ .
$K_{P1}$ a $K_{P4}$	Ganhos dos controladores PI do GUPFC.
$T_{I1}$ a $T_{I4}$	Constantes de tempo dos controladores PI do GUPFC.
$K_r$	Ganho do regulador automático de tensão.
$T_r$	Constante de tempo do Regulador Automático de Tensão.
$T_{GUPFC}$	Constante de tempo referente ao atraso no processamento dos sinais de controle do GUPFC.
$V_{sup}$	Sinal suplementar proveniente do controlador POD.
$\omega$	Velocidade angular.
$(r,m)$	Sistema de coordenadas fixo.
$(d,q)$	Sistema de coordenadas rotativo.

<b>T</b>	Matriz de transformação de coordenadas.
$\tilde{E}'_k$	Tensão interna do gerador conectado à barra $k$ .
$x'_{dk}$	Reatância transitória de eixo direto do gerador.
$x_{dk}$	Reatância síncrona de eixo direto do gerador.
$\tilde{I}_K$	Corrente complexa injetada na barra $k$ .
$\tilde{V}_k$	Tensão complexa na barra $k$ .
$\delta_k$	Ângulo entre os eixos rotativo e fixo.
$Z_{km}$	Impedância entre as barras $k$ e $m$ .
$Y_{km}$	Admitância entre as barras $k$ e $m$ .
$A1_{Gk}, A2_{Gk}, A3_{Gk}$	Coefficientes de sensibilidade de potência ativa do gerador conectado à barra $k$ .
$R1_{Gk}, R2_{Gk}, R3_{Gk}$	Coefficientes de sensibilidade de potência reativa do gerador conectado à barra $k$ .
$A1_{km}, A2_{km}, A3_{km}$	Coefficientes de sensibilidade de potência ativa da linha de transmissão entre as barras $k$ e $m$ .
$R1_{km}, R2_{km}, R3_{km}$	Coefficientes de sensibilidade de potência reativa da linha de transmissão entre as barras $k$ e $m$ .
$K_{V_k}, K_{A_k}$	Coefficientes de reação de armadura do gerador.
$M_k$	Constante de inércia do gerador conectado à barra $k$ .
$D_k$	Coefficiente de amortecimento do gerador conectado à barra $k$ .
$P_{Meck}$	Potência mecânica do gerador conectado à barra $k$ .
$P_{Gk}$	Potência gerada 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.
$\omega_0$	Velocidade síncrona.
<b>x</b>	Vetor de variáveis de estado.
<b>z</b>	Vetor de variáveis algébricas.
<b>u</b>	Vetor de variáveis de entradas.
<b>A</b>	Matriz de estados do sistema.
<b>B</b>	Matriz de entradas do sistema.
$J1, J2, J3, J4$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Potência.
$B1, B2$	Matrizes de entradas do Modelo de Sensibilidade de Potência.

$T_1, T_2, T_3, T_4$	Constantes de tempo do controlador Avanço-Atraso conectado ao Estabilizador de Sistemas de Potência instalado no gerador conectado à barra $k$ .
$K_{ESP}$	Ganho estático do Estabilizador de Sistemas de Potência instalado no gerador conectado à barra $k$ .
$\dot{V}_{1k}, \dot{V}_2, \dot{V}_{3k}$	Variáveis de estados referentes ao Estabilizador de Sistemas de Potência instalado no gerador conectado à barra $k$ .
$K_{11}, K_{12},$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{V}_{1k}$ .
$K_{21}, K_{22}, K_{23},$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{V}_{2k}$ .
$K_{31}, K_{32}, K_{33}, K_{34},$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{V}_{3k}$ .
$K_{41}, K_{42}, K_{43}, K_{44},$ $K_{45}, K_{46}, K_{47}$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $E_{fdk}$ .
$T_w$	Constante de tempo do filtro <i>whashout</i> .
$T1^P, T2^P, T3^P, T4^P$	Constantes de tempo do controlador Avanço-Atraso conectado ao controlador POD.
$K_{POD}$	Ganho estático do controlador POD.
$\dot{Y}_1, \dot{Y}_2, \dot{Y}_3$	Variáveis de estados referentes ao controlador POD.
$C_{11}, C_{12}, C_{13},$ $C_{14}, C_{15},$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{Y}_1$ .
$C_{21}, C_{22}, C_{23},$ $C_{24}, C_{25}, C_{26},$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{Y}_2$ .
$C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34},$ $C_{35}, C_{36}, C_{37},$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{Y}_3$ .
$C_{41}, C_{42}, C_{43}, C_{44},$ $C_{45}, C_{46}, C_{47}$	Coefficientes de sensibilidade associados à variável de estado $\dot{Y}_3$ .
$J1_{GUPFC}, J2_{GUPFC}, J3_{GUPFC}$ $J4_{GUPFC}$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do GUPFC.

$B1_{GUPFC}, B2_{GUPFC}$	Matrizes de entradas do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do GUPFC.
$J1_{GE}, J2_{GE}, J3_{GE}$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do Estabilizador de Sistemas de Potência.
$B1_{GE}$	Matrizes de entradas do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do Estabilizador de Sistemas de Potência.
$J1_{GP}, J2_{GP}, J3_{GP}$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do <i>POD</i> .
$B1_{GP}$	Matrizes de entrada do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do <i>POD</i> .
$J1_{GUTOTAL}, J2_{GUTOTAL}, J3_{GUTOTAL}$	Matrizes jacobianas do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do GUPFC e demais controladores suplementares.
$B1_{GUTOTAL}$	Matrizes de entradas do Modelo de Sensibilidade de Potência considerando a inclusão do GUPFC e demais controladores suplementares.
$f_i$	Frequência de um individuo $i$ qualquer (Hz).
$f_{max}$	Limite superior da frequência.
$f_{min}$	Limite inferior da frequência.
$x_*$	Melhor posição global de um individuo.
$\varepsilon$	Número aleatório extraído de uma distribuição uniforme utilizado no cálculo de soluções temporárias.
$A_i$	Amplitude do som emitido por um individuo $i$ .
$r_i$	Taxa de emissão de pulsos de um individuo $i$ .
$\mu$	Fator de ponderação a intensidade do sinal sonoro.
$\gamma$	Fator de ponderação a intensidade da taxa de emissão de pulsos.
$g_j^t$	Melhor posição global da população.
$\theta$	Coefficiente de atração-expansão.
$G$	Número de Gerações.
$C$	Taxa de compensação.

$u_{ij}$	Número aleatório de distribuição uniforme entre 0 e 1.
$w$	Peso de inércia.
$P$	Probabilidade da seleção de <i>habitat</i> .
$R$	Número aleatório de distribuição uniforme entre 0 e 1.
$Mbest_j^t$	Média das posições $x_{ij}^t$ de todos os morcegos da população na iteração $t$ .
$x_{ij}^t$	Posição do $i$ -th indivíduo na iteração $t$ .
$v_{g,j}^t$	Velocidade correspondente a melhor posição global.
$v_{i,j}^t$	Velocidade do $i$ -th indivíduo na iteração $t$ .
$N_C$	Número de passos de quimiotaxia.
$N_{ed}$	Número de eventos de eliminação e dispersão.
$N_{re}$	Número de passos de reprodução.
$p_{ed}$	Probabilidade de eliminação e dispersão.
$c_1, c_2$	Constantes de aceleração.
$\xi_{iesp}, \xi_i^{min}, \xi_i^{cal}, \xi_i^{des}$	Coefficientes de Amortecimento: especificado, mínimo, calculado e desejado, respectivamente.
$\lambda_i^{cal}$	Autovalores de Interesse calculados.
$\sigma_i$	Parte real do autovalor de interesse.
$\beta$	Número aleatório extraído de uma distribuição uniforme utilizado como fator de ponderação no cálculo da frequência atual.
$Q1$	Primeiro Quartil.
$Q2$	Segundo Quartil.
$Q3$	Terceiro Quartil.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
1.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	28
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	28
<b>2</b>	<b>O DISPOSITIVO GENERALIZED UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER .....</b>	<b>30</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	30
2.2	TEORIA DOS DISPOSITIVOS FACTS .....	30
2.3	O DISPOSITIVO FACTS GUPFC .....	34
2.4	MODELO MATEMÁTICO DO GUPFC .....	36
2.4.1	Desconsideração Momentânea da Fonte de Corrente .....	37
2.4.2	Consideração dos Efeitos das Fontes de Tensão Série Controláveis .....	39
2.4.3	Consideração dos Efeitos da Fonte de Corrente (Conversor Shunt).....	40
2.4.4	Restrição Operacional do GUPFC .....	41
2.5	ESTRUTURA DO SISTEMA DE CONTROLE DO GUPFC .....	45
2.6	CONTROLE DOS FLUXOS E DA TENSÃO REALIZADOS PELO GUPFC .....	50
2.7	INCLUSÃO DO GUPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA.....	52
2.8	CONCLUSÕES.....	55
<b>3</b>	<b>MODELO DE SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS.....</b>	<b>56</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	56
3.2	EQUAÇÕES GERAIS DO MSP PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS .....	56
3.3	POTÊNCIAS GERADAS E FLUXOS DE POTÊNCIAS NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS .....	59
3.4	BALANÇO NODAL DE POTÊNCIA NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS.....	62
3.5	TENSÃO INTERNA DA MÁQUINA SÍNCRONA .....	63
3.6	TENSÃO DE CAMPO DA MÁQUINA SÍNCRONA .....	64
3.7	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DA MÁQUINA SÍNCRONA .....	65
3.8	REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA MULTIMÁQUINAS PELO MSP .....	65
3.9	INCLUSÃO DO GUPFC NO MSP .....	68
3.10	CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO .....	71
3.10.1	Estabilizadores de Sistemas de Potência .....	71
3.10.2	Inclusão do ESP no MSP .....	72
3.10.3	Power Oscillation Damping.....	79
3.10.4	Inclusão do POD no MSP .....	80

3.10.5	Inclusão dos Controladores ESPs e do Conjunto GUPFC-POD no MSP.....	87
3.11	CONCLUSÕES.....	91
<b>4</b>	<b>TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO PARA PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO .....</b>	<b>93</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	93
4.2	O ALGORITMO DO MORCEGO .....	95
4.3	NOVEL BAT ALGORITHM .....	98
4.3.1	Efeito Doppler .....	99
4.3.2	Análise da Trajetória de uma Partícula com Comportamento Quântico .....	99
4.3.3	Seleção de Habitats.....	101
4.3.4	Comportamento Quântico e Comportamento Mecânico .....	102
4.3.5	Busca Local .....	103
4.4	ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO .....	104
4.5	CONCLUSÕES.....	108
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....</b>	<b>109</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	109
5.2	SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS – SEM A ATUAÇÃO DE CONTROLADORES.....	110
5.3	SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS – GUPFC INCLUSO NO SEP .....	112
5.4	SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS – INCLUSÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO ESP E GUPFC-POD. ....	119
5.5	SISTEMA NEW ENGLAND – GUPFC INCLUSO NO SEP.....	134
5.6	SISTEMA NEW ENGLAND – INCLUSÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO ESP E GUPFC-POD.....	142
5.7	CONCLUSÕES.....	152
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>156</b>
6.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	156
6.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	157
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>159</b>
	<b>ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTES .....</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS, ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO E SUBMETIDOS.....</b>	<b>173</b>
	<b>APÊNDICE B - ANÁLISE MODAL .....</b>	<b>176</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Crescimento da economia, aumento do poder de consumo e o desenvolvimento de novas tecnologias são exemplos de fatores que estão intimamente relacionados com o aumento do consumo de energia elétrica. Para tanto, é preciso garantir o atendimento dessa demanda crescente de forma segura, confiável e economicamente viável. Soma-se a isso a necessidade de considerar as restrições ambientais, os impactos sociais e financeiros, que são cada vez mais importantes na tomada de decisão para construção de novos empreendimentos no setor de energia e fortalecem a filosofia de máximo aproveitamento da infraestrutura de geração e transmissão já existente.

Para atender com confiabilidade e segurança esta crescente demanda distribuída por diferentes regiões geográficas, os sistemas elétricos de potência (SEPs) foram sendo interligados ao longo do tempo, formando grandes redes, que reúnem uma série de equipamentos com diferentes características dinâmicas. Isso tem tornado os SEPs interligados cada vez mais complexos do ponto de vista operacional e de modelagem matemática (KIMBARK, 1956). Se juntarmos a isso o fato de que os sistemas elétricos são levados a operar em regiões cada vez mais próximas de seus limites, temos por consequência, uma maior vulnerabilidade a faltas e pequenas perturbações que podem acarretar instabilidades.

Garantir a estabilidade do SEP, mesmo na ocorrência de pequenas perturbações, não é uma tarefa trivial, e tem sido alvo de inúmeros trabalhos apresentados ao longo das últimas décadas por pesquisadores do mundo todo. Como a estabilidade em sistemas elétricos de potência está relacionada ao seu comportamento quando submetido a uma perturbação, sua análise pode ser feita sob duas diferentes perspectivas, a estabilidade a grandes perturbações e a estabilidade a pequenas perturbações. A primeira ocorre quando o sistema elétrico sofre uma grande perturbação, por exemplo, a perda de sincronismo de um parque gerador ou uma falta no sistema de transmissão. A estabilidade a pequenas perturbações, por sua vez, pode ser ocasionada por pequenas variações de carga que ocorrem naturalmente ao longo do dia e que levam a consequentes ajustes na geração (KUNDUR et al., 2004). Esta tese delimitará sua análise a pequenas perturbações ocorridas nos SEPs.

Uma pequena perturbação pode ser descrita matematicamente como um pequeno desvio no estado do sistema. Assim, todas as equações que descrevem este sistema podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio e, desta forma, todas as propriedades aplicáveis à análise de sistemas lineares podem ser utilizadas (KUNDUR, 1994).

Encontrar a melhor representação matemática para SEPs cada vez mais complexos

tornou-se um grande desafio para os engenheiros e estudiosos desta área. Até a década de 50 o chamado Modelo Clássico foi por muito tempo suficiente para o estudo de caso de instabilidade aperiódica a que os primeiros sistemas interligados foram submetidos (KIMBARK, 1956; YU, 1983; ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994). Neste modelo as máquinas síncronas são representadas por uma fonte de tensão constante, conectados à rede de transmissão por meio de impedâncias constantes. Além disso, o modelo clássico desconsiderava os efeitos dos controladores e reguladores.

Em 1952, Heffron e Phillips (1952) propuseram um modelo linear muito eficiente e amplamente difundido (MHP - Modelo de Heffron-Phillips) para esse mesmo problema. O Modelo de Heffron-Phillips é uma representação linearizada de um sistema elétrico de potência composto por um único gerador síncrono conectado ao restante do SEP (o qual inclui os demais geradores e o sistema de transmissão). Esta parcela restante é representada, de maneira simplificada, por uma linha de transmissão e um barramento infinito, o que sugere o nome pelo qual é conhecido na literatura como sistema SMBI (*single machine VS infinite bus*) (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; MOUSSA; YU, 1974 LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994).

Com o objetivo de superar algumas limitações dos modelos anteriores, Deckmann e da Costa (1994) propuseram um modelo alternativo para o sistema de potência, baseado em coeficientes de sensibilidade de potências ativa e reativa, denominado de “Modelo de Sensibilidade de Potência - MSP”. O conceito fundamental do MSP baseia-se no balanço nodal de potências ativa e reativa em todas as barras do SEP sob estudo, em qualquer instante de tempo. O modelo desenvolvido facilita a sua extensão para sistemas multimáquinas e a análise de estabilidade a pequenas perturbações, além de facilitar a inclusão de novos dispositivos e controladores (VALLE; KOPCAK; DA COSTA, 2010; FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011). Nesse trabalho será utilizado o MSP para modelar todos os componentes agregados ao SEP, e os detalhes desta modelagem podem ser encontrados no Capítulo 3.

Embora as interligações entre grandes sistemas elétricos apresente uma série de vantagens do ponto de vista do aumento da robustez, confiabilidade e segurança no atendimento da demanda por energia elétrica, ela também provoca alguns inconvenientes intrínsecos às interligações, como o surgimento de modos oscilatórios de baixa frequência fracamente amortecidos por fontes naturais. O efetivo amortecimento destas oscilações tornou-se decisivo para a estabilidade dos SEPs. Quando mal amortecidos, as oscilações eletromecânicas podem provocar desgastes mecânicos nas máquinas síncronas, redução da capacidade de transferência de potência em linhas de transmissão e, em casos mais graves,

podem acarretar a perda de sincronismo dos geradores e conseqüente interrupção no fornecimento de energia elétrica (DEMELLO; CONCORDIA, 1969, LARSEN; SWANN, 1981; ANDERSON; FOUAD, 1993; SAUER; PAI, 1998).

Os modos eletromecânicos de maior relevância são conhecidos como modos locais e modos interárea, e são diferenciados de acordo com a sua frequência de ocorrência. Os modos locais se encontram na faixa de 0,8 a 2,0 Hz e estão associados às oscilações dos rotores de um grupo de geradores próximos, fisicamente ou eletricamente. Os modos interárea localizam-se na faixa de 0,1 a 0,7 Hz e são relacionados com as oscilações de grupos de geradores de uma área contra outro grupo de geradores de outra área (YU, 1983; KUNDUR, et al., 1989; SAUER; PAI, 1998).

Com o objetivo de controlar as oscilações de baixa frequência, DeMello e Concordia (1969) introduziram os conceitos básicos para o projeto de Estabilizadores do Sistema Elétrico (PSS – do inglês *Power System Stabilizers*). Estes estabilizadores são largamente utilizados pelas empresas de geração de energia elétrica e fornecem amortecimento às oscilações eletromecânicas por meio de um sinal estabilizante adicionado ao Regulador Automático de Tensão (RAT) da unidade geradora. Em muitos casos, esta é uma solução versátil e relativamente barata, mas considerando sistemas multimáquinas o ESP introduz amortecimento adicional às oscilações de modo local (LARSEN; SWANN, 1981), e não mostra a mesma eficiência para o amortecimento dos modos interárea (MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012). Assim, outras soluções devem ser estudadas e aplicadas para garantir que tais modos sejam adequadamente amortecidos.

Outra solução que tem sido considerada recentemente para melhorar o desempenho operacional dos SEPs, em especial os problemas de transmissão de energia elétrica, é a utilização de dispositivos denominados *Flexible AC Transmission System* (FACTS). Estes são baseados em circuitos da eletrônica de potência e são instalados diretamente na rede de transmissão, tendo o objetivo de flexibilizar os SEPs que até então eram rígidos no sentido da invariabilidade de seus parâmetros. Assim, dispositivos FACTS podem aumentar a capacidade de transferência de potência ativa por uma linha de transmissão já existente, controlar o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão, reduzir perdas no sistema de transmissão, e minimizar os problemas referentes ao controle de tensão no SEP (SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999; WATANABE et al., 1998). Se equipados com controladores suplementares, estes dispositivos podem também introduzir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas do modo interárea (WATANABE, et al., 1998; HINGORANI, 1988; HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999; PASERBA,

2003).

Assim sendo, para que ocorra a adição de amortecimento de maneira efetiva e semelhante à realizada pelo ESP é necessária a introdução de um controlador suplementar designado *Power Oscillation Damping* (POD) à malha de controle do dispositivo FACTS que atuará na sua variável de controle (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994; GYUGYI et al., 1995; FURINI; ARAUJO, 2008; FORTES et al., 2015; MARTINS et al., 2017; MIOTTO et al., 2018).

Normalmente o sinal utilizado como entrada do controlador POD deve ser medido preferencialmente no local de sua instalação, de maneira semelhante a que ocorre com o controlador ESP. Estando os FACTS instalados diretamente na linha de transmissão, alguns exemplos de variáveis utilizadas como entrada são o fluxo de potências ativa ou reativa, a corrente na linha ou a tensão na barra terminal do dispositivo. A utilização de sinais locais como entradas dos controladores suplementares, ao invés de sinais remotos, evita a necessidade de implementação de sistemas adicionais para transmissão de dados, que implicariam em elevados custos extras, além de redução na confiabilidade operacional (FURINI, 2008; KUIAVA; RAMOS; BRETAS, 2009).

Isto posto, no Capítulo 2 desta tese serão apresentadas as principais famílias de dispositivos FACTS, sendo dada atenção especial ao dispositivo FACTS *Generalized Unified Power Flow Controller* (GUPFC). O modelo matemático do controlador GUPFC adotado nesse trabalho, possibilita realizar tanto uma abordagem estática quanto dinâmica de seu desempenho no SEP. O modelo de injeção de potência utilizado para representar o GUPFC, permite introduzi-lo em programas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, além de possibilitar sua representação em programas de análise de estabilidade a pequenas e grandes perturbações no SEP. Neste Capítulo também será apresentada uma estrutura de controle para o dispositivo FACTS, que permite analisar sua influência na estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

O GUPFC modelado nessa tese é baseado em uma versão que utiliza três conversores fonte de tensão (LUBIS; HADI; TUMIRAN, 2011). Mesmo sendo considerada uma configuração mais simples, este controlador pode gerenciar quatro fluxos de potências ativa e reativa nas duas linhas em que está instalado, além da tensão no barramento comum de sua instalação. A soma dessas potencialidades faz deste dispositivo um dos mais completos da atualidade, contribuindo de forma efetiva para a solução de vários problemas que podem afetar a integridade operacional dos SEPs.

Uma das etapas mais importantes durante o projeto e implementação dos

controladores suplementares de amortecimento está relacionada à escolha da sua localização no SEP. Este trabalho amparou-se nos fatores de participação (KUNDUR, 1994; MILANO, 2010) para encontrar a melhor localização para os controladores ESPs. Já a localização do conjunto GUPFC-POD foi determinada de forma empírica, ou seja, considerando-se regiões do SEP que apresentam problemas de subtensão (níveis abaixo de 0,95 p.u. do valor nominal) além de condições topológicas da rede (quantidade mínima de linhas de transmissão) que permitam a instalação e o funcionamento adequado do dispositivo. A localização correta irá contribuir para que o dispositivo melhore consideravelmente o perfil de tensão global do SEP, através de compensação de reativos e controle de fluxos em diferentes rotas do SEP em análise.

Após determinar a melhor localização dos controladores suplementares de amortecimento, o próximo passo será projetá-los e sintonizá-los. Essa etapa é fundamental para que estes atuem de forma efetiva no amortecimento dos modos oscilatórios de baixa frequência. Tal a importância do assunto, que ao longo das últimas décadas, diferentes técnicas para projeto e ajuste de controladores suplementares de amortecimento vêm sendo desenvolvidas e avaliadas para análise de pequenas perturbações no SEP.

Inicialmente os métodos baseados no controle clássico, tais como, resíduos (MARTINS et al., 1996; YANG; LIU; MCCLELLY, 1998), critério da estabilidade de *Nyquist* (ZHENENKO; FARAH, 1984), e *Decentralized Modal Control* (DMC) (CHEN; HSU, 1987; ARAUJO; ZANETA, 2001), foram avaliados como ferramentas para o ajuste dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento ESP e POD empregados no SEP. Algoritmos Genéticos (AG) (HOLLAND, 1992) também já foram utilizados com sucesso para a alocação e projeto de controladores ESPs atuando em conjunto com o dispositivo FACTS *Unified Power Flow Controllers* (UPFC) considerando diferentes condições de operação do SEP (HASSAN et al., 2014). Em Fortes et al., (2016) o AG foi utilizado para o ajuste coordenado de controladores ESPs e do conjunto *Interline Power Flow Controller – Power Oscillation Damping* (IPFC-POD) no amortecimento de modos oscilatórios de baixa frequência em sistemas de potência de médio porte.

Técnicas baseadas em controle robusto e estruturadas na forma de *Linear Matrix Inequalities* (LMIs), também apresentaram resultados promissores no ajuste de controladores ESPs (RAMOS et al., 2004) e controladores suplementares de amortecimento associados a diferentes dispositivos FACTS (CHAUDHURI; PAL, 2004; OLIVEIRA et al., 2009; MIOTTO; COVACIC, 2011; DENG; ZHANG, 2014).

No mesmo contexto, técnicas baseadas em inteligência artificial, tais como Redes

Neurais (RNAs) (HAYHIN, 2001) e Lógica Fuzzy (ZADEH, 1965) também são exemplos de técnicas encontrados na literatura para o projeto e sintonia de estabilizadores empregados em sistemas elétricos de potência. No caso da Lógica Fuzzy pode-se citar os trabalhos de Hussein et al. (2010), Yixin et al. (1999) e Nguyen e Gianto (2008). Em relação às RNAs podem ser citados os trabalhos de Mishra et al. (2002) e Pereira (2009).

Um algoritmo meta-heurístico conhecido como *Variable Neighborhood Search* (VNS) também teve seu desempenho testado para o ajuste de controladores ESP e IPFC-POD para sistemas elétricos de potência de diferentes complexidades (FORTES et al., 2018).

Os algoritmos meta-heurísticos inspirados na inteligência de enxames ganharam grande popularidade nos últimos anos, o que se deve em parte à sua capacidade de lidar com uma diversidade de problemas de otimização de difícil solução na engenharia e aqui são representados pelos algoritmos *Bacterial Foraging Optimization* (BFO) (PASSINO, 2002), *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995), *Artificial Bee Colony* (ABC) (KARABOGA, 2005), *Ant Colony* (ACO) (DORIGO; DI CARO, 1999), *Firefly Algorithm* (FA) (YANG, 2008a, 2009a). Como exemplos de pesquisas realizadas para o projeto e ajuste coordenado de controladores suplementares de amortecimento empregados no SEP utilizando estes algoritmos, podemos citar: o BFO (ALI; ABD-ELAZIM, 2012; MIOTTO et al., 2016); PSO (HASANVAND et al., 2016); ABC (ESLAMI et al., 2013; MARTINS et al., 2017); ACO (PERES et al., 2015) e FA (PANDEY; GUPTA, 2015). Mais recentemente o *Bat Algorithm* (BA) proposto por Yang (2010b), também foi testado com êxito por Peres et al. (2015) no ajuste de parâmetros de controladores ESPs aplicados em sistemas elétricos de potência de médio porte.

Para aproveitar algumas características vantajosas que as diferentes técnicas oferecem, métodos híbridos foram propostos para o ajuste de controladores. Em Panda et al., (2013) algumas características do *Bacterial Foraging Optimization* e do *Particle Swarm Optimization* foram utilizadas para dar origem ao método híbrido hBFO-PSO que foi utilizado para ajustar controladores ESPs e o *Static Synchronous Series Compensators* (SSSC), e em Abd-Elazim (2013) para o projeto de controladores associados ao dispositivo FACTS *Thyristor Controlled Series Compensators* (TCSC).

Neste contexto, no Capítulo 4 desse trabalho será apresentada uma técnica de otimização baseada no *Novel Bat Algorithm* (NBA) (MENG et al., 2015) para o ajuste coordenado dos controladores ESPs e do conjunto GUPFC-POD. O NBA é considerado um dos mais recentes métodos de otimização inspirados na natureza, e sua adaptação e aplicação para o problema de ajuste de controladores suplementares de amortecimento empregados no

SEP precisa ser compreendida e seu desempenho avaliado.

A partir de simulações realizadas e dos resultados apresentados no Capítulo 5, foi possível avaliar o modelo de injeção de potência desenvolvido para o dispositivo GUPFC, bem como a atuação da sua estrutura de controle. Uma análise do GUPFC atuando no controle dos fluxos de potências ativa e reativa e na melhoria do perfil global de tensão do SEP foi realizada utilizando a ferramenta de fluxo de potência expandido. A eficiência da metodologia utilizada (NBA) para o ajuste dos controladores suplementares de amortecimento ESP e do conjunto GUPFC-POD também foi avaliada e os resultados obtidos foram comparados estatisticamente com outras técnicas bioinspiradas: PSO, BFO, AG e o BA. Por fim, para avaliar a qualidade dos ajustes encontrados pelo NBA os sistemas utilizados nos testes foram submetidos a diferentes cenários de carregamento a fim de verificar a manutenção da estabilidade dos SEPs para diferentes condições de carregamento.

## 1.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Esta tese traz como contribuição principal a modificação, ajustes, implementação e validação de uma técnica de otimização bioinspirada, o NBA, como alternativa de solução do problema de ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento. O objetivo é introduzir taxas de amortecimento especificadas em projeto a todos os modos oscilatórios de interesse. Além disso, esta tese também irá implementar um modelo de injeção de potência para o dispositivo FACTS GUPFC bem como sua estrutura de controle de modo a inseri-lo no fluxo de potência expandido a fim de avaliar seu desempenho no controle do fluxo de potência em diferentes rotas no SEP, na redução das perdas no sistema de transmissão e na melhoria do perfil de tensão do SEP. Por fim, será avaliada a contribuição do controlador FACTS GUPFC para o aumento da segurança operacional e melhoria da estabilidade do SEP.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além desse Capítulo introdutório o trabalho contém mais cinco capítulos. O Capítulo 2 inicia com uma breve discussão sobre as características construtivas e operacionais das diferentes configurações de dispositivos FACTS da primeira e segunda geração. Uma atenção especial é dada ao dispositivo *Generalized Unified Power Flow Controller* (GUPFC), seu modelamento matemático baseado no modelo de injeção de potência é apresentado bem como sua estrutura de controle. Um conjunto de equações diferenciais, obtidas a partir dessa

estrutura de controle, são utilizadas para modelar o dispositivo em programas de análise da estabilidade a pequenas perturbações. O Capítulo é concluído com a apresentação da ferramenta de fluxo de potência expandido utilizada para modelar o dispositivo GUPFC no fluxo de potência convencional.

No Capítulo 3 serão apresentadas as equações que compõem o MSP para um sistema multimáquinas genérico, bem como a representação deste modelo no domínio do tempo. Neste mesmo Capítulo são desenvolvidos os modelos dinâmicos dos controladores suplementares ESP e POD que serão posteriormente incluídos ao MSP resultando em novas equações matriciais que representam o sistema completo.

No Capítulo 4 será apresentado em detalhes um método de otimização bioinspirado, *Novel Bat Algorithm*, o qual foi utilizado para o ajuste coordenado de controladores suplementares de amortecimento ESP e GUPFC-POD. Também serão apresentados os aspectos gerais do problema de otimização tratado nesta tese.

Os resultados obtidos das simulações realizadas em dois sistemas testes conhecido na literatura como: (a) Sistema Simétrico de Duas Áreas; (b) Sistema *New England* serão discutidos no Capítulo 5. Com base nos resultados obtidos, algumas conclusões são destacadas. Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões finais e algumas sugestões de trabalhos futuros. Na sequência são apresentadas as Referências Bibliográficas, os Anexos e um Apêndice, que contribui para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido.



## **2 O DISPOSITIVO *GENERALIZED UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER***

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Neste Capítulo são apresentados de forma breve os principais conceitos referentes à teoria e aplicação dos dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*). Uma atenção especial será dada ao dispositivo GUPFC (*Generalized Unified Power Flow Controller*), onde seu modelo matemático é detalhado e uma representação por injeção de potência é apresentado em conjunto com uma estrutura de controle que permite realizar análises de estabilidade a pequenas perturbações no SEP. Também será descrito o passo a passo para a inclusão do GUPFC no fluxo de potência utilizando a técnica de fluxo de potência expandido.

### **2.2 TEORIA DOS DISPOSITIVOS FACTS**

Aumentar a eficiência, a confiabilidade e qualidade do fornecimento de energia, são pressupostos que tornam as interligações entre subsistemas regionais, nacionais e até mesmo internacionais cada vez mais comuns e necessárias (HINGORANI; GYUGYI, 1999). Por outro lado, SEPs interligados operam com equipamentos de diferentes características dinâmicas, tornando sua operação e análise uma tarefa cada vez mais complexa. A máxima utilização desses SEPs é afetada por alguns fatores, dentre eles as oscilações eletromecânicas entre áreas com grandes fluxos de potência.

Nas últimas décadas foi observado um aumento crescente na demanda de energia elétrica nos países emergentes, entre eles o Brasil. Em princípio a construção de novas usinas e linhas de transmissão resolveria o problema de atendimento. Porém, além de ser uma medida de custo mais elevado, existe uma série de restrições de ordem legal que dificulta e atrasa a concretização de novos empreendimentos neste setor. Isso exige a busca de novas alternativas de implementação mais rápidas e adequadas à filosofia de utilização mais racional da infraestrutura já existente, e também, que os SEPs operem cada vez mais próximos de seus limites.

Essas dificuldades ganham espaço nas pesquisas de estudiosos da área de sistemas elétricos de potência, em cujos trabalhos foram desenvolvidas novas propostas para flexibilização do sistema de transmissão e aumento da geração de energia elétrica. Em Hingorani (1988) o uso da tecnologia FACTS em sistemas elétricos de potência é sugerido

como uma ferramenta de grande potencial de aplicação nos atuais desafios do setor elétrico. FACTS são dispositivos baseados na eletrônica de potência e constituem-se de chaves eletrônicas para altos níveis de tensão e com pequeno tempo de chaveamento quando comparado às oscilações eletromecânicas (PASERBA, 2003).

Os dispositivos FACTS podem otimizar a capacidade de transmissão das redes já existentes e contribuem para a estabilidade do sistema elétrico interligado por meio do controle de algumas grandezas elétricas como tensão, ângulo, impedância e corrente (SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999). Além disso, os FACTS são reconhecidos como uma alternativa eficiente para prover amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência principalmente quando junto à malha de controle do dispositivo é instalado um controlador POD (*Power Oscillation Damping*) (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994; WANG; SWIFT, 1998; CASTRO, 2005; FURINI; ARAUJO, 2008; FORTES et al., 2015; MIOTTO et al., 2018).

As diferentes configurações existentes para os dispositivos FACTS podem ser classificadas de acordo com sua inserção no sistema elétrico de potência. Essas configurações dividem-se em quatro grupos: Controladores Série, Controladores *Shunt*, Controladores Combinados Série - Série e Controladores Combinados Série – *Shunt* (WATANABE et al., 1998). Esses dispositivos também estão divididos em duas gerações segundo a evolução tecnológica das chaves semicondutoras empregadas na sua construção. Assim, a primeira geração de dispositivos FACTS emprega tiristores convencionais, que apesar de muito confiáveis devido a sua longa história de utilização tem sua capacidade de controle limitada apenas ao processo de disparo das chaves.

A segunda geração de dispositivos FACTS utiliza chaves semicondutoras autocomutadas de alta potência, tais como GTO (*Gate Turn-Off*) e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) que permitem o projeto de conversores tipo fonte de tensão (VSC). Outra vantagem desses componentes é sua qualidade melhorada de chaveamento, o que possibilita a sua utilização em aplicações de alta frequência. Com relação aos conversores VSCs, esses permitem a partir de uma fonte de corrente contínua (CC) e de um inversor, a geração de tensões síncronas trifásicas senoidais na frequência fundamental, com magnitude e ângulo de fase controláveis, sem a necessidade de bancos de capacitores ou reatores, imprescindíveis num compensador estático convencional.

Os Controladores Série, basicamente, atuam alterando a reatância série efetiva da linha de transmissão e assim efetuam o controle do fluxo de potência. O TCSC atua pelo chaveamento de um banco de capacitores por meio de tiristores, enquanto que o SSSC,

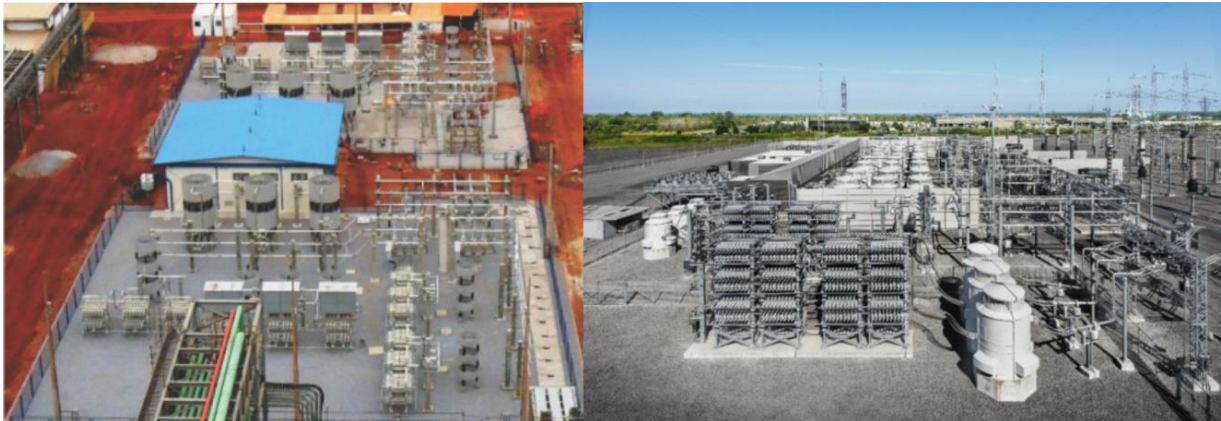
pertencente à segunda geração, altera a impedância da linha de transmissão pela injeção de uma tensão série em quadratura com a corrente da linha. A magnitude desta tensão série influencia diretamente a reatância série efetiva da linha de transmissão e conseqüentemente o fluxo de potência na linha (SONG; JOHNS, 1999; WATANABE, et al., 1998). Esta tensão série é injetada por um transformador que faz o acoplamento entre uma fonte de tensão síncrona quase senoidal de amplitude e ângulo de fase controlável e a linha de transmissão a ser compensada.

Os Controladores *Shunt*, por sua vez, têm sua atuação baseada na injeção ou absorção de potência reativa à barra a qual está conectado por meio de banco de capacitores ou indutores variáveis, e geralmente são usados para o controle da tensão dessa barra. No caso do dispositivo SVC (*Static Var Compensator*) o controle é feito por meio de tiristores. Já o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) não se utiliza de banco de capacitores ou indutores para a troca de potência reativa com o SEP, mas sim, de uma fonte de tensão CC que por meio de chaves GTO faz a conversão em tensão CA com a mesma frequência fundamental da linha de transmissão. Para que não haja troca de potência ativa, o ângulo de fase das tensões geradas coincide com os ângulos de fase das tensões da rede (CASTRO, 2005). Na Figura 1 são apresentados dois exemplos de dispositivos FACTS, o primeiro mostra lado a lado dois exemplos de dispositivo série TCSC (Figura 1(a)) enquanto na Figura 1(b) é mostrado dois exemplos (lado a lado) de dispositivos FACTS *shunt* SVC.

Figura 1 - Exemplos de dispositivos FACTS Série e *Shunt* em operação

(a) Dispositivo série TCSC



(b) Dispositivo *shunt* SVC

Fonte: adaptado de Siemens (2018).

Controladores Série e *Shunt* também podem ser combinados, e com isso modificar todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência. A principal vantagem destes dispositivos é oferecer um caminho para o fluxo de potência ativa entre os controladores, atuando dessa forma, sobre as potências ativa e reativa.

Um exemplo de Controlador Combinado Série – Série é o IPFC (*Interline Power Flow Controller*) que pode ser visto como uma combinação de dois ou mais dispositivos SSSCs independentes acoplados por um elo CC para possibilitar o fluxo bidirecional de potência ativa entre seus terminais. Esse dispositivo é extremamente eficiente no controle e gerenciamento de fluxos de potência nas linhas de transmissão onde está instalado, nas quais insere tensões síncronas controláveis em magnitude e ângulo de fase por meio de seus conversores VSCs. Apesar do IPFC não ter capacidade de fornecer potência ativa para o sistema, o dispositivo consegue gerenciar o seu fluxo desviando-o de uma linha para a outra por meio do elo de corrente contínua. O IPFC possui um banco armazenador de energia instalado entre seus conversores e este possibilita a realização de uma compensação série reativa nas linhas que o dispositivo gerencia (VALLE; ARAUJO, 2013; FORTES et al., 2015).

Como exemplo de Controlador Combinado Série – *Shunt* apresenta-se o UPFC (*Unified Power Flow Controller*), dispositivo que pode atuar sobre todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência em uma linha de transmissão de maneira isolada ou combinada. O UPFC consiste na instalação de dois conversores fontes de tensão (VSC) ligados ao sistema CA por meio de transformadores de acoplamento. Um dos conversores está ligado em série e o outro em derivação com a linha de transmissão. Um elo de corrente contínua faz a interligação entre estes dois conversores.

O conversor série realiza a função principal do UPFC, que é inserir uma tensão controlável em magnitude e ângulo de fase em série com a linha de transmissão que o dispositivo gerencia. É devido à diferença angular entre a tensão série injetada e a corrente da linha de transmissão, que o UPFC transfere potência ativa e também absorve ou injeta potência reativa no sistema de transmissão. Toda a potência ativa injetada na rede por meio do transformador de acoplamento do conversor série é disponibilizada pelo conversor em derivação. Já a potência reativa que é inserida no sistema é obtida por intermédio de um banco armazenador de energia instalado entre os dois conversores do UPFC (GYUGYI et al., 1995; MARTINS et al., 2017).

As próximas subseções deste Capítulo serão dedicadas à modelagem do dispositivo FACTS GUPFC, a apresentação de sua estrutura de controle baseada em controladores PI e sua inclusão no fluxo de potência utilizando a metodologia chamada de fluxo de potência expandido.

### 2.3 O DISPOSITIVO FACTS GUPFC

Ao longo dos últimos anos vários trabalhos realizaram diferentes modelagens para representar o controlador GUPFC no fluxo de potência e fluxo de potência ótimo (ZANG, 2003; LEE; CHU, 2004; LUBIS; HADI; TUMIRAN, 2011). Em Lubis, Hadi e Tumiran (2012) é analisada a influência do controlador GUPFC com e sem controlador POD na estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

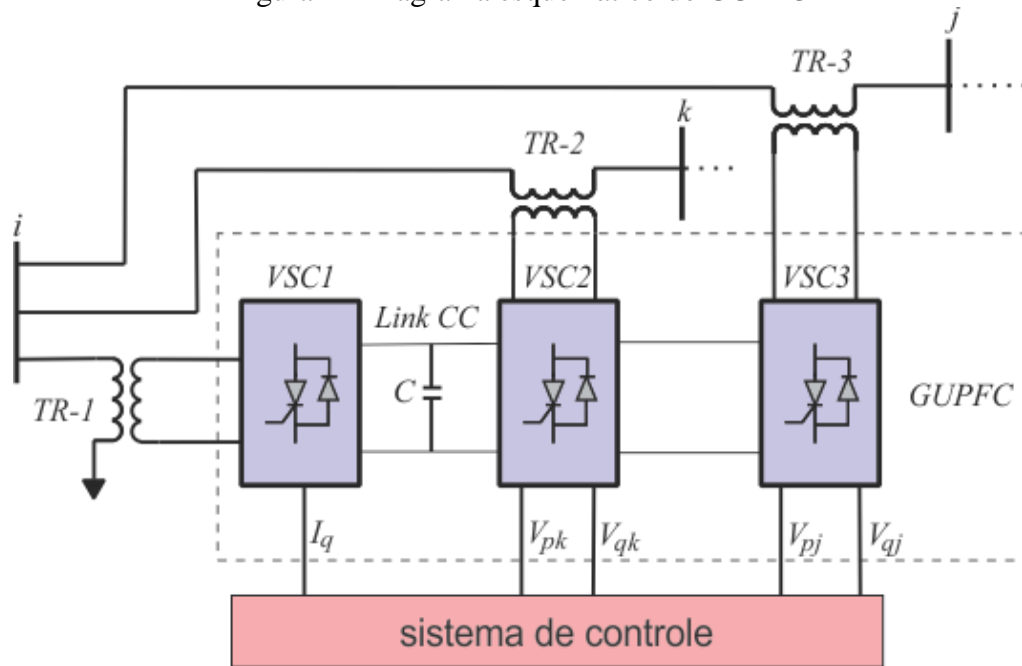
Em Valle (2014) foi apresentado uma proposta para modelar o controlador GUPFC que possibilita sua utilização tanto para análise de fluxo de potência quanto para análises de pequenas perturbações no SEP graças a inclusão de um estrutura de controle adicional. Nesta tese será acrescentada ao modelo de injeção de potência do GUPFC uma estrutura de controle para o dispositivo, baseada em controladores proporcional-integral (PI), por meio da qual são levantadas as equações diferenciais que representam a sua dinâmica. A estrutura de controle adotada difere-se daquela utilizada em Valle (2014) devido a modificações realizadas na forma de controle do conversor primário (conversor em derivação) do dispositivo FACTS GUPFC.

A modelagem realizada neste trabalho é baseada em uma configuração do controlador GUPFC que utiliza três conversores VSCs, conforme diagrama ilustrado na Figura 2. Observa-se que o conversor VSC1 está conectado ao barramento comum de instalação do dispositivo (barra  $i$ ) através de um transformador ( $TR-1$ ) de acoplamento em derivação. Já os

conversores VSC2 e VSC3 são conectados em série com as linhas de transmissão gerenciadas pelo FACTS por meio dos transformadores de acoplamento série (*TR-2* e *TR-3*).

Também é possível observar que os três conversores estão conectados por meio de um link comum de corrente contínua, e que o dispositivo possui um banco de capacitores capaz de dar suporte de potência reativa ao SEP ou diretamente à barra comum de instalação. Dessa forma, o GUPFC pode atuar corrigindo eventuais problemas de tensão no sistema analisado. Além disso, o controlador GUPFC considerado nesta tese pode atuar livremente sobre cinco variáveis do SEP sendo elas: a tensão do barramento comum de instalação e mais quatro fluxos de potências ativa e reativa nas duas linhas de transmissão onde o mesmo está instalado.

Figura 2 - Diagrama esquemático do GUPFC



Fonte: Elaborada pelo autor.

O controle sobre estas cinco variáveis do SEP é realizada pela estrutura de controle (controladores PI) do GUPFC, cujas variáveis de saída ( $I_q$ ,  $V_{pk}$ ,  $V_{qk}$ ,  $V_{pj}$ ,  $V_{qj}$ ) interferem diretamente nos fluxos de potência controlados pelo dispositivo FACTS e na tensão da barra comum de instalação. Detalhes sobre essa estrutura de controle e sua modelagem serão apresentados na seção 2.5.

## 2.4 MODELO MATEMÁTICO DO GUPFC

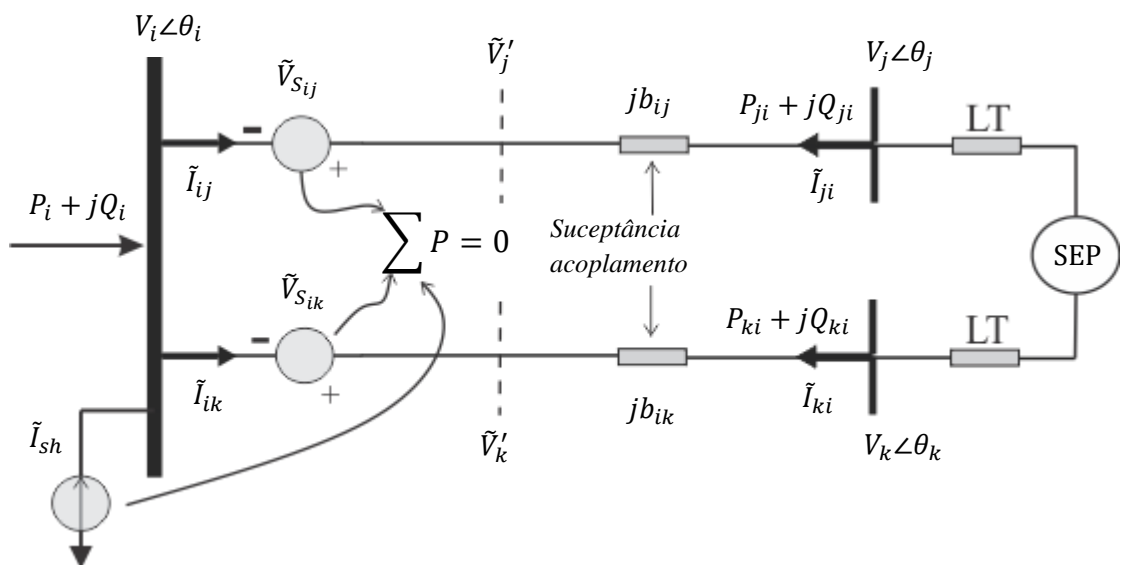
As equações apresentadas nesta subseção são baseadas na Figura 3. Esta figura representa o circuito equivalente do GUPFC modelado por uma fonte de corrente ideal ( $\tilde{I}_{sh}$ ) conectada em derivação com a barra comum  $i$  de instalação, e por duas fontes de tensão série que injetam no sistema tensões síncronas de magnitude e ângulo de fase controlável ( $\tilde{V}_{Sin}$ ). Em série com cada uma das fontes está a susceptância ( $b_{in}$ ) que modela os transformadores de acoplamento utilizados para a conexão dos conversores ao sistema elétrico de potência. É por meio do controle da amplitude e ângulo de fase da tensão série injetada  $\tilde{V}_{Sin}$ , equação (1), que o GUPFC controla os fluxos de potência nas linhas de transmissão onde está instalado (LUBIS; HADI; TUMIRAN, 2011).

$$\tilde{V}_{Sin} = r_n e^{j\gamma_n} \tilde{V}_i, \text{ sendo } n = j, k \quad (1)$$

Na equação (1),  $r_n$  e  $\gamma_n$  são os parâmetros das tensões série injetadas, sendo  $r_n = \tilde{V}_{Sin}/\tilde{V}_i$ , e  $\gamma_n$  o ângulo relativo de  $\tilde{V}_{Sin}$  com a respectiva tensão da barra  $\tilde{V}_i$ . A faixa controlável de magnitude relativa ( $r_n$ ) e o ângulo ( $\gamma_n$ ) de  $\tilde{V}_{Sin}$  são descritas na equação (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < r_n < r_{nmax} \\ 0 < \gamma_n < 2\pi \end{array} \right. \quad (2)$$

Figura 3 - Circuito equivalente do GUPFC



Fonte: Adaptado de Lubis, Hadi e Tumiran (2011).

Na Figura 3,  $S_i$  é a injeção de potência complexa na barra  $i$  do sistema;  $P_{ji}$  e  $Q_{ji}$  são os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $i - j$ , saindo da barra  $j$ ,  $P_{ki}$  e  $Q_{ki}$  são os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $i - k$ , saindo da barra  $k$  e,  $I_{ji}$  e  $I_{ki}$ , são as correntes nos ramos  $i - j$  e  $i - k$ , saindo das barras  $j$  e  $k$ , respectivamente.

As tensões  $\tilde{V}'_j$  e  $\tilde{V}'_k$  apresentadas no circuito equivalente da Figura 3 correspondem às tensões nas barras fictícias colocadas entre as susceptâncias dos transformadores de acoplamento e as fontes de tensão série, e são dadas na equação (3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{V}'_j = \tilde{V}_i + \tilde{V}_{Sij} \\ \tilde{V}'_k = \tilde{V}_i + \tilde{V}_{Sik} \end{array} \right. \quad (3)$$

Substituindo a equação (1) na equação (3), obtém-se a equação (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{V}'_j = V_i \angle \theta_i + r_j e^{j\gamma_j} V_i \angle \theta_i \\ \tilde{V}'_k = V_i \angle \theta_i + r_k e^{j\gamma_k} V_i \angle \theta_i \end{array} \right. \quad (4)$$

#### 2.4.1 Desconsideração Momentânea da Fonte de Corrente

Com o intuito de facilitar a análise seguinte, será utilizado o teorema da superposição aplicado ao circuito equivalente da Figura 3 onde inicialmente a fonte de corrente ideal será desconsiderada, isto é,  $\tilde{I}_{sh} = 0$ . Outra simplificação se dá com a desconsideração das resistências dos enrolamentos dos transformadores de acoplamento ( $TR-2$  e  $TR-3$ ). Assim, no circuito equivalente onde atuam somente as duas fontes de tensão série, a injeção de corrente na barra  $i$  pode ser escrita de acordo com a equação (5).

$$\tilde{I}_i = \tilde{I}_{ij} + \tilde{I}_{ik} = (\tilde{V}'_j - V_j \angle \theta_j) j b_{ij} + (\tilde{V}'_k - V_k \angle \theta_k) j b_{ik} \quad (5)$$

Substituindo a equação (4) em (5), chega-se na equação (6), que descreve a injeção de corrente na barra  $i$  do dispositivo GUPFC.

$$\tilde{I}_i = (V_i \angle \theta_i + r_j e^{j\gamma_j} V_i \angle \theta_i - V_j \angle \theta_j) j b_{ij} + (V_i \angle \theta_i + r_k e^{j\gamma_k} V_i \angle \theta_i - V_k \angle \theta_k) j b_{ik} \quad (6)$$

A injeção de potência complexa na barra comum  $i$  do dispositivo FACTS pode ser visualizada na equação (7).



$$\tilde{S}_i = \tilde{V}_i \tilde{I}_i^* \quad (7)$$

A substituição da equação (6) em (7) com a posterior separação da parte real e da parte imaginária na equação obtida, resulta nas injeções de potências ativa e reativa na barra  $i$  apresentadas na equação (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = \underbrace{-V_i \sum_{(n=j,k)} V_n b_{in} \text{sen}(\theta_i - \theta_n)}_{\text{Injeção convencional}} - \underbrace{V_i^2 \sum_{(n=j,k)} r_n b_{in} \text{sen}(\gamma_n)}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \\ Q_i = \underbrace{-V_i^2 \sum_{(n=j,k)} b_{in} + V_i \sum_{(n=j,k)} V_n b_{in} \text{cos}(\theta_i - \theta_n)}_{\text{Injeção convencional}} - \underbrace{V_i^2 \sum_{(n=j,k)} r_n b_{in} \text{cos}(\gamma_n)}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \end{array} \right. \quad (8)$$

Ainda com relação ao circuito equivalente da Figura 3, pode-se escrever a corrente do ramo  $j - i$  de acordo com a equação (9).

$$\tilde{I}_{ji} = (V_j \angle \theta_j - \tilde{V}'_j) j b_{ij} = (V_j \angle \theta_j - V_i \angle \theta_i - r_j e^{j\gamma_j} V_i \angle \theta_i) j b_{ij} \quad (9)$$

O fluxo de potência complexa no ramo  $j - i$  é explicitado na equação (10).

$$\tilde{S}_{ji} = \tilde{V}_j \tilde{I}_{ji}^* \quad (10)$$

A substituição da equação (9) em (10) com a posterior separação da parte real e parte imaginária na equação obtida, resulta nos fluxos de potências ativa e reativa apresentados na equação (11).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ji} = \underbrace{V_i V_j b_{ij} \text{sen}(\theta_i - \theta_j)}_{\text{Fluxo convencional}} + \underbrace{V_i V_j b_{ij} r_j \text{sen}(\theta_i - \theta_j + \gamma_j)}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \\ Q_{ji} = \underbrace{-V_j^2 b_{ij} + V_i V_j b_{ij} \text{cos}(\theta_i - \theta_j)}_{\text{Fluxo convencional}} + \underbrace{V_i V_j b_{ij} r_j \text{cos}(\theta_i - \theta_j + \gamma_j)}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \end{array} \right. \quad (11)$$

Uma análise semelhante à realizada anteriormente pode ser feita para o ramo  $k - i$  de forma que o fluxo de potências ativa e reativa é explicitado na equação (12).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ki} = \underbrace{\frac{V_i V_k b_{ik} \text{sen}(\theta_i - \theta_k)}{\text{Fluxo convencional}}}_{\text{Fluxo convencional}} + \underbrace{\frac{V_i V_k b_{ik} r_k \text{sen}(\theta_i - \theta_k + \gamma_k)}{\text{Contribuição do GUPFC}}}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \\ Q_{ki} = \underbrace{\frac{-V_k^2 b_{ik} + V_i V_k b_{ik} \text{cos}(\theta_i - \theta_k)}{\text{Fluxo convencional}}}_{\text{Fluxo convencional}} + \underbrace{\frac{V_i V_k b_{ik} r_k \text{cos}(\theta_i - \theta_k + \gamma_k)}{\text{Contribuição do GUPFC}}}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \end{array} \right. \quad (12)$$

Expressando de forma genérica as equações de fluxo de potência dada nas equações (11) e (12), os fluxos dos ramos  $j - i$  e  $k - i$  do dispositivo GUPFC resultam na equação (13), sendo  $n = j, k$  e  $\theta_{in} = (\theta_i - \theta_n)$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ni} = \underbrace{\frac{V_i V_n b_{in} \text{sen}(\theta_{in})}{\text{Fluxo convencional}}}_{\text{Fluxo convencional}} + \underbrace{\frac{V_i V_n b_{in} r_n \text{sen}(\theta_{in} + \gamma_n)}{\text{Contribuição do GUPFC}}}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \\ Q_{ni} = \underbrace{\frac{-V_n^2 b_{in} + V_i V_n b_{in} \text{cos}(\theta_{in})}{\text{Fluxo convencional}}}_{\text{Fluxo convencional}} + \underbrace{\frac{V_i V_n b_{in} r_n \text{cos}(\theta_{in} + \gamma_n)}{\text{Contribuição do GUPFC}}}_{\text{Contribuição do GUPFC}} \end{array} \right. \quad (13)$$

#### 2.4.2 Consideração dos Efeitos das Fontes de Tensão Série Controláveis

Na subseção anterior foram deduzidas as equações das injeções de potências ativa e reativa na barra de instalação do GUPFC e dos fluxos de potências ativa e reativa nos ramos  $j - i$  e  $k - i$ . Nesta subseção serão apresentadas as contribuições das fontes de tensão série que representam o dispositivo FACTS no circuito equivalente da Figura 3.

Observando as equações (8) e (13) e desconsiderando a parte resistiva da linha de transmissão, é possível concluir que os primeiros termos após a igualdade são iguais às equações de fluxo de potência convencional aplicados às linhas de transmissão  $i - j$  e  $i - k$ , enquanto os demais termos dessas equações podem ser considerados como contribuições das fontes de tensão série controláveis. Essas equações farão parte do modelo de injeção de potência do GUPFC. Assim, as equações (14) a (17) representam as contribuições das fontes de tensão série controláveis (considerando  $\tilde{I}_{sh} = 0$ ) nas barras onde o dispositivo FACTS está instalado, sendo  $b_{in} = 1/X_{in}$  e  $n = j, k$ .

$$P_{se,i} = -V_i^2 \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n \text{sen}(\gamma_n) \quad (14)$$

$$Q_{se,i} = -V_i^2 \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n \text{cos}(\gamma_n) \quad (15)$$

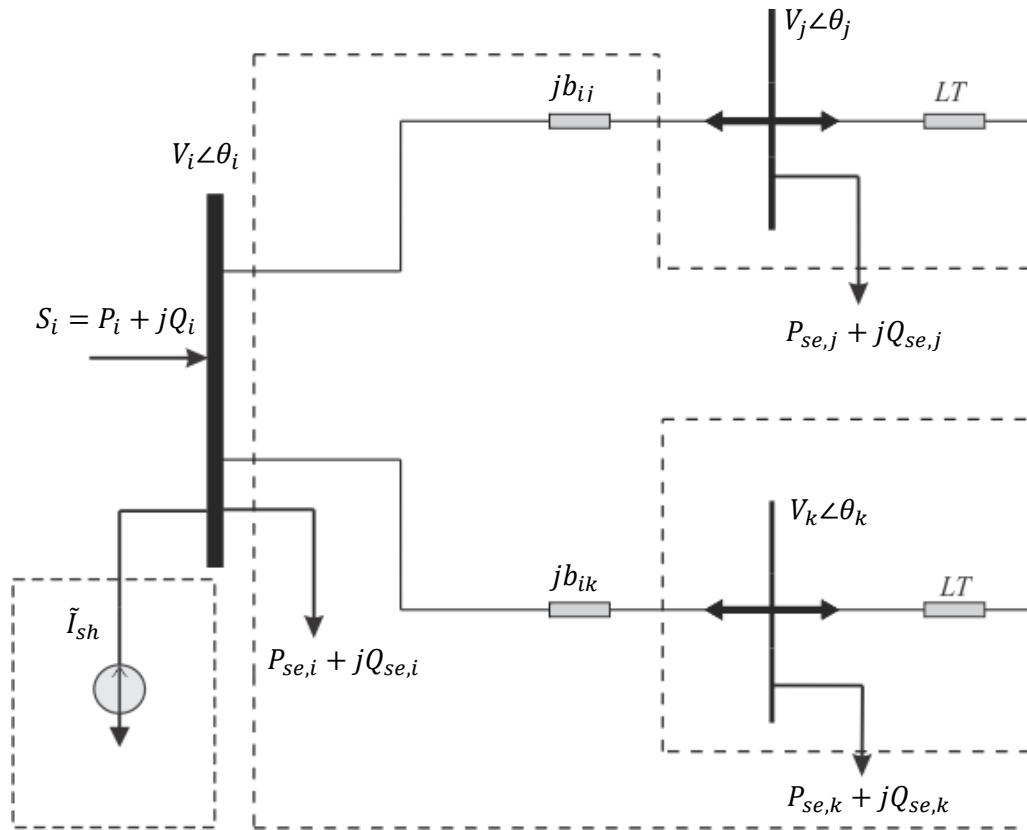
$$P_{se,n} = V_i V_n r_n b_{in} \text{sen}(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (16)$$

$$Q_{se,n} = V_i V_n r_n b_{in} \cos(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (17)$$

### 2.4.3 Consideração dos Efeitos da Fonte de Corrente (Conversor *Shunt*)

Nesta subsecção os efeitos da fonte de corrente ligada em derivação com a barra comum  $i$  de instalação serão considerados na modelagem matemática do GUPFC. As contribuições das fontes de tensão série apresentadas na subsecção anterior, e a contribuição do conversor *shunt* representado aqui por uma fonte de corrente ideal (com  $\tilde{I}_{sh} \neq 0$ ) conectada à barra comum de instalação do dispositivo, são representados na Figura 4.

Figura 4 - Contribuição série e Shunt nas barras do GUPFC



Fonte: Adaptado de Lubis, Hadi e Tumiran (2011).

A fonte de corrente ideal ( $\tilde{I}_{sh}$ ) utilizada na modelagem do GUPFC pode ser decomposta em duas componentes, sendo uma em fase ( $i_p$ ) e a outra em quadratura ( $i_q$ ) com a tensão ( $\tilde{V}_i$ ) da barra  $i$ , como descrito na equação (18).

$$\tilde{I}_{sh} = (i_p - ji_q)e^{j\theta_i} \quad (18)$$

A variação na amplitude da tensão ( $\tilde{V}_i$ ) da barra comum de instalação do GUPFC ocorre por meio da troca de potência reativa entre o dispositivo e o sistema elétrico de potência utilizando o conversor *shunt*, conforme equação (19).

$$Q_{sh} = \Im_m(\tilde{S}_{sh}) = \Im_m[\tilde{V}_i(-\tilde{I}_{sh}^*)] = -V_i i_q \quad (19)$$

#### 2.4.4 Restrição Operacional do GUPFC

Uma restrição que deve ser satisfeita para a correta implementação do GUPFC no fluxo de potência diz respeito à troca de potência ativa entre seus conversores. Desse modo, quando as perdas são desconsideradas, toda a potência ativa fornecida pelo conversor *shunt* VSC1 deve ser igual à potência entregue ao sistema CA pelos conversores série VSC2 e VSC3. Essa restrição é mostrada na equação (20).

$$P_{sh} = - \sum_{(m=i,j,k)} P_{se,m} \quad (20)$$

Com a substituição das equações (14) e (16) em (20) obtém-se a potência ativa entregue pelo conversor *shunt*, conforme mostrado na equação (21), sendo  $n = j, k$ .

$$P_{sh} = V_i^2 \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n \text{sen}(\gamma_n) - V_i \sum_{(n=j,k)} V_n b_{in} r_n \text{sen}(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (21)$$

Segundo a restrição de invariância de potência ativa do GUPFC, tem-se que a potência injetada pelo dispositivo é igual à soma das contribuições séries das fontes de tensão síncronas e pela contribuição shunt da fonte de corrente ideal, de acordo com as equações (22) e (23).

$$P_{inj,i} = P_{sh} + P_{se,i} \quad (22)$$

$$Q_{inj,i} = Q_{sh} + Q_{se,i} \quad (23)$$

Substituindo as equações (14) e (21) em (22), e as equações (15) e (19) em (23), obtêm-se as equações (24) e (25), sendo  $n = j, k$ .

$$P_{inj,i} = -V_i \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n V_n \text{sen}(\theta_{in} + \gamma_n)$$

$$Q_{inj,i} = -V_i^2 \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n \cos(\gamma_n) - V_i i_q \quad (24)$$

$$(25)$$

O modelo completo de injeção de potência é representado nas equações (24) e (25) em conjunto com as equações (16) e (17), conforme disposto nas equações (26) a (29), sendo  $n = j, k$  e  $\theta_{in} = (\theta_i - \theta_n)$ .

$$P_{inj,i} = -V_i \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n V_n \sen(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (26)$$

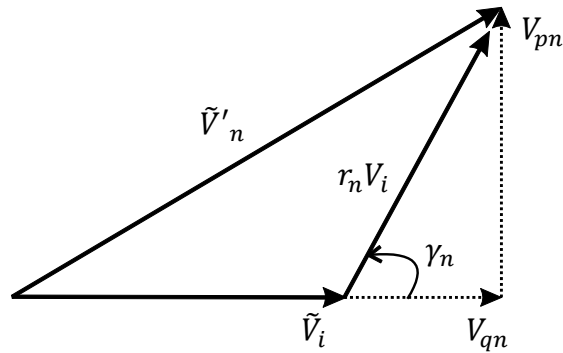
$$Q_{inj,i} = -V_i^2 \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n \cos(\gamma_n) - V_i i_q \quad (27)$$

$$P_{inj,n} = P_{se,n} = V_i V_n r_n b_{in} \sen(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (28)$$

$$Q_{inj,n} = Q_{se,n} = V_i V_n r_n b_{in} \cos(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (29)$$

O conjunto de equações (26) a (29) representam o modelo completo de injeção de potência do GUPFC e fará parte das equações que modelam o dispositivo nos programas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, conforme fora descrito em Lubis, Hadi e Tumiram (2011). Além disso, em Valle (2014) foi apresentado um modelo alternativo para o dispositivo GUPFC que pode ser utilizado de forma única tanto em análise estática quanto para análise de pequenas perturbações. Os passos para a obtenção desse modelo completo são descritos a seguir. Considere o diagrama fasorial representado na Figura 5, onde a fonte de tensão controlável ( $\tilde{V}_{sin}$ ) do GUPFC foi decomposta em suas componentes de fase ( $V_{qn}$ ) e de quadratura ( $V_{pn}$ ), com relação à tensão ( $\tilde{V}_i$ ) da barra  $i$ .

Figura 5 - Diagrama fasorial das tensões série injetadas



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

A análise da Figura 5 permite expressar as componentes em quadratura ( $V_{pn}$ ) e em fase ( $V_{qn}$ ) com a tensão ( $\tilde{V}_i$ ) por meio das equações (30) e (31).

$$V_{pn} = r_n V_i \text{sen}(\gamma_n) \quad (30)$$

$$V_{qn} = r_n V_i \text{cos}(\gamma_n) \quad (31)$$

A equação (26) do modelo de injeção de potência do GUPFC pode ser reescrita em termos das componentes em série e quadratura mostradas nas equações (30) e (31). Para isso, a identidade trigonométrica apresentada na equação (32) é utilizada para a obtenção da equação (33) que representa ( $P_{inj,i}$ ).

$$\text{sen}(A + B) = \text{sen}(A)\text{cos}(B) + \text{cos}(A)\text{sen}(B) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} P_{inj,i} &= - \sum_{(n=j,k)} b_{in} r_n V_n V_i [\text{cos}(\gamma_n) \text{sen}(\theta_{in}) + \text{sen}(\gamma_n) \text{cos}(\theta_{in})] \\ &= - \sum_{(n=j,k)} b_{in} V_n \left[ \underbrace{r_n V_i \text{cos}(\gamma_n)}_{V_{qn}} \text{sen}(\theta_{in}) + \underbrace{r_n V_i \text{sen}(\gamma_n)}_{V_{pn}} \text{cos}(\theta_{in}) \right] \rightarrow \\ P_{inj,i} &= - \sum_{(n=j,k)} b_{in} V_n [V_{qn} \text{sen}(\theta_{in}) + V_{pn} \text{cos}(\theta_{in})] \end{aligned} \quad (33)$$

Aplicando as mesmas considerações anteriores às equações (27) e (28) do modelo de injeção de potência do GUPFC obtêm-se as equações (34) e (35) respectivamente ( $Q_{inj,i}$ ,  $P_{inj,n}$ ).

$$\begin{aligned}
Q_{inj,i} &= -V_i \sum_{(n=j,k)} b_{in} \underbrace{r_n V_i \cos(\gamma_n)}_{V_{qn}} - V_i i_q \rightarrow \\
Q_{inj,i} &= -V_i \sum_{(n=j,k)} b_{in} V_{qn} - V_i i_q
\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
P_{inj,n} &= b_{in} r_n V_n V_i [\cos(\gamma_n) \text{sen}(\theta_{in}) + \text{sen}(\gamma_n) \cos(\theta_{in})] \\
&= b_{in} V_n [\underbrace{r_n V_i \cos(\gamma_n)}_{V_{qn}} \text{sen}(\theta_{in}) + \underbrace{r_n V_i \text{sen}(\gamma_n)}_{V_{pn}} \cos(\theta_{in})] \rightarrow \\
P_{inj,n} &= b_{in} V_n [V_{qn} \text{sen}(\theta_{in}) + V_{pn} \cos(\theta_{in})]
\end{aligned} \tag{35}$$

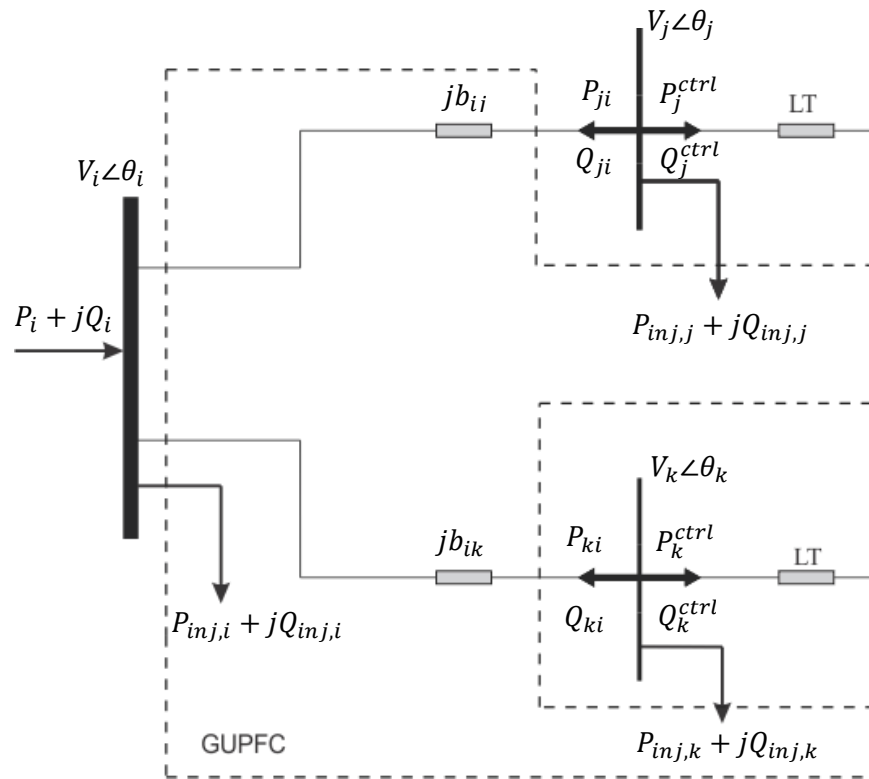
Finalmente a equação (29) poder ser reescrita em termos das componentes em série e quadratura, dadas nas equações (30) e (31), utilizando-se a propriedade trigonométrica apresentada na equação (36) para a obtenção da equação (37).

$$\cos(A + B) = \cos(A) \cos(B) - \text{sen}(A) \text{sen}(B) \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
Q_{inj,n} &= b_{in} r_n V_n V_i [\cos(\gamma_n) \cos(\theta_{in}) - \text{sen}(\gamma_n) \text{sen}(\theta_{in})] \\
&= b_{in} V_n [\underbrace{r_n V_i \cos(\gamma_n)}_{V_{qn}} \cos(\theta_{in}) - \underbrace{r_n V_i \text{sen}(\gamma_n)}_{V_{pn}} \text{sen}(\theta_{in})] \rightarrow \\
Q_{inj,n} &= b_{in} V_n [V_{qn} \cos(\theta_{in}) - V_{pn} \text{sen}(\theta_{in})]
\end{aligned} \tag{37}$$

O conjunto de equações (33), (34), (35) e (37) descreve de forma alternativa o modelo de injeção de potência do GUPFC em termos das componentes em fase e quadratura da tensão do barramento comum de instalação do dispositivo ( $\tilde{V}_i$ ). Deve-se destacar que os parâmetros ( $r_n$ ) e ( $\gamma_n$ ) foram suprimidos no novo conjunto de equações obtido, eliminando a necessidade do seu ajuste. Na Figura 6 é ilustrado como o GUPFC pode ser representado em um programa de fluxo de potência convencional.

Figura 6 - Modelo completo de injeção de potência do GUPFC



Fonte: Adaptado de Valle (2014).

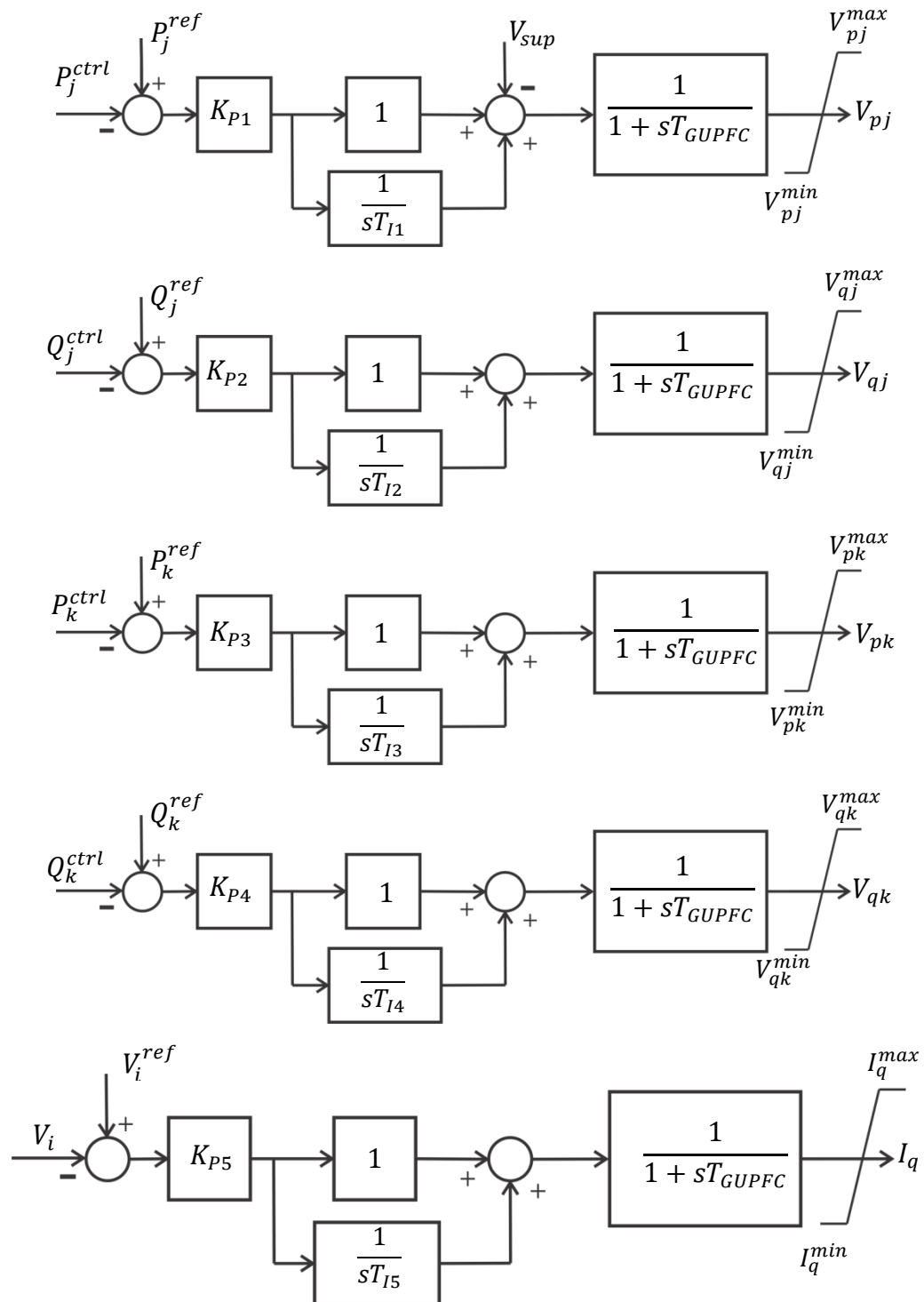
Na modelagem apresentada as contribuições do dispositivo FACTS são representadas por injeções de potências ativa e reativa nas barras onde se encontra instalado. Isso facilita a sua inclusão em programas de fluxo de potência, visto que mantém as equações de fluxo inalteradas. Esse mesmo modelo pode ser utilizado em estudos de estabilidade a pequenas perturbações no SEP. Para isso, na próxima seção será apresentada uma estrutura de controle que será utilizada no estudo da estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

## 2.5 ESTRUTURA DO SISTEMA DE CONTROLE DO GUPFC

A estrutura de controle do GUPFC discutida nesta seção irá utilizar controladores Proporcional Integral (PI) para controlar os componentes das fontes de tensão síncronas, e por sua vez, os fluxos de potências gerenciados pelo dispositivo. Na Figura 7 é apresentada esta estrutura de controle, onde cada controlador PI está relacionado com uma variável das fontes de tensão que representam os conversores VSCs série e *shunt*.



Figura 7 - Estrutura do sistema de controle do GUPFC



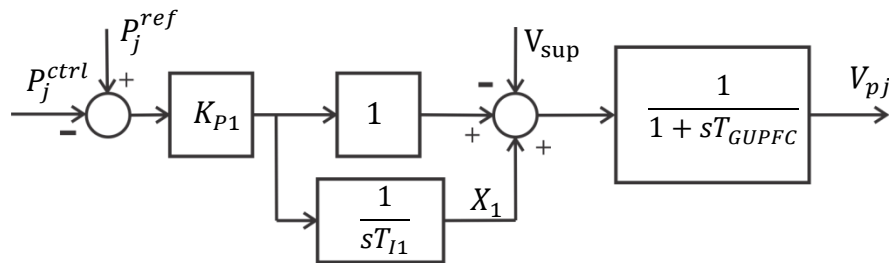
Fonte: Adaptado de Valle (2010).

Na Figura 7 os ganhos  $K_{P1}$  a  $K_{P5}$  (em p.u.) e as constantes de tempo  $T_{I1}$  a  $T_{I5}$  (em segundos) são os parâmetros dos controladores PI. A constante de tempo  $T_{GUPFC}$  está relacionada com o tempo de processamento do sistema de controle do dispositivo, cujo valor se situa entre 1ms a 10ms (HINGORANI; GYUGYI, 1999). O sinal de controle suplementar

$V_{sup}$  (provindo de um controlador POD) está modulando o componente em quadratura ( $V_{pj}$ ) do conversor VSC2.

Porém, este mesmo sinal poderia ser utilizado para modular qualquer um dos componentes das fontes de tensão série e inclusive, a componente em quadratura da fonte de corrente ideal  $I_q$  do conversor VSC1. Na sequência será realizado o modelamento matemático individualizado de cada parte do sistema de controle do GUPFC, que resultará em um conjunto de equações dinâmicas que representam o dispositivo. Este processo é iniciado analisando a Figura 8 onde se tem o controle do fluxo de potência ativa na linha de transmissão conectada à barra  $j$  do SEP no qual o GUPFC está inserido.

Figura 8 - Sistema de controle para componente em quadratura do conversor VSC2



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

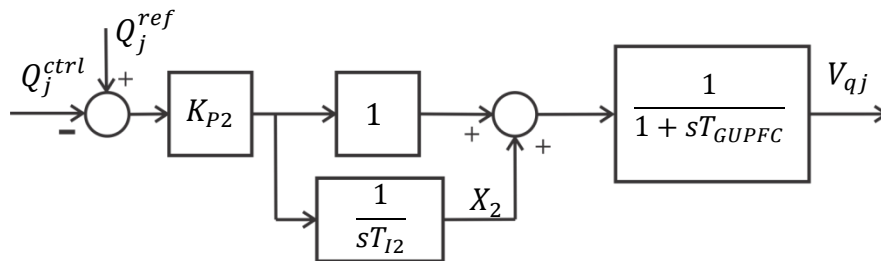
Da análise desta figura é possível escrever as equações (38) e (39) que representam o componente em quadratura da fonte de tensão do conversor VSC2.

$$\dot{V}_{pj} = \frac{K_{P1}}{T_{GUPFC}} (P_j^{ref} - P_j^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_1 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{sup} - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{pj} \quad (38)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{K_{P1}}{T_{I1}} (P_j^{ref} - P_j^{ctrl}) \quad (39)$$

Da mesma forma, o controle de fluxo de potência reativa na linha de transmissão conectada à barra  $j$  do dispositivo é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Sistema de controle para componente em fase do conversor VSC2



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

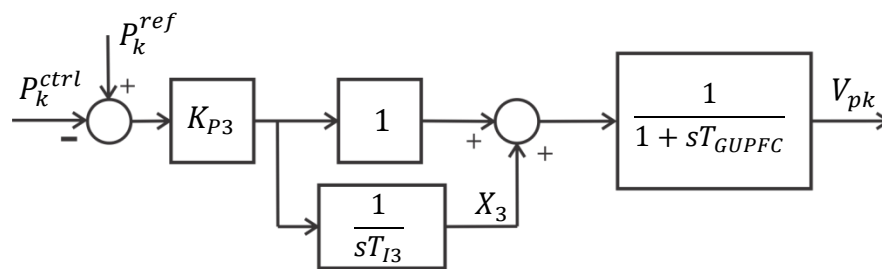
As equações (40) e (41) representam o componente em fase da fonte de tensão do conversor VSC2, obtidas após análise da Figura 9.

$$\dot{V}_{qj} = \frac{K_{P2}}{T_{GUPFC}} (Q_j^{ref} - Q_j^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_2 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{qj} \quad (40)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{K_{P2}}{T_{I2}} (Q_j^{ref} - Q_j^{ctrl}) \quad (41)$$

Um procedimento similar é realizado para o controle do fluxo de potência ativa na linha de transmissão conectada à barra  $k$  do GPUFC, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de controle para componente em quadratura do conversor VSC3



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

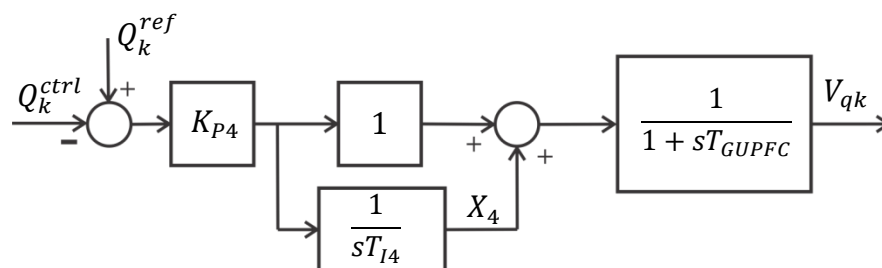
As equações (42) e (43) estão relacionadas com o componente em quadratura da fonte de tensão do conversor VSC3, obtidos da análise da Figura 10.

$$\dot{V}_{pk} = \frac{K_{P3}}{T_{GUPFC}} (P_k^{ref} - P_k^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_3 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{pk} \quad (42)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{K_{P3}}{T_{I3}} (P_k^{ref} - P_k^{ctrl}) \quad (43)$$

Já o controle do fluxo de potência reativa nesta mesma linha de transmissão conectada à barra  $k$  do dispositivo é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Sistema de controle para componente em fase do conversor VSC3



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

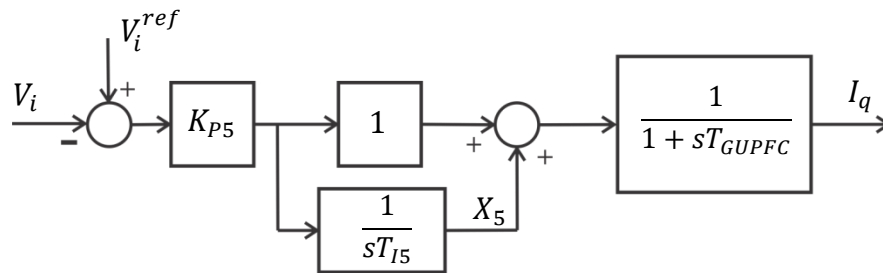
Os componentes em fase da fonte de tensão do conversor VSC3, equações (44) e (45), são obtidas após análise da Figura 11.

$$\dot{V}_{qk} = \frac{K_{P4}}{T_{GUPFC}} (Q_k^{ref} - Q_k^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_4 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{qk} \quad (44)$$

$$\dot{X}_4 = \frac{K_{P4}}{T_{I4}} (Q_k^{ref} - Q_k^{ctrl}) \quad (45)$$

Na Figura 12 é apresentado o controle de tensão na barra comum de instalação do dispositivo FACTS GUPFC.

Figura 12 - Sistema de controle para a corrente em quadratura do conversor VSC1



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

Conclui-se esse processo com as equações (46) e (47) que estão relacionadas com a corrente em quadratura do conversor VSC1 obtida após análise da Figura 12.

$$\dot{I}_q = \frac{K_{P5}}{T_{GUPFC}} (V_i^{ref} - V_i) + \frac{1}{T_{GUPFC}} (X_5 - I_q) \quad (46)$$

$$\dot{X}_5 = \frac{K_{P5}}{T_{I5}} (V_i^{ref} - V_i) \quad (47)$$

O conjunto de equações (38) a (47) define o comportamento dinâmico do dispositivo GUPFC e são agrupadas nas equações (48).

$$\left. \begin{aligned}
\dot{V}_{pj} &= \frac{K_{P1}}{T_{GUPFC}} (P_j^{ref} - P_j^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_1 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{sup} - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{pj} \\
\dot{X}_1 &= \frac{1}{T_{I1}} (P_j^{ref} - P_j^{ctrl}) \\
\dot{V}_{qj} &= \frac{K_{P2}}{T_{GUPFC}} (Q_j^{ref} - Q_j^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_2 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{qj} \\
\dot{X}_2 &= \frac{1}{T_{I2}} (Q_j^{ref} - Q_j^{ctrl}) \\
\dot{V}_{pk} &= \frac{K_{P3}}{T_{GUPFC}} (P_k^{ref} - P_k^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_3 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{pk} \\
\dot{X}_3 &= \frac{1}{T_{I3}} (P_k^{ref} - P_k^{ctrl}) \\
\dot{V}_{qk} &= \frac{K_{P4}}{T_{GUPFC}} (Q_k^{ref} - Q_k^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_4 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{qk} \\
\dot{X}_4 &= \frac{1}{T_{I4}} (Q_k^{ref} - Q_k^{ctrl}) \\
\dot{I}_q &= \frac{K_{P5}}{T_{GUPFC}} (V_i^{ref} - V_i) + \frac{1}{T_{GUPFC}} (X_5 - I_q) \\
\dot{X}_5 &= \frac{K_{P5}}{T_{I5}} (V_i^{ref} - V_i)
\end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Nas equações (48),  $P_j^{ref}$  e  $Q_j^{ref}$  são os valores dos fluxos de potências ativa e reativa especificados pelo controlador do sistema para a linha de transmissão conectada à barra  $j$  de instalação do dispositivo.  $P_k^{ref}$  e  $Q_k^{ref}$  são os valores dos fluxos ativo e reativo especificados pelo controlador do sistema para a linha conectada à barra  $k$ .  $V_i^{ref}$  é a tensão de referência na barra comum de instalação do GUPFC. Os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão controladas pelo dispositivo são expressos por  $P_j^{ctrl}$ ,  $Q_j^{ctrl}$ ,  $P_k^{ctrl}$  e  $Q_k^{ctrl}$ . Por fim,  $V_i$  é a tensão da barra  $i$  que é controlada via modulação da corrente  $I_q$  em quadratura do conversor VSC1.

## 2.6 CONTROLE DOS FLUXOS E DA TENSÃO REALIZADOS PELO GUPFC

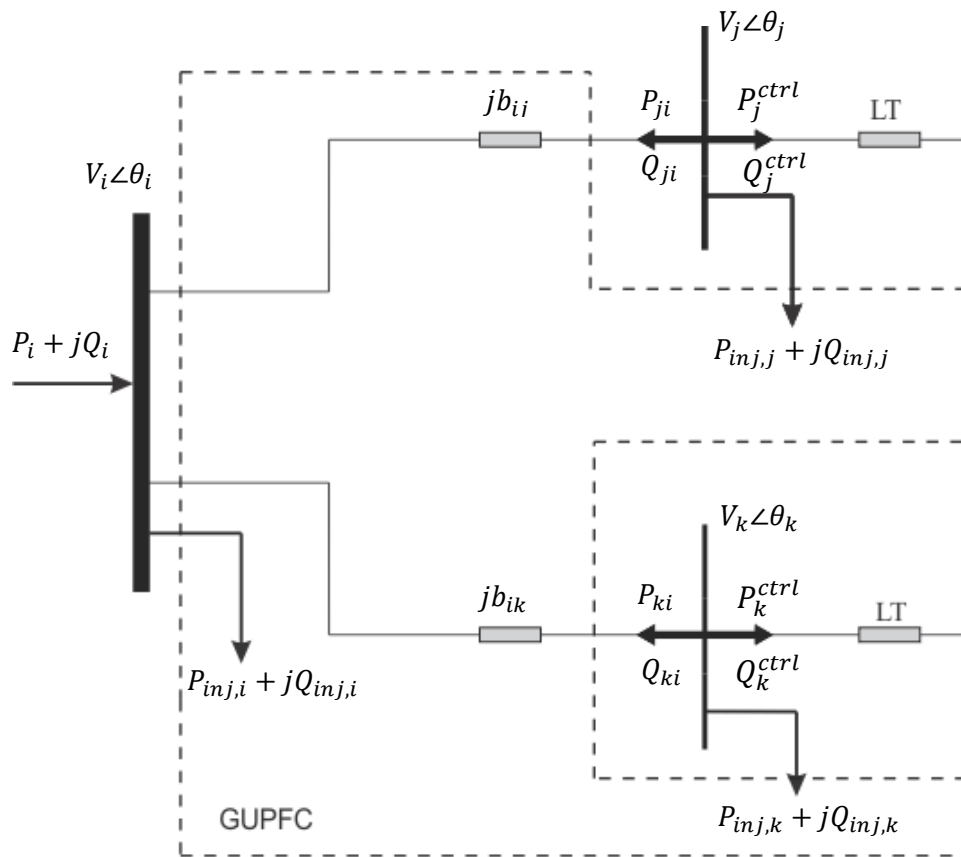
O modelo de injeção de potência e os fluxos de potências ativa e reativa ( $P_j^{ctrl}$ ,  $Q_j^{ctrl}$ ,  $P_k^{ctrl}$  e  $Q_k^{ctrl}$ ) controlados nas duas linhas de transmissão que o GUPFC gerencia são ilustrados na Figura 13.

Nesta figura verifica-se que o balanço de potências ativa e reativa nas barras controladas pelo dispositivo resultam nas expressões dos fluxos controlados que são apresentados nas equações (49) e (50), sendo  $n = j, k$ .

$$P_n^{ctrl} = -P_{ni} - P_{inj,n} \quad (49)$$

$$Q_n^{ctrl} = -Q_{ni} - Q_{inj,n} \quad (50)$$

Figura 13 - Controle dos fluxos de potência pelo GUPFC



Fonte: Adaptado de Valle (2014).

Nas equações (49) e (50),  $P_{ni}$  e  $Q_{ni}$  são os fluxos convencionais de potências ativa e reativa descritos nas equações (51) e (52).

$$P_{ni} = b_{in} V_n V_i \sin(\theta_i - \theta_n) \quad (51)$$

$$Q_{ni} = -V_n^2 b_{in} + b_{in} V_n V_i \cos(\theta_i - \theta_n) \quad (52)$$

Com a substituição das equações (35), (37), (51) e (52) nas equações (49) e (50), obtêm-se as equações (53) e (54) que definem os fluxos de potências ativa e reativa controlados, sendo utilizados como entradas do sistema de controle do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 7.

$$P_n^{ctrl} = -b_{in}V_n V_i \text{sen}(\theta_{in}) - b_{in}V_n [V_{qn} \text{sen}(\theta_{in}) + V_{pn} \text{cos}(\theta_{in})] \quad (53)$$

$$Q_n^{ctrl} = V_n^2 b_{in} - b_{in}V_n V_i \text{cos}(\theta_{in}) - b_{in}V_n [V_{qn} \text{cos}(\theta_{in}) - V_{pn} \text{sen}(\theta_{in})] \quad (54)$$

A substituição das equações (53) e (54) no conjunto de equações (48) resulta no conjunto de equações utilizado para representar o GUPFC no programa de fluxo de potência expandido, o qual será tema da seção seguinte.

## 2.7 INCLUSÃO DO GUPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA

As equações que representam o modelo de injeção de potência em conjunto com as equações diferenciais que descrevem o seu comportamento dinâmico, todas elas definidas nas seções anteriores, são utilizadas para incluir o GUPFC no fluxo de potência a fim de analisar a sua influência no SEP. No trabalho de Kopcak, Da Costa e Silva (2007) foi apresentada uma metodologia para a inclusão de dispositivos FACTS no fluxo de potência convencional. No trabalho citado, as equações diferenciais que descrevem a dinâmica do dispositivo FACTS GUPFC são consideradas constantes em relação ao tempo, assim, suas derivadas são consideradas nulas. Desta forma, passam a ser tratadas como equações algébricas para um dado ponto de equilíbrio.

Portanto, a solução do problema resume-se a encontrar os zeros de um conjunto de equações algébricas não lineares. Isso pode ser obtido com a utilização do método de Newton-Raphson já bastante conhecido e utilizado para a solução do fluxo de potência convencional. Assim como no método de Newton-Raphson a solução do problema do fluxo expandido ocorre quando todos os *mismatches* referentes às potências ativa e reativa da rede sejam satisfeitos, incluindo as barras onde o GUPFC está instalado. Estes *mismatches* são apresentados nas equações (55) e (56), sendo  $m = i, j, k$ .

$$0 = P_{gm} - P_{inj,m} - P_{cm} - P_{calc,m} \quad (55)$$

$$0 = Q_{gm} - Q_{inj,m} - Q_{cm} - Q_{calc,m} \quad (56)$$

Nas equações (55) e (56),  $P_{gm}$  e  $Q_{gm}$  são as gerações de potências ativa e reativa entrando na barra  $m$ . As grandezas  $P_{cm}$  e  $Q_{cm}$  são possíveis cargas ativa e reativa conectadas à barra  $m$ .  $P_{calc,m}$  e  $Q_{calc,m}$  referem-se às potências ativa e reativa transmitidas nas LTs, deixando a barra  $m$ . Finalmente,  $P_{inj,m}$  e  $Q_{inj,m}$  são as injeções de potências ativa e reativa controladas pelo GUPFC.

Esse método (chamado de fluxo de potência expandido) fundamenta-se na expansão das equações de fluxo de potência convencional através da inclusão das equações dinâmicas que descrevem o dispositivo FACTS conectado ao sistema elétrico, neste caso em particular o GUPFC. A utilização dessa ferramenta considera o SEP operando em regime permanente. Assim, o conjunto de equações diferenciais (48) que representa a dinâmica do dispositivo pode ser igualado a zero e tratado como um conjunto de equações algébricas. Dessa forma, o fluxo de potência convencional pode ser utilizado, e as equações dinâmicas do GUPFC inseridas juntamente com o conjunto de equações algébricas que modelam o restante do SEP analisado (KOPCAC, 2007; KOPCAK; DA COSTA; SILVA, 2007).

Considerando essa ferramenta, as equações do fluxo de potência expandido para o GUPFC com três conversores pode ser representado conforme equação matricial (57).



$$\begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{l}
 \Delta \dot{V}_{pj} \\
 \Delta \dot{X}_1 \\
 \Delta \dot{V}_{qj} \\
 \Delta \dot{X}_2 \\
 \Delta \dot{V}_{pk} \\
 \Delta \dot{X}_3 \\
 \Delta \dot{V}_{qk} \\
 \Delta \dot{X}_4 \\
 \Delta \dot{I}_q \\
 \Delta \dot{X}_5 \\
 \Delta P_i \\
 \Delta P_j \\
 \Delta P_k \\
 \Delta Q_i \\
 \Delta Q_j \\
 \Delta Q_k
 \end{array} \right\} = \left( \begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \underbrace{\hspace{12em}}_{J1_G} \\
 \begin{array}{cccccccccccc}
 \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{pj}} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial X_1}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial X_1}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{qj}} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial X_2}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial X_2}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial X_3} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{qk}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial V_{qk}}{\partial V_{qk}} & \frac{\partial V_{qk}}{\partial X_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial X_4}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial X_4}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial I_q}{\partial I_q} & \frac{\partial I_q}{\partial X_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial X_5}{\partial I_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial I_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial Q_{inj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \\
 \underbrace{\hspace{12em}}_{J3_G} & \underbrace{\hspace{12em}}_{J4_G} \\
 \end{array} \right) \left. \begin{array}{l}
 \Delta V_{pj} \\
 \Delta X_1 \\
 \Delta V_{qj} \\
 \Delta X_2 \\
 \Delta V_{pk} \\
 \Delta X_3 \\
 \Delta V_{qk} \\
 \Delta X_4 \\
 \Delta I_q \\
 \Delta X_5 \\
 \Delta \theta_i \\
 \Delta \theta_j \\
 \Delta \theta_k \\
 \Delta V_i \\
 \Delta V_j \\
 \Delta V_k
 \end{array} \right\}
 \end{array} \quad (57)$$

A equação matricial (57), que representa a matriz jacobiana do fluxo de potência expandido, foi subdividida em quatro blocos. Observa-se que o bloco denominado  $J4_G$  tem uma estrutura muito semelhante à jacobina do fluxo de potência convencional. Porém, o que torna este bloco diferente em relação à jacobiana convencional são os termos marcados com o sinal (\*), onde são somadas as parcelas referentes às derivadas que relacionam as injeções de potências ativa e reativa do GUPFC.

A grande vantagem dessa metodologia para a solução do fluxo de potência expandido está em unir as equações diferenciais do GUPFC (que na solução do fluxo de potência são consideradas algébricas) às equações algébricas que modelam o SEP. Logo, a solução obtida após a convergência do fluxo de potência, retrata de forma mais fiel o SEP no qual o dispositivo FACTS já está incluso através de uma nova matriz jacobiana que além de trazer as informações referentes às variáveis do SEP (tensões e ângulos de todas as barras), traz também informações da dinâmica do GUPFC. Conseqüentemente, essa ferramenta possibilita que o modelo proposto para o dispositivo FACTS, seja ele qual for, possa ser utilizado tanto em análises de regime permanente, como em análises de estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

## 2.8 CONCLUSÕES

Este Capítulo iniciou com uma breve abordagem sobre os principais aspectos relacionados à teoria dos dispositivos FACTS, suas configurações básicas, as diferentes gerações de dispositivos, seus princípios básicos de funcionamento e sua influência no sistema elétrico de potência. Na sequência, um modelo de injeção de potência para o GUPFC foi obtido através da análise de um diagrama esquemático (Figura 3) utilizado para representá-lo. Uma estrutura de controle para o dispositivo também foi apresentada, e um conjunto de equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do GUPFC no SEP foi obtido.

Ao final do Capítulo foi apresentada uma metodologia para a inclusão do GUPFC no algoritmo de Newton-Raphson utilizando a ferramenta fluxo de potência expandido, a qual considera as equações dinâmicas da estrutura de controle do FACTS como equações algébricas para um determinado ponto de equilíbrio do sistema. Como resultado da convergência do fluxo expandido, obtêm-se uma matriz jacobiana modificada dada na equação (57), que possui tanto informações das variáveis do SEP como do controlador GUPFC. O próximo Capítulo irá apresentar o Modelo de Sensibilidade de Potência, uma ferramenta que será utilizada para representar o SEP (máquinas síncronas, reguladores automáticos de tensão, cargas e o sistema de transmissão). Nesse Capítulo também serão modelados os controladores suplementares de amortecimento ESP e POD, e ao final, estes controladores serão incluídos ao SEP modelado pelo MSP para a obtenção de um modelo completo.

### 3 MODELO DE SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo será apresentado o equacionamento do Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) para um sistema multimáquinas baseado na proposta de Deckmann e Da Costa (1994). A principal vantagem dessa modelagem está na preservação do sistema de transmissão, ou seja, o sistema de potência não é mais reduzido às barras dos geradores como ocorre no modelo de Heffron & Phillips (MHP) (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; HEFFRON; PHILLIPS, 1952; LARSEN; SWANN, 1981; CHEN; HSU, 1987; ARAUJO; ZANETA, 2001).

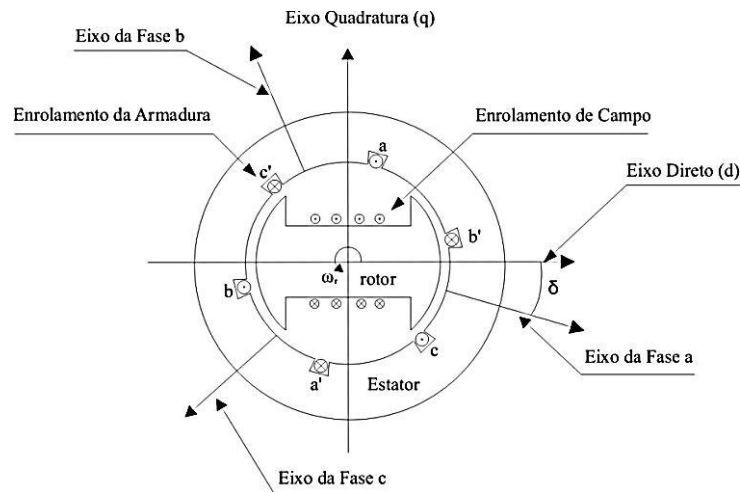
O MSP baseia-se no princípio do balanço de potências ativa e reativa que deve ser satisfeito continuamente em qualquer barra do SEP durante um processo dinâmico. Todas as equações que representam o SEP são linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio estático e um modelo na forma de espaço de estado será apresentado. O modelo dinâmico do GUPFC apresentado no Capítulo 2 será incluso no MSP, e novas equações no domínio do tempo são obtidas, sendo a matriz de estados do modelo anterior modificada através da inclusão de novas linhas e colunas referentes às variáveis de estado do modelo dinâmico do GUPFC.

Os controladores suplementares de amortecimento ESP e POD também serão modelados, e as equações que representam suas dinâmicas serão introduzidas ao modelo anterior. Finalmente são apresentadas as matrizes que representam o modelo completo do SEP, com todos os controladores incluídos. A análise dos autovalores da matriz de estados do sistema completo permite avaliar a influência dos controladores suplementares de amortecimento na manutenção da estabilidade do SEP diante de pequenas perturbações.

#### 3.2 EQUAÇÕES GERAIS DO MSP PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

Na modelagem que segue é considerado um modelo de gerador síncrono trifásico representado pelos enrolamentos trifásicos de armadura e também pelo enrolamento de campo ( $fd$ ) no rotor, conforme ilustrado na Figura 14, para o caso de um gerador de dois polos salientes. Os enrolamentos amortecedores e seus efeitos não serão aqui considerados.

Figura 14 - Enrolamento do gerador síncrono trifásico (2 polos)



Fonte: Adaptado de Kundur (1994).

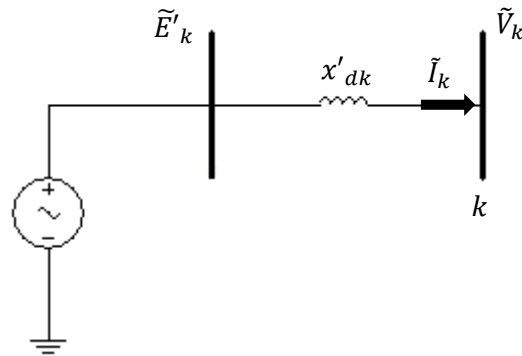
As grandezas medidas para o enrolamento de armadura obedecem a um sistema de coordenadas fixo  $(r,m)$ , visto que estão alojados em ranhuras no estator do gerador síncrono. Já para o enrolamento de campo que se move com uma velocidade angular  $(\omega)$  junto com o rotor, suas grandezas são medidas no sistema de coordenadas  $(d,q,0)$ . Como atuam dois sistemas de coordenadas ao mesmo tempo, será realizada uma transformação de coordenadas baseada na Transformação de Park que tem o intuito de facilitar a manipulação das equações posteriores (ANDERSON; FOUAD, 1993).

A transformação que permite referir as grandezas do sistema de coordenadas fixo  $(r,m)$  para o sistema de coordenadas rotativo  $(d,q,0)$  e vice-versa é feito utilizando a matriz  $(T)$  (equação (58)), e sua dedução pode ser encontrada em Furini (2008) e Pupin (2009).

$$T = \begin{bmatrix} \text{sen}\delta_k & -\text{cos}\delta_k \\ \text{cos}\delta_k & \text{sen}\delta_k \end{bmatrix} \quad (58)$$

Na equação (58),  $\delta_k$  é o ângulo interno do gerador conectado a uma barra  $k$  do SEP, como ilustrado no diagrama da Figura 15. Neste diagrama  $\tilde{E}'_k$  é a tensão interna do gerador  $k$ ,  $x'_{dk}$  a reatância transitória de eixo direto do gerador  $k$ ,  $\tilde{V}_k$  a tensão terminal da barra contendo o gerador  $k$  e  $\tilde{I}_k$  é a corrente terminal do gerador  $k$ .

Figura 15 - Diagrama unifilar do gerador síncrono



Fonte: Adaptado de Furini et al., (2011).

A expressão para a tensão terminal nas componentes de eixo real e imaginário é dada na equação (59), enquanto a equação (60) é obtida por inspeção da Figura 15.

$$\tilde{V}_k = V_k \angle \theta_k = V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k = V_{rk} + jV_{mk} \quad (59)$$

$$\tilde{E}'_k = \tilde{V}_k + jx'_{dk} \tilde{I}_k \quad (60)$$

Pode-se definir uma tensão  $\tilde{E}_{ak}$ , localizada sobre o eixo em quadratura, a qual define a localização do sistema de coordenadas rotativo ( $d_k$ ,  $q_k$ ), para cada gerador (ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994). Esta tensão é expressa segundo a equação (61), onde a grandeza  $x_{qk}$  corresponde à reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador  $k$ .

$$\tilde{E}_{ak} = \tilde{V}_k + jx_{qk} \tilde{I}_k \quad (61)$$

Faz-se a mudança de coordenadas da equação (59) aplicando-se a matriz de transformação  $\mathbf{T}$ . Como resultado, a tensão terminal em componentes de eixo direto e em quadratura é mostrada na equação (62).

$$\begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} \Rightarrow V_{dk} = V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (62)$$

$$V_{qk} = V_k \cos(\delta_k - \theta_k)$$

Aplicando-se o mesmo procedimento nas equações (60) e (61) estas podem ser expressas em componentes de eixo direto e quadratura como mostrado nas equações (63), (64), (65) e (66).

$$E'_{dk} = V_{dk} - x'_{dk} I_{qk} \quad (63)$$

$$E'_{qk} = V_{qk} - x'_{dk}I_{dk} \quad (64)$$

$$0 = V_{dk} - x_{qk}I_{qk} \quad (65)$$

$$E_{ak} = V_{qk} - x_{qk}I_{dk} \quad (66)$$

Por intermédio das equações (62) a (66) são obtidas as equações (67) e (68).

$$V_{dk} = V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k) = E'_{dk} + x'_{dk}I_{qk} = x_{qk}I_{qk} \quad (67)$$

$$V_{qk} = V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k) = E'_{qk} - x'_{dk}I_{dk} = E_{ak} - x_{qk}I_{dk} \quad (68)$$

Da manipulação das equações (67) e (68) obtêm-se as componentes de eixo direto e de eixo em quadratura da corrente terminal do gerador  $k$ , como mostrado nas equações (69) e (70).

$$I_{dk} = \frac{E'_{qk} - V_k \theta_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (69)$$

$$I_{qk} = \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (70)$$

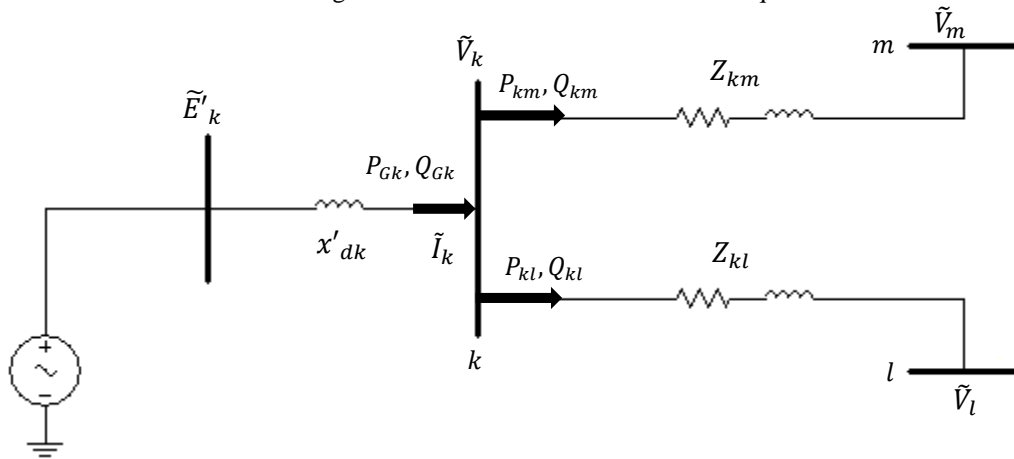
As equações (67) a (70) são equações básicas para o desenvolvimento do MSP.

### 3.3 POTÊNCIAS GERADAS E FLUXOS DE POTÊNCIAS NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS

A análise da Figura 16 ajudará no entendimento e dedução das equações que descrevem as potências envolvidas no sistema multimáquinas, onde uma barra de geração genérica  $k$  é conectada a outras duas barras  $m$  e  $l$ , através de linhas de transmissão de impedâncias  $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$  e  $Z_{kl} = R_{kl} + jX_{kl}$ , respectivamente.

Na Figura 16  $P_{Gk}$  e  $Q_{Gk}$  são as potências ativa e reativa geradas pela máquina  $k$  e injetadas na barra  $k$ ,  $P_{km}$  e  $Q_{km}$  são as potências ativa e reativa transmitidas da barra  $k$  para a barra  $m$ , e  $P_{kl}$  e  $Q_{kl}$  são as potências ativa e reativa transmitidas da barra  $k$  para a barra  $l$ .

Figura 16 - Potências no sistema multimáquinas



Fonte: Adaptado de Furini et al., (2011).

Por meio do cálculo da potência complexa entregue à barra  $k$  obtêm-se as potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador  $k$ , como mostrado na equação (71).

$$\tilde{S}_{Gk} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_k)^* = P_{Gk} + jQ_{Gk} \quad (71)$$

Fazendo a substituição das equações (67) a (70) na equação (71) encontram-se as expressões para as potências ativa e reativa geradas, conforme equações (72) e (73).

$$P_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] V_k^2 \text{sen}[2(\delta_k - \theta_k)] \quad (72)$$

$$Q_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{2} \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] [1 - \cos[2(\delta_k - \theta_k)]] \quad (73)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio estável as equações (72) e (73) podem ser linearizadas utilizando a expansão em série de Taylor e considerando os termos de ordem menor que dois, como mostrado nas equações (74) e (78).

$$\Delta P_{Gk} = A1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + A2_{Gk} \Delta E'_{qk} + A3_{Gk} \Delta V_k \quad (74)$$

$$A1_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} \right) = \frac{E'_{qk} V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k^2 \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] [\cos[2(\delta_k - \theta_k)]] \quad (75)$$

$$A2_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (76)$$

$$A3_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] [\text{sen}[2(\delta_k - \theta_k)]] \quad (77)$$

$$\Delta Q_{Gk} = R1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + R2_{Gk} \Delta E'_{qk} + R3_{Gk} \Delta V_k \quad (78)$$

$$R1_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} \right) = -\frac{E'_{qk} V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - V_k^2 \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] [\text{sen}[2(\delta_k - \theta_k)]] \quad (79)$$

$$R2_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (80)$$

$$R3_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{2V_k}{x'_{dk}} - V_k \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] [1 - \text{cos}[2(\delta_k - \theta_k)]] \quad (81)$$

Nas equações (74) – (81) as constantes  $A1_{Gk}$ ,  $A2_{Gk}$  e  $A3_{Gk}$  são denominadas “coeficientes de sensibilidade de potência ativa do gerador  $k$ ”, enquanto os termos  $R1_{Gk}$ ,  $R2_{Gk}$  e  $R3_{Gk}$  são denominados “coeficientes de sensibilidade de potência reativa do gerador  $k$ ”. Os coeficientes de sensibilidade de potência do sistema de transmissão são obtidos considerando a linha de transmissão que liga as barras  $k$  e  $m$  do sistema multimáquinas mostrado na Figura 16, cuja impedância  $Z_{km}$  é mostrada na sua forma de admitância conforme equação (82).

$$Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = \frac{R_{km}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} - j \frac{X_{km}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} = g_{km} + jb_{km} \quad (82)$$

A corrente que flui entre a barra  $k$  e a barra  $m$  é explicitada na equação (83), enquanto que o fluxo de potência complexa com sentido da barra  $k$  para a barra  $m$  é dado na equação (84).

$$\tilde{I}_{km} = Y_{km} (\tilde{V}_k - \tilde{V}_m) \quad (83)$$

$$\tilde{S}_{km} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_{km})^* = P_{km} + jQ_{km} \quad (84)$$

Manipulando-se as duas últimas equações são obtidos os fluxos de potências ativa e reativa da barra  $k$  para a barra  $m$ , mostrado nas equações (85) e (86).

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \text{cos}\theta_{km} - V_k V_m b_{km} \text{sen}\theta_{km} \quad (85)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 b_{km} + V_k V_m b_{km} \text{cos}\theta_{km} - V_k V_m g_{km} \text{sen}\theta_{km} \quad (86)$$



Considerando pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio estático as equações (85) e (86) podem ser linearizadas via série de Taylor, resultando nas equações (87) e (91).

$$\Delta P_{km} = A1_{km}\Delta\theta_{km} + A2_{km}\Delta V_k + A3_{km}\Delta V_m \quad (87)$$

$$A1_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial(\theta_{km})} \right) = V_k V_m g_{km} \text{sen}\theta_{km} - V_k V_m b_{km} \text{cos}\theta_{km} \quad (88)$$

$$A2_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial(V_k)} \right) = 2V_k g_{km} - V_m g_{km} \text{cos}\theta_{km} - V_m b_{km} \text{sen}\theta_{km} \quad (89)$$

$$A3_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial(V_m)} \right) = -V_k g_{km} \text{cos}\theta_{km} - V_k b_{km} \text{sen}\theta_{km} \quad (90)$$

$$\Delta Q_{km} = R1_{km}\Delta\theta_{km} + R2_{km}\Delta V_k + R3_{km}\Delta V_m \quad (91)$$

$$R1_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial(\theta_{km})} \right) = -V_k V_m b_{km} \text{sen}\theta_{km} - V_k V_m g_{km} \text{cos}\theta_{km} \quad (92)$$

$$R2_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial(V_k)} \right) = -2V_k (b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_m b_{km} \text{cos}\theta_{km} - V_m g_{km} \text{sen}\theta_{km} \quad (93)$$

$$R3_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial(V_m)} \right) = V_k b_{km} \text{cos}\theta_{km} - V_k g_{km} \text{sen}\theta_{km} \quad (94)$$

Os termos  $A1_{km}$ ,  $A2_{km}$  e  $A3_{km}$  são chamados “coeficientes de sensibilidade de potência ativa da linha de transmissão  $k - m$ ”, enquanto que os termos  $R1_{km}$ ,  $R2_{km}$  e  $R3_{km}$  são os “coeficientes de sensibilidade de potência reativa da linha de transmissão  $k - m$ ”.

### 3.4 BALANÇO NODAL DE POTÊNCIA NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS

O MSP para Sistemas Multimáquinas tem como ideia principal a aplicação do balanço incremental de potências ativa e reativa em cada barra do SEP (DECKMANN; Da COSTA, 1994).

Considerando uma barra genérica  $k$ , conectada a outras duas barras  $l$  e  $m$  do sistema elétrico conforme Figura 16, a variação das potências ativa e reativa geradas na barra  $k$  ( $\Delta P_{Gk}$  e  $\Delta Q_{Gk}$ ) deve ser igual ao somatório das variações dos fluxos ativo e reativo ( $\Delta P_{km}$  e  $\Delta Q_{km}$ ) e ( $\Delta P_{kl}$  e  $\Delta Q_{kl}$ ) nas linhas de transmissão  $k - m$  e  $k - l$ . Este conceito pode ser generalizado

considerando um conjunto de todas as barras conectadas à barra  $k$ , chamado  $\Omega_k$ . Para maior generalização considere ainda que na barra  $k$  está conectada uma carga que consome as potências  $\Delta P_{Lk}$  e  $\Delta Q_{Lk}$ . Assim, o balanço incremental de potências ativa e reativa na barra  $k$  é descrito nas equações (95) e (96).

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta P_{km} = 0 \quad (95)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta Q_{km} = 0 \quad (96)$$

É importante salientar que as equações (95) e (96) são equações algébricas, e traduzem o balanço nodal de potência na sua forma incremental em cada barra do sistema multimáquinas. Esta igualdade de potências deve ser satisfeita no decorrer de qualquer processo do SEP.

### 3.5 TENSÃO INTERNA DA MÁQUINA SÍNCRONA

Considerando-se o circuito de campo do gerador síncrono, a variação da tensão interna é dada na equação (97), onde  $x_{dk}$  é a reatância síncrona de eixo direto,  $E_{fdk}$  é a tensão de campo do gerador síncrono e  $T'_{d0k}$  é a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto (ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994; YU, 1983).

$$\dot{E}'_{qk} = \frac{1}{T'_{d0k}} [E_{fdk} - E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk})I_{dk}] \quad (97)$$

A linearização da equação (97) é feita admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio estável e desconsiderando os termos de ordem igual ou superior a dois, conforme mostrado na equação (98).

$$\Delta \dot{E}'_{qk} = \frac{1}{T'_{d0k}} [\Delta E_{fdk} - \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} + K_{Vk} \Delta V_k - K_{Ak} \Delta(\delta_k - \theta_k)] \quad (98)$$

Os coeficientes  $K_{Vk}$  e  $K_{Ak}$  são denominados de “coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono  $k$ ” e são obtidos por manipulações matemáticas apresentadas em Furini (2008) cujas expressões são apresentadas nas equações (99) e (100).

$$K_{Vk} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (99)$$

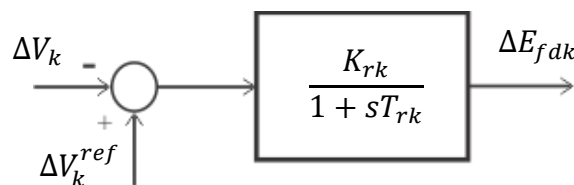
$$K_{Ak} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (100)$$

A reação de armadura no Modelo de Sensibilidade de Potência é determinada considerando-se as variações do ângulo da tensão interna do gerador síncrono ( $\delta_k$ ), da magnitude da tensão terminal ( $V_k$ ) e do ângulo da tensão terminal ( $\theta_k$ ). Isso contrasta com o Modelo Linear de Heffron e Phillips (1952) onde a reação de armadura é associada somente às variações de ( $\delta_k$ ) ponderada pelo termo  $K_4$  (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; HEFFRON; PHILLIPS, 1952).

### 3.6 TENSÃO DE CAMPO DA MÁQUINA SÍNCRONA

Nesta seção são considerados os efeitos da variação da tensão de excitação da máquina síncrona utilizando-se o enrolamento de campo. Para isso faz-se necessário introduzir o Regulador Automático de Tensão – RAT do gerador. Este tem por objetivo regular a tensão de excitação da máquina síncrona ( $E_{fdk}$ ) de acordo com a variação da tensão terminal ( $V_k$ ) em relação a uma tensão de referência especificada ( $V_k^{ref}$ ), conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Sistema de excitação do gerador síncrono



Fonte: Adaptado de Furini et al. (2011).

Neste trabalho considera-se um modelo de primeira ordem para representar o regulador automático de tensão, muito utilizado em estudos de estabilidade a pequenas perturbações (ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994; YU, 1983; DEMELLO; CONCORDIA, 1969). Sendo assim, o RAT é representado por um ganho  $K_{rk}$  e por uma constante de tempo  $T_{rk}$ . Analisando-se a Figura 17 pode-se apresentar a forma linearizada para a expressão da tensão de campo  $E_{fdk}$  conforme equação (101). Para isso, pequenos desvios foram considerados em torno de um ponto de operação e os termos de ordem igual ou superior a dois foram desprezados.

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k^{ref} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k \quad (101)$$

### 3.7 EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DA MÁQUINA SÍNCRONA

A equação de balanço (*swing*) do gerador síncrono, representada na equação (102), descreve o comportamento das grandezas mecânicas de uma máquina síncrona em função das grandezas elétricas (ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994; YU, 1983; DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

$$M_k \frac{\partial^2 \delta_k}{\partial t^2} = P_k^{mec} - P_{Gk} - D_k \frac{\partial \delta_k}{\partial t} \quad (102)$$

A partir da equação de oscilação do gerador síncrono as variações do ângulo interno ( $\Delta \delta_k$ ) e as variações da velocidade angular do rotor ( $\Delta \omega_k$ ) são linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio e são representadas nas equações (103) e (104).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_k^{mec} - \Delta P_{Gk} - D_k \Delta \omega_k) \quad (103)$$

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta \omega_k \quad (104)$$

Nas equações (103) e (104),  $\omega_0$  é a velocidade síncrona (377 rad/s),  $M_k$  é a constante de inércia da máquina síncrona e  $D_k$  é o coeficiente de amortecimento inerente do SEP. Este coeficiente é conhecido como torque de amortecimento do laço eletromecânico e expressa os componentes de torques contrários às oscilações do rotor e aceleração do gerador síncrono (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; DECKMANN; Da COSTA, 1993). Diversos fatores existentes no SEP podem causar estes torques, como a inércia das cargas, as perdas do sistema de transmissão e do sistema de distribuição, além de possíveis atritos não considerados (ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994; YU, 1983).

### 3.8 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA MULTIMÁQUINAS PELO MSP

A representação do sistema multimáquinas por meio do MSP é dada pelo conjunto de equações algébricas (95) e (96) e diferenciais (98), (101), (103) e (104). Esta representação pode ser realizada no domínio do tempo ou da frequência. Para estas representações considere que o sistema multimáquinas em estudo é formado por  $ng$  geradores e  $nb$  barras. Na equação (105) o Modelo de Sensibilidade de Potência para um SEP multimáquinas é apresentado no

domínio do tempo. Nesta equação  $\Delta \mathbf{x}$  é o vetor de variáveis de estado,  $\Delta \mathbf{z}$  é o vetor de variáveis algébricas,  $\Delta \mathbf{u}$  o vetor de entradas,  $\mathbf{A}$  é a matriz de estados e  $\mathbf{B}$  a matriz de entradas.

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (105)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \left[ [\Delta \omega_1 \dots \Delta \omega_{ng}] [\Delta \delta_1 \dots \Delta \delta_{ng}] [\Delta E'_{q1} \dots \Delta E'_{qng}] [\Delta E_{fd1} \dots \Delta E_{fdng}] \right]^t \quad (106)$$

$$\Delta \mathbf{u} = \left[ [\Delta P_1^{mec} \dots \Delta P_{ng}^{mec}] [\Delta V_1^{ref} \dots \Delta V_{ng}^{ref}] [\Delta P_{L1} \dots \Delta P_{Lnb}] [\Delta Q_{L1} \dots \Delta Q_{Lnb}] \right]^t \quad (107)$$

$$\Delta \mathbf{z} = \left[ [\Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_{nb}] [\Delta V_1 \dots \Delta V_{nb}] \right]^t \quad (108)$$

A partir do conjunto de equações (105) a (108) podem ser obtidas as equações diferenciais e algébricas do Modelo de Sensibilidade de Potência e suas subdivisões são apresentadas nas equações (109) e (110).

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \dot{\omega}] \\ [\Delta \dot{\delta}] \\ [\Delta \dot{E}'_q] \\ [\Delta \dot{E}_{fd}] \end{bmatrix}}_{\Delta \dot{\mathbf{x}}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{D}] & -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A1}_G] & -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A2}_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [\omega_0] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & -[\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{K}_A] & -[\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{X}_d][\mathbf{X}'_d] & [\mathbf{T}'_{do}]^{-1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[\mathbf{T}'_r]^{-1} \end{bmatrix}}_{J1} \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{x}} + \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A1}_G] & [0]_{ng \times nb-ng} & -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A3}_G] & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{K}_A] & [0]_{ng \times nb-ng} & [\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{K}_V] & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[\mathbf{T}'_r]^{-1}[\mathbf{K}_r] & [0]_{ng \times nb-ng} \end{bmatrix}}_{J2} \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{z}} + \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{D}] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [\mathbf{T}'_r]^{-1}[\mathbf{K}_r] & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \end{bmatrix}}_{B1} \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta P^{mec}] \\ [\Delta V^{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{u}} \quad (109) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & -[M]^{-1}[A2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix}}_{J3} \begin{bmatrix} [\Delta\omega] \\ [\Delta\delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} + \\
&+ \underbrace{\begin{bmatrix} [J4_1] & [J4_2] \\ [J4_3] & [J4_4] \end{bmatrix}}_{J4} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta\theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \\
&\underbrace{\begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} \end{bmatrix}}_{B2} \begin{bmatrix} [\Delta P^{mec}] \\ [\Delta V^{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix} \quad (110)
\end{aligned}$$

A matriz  $J4$  que aparece na representação mostrada na equação matricial (110), possui formação semelhante à matriz Jacobiana do fluxo de potência. O conjunto de equações (111) a (114) descreve a lei de formação de cada submatriz componente da matriz  $J4$ .

$$[J4_1] = \begin{cases} J4_{1kk} = -A1_{Gk} - \sum_{k \neq m} A1_{km} \\ J4_{1km} = A1_{km} \end{cases} \quad (111)$$

$$[J4_2] = \begin{cases} J4_{2kk} = A3_{Gk} - \sum_{k \neq m} A2_{km} \\ J4_{2km} = -A3_{km} \end{cases} \quad (112)$$

$$[J4_3] = \begin{cases} J4_{3kk} = -R1_{Gk} - \sum_{k \neq m} R1_{km} \\ J4_{3km} = R1_{km} \end{cases} \quad (113)$$

$$[J4_4] = \begin{cases} J4_{4kk} = R3_{Gk} - \sum_{k \neq m} R2_{km} \\ J4_{4km} = -R3_{km} \end{cases} \quad (114)$$

As equações (109) a (114) são apresentadas de uma forma compacta conforme explicitado na equação (115).

$$\begin{bmatrix} [\Delta \dot{x}] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta x] \\ [\Delta z] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta u] \quad (115)$$

A representação na forma de espaço de estado é finalmente obtida com a eliminação do vetor de variáveis algébricas ( $\Delta z$ ), resultando na equação (116).

$$\Delta \dot{x} = (J1 - J2J4^{-1}J3)\Delta x + (B1 - J2J4^{-1}B2)\Delta u \quad (116)$$

Na equação (116) a matriz de estados  $\mathbf{A}$  é dada por  $(J1 - J2J4^{-1}J3)$  e a matriz de entradas  $\mathbf{B}$  é dada por  $(B1 - J2J4^{-1}B2)$ .

### 3.9 INCLUSÃO DO GUPFC NO MSP

Nesta seção é apresentada a forma como o dispositivo FACTS GUPFC é inserido no Modelo de Sensibilidade de Potência. Como discutido no Capítulo 2 a ferramenta de fluxo de potência expandido carrega todas as informações e características dinâmicas do GUPFC nas suas submatrizes  $J1G$ ,  $J2G$ ,  $J3G$  e  $J4G$  e, portanto, essas submatrizes podem ser incluídas diretamente na formulação geral do MSP, segundo as equações (117) e (118).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta}_k \\ \Delta \dot{\omega}_k \\ \Delta \dot{E}'_{qk} \\ \Delta \dot{E}'_{dk} \\ \Delta \dot{V}_{pj} \\ \Delta \dot{X}_1 \\ \Delta \dot{V}_{qj} \\ \Delta \dot{X}_2 \\ \Delta \dot{V}_{pk} \\ \Delta \dot{X}_3 \\ \Delta \dot{V}_{qk} \\ \Delta \dot{X}_4 \\ \Delta \dot{I}_q \\ \Delta \dot{X}_5 \end{bmatrix}}_{\Delta x_{GUPFC}} = \begin{bmatrix} [J1] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \delta_k \\ \Delta \omega_k \\ \Delta E'_{qk} \\ \Delta E'_{dk} \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \\ \Delta V_{qk} \\ \Delta X_4 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_5 \end{bmatrix}}_{\Delta x_{GUPFC}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \delta_k \\ \Delta \omega_k \\ \Delta E'_{qk} \\ \Delta E'_{dk} \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \\ \Delta V_{qk} \\ \Delta X_4 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_5 \end{bmatrix}}_{\Delta x_{GUPFC}}$$

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\begin{bmatrix} \text{[J2]} \\ \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial X_1}{\partial V_i} & \frac{\partial X_1}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} & \frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial X_2}{\partial V_i} & \frac{\partial X_2}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_k} \\ \frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} & \frac{\partial X_3}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial V_k} \\ \frac{\partial V_{qk}}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial V_{qk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_{qk}}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial V_{qk}}{\partial V_k} \\ \frac{\partial X_4}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial X_4}{\partial \theta_k} & \frac{\partial X_4}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial X_4}{\partial V_k} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial I_q}{\partial V_i} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{J2}_{GUPFC}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \text{[B1]} \\ 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 & \frac{K_{P1}}{T_{GUPFC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P2}}{T_{GUPFC}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P3}}{T_{GUPFC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P4}}{T_{GUPFC}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I4}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P5}}{T_{GUPFC}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B1}_{GUPFC}} \underbrace{\begin{bmatrix} \text{[ } \Delta P^{mec} \text{]} \\ \text{[ } \Delta V^{ref} \text{]} \\ \text{[ } \Delta P_L \text{]} \\ \text{[ } \Delta Q_L \text{]} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta V_i^{ref} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{u}_{GUPFC}} \\
 & \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{z}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \text{[J3]} \\ \frac{\partial P_{nj,i}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{nj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial P_{nj,i}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{nj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_{nj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{nj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{nj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{nj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_{nj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{nj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & \frac{\partial Q_{nj,i}}{\partial I_q} \\ \frac{\partial Q_{nj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial Q_{nj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{nj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial Q_{nj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{J3}_{GUPFC}} \underbrace{\begin{bmatrix} \text{[ } \Delta \delta_k \text{]} \\ \text{[ } \Delta \omega_k \text{]} \\ \text{[ } \Delta E'_{qk} \text{]} \\ \text{[ } \Delta E_{fdk} \text{]} \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \\ \Delta V_{qk} \\ \Delta X_4 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_5 \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{x}_{GUPFC}} + \\
 & (117)
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial P_j^*}{\partial V_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial Q_j^*}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_k} \end{bmatrix}}_{J4_G} + \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \end{bmatrix}}_{\Delta z} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 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}}_{B2_{GUPFC}} \begin{bmatrix} \Delta P^{mec} \\ \Delta V^{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta V_i^{ref} \end{bmatrix}}_{\Delta u_{GUPFC}} \quad (118)
\end{aligned}$$

Observa-se que a matriz  $J4_G$  não sofre nenhuma alteração com relação àquela apresentada no Capítulo 2, ou seja, é a matriz de fluxo de potência convencional ( $J4$ ), cujas derivadas pertencentes ao dispositivo GUPFC foram somadas nos respectivos elementos. Representando as equações (117) e (118) na sua forma compacta, obtém-se a equação (119).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{GUPFC} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_{GUPFC} & J2_{GUPFC} \\ J3_{GUPFC} & J4_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{GUPFC} \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{GUPFC} \\ B2_{GUPFC} \end{bmatrix} \Delta u_{GUPFC} \quad (119)$$

A eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$  possibilita representar o sistema multimáquinas no espaço de estado conforme a equação (120).

$$\Delta \dot{X}_{GUPFC} = (J1_{GUPFC} - J2_{GUPFC} J4_G^{-1} J3_{GUPFC}) \Delta X_{GUPFC} + (B1_{GUPFC} - J2_{GUPFC} J4_G^{-1} B2_{GUPFC}) \Delta u_{GUPFC} \quad (120)$$

### 3.10 CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO

Nesta seção serão apresentados os controladores suplementares ESP e POD que foram utilizados neste trabalho. Após a apresentação de seus modelos, poderá concluir-se que estes dois controladores possuem estruturas idênticas diferindo no modo de operação e nos sinais de entrada/saída de cada um deles.

Os controladores ESPs são acoplados às malhas de controle dos RATs dos geradores síncronos, inserindo sinais estabilizantes ( $\Delta V_{ESP}$ ) com o objetivo de introduzir amortecimento adicional aos modos locais de oscilação do SEP. Já o controlador POD é acoplado à malha de controle do dispositivo FACTS e insere amortecimento às oscilações de modo interárea por meio de um sinal suplementar ( $\Delta V_{sup}$ ) que modula a componente em quadratura ( $V_{pj}$ ) do conversor secundário do GUPFC. Como sinal de entrada o ESP utilizará a variação da velocidade angular do rotor da unidade geradora ( $\Delta\omega$ ), enquanto o POD utilizará a variação da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) da linha de transmissão adjacente à sua instalação.

#### 3.10.1 Estabilizadores de Sistemas de Potência

Em regime permanente a estabilidade de um SEP está intimamente ligada à presença dos componentes de torque elétrico de sincronização e torque elétrico de amortecimento. A primeira componente está em fase com as variações do ângulo interno ( $\Delta\delta$ ), enquanto que a segunda componente está em fase com as variações da velocidade angular ( $\Delta\omega$ ) do rotor do gerador síncrono.

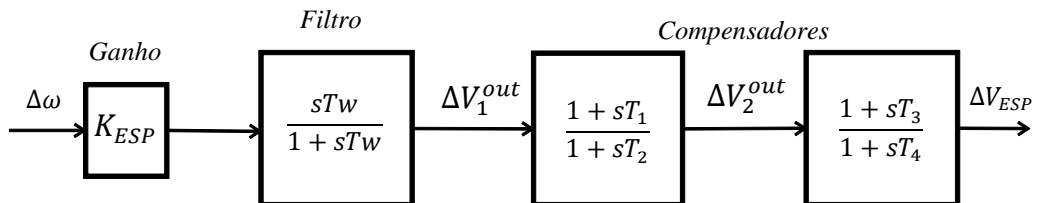
Os precursores nos estudos a respeito de torques sincronizantes e torques de amortecimento foram DeMello e Concordia (1969). Em seu artigo os autores apresentaram uma base teórica para a implementação de sinais estabilizantes a fim de eliminar o amortecimento negativo das oscilações eletromecânicas. Essas oscilações são causadas pelo uso de RATs de atuação rápida e contínua, que tornaram-se comuns a partir das décadas de 1940 e 50. Os RATs de atuação rápida e contínua foram utilizados para contornar problemas de estabilidade em regime transitório principalmente em geradores com alta reatância síncrona e com baixo torque de sincronização. Mas, se por um lado os RATs eliminavam o efeito da alta reação de armadura, por outro, em condições de elevados carregamentos e fracos sistemas de transmissão (linhas de transmissão longas com elevada reatância indutiva), os RATs provocavam o surgimento de oscilações de pequena magnitude e baixa frequência

(0,8 a 1,8 Hz) que muitas vezes persistiam por longos períodos de tempo sendo que, em alguns casos impunham limitações na capacidade de transferência de potência dos SEPs.

Diante desse problema DeMello e Concordia (1969), e mais tarde Larsen e Swann (1981), verificaram a necessidade de inserção de sinais suplementares na malha de controle dos RATs com o objetivo de compensar o atraso de fase imposto pelo RAT e pelo sistema elétrico com relação às variações da velocidade angular da máquina síncrona. Este fato promoveu o surgimento de um importante controlador chamado de Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP) (no inglês, *Power System Stabilizers – PSS*), e sua estrutura básica é apresentada na Figura 18.

A estrutura básica deste controlador é composta por dois blocos compensadores de fase, um bloco de filtro *washout* representado pela constante de tempo  $T_w$ , um ganho estático do controlador  $K_{ESP}$  relacionado com a quantidade de amortecimento introduzido no SEP de acordo com o amortecimento desejado em projeto. A função do filtro *washout* é garantir que o controlador ESP atue somente durante o período transitório. As constantes de tempo  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , e  $T_4$  são responsáveis por compensar o atraso de fase entre a saída da malha de controle do RAT e o torque produzido pelo gerador síncrono, sendo usual na literatura considerar  $T_1 = T_3$  e  $T_2 = T_4$  (KUNDUR, 1994).

Figura 18 - Estrutura do controlador ESP



Fonte: Elaborada pelo autor.

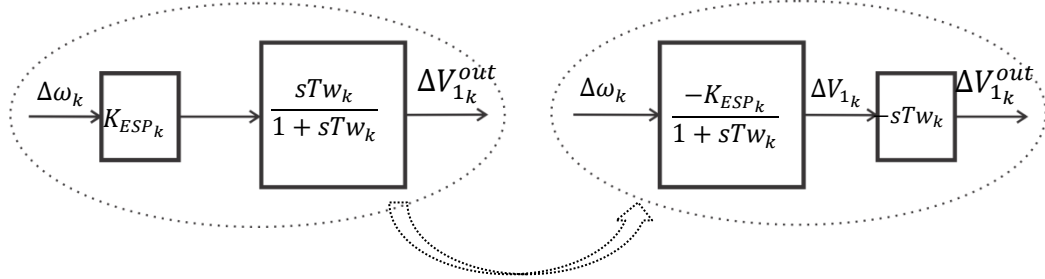
Como comentado anteriormente o sinal de entrada do controlador ESP será a variação da velocidade angular ( $\Delta\omega$ ) da máquina no qual o controlador está instalado (ANDERSON; FOUAD, 1993; DEMELLO; CONCORDIA, 1969; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981b). O sinal de saída ( $\Delta V_{ESP}$ ) é somado à malha de controle do RAT do gerador síncrono. Na próxima seção será abordado o procedimento para inclusão desse controlador no MSP.

### 3.10.2 Inclusão do ESP no MSP

Nota-se da Figura 18 que devido à inclusão do controlador ESP surgem três novas variáveis para cada unidade geradora  $k$  ( $\Delta V'_1$ ,  $\Delta V'_2$  e  $\Delta V_{ESP}$ ), as quais serão incluídas às variáveis de estado. Para facilitar a dedução, cada parte da Figura 18 será considerada

separadamente. Para encontrar a saída  $\Delta V'_{1k}$  do bloco *washout* pode-se realizar o procedimento apresentado na Figura 19, onde uma nova variável ( $\Delta V_{1k}$ ) de estado é definida.

Figura 19 - Divisão do bloco *Washout*



Fonte: Elaborada pelo autor.

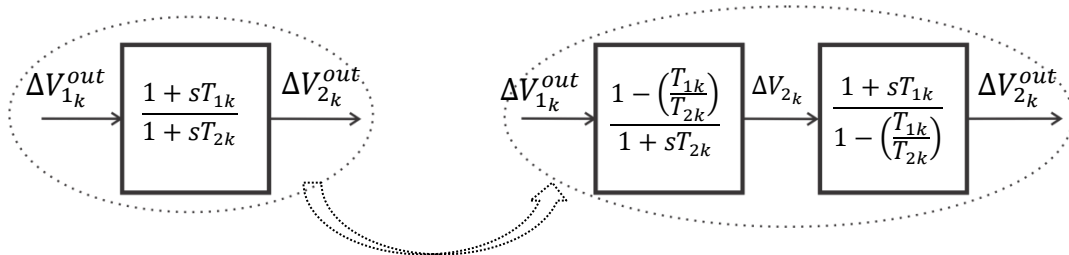
Por inspeção da Figura 19 obtêm-se as expressões para a nova variável de estado  $\Delta V_{1k}$  e para a variável que representa a saída do bloco *washout* ( $\Delta V_{1k}^{out}$ ), como expresso nas equações (121) e (122).

$$\Delta \dot{V}_{1k} = -\frac{1}{T_{Wk}} [K_{ESPk} \Delta \omega_k + \Delta V_{1k}] \quad (121)$$

$$\Delta V_{1k}^{out} = K_{ESPk} \Delta \omega_k + \Delta V_{1k} \quad (122)$$

De forma semelhante, na Figura 20 é mostrada a divisão do primeiro bloco de avanço/atraso de fase sendo que uma nova variável de estado ( $\Delta V_{2k}$ ) é definida.

Figura 20 - Divisão do primeiro bloco de avanço/atraso de fase



Fonte: Elaborada pelo autor.

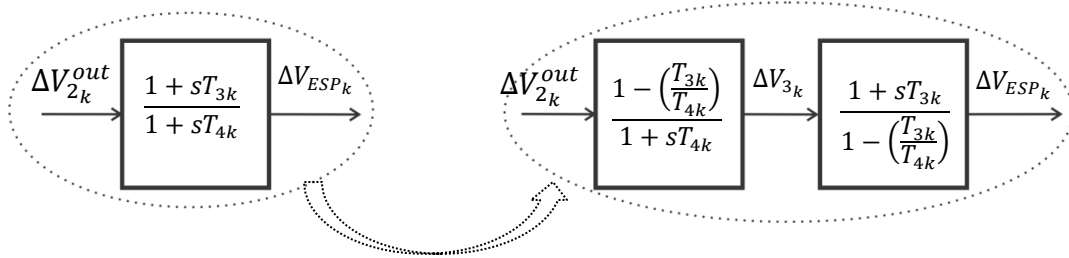
Analisando a Figura 20 e utilizando a equação (122), entrada do bloco analisado, são obtidas as equações da variável de estado  $\Delta V_{2k}$  e do sinal de saída  $\Delta V_{2k}^{out}$  do primeiro bloco de avanço/atraso de fase, equações (123) e (124), respectivamente.

$$\Delta \dot{V}_{2k} = \frac{1}{T_{2k}} \left[ \left( 1 - \frac{T_{1k}}{T_{2k}} \right) (K_{ESPk} \Delta \omega_k + \Delta V_{1k}) - \Delta V_{2k} \right] \quad (123)$$

$$\Delta V_{2k}^{out} = \Delta V_{2k} + \frac{T_{1k}}{T_{2k}} (K_{ESPk} \Delta \omega_k + \Delta V_{1k}) \quad (124)$$

O segundo bloco de avanço/atraso de fase é representado na Figura 21 e uma nova variável de estado é definida ( $\Delta V_{3k}$ ).

Figura 21 - Divisão do segundo bloco de avanço/atraso de fase



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da análise da Figura 21 em conjunto com a equação (124), que representa a entrada deste segundo bloco de avanço/atraso de fase, obtêm-se as equações (125) e (126) que representam a nova variável de estado  $\Delta V_{3k}$  e a saída do controlador ESP ( $\Delta V_{ESP}$ ), respectivamente.

$$\Delta \dot{V}_{3k} = \frac{1}{T_{4k}} \left[ \left( 1 - \frac{T_{3k}}{T_{4k}} \right) \left( \Delta V_{2k} + \frac{T_{1k}}{T_{2k}} (K_{ESPk} \Delta \omega_k + \Delta V_{1k}) \right) - \Delta V_{3k} \right] \quad (125)$$

$$\Delta V_{ESPk} = \Delta V_{3k} + \frac{T_{3k}}{T_{4k}} \left( \Delta V_{2k} + \frac{T_{1k}}{T_{2k}} (K_{ESPk} \Delta \omega_k + \Delta V_{1k}) \right) \quad (126)$$

O procedimento para a inclusão do ESP no MSP é concluído com a adição do sinal suplementar  $\Delta V_{ESP}$  à malha de controle do RAT apresentado na Figura 17. Com isso, é possível obter a equação (127) linearizada para a tensão de campo.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{fdk} &= \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k^{ref} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k - \frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \\ &+ \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \left[ \Delta V_{3k} + \frac{T_{3k}}{T_{4k}} \left( \Delta V_{2k} + \frac{T_{1k}}{T_{2k}} (K_{ESPk} \Delta \omega_k + \Delta V_{1k}) \right) \right] \end{aligned} \quad (127)$$

Reescrevendo as equações (121), (123), (125) e (127), que representam a dinâmica do ESP, e substituindo nas mesmas os termos que multiplicam os respectivos desvios por coeficientes de sensibilidade, é possível obter o conjunto de equações (128) – (131).

$$\Delta \dot{V}_{1k} = K_{11k} \Delta \omega_k + K_{12k} \Delta V_{1k} \quad (128)$$

$$\Delta \dot{V}_{2k} = K_{21k} \Delta \omega_k + K_{22k} \Delta V_{1k} + K_{23k} \Delta V_{2k} \quad (129)$$

$$\Delta \dot{V}_{3k} = K_{31k} \Delta \omega_k + K_{32k} \Delta V_{1k} + K_{33k} \Delta V_{2k} + K_{34k} \Delta V_{3k} \quad (130)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{fdk} = & K_{41k} \Delta \omega_k + K_{42k} E_{fdk} + K_{43k} \Delta V_k + K_{44k} \Delta V_{refk} + \\ & + K_{45k} \Delta V_{1k} + K_{46k} \Delta V_{2k} + K_{47k} \Delta V_{3k} \end{aligned} \quad (131)$$

Os coeficientes de sensibilidade que aparecem no conjunto de equações (128) – (131), são dados por:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{11k} = -\frac{K_{ESPk}}{T_{Wk}}, \text{ e } K_{12k} = -\frac{1}{T_{Wk}} \\ K_{21k} = -\frac{K_{ESPk}}{T_{2k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{2k}}\right), \quad K_{22k} = -\frac{K_{ESPk}}{T_{2k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{2k}}\right), \text{ e } \quad K_{23k} = -\frac{1}{T_{2k}} \\ K_{31k} = -\frac{T_{1k} K_{ESPk}}{T_{2k} T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{3k}}{T_{4k}}\right), \quad K_{32k} = -\frac{T_{1k}}{T_{2k} T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{3k}}{T_{4k}}\right), \\ K_{33k} = -\frac{1}{T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{3k}}{T_{4k}}\right), \text{ e } \quad K_{34k} = -\frac{1}{T_{4k}} \\ K_{41k} = \frac{K_{rk} T_{1k} T_{3k} K_{ESPk}}{T_{rk} T_{2k} T_{4k}}, \quad K_{42k} = \frac{1}{T_{rk}}, \quad K_{43k} = -\frac{K_{ESPk}}{T_{rk}}, \quad K_{44k} = \frac{K_{ESPk}}{T_{rk}}, \\ K_{45k} = \frac{K_{rk} T_{1k} T_{3k}}{T_{rk} T_{2k} T_{4k}}, \quad K_{46k} = \frac{K_{rk} T_{3k}}{T_{rk} T_{4k}}, \text{ e, por fim, } \quad K_{47k} = \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \end{array} \right.$$

As equações (128) a (131) definem a dinâmica dos controladores ESPs no SEP. A seguir será realizada a inclusão do ESP na formulação geral do MSP que já considera o dispositivo FACTS GUPFC (equações matriciais (117) e (118)), resultando nas equações (132) e (133).

$$\begin{array}{c}
\left[ \Delta \dot{\delta}_k \right] \\
\left[ \Delta \dot{\omega}_k \right] \\
\left[ \Delta \dot{E}'_{qk} \right] \\
\left[ \Delta \dot{E}_{fdk} \right] \\
\Delta \dot{V}_{pj} \\
\Delta \dot{X}_1 \\
\Delta \dot{V}_{qj} \\
\Delta \dot{X}_2 \\
\Delta \dot{V}_{pk} \\
\Delta \dot{X}_3 \\
\Delta \dot{V}_{qk} \\
\Delta \dot{X}_4 \\
\Delta \dot{I}_q \\
\Delta \dot{X}_5 \\
\Delta \dot{V}_{1k} \\
\Delta \dot{V}_{2k} \\
\Delta \dot{V}_{3k} \\
\Delta \dot{x}_{GE}
\end{array}
= \begin{array}{c}
\begin{array}{cccc}
& & & \\
& & & \\
& & & \\
& & & 
\end{array}
\left[ J1 \right]^{\oplus} \\
\hline
\begin{array}{cccc}
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & K_{11k} & 0 & 0 \\
0 & K_{21k} & 0 & 0 \\
0 & K_{31k} & 0 & 0
\end{array}
\left[ J1_G \right] \\
\hline
\begin{array}{ccc}
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
K_{45k} & K_{46k} & K_{47k} \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
K_{12k} & 0 & 0 \\
K_{22k} & K_{23k} & 0 \\
K_{32k} & K_{33k} & K_{34k}
\end{array}
\end{array}
+ \begin{array}{c}
\left[ \Delta \delta_k \right] \\
\left[ \Delta \omega_k \right] \\
\left[ \Delta E'_{qk} \right] \\
\left[ \Delta E_{fdk} \right] \\
\Delta V_{pj} \\
\Delta X_1 \\
\Delta V_{qj} \\
\Delta X_2 \\
\Delta V_{pk} \\
\Delta X_3 \\
\Delta V_{qk} \\
\Delta X_4 \\
\Delta I_q \\
\Delta X_5 \\
\Delta V_{1k} \\
\Delta V_{2k} \\
\Delta V_{3k} \\
\Delta x_{GE}
\end{array}$$





$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [J3] \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial I_q} & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{J3_{GE}} + \begin{bmatrix} [\Delta \delta_k] \\ [\Delta \omega_k] \\ [\Delta E'_{qk}] \\ [\Delta E'_{fdk}] \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \\ \Delta V_{qk} \\ \Delta X_4 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_5 \\ \Delta V_{1k} \\ \Delta V_{2k} \\ \Delta V_{3k} \\ \Delta x_{GE} \end{bmatrix}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial P_j^*}{\partial V_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial Q_j^*}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_k} \end{bmatrix}}_{J4_G} + \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \theta_n] \\ [\Delta V_n] \end{bmatrix}}_{\Delta z} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B2_{GUPFC}} + \begin{bmatrix} [\Delta P^{mec}] \\ [\Delta V^{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta V_i^{ref} \\ \Delta u_{GUPFC} \end{bmatrix}$$

(133)

Na equação (132),  $\mathbf{J}I^\oplus$  refere-se à matriz  $\mathbf{J}I$  do equacionamento geral do MSP agregando o elemento  $K_{41k}$  (o elemento  $K_{41k}$  é somado à matriz  $\mathbf{J}I$  devido à inclusão do ESP). As equações (132) e (133) levam em consideração a dinâmica das máquinas síncronas,

RATs, GUPFC e ESPs, e podem ser representadas de forma compacta conforme equação (134).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{GE} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_{GE} & J2_{GE} \\ J3_{GE} & J4_G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{GE} \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{GE} \\ B2_{GUPFC} \end{bmatrix} \cdot [\Delta u_{GUPFC}] \quad (134)$$

Eliminando-se o vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$  é obtida a formulação do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa na equação (135).

$$\Delta \dot{x}_{GE} = (J1_{GE} - J2_{GE} J4_G^{-1} J3_{GE}) \Delta x_{GE} + (B1_{GE} - J2_{GE} J4_G^{-1} B2_{GUPFC}) \Delta u_{GUPFC} \quad (135)$$

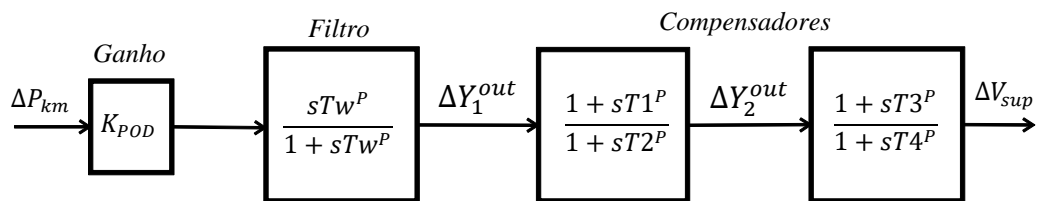
### 3.10.3 Power Oscillation Damping

Com o passar dos anos e o crescimento da demanda por energia elétrica, as interligações entre subsistemas foram tornando-se cada vez mais necessárias. A utilização de longas linhas de transmissão, com alta reatância indutiva, acaba contribuindo para o surgimento de modos oscilatórios de baixa frequência chamados de modos interárea, que são caracterizados por frequências na faixa entre 0,1 a 0,8 Hz (LARSEN; SWANN, 1981; KLEIN et al., 1991). Estes modos não são suficientemente amortecidos com a utilização de ESPs convencionais instalados na malha de controle dos RATs das unidades geradoras. Dessa forma, alternativas mais eficientes foram estudadas e avaliadas pelos engenheiros de sistemas de potência para atuar de forma efetiva no amortecimento dos modos interárea.

Neste contexto, graças ao avanço da eletrônica de potência e o advento da tecnologia FACTS, pesquisadores propuseram como forma de amortecer o modo interárea a adição de um sinal suplementar ( $\Delta V_{sup}$ ) à malha de controle do dispositivo FACTS (semelhante ao realizado pelo ESP na malha do RAT). Este sinal estabilizante é conseguido utilizando-se um controlador adicional conhecido na literatura como POD. Sua estrutura é semelhante à de um ESP convencional, conforme apresentado na

Figura 22. Este sinal suplementar, que neste trabalho é adicionado à malha de controle do GUPFC, atua modulando a componente em quadratura ( $V_{pj}$ ) do conversor secundário do dispositivo FACTS considerado.

Figura 22 - Estrutura do POD



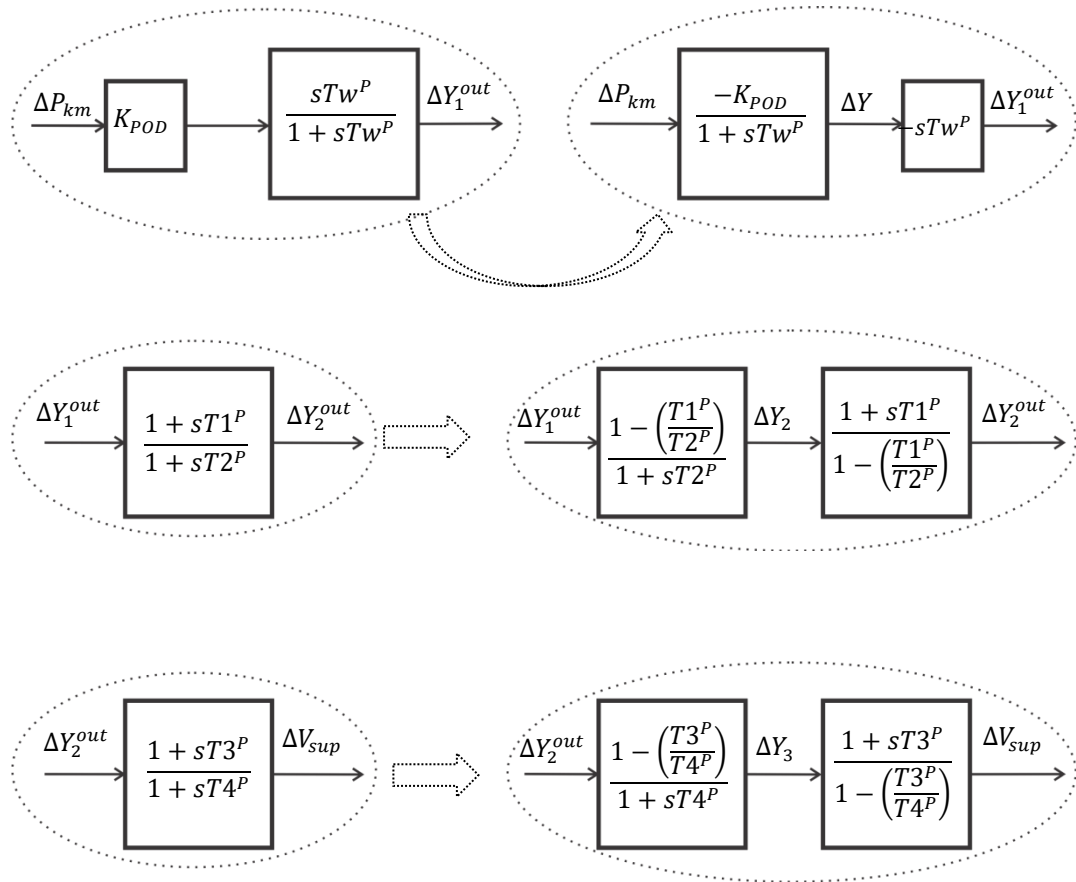
Fonte: Elaborada pelo autor.

O controlador POD apresentado na Figura 22 é composto por dois blocos compensadores de fase com constantes de tempo  $T1^P$ ,  $T2^P$ ,  $T3^P$ , e  $T4^P$ , sendo usual na literatura considerar  $T1^P = T3^P$  e  $T2^P = T4^P$ , um bloco de filtro *washout* representado pela constante de tempo  $Tw^P$ , e um ganho estabilizante do controlador  $K_{POD}$ . O sinal de entrada utilizado é obtido localmente, ou seja, utiliza-se a variação do fluxo de potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) de uma linha adjacente à instalação do GUPFC, eliminando-se assim a necessidade de canais de telecomunicação e reduzindo os atrasos de resposta o que diminui consideravelmente os custos de implantação do controlador. Quanto ao sinal de saída ( $\Delta V_{sup}$ ) este é somado à malha de controle do dispositivo FACTS.

#### 3.10.4 Inclusão do POD no MSP

Para a inclusão do controlador POD no MSP é realizado procedimento semelhante ao que foi realizado para o ESP. Dessa forma, a Figura 22 será modificada resultando na Figura 23.

Figura 23 - Modelo dinâmico do GUPFC equipado com POD



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por inspeção da Figura 23 são obtidas as equações diferenciais que representam o modelo dinâmico do controlador POD, conforme apresentado nas equações (136) a (138).

$$\Delta \dot{Y}_1 = -\frac{1}{T_w^P} [K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta Y_1] \quad (136)$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = \frac{1}{T_2^P} \left[ \left(1 - \frac{T_1^P}{T_2^P}\right) (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta Y_1) - \Delta Y_2 \right] \quad (137)$$

$$\Delta \dot{Y}_3 = \frac{1}{T_4^P} \left[ \left(1 - \frac{T_3^P}{T_4^P}\right) \left( \Delta Y_2 + \frac{T_1^P}{T_2^P} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta Y_1) \right) - \Delta Y_3 \right] \quad (138)$$

A saída do controlador POD é explicitada na equação (139)

$$\Delta V_{sup} = \Delta Y_3 + \left(\frac{T_3^P}{T_4^P}\right) \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_1^P}{T_2^P} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta Y_1) \right] \quad (139)$$

Por fim, a saída algébrica  $\Delta V_{sup}$  é substituída na equação (48), de forma que esta passa a ser escrita como apresentado na equação (140).

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pj} = & \frac{K_{P1}}{T_{GUPFC}} (P_j^{ref} - P_j^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_1 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{sup} - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{pj} + \\ & - \frac{1}{T_{GUPFC}} \left\{ \Delta Y_3 + \left( \frac{T3^P}{T4^P} \right) \left[ \Delta Y_2 + \frac{T1^P}{T2^P} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta Y_1) \right] \right\} \end{aligned} \quad (140)$$

O sinal de entrada do controlador POD é a variação do fluxo de potência ativa em uma LT adjacente à instalação do dispositivo FACTS e é dada na equação linearizada (87) e reescrita novamente conforme equação (141).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (141)$$

A manipulação adequada do conjunto de equações diferenciais do POD (136) a (138), da tensão em quadratura do conversor secundário (140), além da equação (141), resulta do conjunto de equações (142) a (145) onde os termos que multiplicam os respectivos desvios foram substituídos por coeficientes de sensibilidade que são apresentados na sequência.

$$\Delta \dot{Y}_1 = C_{11} \Delta \theta_k + C_{12} \Delta \theta_m + C_{13} \Delta V_k + C_{14} \Delta V_m + C_{15} \Delta Y_1 \quad (142)$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = C_{21} \Delta \theta_k + C_{22} \Delta \theta_m + C_{23} \Delta V_k + C_{24} \Delta V_m + C_{25} \Delta Y_1 + C_{26} \Delta Y_2 \quad (143)$$

$$\Delta \dot{Y}_3 = C_{31} \Delta \theta_k + C_{32} \Delta \theta_m + C_{33} \Delta V_k + C_{34} \Delta V_m + C_{35} \Delta Y_1 + C_{36} \Delta Y_2 + C_{37} \Delta Y_3 \quad (144)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{pj} = & \frac{K_{P1}}{T_{GUPFC}} (P_j^{ref} - P_j^{ctrl}) + \frac{1}{T_{GUPFC}} X_1 - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{sup} - \frac{1}{T_{GUPFC}} V_{pj} + \\ & C_{41} \Delta \theta_k + C_{42} \Delta \theta_m + C_{43} \Delta V_k + C_{44} \Delta V_m + C_{45} \Delta Y_1 + C_{46} \Delta Y_2 + C_{47} \Delta Y_3 \end{aligned} \quad (145)$$

Os coeficientes de sensibilidade que aparecem no conjunto de equações (142) – (145) são dados por:

$$\begin{cases}
C_{11} = -\frac{K_{POD} A1_{km}}{T_{WP}} \left(1 - \frac{T1^P}{T2^P}\right), & C_{12} = -\frac{K_{POD} A1_{km}}{T_{WP}}, & C_{13} = -\frac{K_{POD} A2_{km}}{T_{WP}} \left(1 - \frac{T1^P}{T2^P}\right), \\
C_{14} = -\frac{K_{POD} A3_{km}}{T_{WP}} & \text{e } C_{15} = -\frac{1}{T_{WP}} \\
C_{21} = \frac{K_{POD} A1_{km}}{T2^P} \left(1 - \frac{T1^P}{T2^P}\right), & C_{22} = -\frac{K_{POD} A1_{km}}{T2^P} \left(1 - \frac{T1^P}{T2^P}\right), & C_{23} = \frac{K_{POD} A2_{km}}{T2^P} \left(1 - \frac{T1^P}{T2^P}\right) \\
C_{24} = \frac{K_{POD} A3_{km}}{T2^P} \left(1 - \frac{T1^P}{T2^P}\right), & C_{25} = \frac{1}{T2^P} \left(1 - \frac{T1^P}{T2^P}\right), & \text{e } C_{26} = -\frac{1}{T2^P} \\
C_{31} = \frac{T1^P K_{POD} A1_{km}}{T2^P T4^P} \left(1 - \frac{T3^P}{T4^P}\right), & C_{32} = -\frac{T1^P K_{POD} A1_{km}}{T2^P T4^P} \left(1 - \frac{T3^P}{T4^P}\right), \\
C_{33} = \frac{T1^P K_{POD} A2_{km}}{T2^P T4^P} \left(1 - \frac{T3^P}{T4^P}\right), & C_{34} = -\frac{T1^P K_{POD} A3_{km}}{T2^P T4^P} \left(1 - \frac{T3^P}{T4^P}\right), \\
C_{35} = \frac{1}{T4^P} \left(1 - \frac{T3^P}{T4^P}\right), & C_{36} = -\frac{1}{T4^P} \left(1 - \frac{T3^P}{T4^P}\right), & \text{e } C_{37} = -\frac{1}{T4^P} \\
C_{41} = -\frac{T1^P T3^P K_{POD} A1_{km}}{T2^P T4^P T_{GUPFC}}, & C_{42} = \frac{T1^P T3^P K_{POD} A1_{km}}{T2^P T4^P T_{GUPFC}}, & C_{43} = -\frac{T1^P T3^P K_{POD} A2_{km}}{T2^P T4^P T_{GUPFC}}, \\
C_{44} = -\frac{T1^P T3^P K_{POD} A3_{km}}{T2^P T4^P T_{GUPFC}}, & C_{45} = -\frac{T1^P T3^P}{T2^P T4^P T_{GUPFC}}, & C_{46} = -\frac{T3^P}{T4^P T_{GUPFC}}, \text{ e, por fim,} \\
C_{47} = -\frac{1}{T_{GUPFC}}
\end{cases}$$

Inserindo as equações (142) a (144) e os elementos adicionais da equação (145) em (117) e (118), chega-se finalmente à representação do conjunto GUPFC-POD no MSP que é dada pelo conjunto de equações matriciais (146) e (147).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta\dot{\delta}_k] \\ [\Delta\dot{\omega}_k] \\ [\Delta\dot{E}'_{qk}] \\ [\Delta\dot{E}'_{fdk}] \\ \Delta\dot{V}_{pj} \\ \Delta\dot{X}_1 \\ \Delta\dot{V}_{qj} \\ \Delta\dot{X}_2 \\ \Delta\dot{V}_{pk} \\ \Delta\dot{X}_3 \\ \Delta\dot{V}_{qk} \\ \Delta\dot{X}_4 \\ \Delta\dot{I}_q \\ \Delta\dot{X}_5 \\ \Delta\dot{Y}_1 \\ \Delta\dot{Y}_2 \\ \Delta\dot{Y}_3 \end{bmatrix}}_{\Delta\dot{x}_{GP}} = \begin{bmatrix} [J1]^{\oplus} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & [J1_G] & \begin{matrix} C_{45} & C_{46} & C_{46} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta\delta_k] \\ [\Delta\omega_k] \\ [\Delta E'_{qk}] \\ [\Delta E'_{fdk}] \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \\ \Delta V_{qk} \\ \Delta X_4 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_5 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix}}_{\Delta x_{GP}} +$$

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial V_{pj}}{\partial v_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial v_j} & 0 \\ \frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial X_1}{\partial v_i} & \frac{\partial X_1}{\partial v_j} & 0 \\ \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial v_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial v_j} & 0 \\ \frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} & \frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial X_2}{\partial v_i} & \frac{\partial X_2}{\partial v_j} & 0 \\ \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial v_i} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial v_k} & 0 \\ \frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} & \frac{\partial X_3}{\partial v_i} & \frac{\partial X_3}{\partial v_k} & 0 \\ \frac{\partial V_{qk}}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial V_{qk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_{qk}}{\partial v_i} & \frac{\partial V_{qk}}{\partial v_k} & 0 \\ \frac{\partial X_4}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial X_4}{\partial \theta_k} & \frac{\partial X_4}{\partial v_i} & \frac{\partial X_4}{\partial v_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial I_q}{\partial v_i} & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{12} & 0 & C_{13} & C_{14} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 & C_{23} & C_{24} & 0 \\ C_{31} & C_{32} & 0 & C_{33} & C_{34} & 0 \end{bmatrix}}_{J2_{GP}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \end{bmatrix}}_{\Delta z} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P1}}{T_{GUPFC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P2}}{T_{GUPFC}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P3}}{T_{GUPFC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P4}}{T_{GUPFC}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{I4}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{P5}}{T_{GUPFC}} \\ 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}}_{B1_{GP}} \begin{bmatrix} \Delta P^{mec} \\ \Delta V^{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta V_i^{ref} \end{bmatrix} + \Delta u_{GUPFC}
 \end{aligned} \tag{146}$$



$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [J3] \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,i}}{\partial I_q} & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{inj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial Q_{inj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{J3_{GP}} + \begin{bmatrix} [\Delta \delta_k] \\ [\Delta \omega_k] \\ [\Delta E'_{qk}] \\ [\Delta E'_{jdk}] \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \\ \Delta V_{qk} \\ \Delta X_4 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_5 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix} + \Delta X_{GP}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial P_j^*}{\partial V_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial Q_j^*}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_k} \end{bmatrix}}_{J4_G} + \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \theta_n] \\ [\Delta V_n] \end{bmatrix}}_{\Delta z} + [B2] + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B2_{GUPFC}} + \begin{bmatrix} [\Delta P^{mec}] \\ [\Delta V^{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta V_i^{ref} \end{bmatrix} + \Delta u_{GUPFC}$$

(147)

Nas equações (146) e (147) são modeladas as dinâmicas das máquinas síncronas, RATs e o conjunto GUPFC-POD. Na forma compacta essas equações são explicitadas de acordo com a equação (148).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{GP} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_{GP} & J2_{GP} \\ J3_{GP} & J4_G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{GE} \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{GP} \\ B2_{GUPFC} \end{bmatrix} \cdot [\Delta u_{GUPFC}] \quad (148)$$

Eliminando-se o vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$  é obtida a formulação do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa na equação (149).

$$\Delta \dot{x}_{GP} = (J1_{GP} - J2_{GP} J4_G^{-1} J3_{GP}) \Delta x_{GP} + (B1_{GP} - J2_{GP} J4_G^{-1} B2_{GUPFC}) \Delta u_{GUPFC} \quad (149)$$

### 3.10.5 Inclusão dos Controladores ESPs e do Conjunto GUPFC-POD no MSP

Finalmente, para uma análise completa do SEP considerando a atuação das máquinas síncronas, RATs, ESPs, juntamente com o conjunto GUPFC-POD, todas as equações algébricas e diferenciais que representam os componentes apresentados neste Capítulo devem ser inseridos no MSP, e esta ação resultará em novas equações matriciais dadas por (150) e (151). As matrizes alteradas pela introdução desses dispositivos passarão a ser chamadas de  $J1_{GUTOTAL}$ ,  $J2_{GUTOTAL}$ ,  $J3_{GUTOTAL}$ ,  $B1_{GUTOTAL}$ . As matrizes que não sofrem influência dos controladores ESPs permanecem inalteradas e com a mesma nomenclatura  $J4_{GUPFC}$ ,  $B2_{GUPFC}$ .



$$\begin{aligned}
 & + \underbrace{\begin{bmatrix} [J2] \\ \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_i} \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_j} 0 \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_i} \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_j} 0 \\ \frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} \frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} 0 \frac{\partial X_1}{\partial V_i} \frac{\partial X_1}{\partial V_j} 0 \\ \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i} \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j} 0 \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_i} \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_j} 0 \\ \frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} \frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} 0 \frac{\partial X_2}{\partial V_i} \frac{\partial X_2}{\partial V_j} 0 \\ \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} 0 \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_i} 0 \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_k} \\ \frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} 0 \frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} \frac{\partial X_3}{\partial V_i} 0 \frac{\partial X_3}{\partial V_k} \\ \frac{\partial V_{qk}}{\partial \theta_i} 0 \frac{\partial V_{qk}}{\partial \theta_k} \frac{\partial V_{qk}}{\partial V_i} 0 \frac{\partial V_{qk}}{\partial V_k} \\ \frac{\partial X_4}{\partial \theta_i} 0 \frac{\partial X_4}{\partial \theta_k} \frac{\partial X_4}{\partial V_i} 0 \frac{\partial X_4}{\partial V_k} \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{\partial I_q}{\partial V_i} \quad 0 \quad 0 \\ \hline C_{11} \quad C_{12} \quad 0 \quad C_{13} \quad C_{14} \quad 0 \\ C_{21} \quad C_{22} \quad 0 \quad C_{23} \quad C_{24} \quad 0 \\ C_{31} \quad C_{32} \quad 0 \quad C_{33} \quad C_{34} \quad 0 \\ \hline 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \end{bmatrix}}_{J2_{GUTOTAL}} + \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \theta_n] \\ [\Delta V_n] \end{bmatrix}}_{\Delta z} + \underbrace{\begin{bmatrix} [B1] \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{K_{P1}}{T_{GUPFC}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_{I1}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{K_{P2}}{T_{GUPFC}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_{I2}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{K_{P3}}{T_{GUPFC}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_{I3}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{K_{P4}}{T_{GUPFC}} \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_{I4}} \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{K_{P5}}{T_{GUPFC}} \\ \hline 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \end{bmatrix}}_{B1_{GUTOTAL}} \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta P_{mec}] \\ [\Delta V_j^{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta V_i^{ref} \end{bmatrix}}_{\Delta u_{GUPFC}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [J3] \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{mj,i}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{mj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial P_{mj,i}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{mj,i}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_{mj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial P_{mj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{mj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial P_{mj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_{mj,i}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{mj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & \frac{\partial Q_{mj,i}}{\partial I_q} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_{mj,j}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial Q_{mj,j}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{mj,k}}{\partial V_{pk}} & 0 & \frac{\partial Q_{mj,k}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{J3_{GUTOTAL}} + \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \delta_k] \\ [\Delta \omega_k] \\ [\Delta E_{qk}] \\ [\Delta E_{fdk}] \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \\ \Delta V_{qk} \\ \Delta X_4 \\ \Delta I_q \\ \Delta X_5 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}}_{\Delta X_{GUTOTAL}}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_j} & \frac{\partial P_i^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial P_j}{\partial V_i} & \frac{\partial P_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_i^*}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_j^*}{\partial V_j} & 0 \\ \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_k} \end{bmatrix}}_{J4_G} + \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta \theta_n] \\ [\Delta V_n] \end{bmatrix}}_{\Delta Z} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B2_{GUPFC}} + \underbrace{\begin{bmatrix} [\Delta P^{mec}] \\ [\Delta V^{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta P_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta Q_j^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta P_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta Q_k^{ref} \\ \Delta V_i^{ref} \end{bmatrix}}_{\Delta U_{GUPFC}}$$

(151)

Por fim é apresentado na equação (152) a forma compacta das equações (150) e (151) que representam a modelagem completa de todos os componentes considerados no SEP.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{GUTOTAL} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_{GUTOTAL} & J2_{GUTOTAL} \\ J3_{GUTOTAL} & J4_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{GUTOTAL} \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{GUTOTAL} \\ B2_{GUPFC} \end{bmatrix} \cdot [\Delta u_{GUPFC}] \quad (152)$$

Com a eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$  obtém-se a formulação do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa segundo a equação (153).

$$\Delta \dot{x}_{GUTOTAL} = (J1_{GUTOTAL} - J2_{GUTOTAL} J4_G^{-1} J3_{GUTOTAL}) \Delta x_{GUTOTAL} + (B1_{GUTOTAL} - J2_{GUTOTAL} J4_G^{-1} B2_{GUPFC}) \Delta u_{GUPFC} \quad (153)$$

Cabe destacar que para cada novo ESP acoplado a um RAT implicará no surgimento de três novas variáveis de estado. Ou seja, três novas linhas e/ou colunas em determinadas matrizes do modelo ( $J1_{GUTOTAL}$ ,  $J2_{GUTOTAL}$ ,  $J3_{GUTOTAL}$  e  $B1_{GUTOTAL}$ ) deverão ser consideradas. Do mesmo modo esta análise será válida para cada conjunto GUPFC-POD instalado no SEP.

### 3.11 CONCLUSÕES

Neste Capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo linear para a análise de estabilidade de sistemas elétricos submetidos a pequenas perturbações, denominado de Modelo de Sensibilidade de Potência. Tal modelo foi obtido a partir de equações que descrevem o comportamento mecânico e elétrico de um sistema de potência genérico. Após o seu desenvolvimento matemático, foram feitas representações do sistema multimáquinas no domínio do tempo (na forma de espaço de estados).

Na sequência, o modelo dinâmico do GUPFC apresentado no Capítulo 2 foi incluso no MSP e as novas equações no domínio do tempo (modificadas pela inclusão do dispositivo FACTS) foram obtidas. Os controladores ESP e o conjunto GUPFC-POD foram modelados na Seção 3.5 e suas equações diferenciais foram apresentadas. Finalizando este Capítulo, o GUPFC, os controladores suplementares ESP e POD, foram adicionados de forma simultânea ao MSP. Este equacionamento resultou no modelo completo do sistema (equações (150) e (151)) que possibilita realizar a análise da estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

No próximo Capítulo será abordada a técnica de otimização *Novel Bat Algorithm*, que será utilizada para o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de

amortecimento ESPs e do conjunto GUPFC-POD. O objetivo da técnica é encontrar um ajuste que garanta níveis de amortecimento mínimos desejados aos modos oscilatórios de baixa frequência presentes no SEP.

## 4 TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO PARA PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Para que os controladores suplementares apresentados no Capítulo anterior atuem efetivamente no amortecimento dos modos oscilatórios de baixa frequência, seus parâmetros (constantes de tempo e ganho) devem ser corretamente ajustados. Esta necessidade levou, ao longo de décadas de pesquisa, ao desenvolvimento de uma série de métodos, que vão da teoria do controle clássico até os métodos de otimização bioinspirados. Os próximos parágrafos irão fundamentar alguns conceitos importantes que norteiam o pensamento na busca de alternativas eficientes para solucionar os mais diversos e complexos problemas dentro da engenharia.

Um primeiro conceito importante que se coloca aqui é o de otimização, que pode ser definido de forma simplificada como o esforço para obter a solução ideal de um problema em determinadas circunstâncias. A tarefa crucial da otimização é minimizar o desperdício de tempo ou maximizar algum benefício desejado de um determinado problema de engenharia. De forma geral, todo sistema a ser otimizado apresenta uma função objetivo e diversas variáveis de decisão que afetam esta função (RAO, 1996). Os métodos de otimização podem ser definidos como um processo de obtenção de soluções ótimas que satisfaçam uma determinada função objetivo (CHONG; ZAK, 2008), e seus algoritmos podem ser divididos em dois grupos: algoritmos determinísticos e estocásticos.

Algoritmos determinísticos não contêm operadores que causam aleatoriedade. Dessa forma, este tipo de algoritmo produz sempre o mesmo resultado, desde que suas condições iniciais permaneçam constantes. Por outro lado, devido à sua natureza aleatória, os algoritmos estocásticos tendem a produzir soluções diferentes a cada execução do algoritmo, mesmo quando suas condições iniciais permanecem constantes.

Os algoritmos estocásticos podem ser divididos em dois grupos: algoritmos heurísticos e meta-heurísticos. A classe dos algoritmos heurísticos produzem resultados de alta qualidade por métodos de teste e erro em um tempo computacional aceitável. O sufixo *meta* significa "além, em um nível superior", de modo que o termo meta-



heurística refere-se a um nível mais elevado de heurísticas. Alguns trabalhos recentes apresentados na literatura tendem a se referir a todos os novos algoritmos estocásticos como meta-heurísticos (BLUM; ROLI, 2003; YANG, 2013). Os algoritmos meta-heurísticos também podem ser inspirados na natureza, e daí passam a ser conhecidos como algoritmos bioinspirados. Os algoritmos bioinspirados contam com uma estrutura flexível e facilmente aplicável o que os tornou muito populares nos últimos anos.

Algoritmos de enxame são considerados como um subconjunto de algoritmos meta-heurísticos bioinspirados e foram desenvolvidos por meio de observações dos vários tipos de comportamento colaborativo dos enxames durante a realização de tarefas (GANDOMI et al., 2013). Na natureza são vários os exemplos de comportamentos coletivos inteligentes que deram origem a diversos algoritmos bioinspirados: o comportamento social de exame de abelhas, vagalumes, colônia de formigas, bandos de pássaros ou cardumes de peixes, são só alguns exemplos.

Existem dois componentes cruciais que afetam a característica de busca e por consequência a eficiência de um algoritmo: a exploração global diversificada (também chamada de diversificação) e a exploração local intensiva (também chamada de intensificação). A exploração global está relacionada à capacidade do algoritmo encontrar soluções promissoras ao buscar várias regiões desconhecidas, enquanto uma exploração local intensiva realiza melhoras sobre as soluções obtidas na fase de diversificação. A diversificação pode evitar que o algoritmo fique preso a ótimos locais, enquanto a intensificação pode aumentar a velocidade de convergência do algoritmo. O equilíbrio entre estes dois conceitos tende a tornar o algoritmo mais eficiente (TAN et al., 2009).

Assim, o objetivo principal deste Capítulo é apresentar de forma detalhada uma técnica de otimização baseada no algoritmo meta-heurístico chamado *Novel Bat Algorithm* (NBA) que foi inicialmente proposto por Meng *et al.* (2015). Esta técnica será modificada e seu desempenho avaliado para a solução do problema analisado nesta tese, ou seja, para o ajuste coordenado de controladores suplementares de amortecimento ESP e GUPFC-POD de modo que sejam fornecidas taxas de amortecimento especificadas em projeto aos modos oscilatórios de baixa frequência instáveis ou fracamente amortecidos presentes nos SEPs analisados neste trabalho.

## 4.2 O ALGORITMO DO MORCEGO

Um dos mais recentes algoritmos meta-heurísticos inspirados na natureza, o BA é baseado na avançada capacidade de ecolocalização que várias espécies de morcegos possuem. A ecolocalização é um tipo de sonar utilizado pelo morcego para localizar presas ou desviar de obstáculos mesmo em condições de total escuridão. Estudos apontam que existem cerca de 1000 diferentes espécies de morcegos, e entre estas espécies, os micromorcegos são os que mais utilizam a ecolocalização.

A taxa de pulso e a amplitude dos sons emitidos pelo morcego variam com a estratégia de caça. Dessa forma, quando uma possível presa é encontrada, a taxa de pulso ( $r_i$ ) e a intensidade do sinal sonoro ( $A_i$ ) crescem para evitar que ela escape. Porém, quando a presa é dominada, a intensidade do sinal sonoro diminui. Estudos mostram que a maioria das espécies de micromorcegos emitem ondas sonoras com frequência na faixa entre 20–150 kHz. Um micromorcego emite cerca de 10 a 20 sinais ultra-sônicos a cada segundo que tem uma duração média entre 5 e 20 ms. Mas, dependendo da estratégia de caça, a emissão de sinais pode chegar a 200 pulsos por segundo, e isso ocorre principalmente quando eles voam muito perto de suas presas. Este grande número de pulsos emitidos com tempos tão curtos, implicam em uma capacidade fantástica de processamento de sinal por parte desses micromorcegos. Pesquisas apontam que o tempo de integração no ouvido do morcego é tipicamente cerca de 300 a 400  $\mu$ s (YANG, 2010a).

No modelo computacional que emula o comportamento de morcegos virtuais, cada indivíduo representa uma possível solução para o problema. Uma população de morcegos move-se no espaço de busca a fim de atingir a solução ótima. Para isso, a cada nova interação, as frequências, as velocidades e as posições dos indivíduos são atualizadas, levando em consideração a melhor solução encontrada pela população. Como ocorre com outros algoritmos de computação evolucionária, o BA conta com um controle de exploração e intensificação por meio da variação da amplitude e da taxa de pulso, respectivamente.

O movimento do morcego virtual pelo espaço de busca é descrito nas equações (154) a (156) (YANG, 2010b).

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot \beta \quad (154)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*) \cdot f_i \quad (155)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (156)$$

Considerando o conjunto de equações (154) a (156),  $v_i^t$ ,  $x_i^t$ , são respectivamente, velocidade e posição do  $i$ -th indivíduo na iteração  $t$ ;  $f_i$ , é a variação da frequência do  $i$ -th indivíduo, cujos limites superior e inferior são respectivamente  $f_{max}$  e  $f_{min}$ ;  $\beta \in [0, 1]$ : é um número aleatório extraído de uma distribuição uniforme;  $x_*$  é a melhor solução encontrada até a geração  $t$ . Na equação (155) os vetores velocidade e posição têm a mesma dimensão. Como mostrado na equação (156), novas posições são geradas em torno das posições anteriores a cada geração  $t$ .

Durante o processo, é possível gerar novas soluções temporárias fazendo uma busca local em torno da melhor solução atual, conforme equação (157).

$$x_{temp}^t = x_* + \varepsilon \quad (157)$$

Na equação (157)  $\varepsilon$  é um número aleatório extraído de uma distribuição uniforme pertencente ao conjunto  $[-1, 1]$ . A intensidade  $A_i$  e a taxa de emissão de pulsos  $r_i$  variam durante o processo de busca local de acordo com as equações (158) a (159). Enquanto a taxa de pulsação exerce controle sobre a intensidade da busca local, a sonoridade exerce controle sobre a aceitação das novas soluções.

$$A_i^{t+1} = \mu \cdot A_i^t \quad (158)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \cdot [1 - e^{-\gamma t}] \quad (159)$$

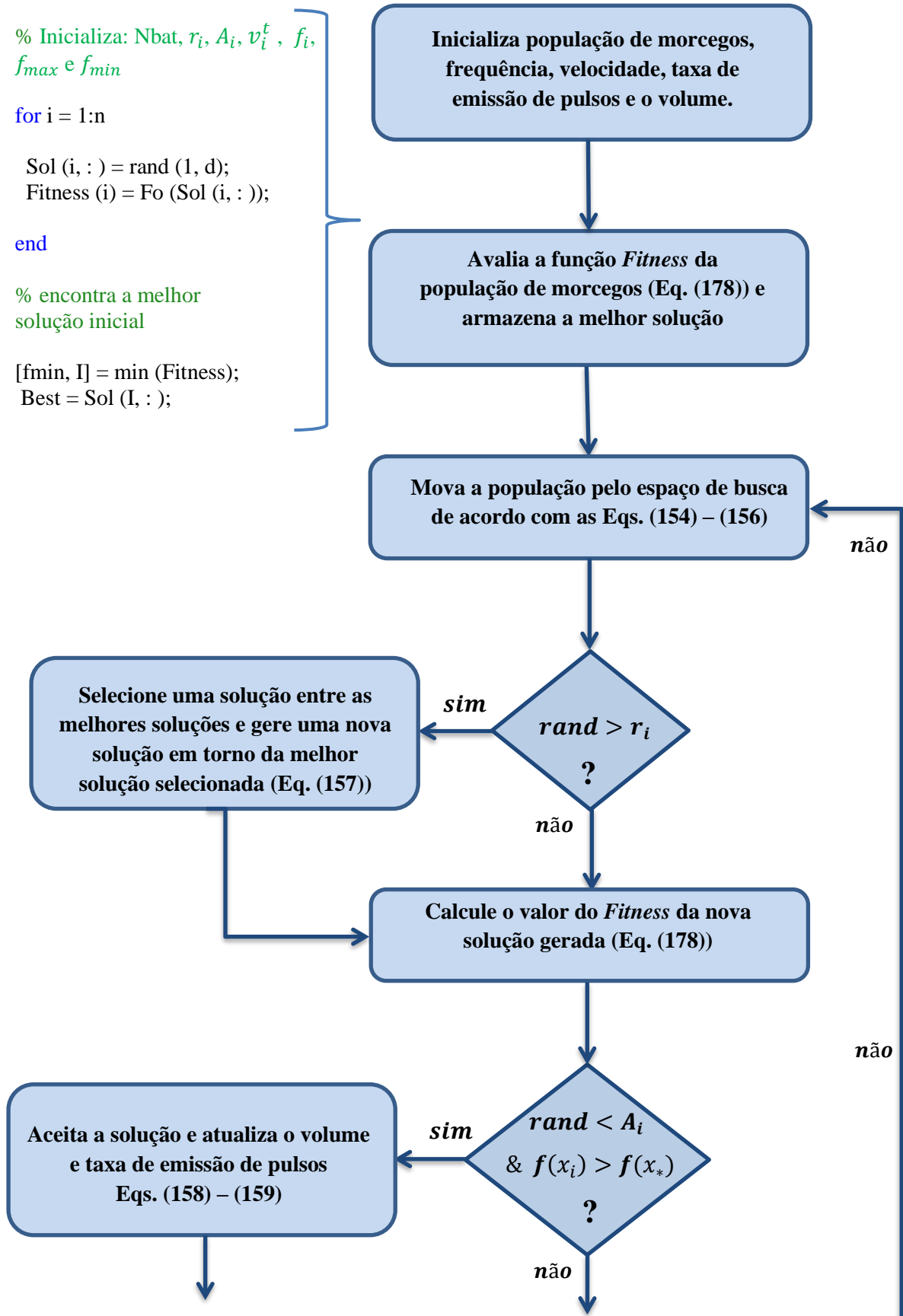
A solução ótima será alcançada quando:

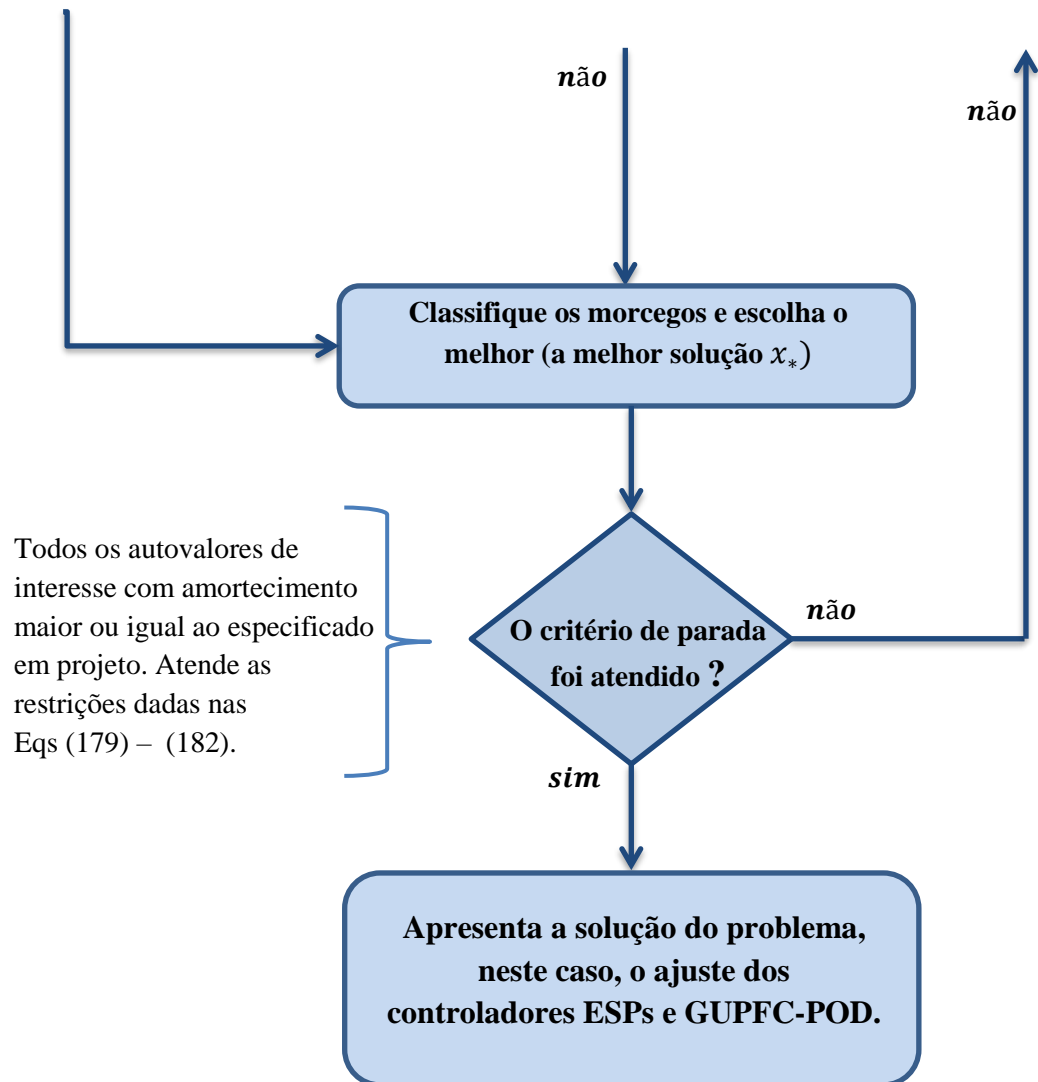
$$A_i^t \rightarrow 0, \quad r_i^t \rightarrow r_i^0, \quad t \rightarrow \infty \quad (160)$$

Em Yang (2010a) também foi verificado que a taxa de convergência do BA sofre influência de acordo com os valores dos parâmetros  $\mu$  e  $\gamma$ , que são fatores que ponderam a intensidade do sinal sonoro e a taxa de pulso, respectivamente. Também devem ser definidos os valores iniciais de intensidade  $A_0$  e taxa de emissão de pulsos  $r_0$ , respectivamente. Na

Figura 24 é apresentado um fluxograma simplificado do algoritmo do morcego clássico que irá ajudar o leitor na compreensão das seqüências de ações executadas pelo BA.

Figura 24 - Fluxograma do Algoritmo do Morcego (BA clássico)





Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3 NOVEL BAT ALGORITHM

No BA clássico não é considerada a influência do efeito Doppler na frequência do sinal emitido/recebido pelos morcegos e nem a diversificação do *habitat* na busca por alimentos. Isto faz com que o morcego virtual fique restrito a um espaço de busca limitado, e sua trajetória seja definida com base apenas em conceitos da mecânica clássica, o que resultará na busca de alimentos em um único *habitat*. Estas deficiências são resolvidas no NBA, que tem como foco principal aproximar mais o algoritmo da realidade biológica de algumas espécies de morcego para extrair vantagens que o tornam mais eficiente que o BA clássico e suas variações baseadas em hibridismos com outros algoritmos bioinspirados.

### 4.3.1 Efeito Doppler

O efeito Doppler é um fenômeno físico observado nas ondas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento em relação ao observador. Este efeito foi descrito teoricamente pela primeira vez em 1842 por Johann Christian Andreas Doppler, recebendo o nome Efeito Doppler em sua homenagem.

Estudos mostram que os micromorcegos utilizam o tempo de atraso entre a emissão e detecção do eco, a diferença de tempo entre suas orelhas e as variações de sonoridade do eco, para construir um cenário tridimensional do entorno. Eles medem a distância e orientação do alvo, o tipo de presa e sua velocidade, mesmo sendo ela um pequeno inseto. Alguns estudos sobre este assunto sugerem que os morcegos parecem discriminar os alvos segundo a variação do efeito Doppler induzido pela taxa de batimento das asas dos insetos-alvo (YANG, 2010b). No NBA o efeito Doppler é incorporado ao BA clássico e cada morcego compensa de forma adaptativa as consequências desse efeito de acordo com a proximidade de seu alvo, como descrito na equação (161).

$$f_r = \frac{v \pm v_r}{v \mp v_s} \cdot f_s \quad (161)$$

Na equação (161),  $f_s$  e  $f_r$  são as frequências da fonte e receptor respectivamente; e  $v_r$  e  $v_s$  são as velocidades do receptor e da fonte respectivamente. Por fim,  $v$  é a velocidade da onda no meio. Supondo que fonte e receptor estão em movimento então o sinal positivo (+) será usado quando a fonte e receptor estão se aproximando um do outro e o sinal negativo (-) no caso contrário. Conclui-se que a frequência da fonte diminui se fonte e receptor se afastam um do outro, em caso contrário, a frequência aumenta.

### 4.3.2 Análise da Trajetória de uma Partícula com Comportamento Quântico

Da perspectiva da mecânica quântica, os limites definidos para o espaço quântico são totalmente diferentes daqueles definidos para o espaço Newtoniano, o qual está relacionado com as leis fundamentais da mecânica clássica. Lembrando que as equações que descrevem o movimento de um indivíduo (morcego) no BA clássico obedecem às leis da mecânica clássica. Então, se a perspectiva quântica for inserida ao BA clássico, é possível que isso leve

a uma forma muito diferente de operação do algoritmo, com características de desempenho muito interessantes, mas que precisam ser avaliadas com bastante cuidado.

No quadro tempo-espaço quântico, o estado quântico de uma partícula é descrito por uma função onda  $\Psi(X, t)$ . Se um espaço tridimensional for considerado, a função onda de uma partícula  $\Psi(X, t)$  deve satisfazer a seguinte relação dada na equação (162).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dx dy dz = \int_{-\infty}^{\infty} Q dx dy dz \quad (162)$$

Na equação (162)  $Q dx dy dz$  é a probabilidade que a partícula irá aparecer no elemento infinitesimal sobre o ponto  $(x, y, z)$ . Ou seja,  $|\Psi|^2 = Q$  representa a função densidade de probabilidade que deve satisfazer a equação (163).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dx dy dz = \int_{-\infty}^{\infty} Q dx dy dz = 1 \quad (163)$$

A equação (163) dá uma interpretação estatística para a função onda. Geralmente,  $\Psi(X, t)$  varia no tempo de acordo com a equação (164).

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(X, t) = -\hat{H} \Psi(X, t) \quad (164)$$

Na equação (164)  $\hbar$  é a constante de Planck,  $i$  é a raiz quadrada de -1 e  $\hat{H}$  é o operador Hamiltoniano definido na equação (165).

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(X) \quad (165)$$

Em (165) é considerado uma partícula única de massa  $m$  movendo-se em um campo potencial  $V(X)$  bem definido, já a equação (164) é conhecida na literatura com a equação de Schrödinger na sua forma dependente do tempo. A equação de Schrödinger é a equação fundamental da mecânica quântica.

Para investigar matematicamente a trajetória de uma partícula com comportamento quântico, o problema será simplificado de forma a focar a análise na trajetória considerando uma única partícula. Em Sun *et al.* (2012) assume-se que cada partícula se mova em um espaço de busca de Hilbert, unidimensional, com um potencial  $\delta$  bem centralizado em  $p$  com

uma determinada energia. Usando o método de Monte Carlo, a posição da partícula pode ser encontrada de acordo com a equação (166).

$$X = p \pm \frac{L}{2} \ln\left(\frac{1}{u}\right) \quad (166)$$

Sendo  $L$  dado pela equação (167).

$$L = \frac{\hbar^2}{m\gamma} \quad (167)$$

Onde  $u$  é um número extraído de uma distribuição uniforme no intervalo  $[0, 1]$ ,  $m$  é a massa de uma partícula,  $\gamma$  é a intensidade de potencial e  $p$  é um atrator local para cada partícula. Além disso, em Sun et al. (2012) foi generalizada a situação em que  $M$  partículas buscam no espaço  $N$ -dimensional de Hilbert com um certo potencial  $\delta$  em cada dimensão. Desta forma, a  $j$ -th ( $1 \leq j \leq N$ ) componente da  $i$ -th ( $1 \leq i \leq M$ ) posição da partícula na iteração  $t$  pode ser descrita da seguinte forma:

$$X_{ij}^{t+1} = p_{ij}^t \pm \frac{L_{ij}^t}{2} \ln\left(\frac{1}{u_{ij}}\right) \quad (168)$$

$$L_{ij}^{t+1} = 2\theta |Mbest_j^t - x_{ij}^t| \quad (169)$$

$$Mbest_j^t = \frac{1}{N} * \sum_i^N x_{ij}^t \quad (170)$$

Onde,  $\theta$  é um coeficiente de atração-expansão e  $u_{ij}$  um número aleatório extraído de uma distribuição uniforme entre  $[0, 1]$  e diferente de zero.

### 4.3.3 Seleção de *Habitats*

Outra adequação importante no NBA é a diversificação dos *habitats* de busca de alimento pela adição do comportamento quântico além do comportamento mecânico já existente no BA clássico. Considerando aspectos teóricos da física quântica, é possível afirmar que uma partícula com comportamento quântico pode aparecer em qualquer posição dentro do espaço de busca com uma certa probabilidade (SUN et al., 2012). Assim, os



morcegos no NBA podem buscar alimentos em uma quantidade maior de *habitats*, devido à introdução da mecânica quântica no algoritmo.

Como a seleção do *habitat* depende de vários fenômenos aleatórios, para facilitar a compreensão, ela será modelada com uma decisão estocástica. Se  $P \in [0, 1]$  representa a probabilidade da seleção de *habitat* e  $R$  um número aleatório de distribuição uniforme entre  $[0, 1]$ , for menor que  $P$ , os morcegos irão escolher o comportamento quântico para busca por alimentos em uma gama maior de *habitats*. Caso contrário, eles optam pelo comportamento mecânico e a diversificação fica comprometida, tornando a busca limitada muitas vezes a um único lugar.

#### 4.3.4 Comportamento Quântico e Comportamento Mecânico

Os morcegos virtuais no NBA podem buscar alimentos num universo maior de *habitats* graças a possibilidade de alternância entre o comportamento mecânico e o comportamento quântico. A posição de um indivíduo (morcego) durante o comportamento quântico é formulada na equação (171).

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} g_j^t + \theta \cdot |Mbest_j^t - x_{ij}^t| \cdot \ln\left(\frac{1}{u_{ij}}\right), & \text{if } rand_j(0,1) < 0.5, \\ g_j^t - \theta \cdot |Mbest_j^t - x_{ij}^t| \cdot \ln\left(\frac{1}{u_{ij}}\right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (171)$$

Na equação (171)  $g_j^t$  é a melhor posição global da população de morcegos,  $\theta$  é um coeficiente de atração-expansão e  $u_{ij}$  um número aleatório extraído de uma distribuição uniforme entre  $[0, 1]$  e diferente de zero. Nesta tese a forma como é calculado o valor do  $Mbest_j^t$  foi alterada em relação ao algoritmo originalmente proposto por Meng et al. (2015), que considerava a média das posições  $x_{ij}^t$  de todos os morcegos da população na iteração  $t$ , agora apenas as melhores posições relativas aos indivíduos da população são considerados na média do  $Mbest_j^t$ . Desse modo, há uma atração maior dos indivíduos da população para regiões que apresentem soluções mais promissoras.

Porém, se o comportamento mecânico for selecionado, este apresentará algumas mudanças sutis em relação ao equacionamento apresentado no BA clássico para o cálculo do movimento dos morcegos, conforme descrito nas equações (172) a (175). Um peso de inércia  $w$  é adicionado para atualizar a velocidade e controlar a taxa de influência da velocidade

anterior do indivíduo. Nesta tese cada indivíduo da população assume um peso de inércia  $w$  diferente, que é escolhido aleatoriamente. No algoritmo original este peso de inércia é calculado para cada indivíduo de forma semelhante ao algoritmo PSO, ou seja, decresce linearmente com o número de iterações durante o processo de busca de uma solução ótima. Uma taxa de compensação  $C$ , variável com cada indivíduo, foi adicionada ao NBA de forma que os morcegos possam autocompensar o efeito Doppler do eco.

$$f_{i,j} = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot rand(0,1) \quad (172)$$

$$f_{i,j}^* = \frac{(c + v_{i,j}^t)}{c + v_{g,j}^t} \cdot f_{i,j} \cdot \left( 1 + C_i \cdot \frac{(g_j^t - x_{i,j}^t)}{|g_j^t - x_{i,j}^t| + \varepsilon} \right) \quad (173)$$

$$v_{i,j}^{t+1} = w \cdot v_{i,j}^t + (g_j^t - x_{i,j}^t) \cdot f_{i,j}^* \quad (174)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \quad (175)$$

Nas equações (172) a (175),  $w \in [0,1]$  é um vetor randômico uniforme,  $\varepsilon$  é uma pequena constante computacional para evitar erro de divisão por zero e  $C$  é um número positivo tal que  $C \in [0,1]$ . Se  $C$  igual a zero não há compensação de efeito Doppler, enquanto  $C$  igual a 1 significa compensação total. O  $C$  de cada indivíduo é atribuído aleatoriamente. A variável  $c$  representa a velocidade do som no ar ( $c = 340$  m/s), e  $v_{g,j}^t$  a velocidade correspondente a melhor posição global. Observe que a velocidade de cada morcego não deve exceder a velocidade do som.

#### 4.3.5 Busca Local

Durante a fase de pesquisa local no entorno de sua presa, uma nova posição para cada morcego é gerada de acordo com as equações (176) e (177).

$$x_{i,j}^{t+1} = g_j^t \cdot (1 + rand\ n(0, \sigma^2)) \quad (176)$$

$$\sigma^2 = |A_i^t - A_{mean}^t| + \varepsilon \quad (177)$$

Nas equações (176) e (177),  $rand\ n(0, \sigma^2)$  é uma distribuição Gaussiana com média zero e desvio padrão  $\sigma^2$ , enquanto  $\varepsilon$  é usado para garantir que  $\sigma^2 > 0$ . E  $A_{mean}^t$  é a média da intensidade de todos os morcegos na iteração  $t$ . Na equação (177) a intensidade relativa entre a intensidade de um morcego específico e a intensidade média de todos os morcegos é considerado um fator de influência quando os morcegos procuram localmente em torno de suas presas.

Quanto à atualização do volume e taxa de emissão de pulsos, estas são atualizadas da mesma forma que no BA clássico. Além disso, quando nenhum morcego encontrar uma solução (presa) melhor que a anterior durante várias gerações ( $G$ ), ou seja, está preso em um ótimo local, o NBA força a população de morcegos a procurar alimento em outro lugar (explorar novos *habitats*). Para isso os volumes  $A_i$  de todos os morcegos são inicializados novamente, e a taxa de pulso  $r_i$ , pode ser temporariamente definida com um valor alto, incentivando a pesquisa global.

Como discutido nos parágrafos anteriores o NBA possui cinco parâmetros a mais que o BA clássico:  $P$ ,  $G$ ,  $C$ ,  $\theta$ ,  $w$ , e seus valores serão discutidos e apresentados na Seção 5.4. Cabe salientar que estes novos parâmetros foram exaustivamente testados e tiveram seus valores modificados nesta tese em relação ao algoritmo proposto por Meng et al. (2015) de forma a melhor adapta-los ao problema tratado neste trabalho. O pseudocódigo do NBA, adaptado ao problema de ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESP e GUPFC-POD, é apresentado na Figura. 25.

Figura 25 - Estrutura de funcionamento do algoritmo NBA para o ajuste de controladores suplementares de amortecimento ESP e GUPFC-POD

---

**Algoritmo :** *Ajuste dos controladores ESPs e GUPFC-POD pelo NBA*

---

1. Inicialize os parâmetros do BA clássico:  $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $f_{min}$ ,  $f_{max}$ ,  $A_0$ ,  $r_0$  número de indivíduos ( $n_{bat}$ ), número máximo de iterações ( $M$ );
  2. Inicialize a população e os parâmetros específicos do NBA:  $P$ ,  $G$ ,  $C$ ,  $\theta$ ,  $w$ ;
  3. Avalie a função objetivo para cada indivíduo;
  4. Avalie o melhor indivíduo da população;
  5. **While** critério de parada não atingido **do**
  6.     **If** ( $rand(0, 1) < P$ )
  7.         Gera novas soluções usando a Equação (171);
  8.     **Else**
  9.         Gera novas soluções usando as Equações (172) - (175);
  10.    **end If**
  11.    **If** ( $rand(0, 1) > r_i$ )
  12.         Gere uma solução local ao redor da melhor solução usando as Equações (176) e (177);
-

- 
13. **End If**
  14. Avalie a função objetivo para cada indivíduo;
  15. Atualize as soluções, a intensidade e a taxa de emissão de pulsos usando as Equações (158) e (159);
  16. Classifique as soluções e encontre a melhor solução atual  $g_j^t$ ;
  17. **If**  $g_j^t$  não obteve melhora durante  $G$  gerações
  18. Reinicialize a intensidade  $A_i$  e defina taxas de pulsos temporárias  $r_i$  utilizando um número aleatório extraído da distribuição entre [0.85, 0.95];
  19. **end If**
  20. Incremente a geração e o contador  $t$ ;
  21. **end While**
  22. Apresente a melhor solução obtida (o melhor ajuste para os controladores ESPs e GUPFC-POD);
  23. **end.**
- 

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4 ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Tendo sido o SEP modelado de acordo com o procedimento apresentado no Capítulo 3 e representado na forma de espaço de estado (conforme equação (116)), é possível verificar a sua estabilidade, ou a falta dela, através da análise dos autovalores da matriz de estados  $A$ . Se a instabilidade às pequenas perturbações for verificada (ou se existem modos oscilatórios fracamente amortecidos), é proeminente que seja fornecido amortecimento adequado a esses modos de forma a aumentar a margem de estabilidade do SEP frente à ocorrência de pequenas perturbações. Esse problema motivou o surgimento de controladores suplementares que tem como objetivo aumentar a margem de estabilidade do SEP. Neste trabalho o ESP e o conjunto GUPFC-POD tiveram seus modelos dinâmicos apresentados no Capítulo 3 e suas equações foram inseridas à modelagem do SEP.

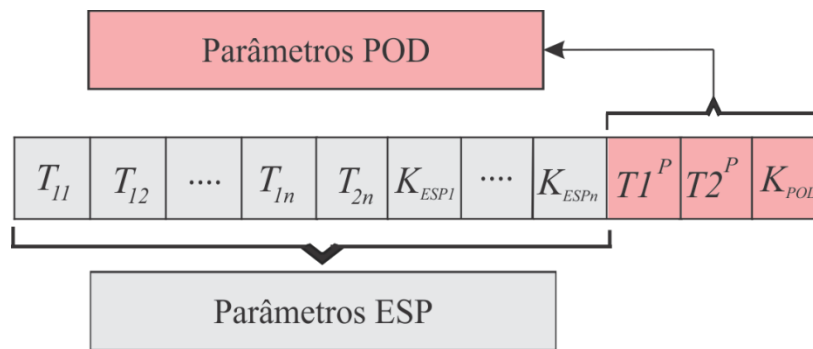
Porém, para que o efeito desses controladores suplementares seja sentido de forma positiva, o ajuste de seus parâmetros (constantes de tempo e ganhos) deve ser realizado de forma correta. Para encontrar um ajuste factível para estes controladores, um grande número de técnicas foram desenvolvidas e apresentadas ao longo das últimas décadas, alguns exemplos foram citados no Capítulo 1. Se o ajuste dos controladores suplementares for eficiente, então, os autovalores de interesse serão deslocados para regiões do semiplano esquerdo que atendem às especificações de projeto destes controladores (veja Figura 27).

Este trabalho utiliza modelos equivalentes para representar o controlador ESP e o controlador POD (veja Figuras 18 e 22). Estes controladores são representados por um ganho

estático ( $K_{ESP}$  e  $K_{POD}$ ), um bloco de filtro (*washout*) com uma constante de tempo  $T_w$ , e por dois blocos de avanço e atraso de fase, representado por quatro constantes de tempo. Nesse trabalho é adotado para ambos os controladores  $T_1 = T_3$  e  $T_2 = T_4$  e  $T_w = 1(s)$  para o ESP,  $T1^P = T3^P$  e  $T2^P = T4^P$  e  $T_w^P = 10(s)$  para o conjunto GUPFC-POD.

Para a formulação do método de ajuste proposto, considere um SEP multimáquinas com  $n$  controladores ESP instalados em  $n$  máquinas síncronas e equipado com um conjunto GUPFC-POD. No modelo computacional, cada morcego virtual representa uma possível solução para o problema, que é codificado na forma de um vetor, como mostrado na Figura 26, composto pelos ganhos e constantes de tempo dos controladores ESPs e POD. Ou seja, quando um indivíduo da população (morcego) encontrar uma solução factível para o problema, que atenda todas as especificações de projeto, este indivíduo estará encontrando um ajuste (constantes de tempo e ganhos para todos os controladores) que leva os autovalores de interesse para regiões do plano complexo que atendem as especificações de projeto. Em outras palavras, o vetor apresentado na Figura 26 está intimamente relacionado com a posição  $x_{ij}^t$  que o indivíduo  $i$  da população assume a cada nova interação  $t$  do processo de busca das soluções ótimas.

Figura 26 - Representação de um indivíduo no NBA



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observe que as primeiras  $n$  posições de cada indivíduo apresentadas na Figura 26 são destinadas às  $n$  constantes de tempo  $T_{1n} - T_{4n}$  dos  $n$  controladores ESPs. A posição  $n+1$  refere-se aos os  $n$  ganhos  $K_{ESP}$  dos  $n$  controladores ESPs. Continuando nesta sequência, as últimas posições do vetor são destinadas às constantes de tempo  $T1^P - T4^P$  do conjunto GUPFC-POD e na última posição do vetor ao ganho  $K_{POD}$ .

O objetivo da abordagem utilizada é encontrar um ajuste para os controladores suplementares que minimize a equação (178) e atenda ao conjunto de restrições definidas nas equações (179) a (182). Essas restrições impõem os limites máximos e mínimos das

constantes de tempo e ganho dos controladores suplementares, bem como estabelece um amortecimento mínimo ( $\xi_i^{min}$ ) para os autovalores de interesse maior ou igual ao amortecimento especificado em projeto ( $\xi^{des}$ ). Além disso, a restrição  $\sigma_i \leq \sigma^{min}$  determina um valor mínimo para parte real dos autovalores de interesse.

$$Fo = \min \sum_{i=1}^{np} |\xi_i^{cal} - \xi^{des}| \quad (178)$$

$$T_{1n}^{min} \leq T_{1n} \leq T_{1n}^{max}, \quad T_{2n}^{min} \leq T_{2n} \leq T_{2n}^{max}, \quad K_{ESP}^{min} \leq K_{ESP} \leq K_{ESP}^{max} \quad (179)$$

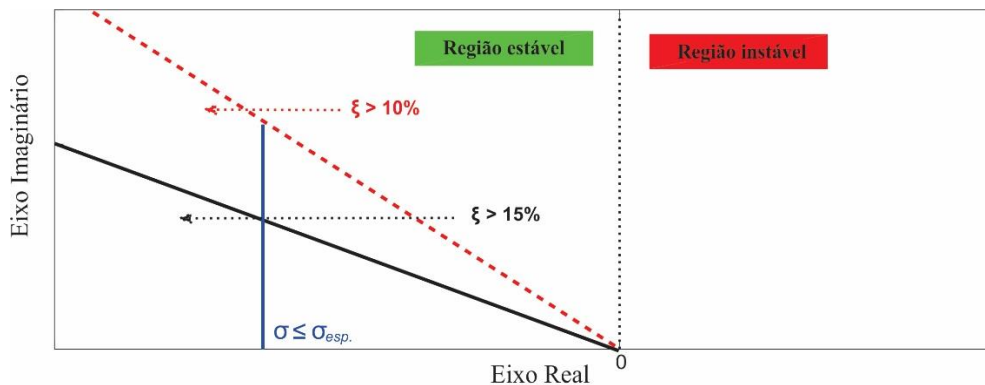
$$T_{1min}^P \leq T1^P \leq T_{1max}^P, \quad T_{2min}^P \leq T2^P \leq T_{2max}^P, \quad K_{POD}^{min} \leq K_{POD} \leq K_{POD}^{max} \quad (180)$$

$$\xi_i^{min} \geq \xi^{des} \quad (181)$$

$$\sigma_i \leq \sigma^{min} \quad (182)$$

Na equação (178) é representada a função objetivo utilizada neste trabalho que consiste em minimizar o módulo da diferença entre o amortecimento calculado  $\xi_i^{cal}$  e o amortecimento desejado  $\xi^{des}$ , sendo  $np$  o número de autovalores com amortecimento inferior ao amortecimento desejado, conforme especificado no projeto dos controladores. Para isso, os autovalores de interesse  $\lambda_i^{cal}$  (modos oscilatórios de baixa frequência presentes no SEP) devem ser deslocados para o semiplano esquerdo do plano complexo em uma região que atenda às especificações de amortecimento mínimo estabelecidas na fase de projeto. Na Figura 27 são ilustradas as regiões de interesse para a alocação desses autovalores. Nesta figura são destacadas duas regiões, a primeira com amortecimento desejado maior que 10% e a segunda com amortecimento desejado maior que 15%. Para ambas as regiões, especifica-se um valor máximo para a parte real dos autovalores de interesse dada na restrição (182).

Figura 27- Região de localização dos autovalores desejados



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.5 CONCLUSÕES

Neste Capítulo foi apresentada uma técnica de otimização bioinspirada chamada *Novel Bat Algorithm* que é derivada do algoritmo do morcego clássico (*Bat Algorithm*). As principais diferenças e modificações implementadas no NBA em relação ao BA clássico foram enfatizadas. Também foram apresentados alguns aspectos importantes relacionadas à formulação do problema de otimização proposto: Função Objetivo, restrições, representação da estrutura para um indivíduo.

No próximo Capítulo serão apresentados alguns resultados a respeito da inclusão do GUPFC no SEP para controle dos fluxos de potência e melhoria do perfil de tensão dos sistemas testes analisados (sistema simétrico de duas áreas e sistema *New England*). Também será analisada a eficiência do NBA no ajuste coordenado dos controladores suplementares ESPs e GUPFC-POD adicionados ao SEP com o objetivo de aumentar as margens de estabilidade para diferentes níveis de amortecimento e variações nos cenários operacionais. Análises estatísticas serão realizadas para comparar o desempenho do NBA com outras técnicas de ajuste de controladores bastante difundidas na literatura (PSO, BFO, AG e BA).

## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são apresentados os resultados de uma série de simulações realizadas em dois *benchmarks* conhecidos na literatura como “sistema Simétrico de Duas Áreas” e “sistema *New England*”. Ambos os SEPs são bastante utilizados em estudos de estabilidade a pequenas perturbações por apresentarem modos de oscilação dos tipos local e interárea. O *MatLab* foi utilizado para implementação de todos os programas computacionais utilizados nesta tese, ou seja, o fluxo de potência expandido, o modelo de injeção de potência do GUPFC e sua estrutura de controle, o SEP através do MSP, e os cinco métodos bioinspirados utilizados nas comparações realizadas nesta tese. O hardware utilizado nas simulações foi um computador equipado com processador *Intel Core I7 2,4 GHz* com 8 GB de memória RAM (1600 MHz DDR3).

Nas seções 5.3 e 5.5 será avaliada a eficiência do dispositivo FACTS GUPFC no controle de fluxos de potência, na melhoria do perfil global de tensão, na redução das perdas no sistema de transmissão, e na estabilidade a pequenas perturbações nos dois SEPs analisados. Como descrito no Capítulo 2, o GUPFC foi modelado para controlar a tensão do barramento comum de instalação e mais quatro fluxos de potências ativa e reativa nas duas linhas de transmissão que ele gerencia.

Na seção 5.4 será realizada uma análise mais aprofundada da estabilidade a pequenas perturbações, onde os controladores suplementares ESP e GUPFC-POD são inseridos nos sistemas testes com o objetivo de fornecer taxas de amortecimento suplementar, especificadas em projeto, aos modos oscilatórios de baixa frequência (local e interárea). Entretanto, para que estes controladores atuem efetivamente na manutenção da estabilidade do SEP, fornecendo amortecimento adicional aos modos oscilatórios de baixa frequência, é necessário que seus parâmetros (constantes de tempo e ganhos) sejam corretamente ajustados. Neste sentido, um dos objetivos desta tese é avaliar o desempenho do método apresentado no Capítulo 4 (NBA) para o ajuste dos parâmetros desses controladores.

Para validar os resultados e a eficiência da metodologia tratada neste trabalho, serão realizadas comparações e análises estatísticas com o desempenho de outras quatro técnicas bioinspiradas: PSO, BFO, AG e o BA. Também foram estabelecidas duas faixas de amortecimento desejado ( $\xi^{des} \geq 10\%$  e  $\xi^{des} \geq 15\%$ ) aos modos oscilatórios de interesse,

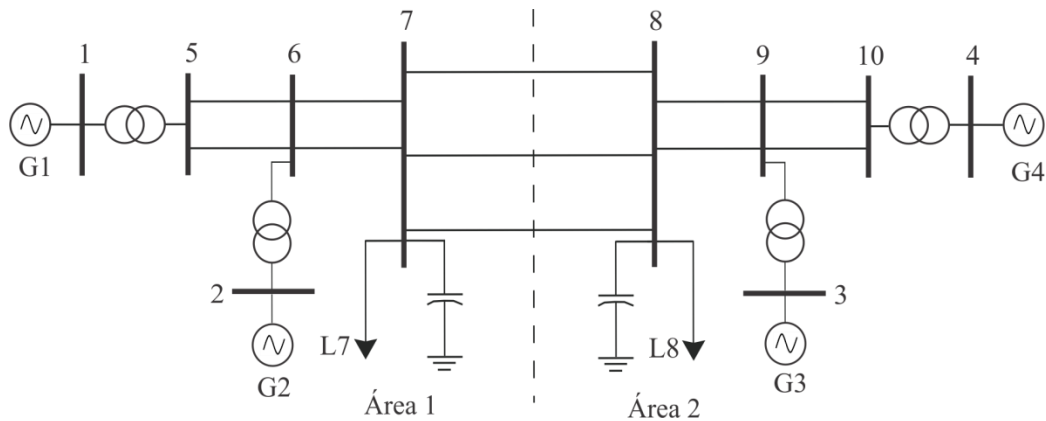


além de submeter o sistema teste a 24 diferentes cenários de carga, possibilitado avaliar a qualidade do ajuste encontrado pelo NBA.

## 5.2 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS – SEM A ATUAÇÃO DE CONTROLADORES

O primeiro SEP analisado nesta tese é conhecido como sistema simétrico de duas áreas. Inicialmente será avaliada a sua estabilidade para o ponto de operação que representa o caso base (SAUER; PAI, 1998), sem a introdução de controladores suplementares. Seu diagrama unifilar é apresentado na Figura 28, e seus dados estão disponíveis em Tabelas apresentadas no Anexo A.

Figura 28 - Diagrama Unifilar: Sistema simétrico de duas áreas sem controladores



Fonte: Adaptado de Kundur (1994).

Com os dados do primeiro sistema teste, mais o ponto de operação inicial, é construído o modelo do SEP na forma de espaço de estados utilizando as variáveis de estado e algébricas provenientes do desenvolvimento matemático apresentado no Capítulo 3. Desse modelo são obtidos os autovalores da matriz de estados  $A$  (equações (109) e (110)) para este sistema teste.

São dezesseis os autovalores obtidos da matriz  $A$ , sendo que dez deles são reais negativos, correspondendo, no domínio do tempo, a parcelas de respostas descritas por exponenciais decrescentes, que quando o tempo tende a infinito assumem o valor zero.

Os seis autovalores restantes correspondem a três pares complexos conjugados e estão representados na Tabela 1 incluindo as taxas de amortecimento  $\zeta$  (em p.u.) e a frequência natural não amortecida  $\omega_n$  (em rad/s e Hz) a eles associados. Na Tabela 1, L1 e L2 representam os modos locais e I o modo interárea.

Tabela 1 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas sem atuação de controladores

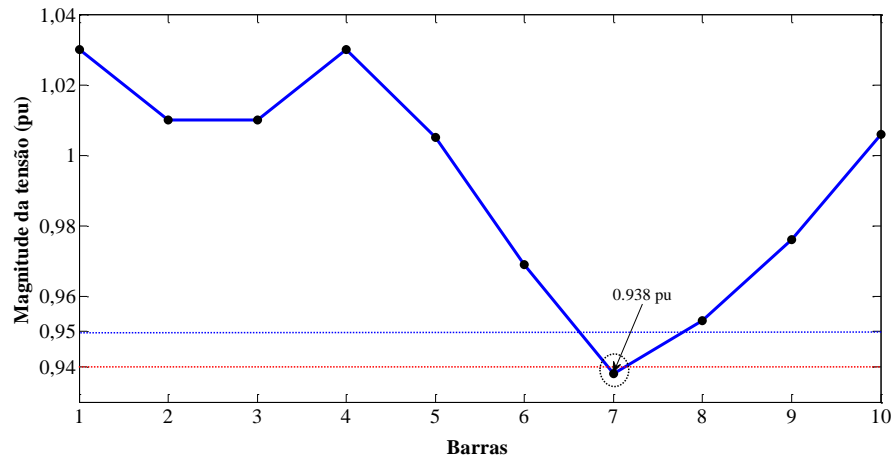
Modo	Autovalores	$\zeta$ (p.u.)	$\omega_n$ (rad/s)	$\omega_n$ (Hz)
L1	$-0,2356 \pm j 6,2956$	0,0374	6,299	1,003
L2	$-0,1585 \pm j 5,8779$	0,0270	5,879	0,936
I	$0,0460 \pm j 4,1382$	-0,0111	4,138	0,659

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A frequência dos modos oscilatórios mostrados na Tabela 1 leva a conclusão que o sistema em estudo possui dois modos locais de oscilação estáveis (cujas frequências típicas ocorrem na faixa de 0,8 a 2,0 Hz). O outro modo oscilatório corresponde a um modo interárea de oscilação (cujas frequências típicas ocorrem na faixa de 0,1 a 0,7 Hz) (KUNDUR, et al 1989), e para este caso o autovalor apresenta parte real positiva, caracterizando a instabilidade do SEP, enquanto os modos locais possuem parte real negativa, que determina uma resposta transitória caracterizada por oscilações de amplitude decrescentes no domínio do tempo tendendo a zero em regime permanente.

Considerando ainda o caso base, na Figura 29 é mostrado o perfil de tensões do SEP após a solução do fluxo de potência. Observa-se que além do problema relacionado à instabilidade oscilatória devido ao modo interárea verificado após análise da Tabela 1, tem-se também um problema relacionado ao baixo nível de tensão em uma das barras do sistema teste (barra 7 que possui tensão igual a 0,938 p.u.). Desse modo, nas próximas seções serão analisadas alternativas de solução para os problemas apontados até aqui para este sistema teste.

Figura 29 - Perfil de tensão: Sistema simétrico de duas áreas sem a atuação de controladores



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

### 5.3 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS – GUPFC INCLUSO NO SEP

O diagrama unifilar do sistema simétrico de duas áreas após a inclusão do dispositivo GUPFC passa a ser representado conforme a Figura 30. O FACTS foi instalado em duas das três linhas que interligam as barras 7 e 8, utilizando como referência a barra 7. A nova configuração após a instalação do GUPFC adiciona duas barras (F1 e F2) e dois ramos novos, nos quais estão inseridas as reatâncias dos transformadores de acoplamento ( $X_{in}$ , com  $n = j, k$ ) cujo valor é de 0,01 p.u. Dessa forma, o sistema passa a ser composto por 4 geradores, 12 barras e 17 ramos.

A escolha deste local deve-se ao fato da barra 7 apresentar o pior nível de tensão do sistema em estudo. Além disso, é um local onde as linhas de transmissão que ligam a barra 7 a 8 possuem alta reatância indutiva (quando comparada com as demais), o que permite maior margem de compensação pelo GUPFC. Outro fator motivador dessa escolha é o fato desse local possuir uma linha de transmissão de folga (a terceira linha entre as barras 7 e 8 não é controlada pelo dispositivo FACTS).

Considerando-se que a mudança nos valores de referência do controle da tensão e dos fluxos de potências ativa e reativa realizados pelo GUPFC causa variações nos valores dos parâmetros do controlador POD, o problema de subtensão na barra 7 será primeiramente solucionado para depois então tratar o problema de instabilidade oscilatória causada pelo modo interárea instável. Na validação do modelo do GUPFC não foram impostas restrições quanto à capacidade de compensação reativa nas linhas de transmissão que o dispositivo gerencia, nem da capacidade de injeção de potência

reativa no barramento comum de instalação do GUPFC embora os valores encontrados durante as simulações estejam coerentes com casos reais encontrados na literatura para outros dispositivos FACTS (GYUGYI et al., 1995; UZUNOVIC et al., 2001).

Os resultados seguintes consideram quatro estudos de caso onde o dispositivo GUPFC está incluso no sistema teste, e são descritos da seguinte forma:

- Caso I – O GUPFC está inserido no SEP, porém sem exercer nenhuma influência sobre ele (não controla fluxos e não corrige tensão na barra comum de instalação);
- Caso II – O GUPFC atua sobre a tensão da barra 7 corrigindo seu valor para 1,0 p.u. sem modificar os fluxos nas linhas onde está instalado (considera-se os fluxos de potências ativa e reativa iguais aos valores encontrados no caso base);
- Caso III – O GUPFC mantém a tensão na barra 7 em 1,0 p.u. e altera os fluxos de potência ativa nas linhas controladas incrementando em 10% os valores encontrados no caso base. Já para os fluxos de potência reativa o incremento foi de 80% dos valores encontrados no caso base;
- Caso IV - É suposto um congestionamento dos fluxos de potência ativa nas linhas controladas pelo dispositivo, ou seja, os limites térmicos dessas duas linhas são violados quando os fluxos de potência ativa tornam-se maiores que 55 MW (caso hipotético). Para isso o GUPFC deve limitar os fluxos de potência ativa nas linhas controladas em 55 MW. Ainda para o Caso IV, os fluxos de potência reativa foram mantidos 80% maiores que os do caso base, porém, foram especificados em sentidos opostos ao do Caso III (o GUPFC tem a capacidade de realizar a inversão dos fluxos de potência nas linhas de transmissão em que exerce o controle).

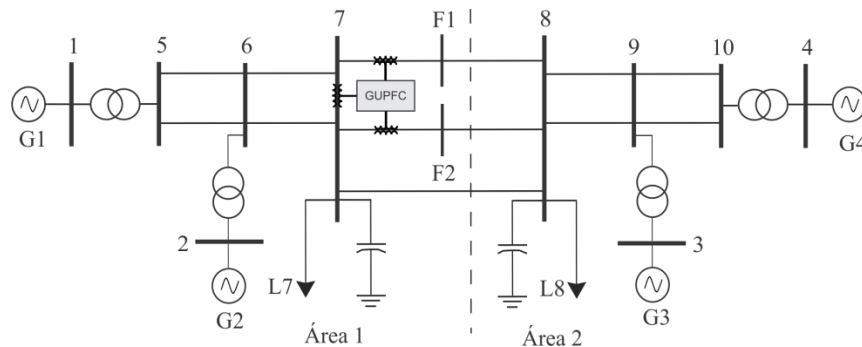
Na Tabela 2 são apresentados os valores de ganhos (em p.u.) e constantes de tempo (em segundos) da estrutura de controle do GUPFC (controladores PI) apresentados no Capítulo 2 deste trabalho. Esses foram considerados fixos para todas as simulações realizadas nesta tese, e foram determinados de forma empírica através de uma série de simulações e ajustes não abordadas nesta tese.

Tabela 2 - Ganhos e constantes de tempo dos controladores PI do GUPFC

<b>Variáveis do Sistema de Controle do GUPFC</b>				
$K_{p1} = 0,50$	$K_{p2} = 0,50$	$K_{p3} = 0,50$	$K_{p4} = 0,50$	$K_{p5} = 1,00$
$T_{i1} = 0,10$	$T_{i2} = 0,10$	$T_{i3} = 0,10$	$T_{i4} = 0,10$	$T_{i5} = 0,01$

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Figura 30 - Diagrama Unifilar: Sistema simétrico de duas áreas com GUPFC instalado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o Caso I, as variáveis de controle que representam os conversores do GUPFC são apresentadas na Tabela 3. Observa-se que estas variáveis tem valor muito pequeno e, por isso, não exercem controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa, nem controla a tensão no barramento comum de instalação ( $Q_{sh} = 0$ ), ou seja, o dispositivo apresenta-se no estado desligado.

Tabela 3 - Valores das variáveis de controle do GUPFC (Caso I)

Variáveis do Sistema de Controle do GUPFC				
$V_{pj}$ (p.u.)	$V_{qj}$ (p.u.)	$V_{pk}$ (p.u.)	$V_{qk}$ (p.u.)	$I_q$ (p.u.)
2,683e-08	-1,074e-06	2,683e-08	-1,073e-06	5,96e-05

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na Tabela 4 são apresentados os valores das tensões (valores em p.u.) e ângulos de fase de todas as barras do sistema Simétrico de Duas Áreas para os quatro casos descritos anteriormente. Observa-se que a simples inclusão do GUPFC ao SEP como ocorre no Caso I (modo inoperante) não altera a magnitude das tensões de barra em relação ao caso base. Para os demais casos o objetivo é manter a tensão da barra 7 em 1,0 p.u..

Para o Caso II o conversor *shunt* forneceu uma injeção de potência reativa de 306,12 MVar à barra 7 para manter a tensão controlada em 1,0 p.u.. No Caso III esta injeção de potência reativa caiu para 258,63 MVar. Embora esse valor tenha sido menor quando comparado com o Caso II, o aumento de 80% nos fluxos de potência reativa nas linhas controladas pelos GUPFC, resultou em uma redução da tensão da barra 8 para um valor abaixo do limite mínimo estabelecido (0,95 p.u.).

Tabela 4 - Magnitudes e ângulos das tensões para os quatro casos analisados

Barra	Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
1	1,030	9,163	1,030	8,019	1,030	6,108	1,030	10,83
2	1,010	-0,733	1,010	-1,596	1,010	-3,505	1,010	1,214
3	1,010	-10,39	1,010	-10,26	1,010	-10,35	1,010	-10,12
4	1,030	0,000	1,030	0,000	1,030	0,000	1,030	0,000
5	1,005	4,611	1,015	3,464	1,015	1,554	1,015	6,272
6	0,969	-5,472	0,999	-6,336	0,999	-8,245	0,999	-3,526
7	<b>0,937</b>	-14,02	<b>1,000</b>	-14,30	<b>1,000</b>	-16,21	<b>1,000</b>	-11,49
8	0,953	-23,69	0,960	-23,46	<b>0,949</b>	-23,67	0,987	-23,05
9	0,976	-15,13	0,979	-15,00	0,974	-15,09	0,993	-14,85
10	1,006	-4,728	1,008	-4,698	1,006	-4,709	1,012	-4,693
F1	-	-	-	-	-	-	-	-
F2	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Já para o Caso IV, a injeção de potência reativa fornecida pelo conversor *shunt* à barra comum de instalação (barra 7) atingiu o valor de 415,73 MVar. Porém, mesmo com os fluxos de potência reativa nas barras controladas especificados com valores 80% maiores que no caso base, só que em sentidos opostos ao do caso anterior, levou a um aumento da tensão na barra 8 do SEP, o que contribui para se obter o melhor perfil de tensão entre os quatro casos analisados. Cabe salientar que os valores encontrados para a injeção de potência reativa feita pelo conversor *shunt* do GUPFC para todos os casos analisados estão de acordo com valores encontrados na literatura em estudos semelhantes realizados com o dispositivo FACTS UPFC. Nesses estudos, a contribuição do conversor em derivação do UPFC se situa na faixa de 100 MVar a 475 MVar (GYUGYI et al., 1995; UZUNOVIC et al., 2001).

Na Tabela 5 são apresentados os fluxos de potência ativa (em MW) e reativa (em MVar) controlados pelo GUPFC nas duas linhas que gerencia. Analisando a Tabela 5 conclui-se que o dispositivo controla os fluxos corretamente, atendendo às especificações do operador, que para os Casos I e II considerou  $P_n^{ref}$  e  $Q_n^{ref}$  (sendo  $n = i, j$ ) com os mesmos valores encontrados para o caso base. Para o Caso III os

valores especificados pelo operador foram  $P_n^{ref} = 0,712 p.u.$  e  $Q_n^{ref} = -0,38514 p.u.$ , e para o Caso IV, os valores especificados são  $P_n^{ref} = 0,55 p.u.$  e  $Q_n^{ref} = 0,38514 p.u.$  Para todos os casos foi considerada uma potência de base  $S_B$  igual a 100MVA.

Tabela 5 - Fluxo de potências ativa e reativa para os casos analisados

Linha De – Para	Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
	$P_{km}$	$Q_{km}$	$P_{km}$	$Q_{km}$	$P_{km}$	$Q_{km}$	$P_{km}$	$Q_{km}$
6 – 7	688,43	132,23	689,31	-25,90	689,32	-26,91	689,32	-27,07
6 – 7	688,43	132,23	689,31	-25,90	689,32	-26,91	689,32	-27,07
F1 – 8	<b>64,728</b>	<b>-21,39</b>	<b>64,728</b>	<b>-21,39</b>	<b>71,20</b>	<b>-38,51</b>	<b>55,00</b>	<b>38,51</b>
F2 – 8	<b>64,728</b>	<b>-21,39</b>	<b>64,728</b>	<b>-21,39</b>	<b>71,20</b>	<b>-38,51</b>	<b>55,00</b>	<b>38,51</b>
7 – 8	67,44	-22,07	71,10	0,07	58,17	4,61	90,57	-10,68
9 – 8	701,20	91,88	699,16	74,90	699,80	102,27	699,2	4,45
9 – 8	701,20	91,88	699,16	74,90	699,80	102,27	699,2	4,45

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Da análise do fluxo de potência ativa nas duas linhas controladas pelo GUPFC (Tabela 5), verifica-se que o dispositivo não fornece potência ativa ao SEP (restrição de invariância de potência ativa do dispositivo), mas que ele transfere por meio dos conversores série e *shunt* a potência ativa de uma das linhas do SEP analisado (neste caso a linha de folga entre as barras 7 e 8).

Na Tabela 6 são apresentados os valores das perdas ativa (em MW) e reativa (em MVar) nos mesmos ramos enfatizados na Tabela 5. Com os dados apresentados nas Tabelas 5 e 6 é possível realizar o balanço de potência ativa nas barras 7 e 8 do sistema e, assim, validar o controle dos fluxos realizados pelo GUPFC.

Tabela 6 - Perdas de potências ativa e reativa para os casos analisados

Linha De - Para	Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
6 – 7	10,48	104,8	9,536	95,36	9,534	95,34	9,533	95,33
6 – 7	10,48	104,8	9,536	95,36	9,534	95,34	9,533	95,33
F1 – 8	1,055	10,55	1,037	10,37	1,608	16,08	1,158	11,58
F2 – 8	1,055	10,55	1,037	10,37	1,608	16,08	1,158	11,58
7 – 8	1,153	11,53	1,173	11,73	0,842	8,42	1,812	18,12
9 – 8	10,511	105,11	10,32	103,2	10,55	105,5	9,925	99,25
9 – 8	10,511	105,11	10,32	103,2	10,55	105,5	9,925	99,25

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Com relação às perdas ativa e reativa do sistema de transmissão pode-se observar na Tabela 7 que entre o Caso I e o Caso III há uma redução de 2,79 MW e com relação ao Caso IV a redução aumenta para 5,24 MW, evidenciando a contribuição do GUPFC na diminuição das perdas de transmissão do SEP. Outra conclusão retirada da análise da Tabela 7 diz respeito à diminuição da potência reativa gerada após a inclusão do dispositivo FACTS, visto que o mesmo possui um sistema armazenador de energia (banco de capacitores instalados entre os conversores do GUPFC) por meio do qual ele fornece potência reativa ao SEP.

Tabela 7 - Gerações de potências ativa e reativa para os casos analisados

Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
PG (MW)	QG (MVAR)	PG (MW)	QG (MVAR)	PG (MW)	QG (MVAR)	PG (MW)	QG (MVAR)
2826,29	933,56	2821,72	555,7	2823,47	613,86	2821,02	403,33

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Também foi verificada a influência do GUPFC nos modos oscilatórios de baixa frequência para os quatro casos analisados. Os autovalores de interesse e seus respectivos coeficientes de amortecimento associados estão expressos na Tabela 8. Estes autovalores foram calculados utilizando a matriz de estados do SEP após a inclusão do GUPFC sem controladores suplementares de amortecimento.



Tabela 8 - Autovalores dominantes e coeficiente de amortecimento para os casos analisados

Modo	Caso I	
	Autovalores	$\xi$ (p.u.)
L1	$-0,3427 \pm j 6,277$	0,05452
L2	$-0,3037 \pm j 5,799$	0,05229
I	$0,0505 \pm j 4,309$	-0,01172
Modo	Caso II	
	Autovalores	$\xi$ (p.u.)
L1	$-0,4953 \pm j 6,363$	0,07761
L2	$-0,3188 \pm j 5,796$	0,05492
I	$0,0685 \pm j 4,411$	-0,01553
Modo	Caso III	
	Autovalores	$\xi$ (p.u.)
L1	$-0,4804 \pm j 6,337$	0,07561
L2	$-0,2938 \pm j 5,797$	0,05062
I	$0,0558 \pm j 4,351$	-0,01283
Modo	Caso IV	
	Autovalores	$\xi$ (p.u.)
L1	$-0,4979 \pm j 6,355$	0,07810
L2	$-0,3721 \pm j 5,824$	0,06374
I	$0,1151 \pm j 4,614$	-0,02491

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Comparando os resultados das Tabelas 1 e 8, observa-se que a manutenção da tensão da barra 7 em 1,0 p.u. (Casos II a IV) influenciou positivamente no amortecimento do modo local L1. No entanto, a compensação reativa realizada nas linhas de transmissão controladas pelo GUPFC exerceu menor influência no amortecimento do modo local L2 e do modo interárea I. Para este último, pelo contrário, houve uma piora do amortecimento após a atuação do GUPFC. Diante disso, outras estratégias serão discutidas na próxima seção para a solução do problema relacionado a estabilidade a pequenas perturbações.

#### 5.4 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS – INCLUSÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO ESP E GUPFC-POD.

Nesta seção é feita a análise e avaliação dos resultados encontrados pela técnica utilizada para ajuste dos controladores ESPs e GUPFC-POD, instalados no sistema simétrico de duas áreas, com o objetivo de fornecer amortecimento suplementar aos modos oscilatórios instáveis ou fracamente amortecidos. O desempenho do NBA foi comparado com outros quatro métodos bioinspirados (PSO, BFO, AG e BA) considerando duas faixas de amortecimento desejado ( $\xi^{des} \geq 10\%$  e  $\xi^{des} \geq 15\%$ ). A qualidade do ajuste encontrado pelo NBA foi avaliada por meio de testes considerando 24 cenários diferentes de carga para o sistema em estudo.

Como argumentado no Capítulo 1, foram considerados sinais locais para as entradas dos controladores. Desse modo, o ESP tem como sinal de entrada a velocidade angular do gerador onde está instalado, enquanto no POD o sinal de entrada é o fluxo de potência ativa na linha de transmissão adjacente à instalação do dispositivo FACTS. A saída do ESP será utilizada para modular a tensão de campo do gerador síncrono ( $E_{fdk}$ ), enquanto a saída do controlador POD ( $\Delta V_{sup}$ ) modulará a componente em quadratura ( $V_{pj}$ ) do conversor secundário do GUPFC. Além disso, os parâmetros dos controladores ESP e POD estão sujeitos às restrições apresentadas de forma literal nas equações (179) e (180), respectivamente. Estas restrições (limites assumido pelas variáveis) são apresentadas nesta seção de acordo com as equações (183) e (184).

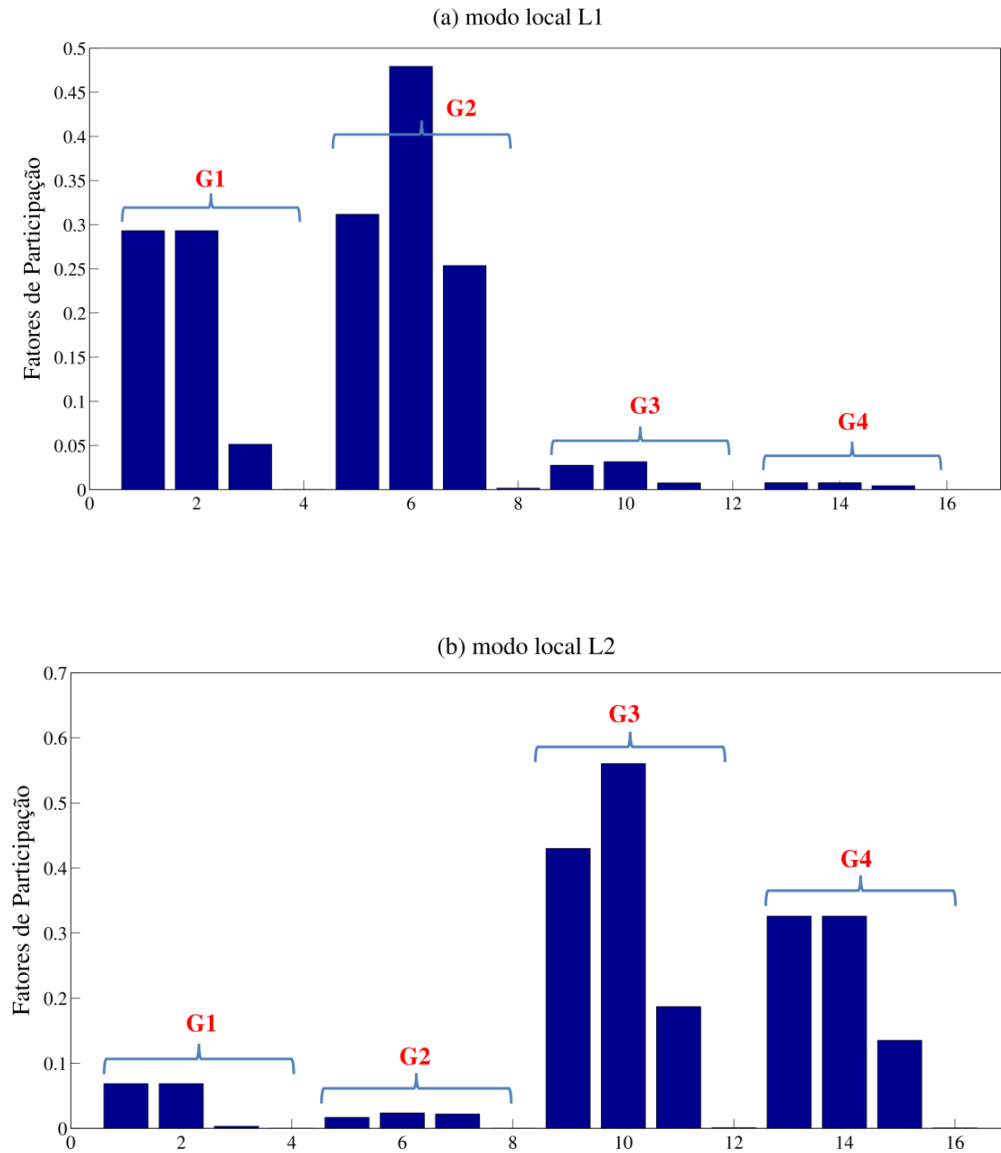
$$0,05 \leq T_{1n} \leq 1,0, \quad 0,05 \leq T_{2n} \leq 1,0, \quad 1,0 \leq K_{ESP} \leq 5,0 \quad (183)$$

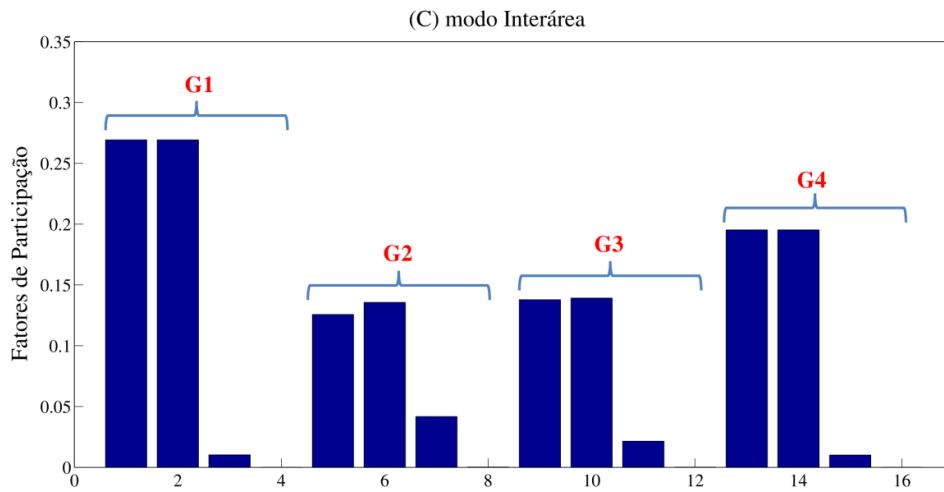
$$0,05 \leq T1^P \leq 1,0, \quad 0,05 \leq T2^P \leq 1,0, \quad 0,05 \leq K_{POD} \leq 0,5 \quad (184)$$

Para determinar a localização que melhor contribua para uma atuação mais efetiva dos controladores ESPs, uma análise prévia dos fatores de participação (KUNDUR, 1994) deve ser feita. Na Figura 31 são apresentadas de forma gráfica quais unidades geradoras tem maior influência (ou participação) nos modos oscilatórios de interesse verificados no sistema teste (modos locais e interárea). As barras azuis representam as variáveis de estado de cada unidade geradora, a posição de um a quatro refere-se às variáveis de estado  $\omega_1$ ,  $\delta_1$ ,  $E'_{q1}$ ,  $E_{fd1}$  do gerador G1, a posição cinco a oito

são as posições das variáveis de estado do gerador G2 e assim sucessivamente até o gerador G4.

Figura 31 - Fatores de participação de cada gerador em cada modo oscilatório do sistema simétrico de duas áreas





Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A análise da Figura 31 indica que o gerador 2 (G2) possui maior participação no modo local 1 (L1), enquanto o gerador 3 (G3) possui maior participação no modo local 2 (L2). Como era esperado, o modo interárea (I) possui participação de todos os geradores (G1, G2, G3 e G4). Portanto, com o objetivo de garantir índices de amortecimento mínimos desejados para os modos locais L1 e L2, as unidades geradoras 2 e 3 foram equipadas com controladores ESP. Uma vez definida a posição dos controladores no sistema em estudo é necessário agora definir os parâmetros comuns e específicos das técnicas de ajuste avaliadas neste trabalho.

Assim, todos os algoritmos avaliados utilizaram um mesmo número de 20 indivíduos para formar a população inicial, sejam eles representados figurativamente por bactérias, pássaros, cromossomos ou morcegos.

O PSO considerado neste estudo é baseado na versão básica e também a mais popular deste algoritmo, com constantes de aceleração  $c_1 = c_2 = 2,0$ , e fator de inércia decrescendo linearmente com o número de iterações  $w \in [0,2 ; 1,5]$ . Outras informações sobre esta técnica podem ser encontradas em Fortes *et al.* (2016).

Para o BFO os valores iniciais foram baseados em Ali e ABD-Elazin (2012) e tem os seguintes valores: número de passos de quimiotaxia ( $N_C = 10$ ), número de eventos de eliminação e dispersão ( $N_{ed} = 2$ ), número de passos de reprodução ( $N_{re} = 4$ ), probabilidade de eliminação e dispersão ( $p_{ed} = 0,25$ ).

O AG com elitismo utilizado nos testes foi baseado na mesma versão adotada em Fortes *et al.* (2016) a qual poderá ser consultada para obtenção de mais detalhes sobre as características do método, sua implementação e parâmetros adotados. Dessa forma, para

o AG considerou-se uma taxa de mutação fixa de 5%, seleção por torneio e uma recombinação entre os indivíduos selecionados de apenas um ponto.

Para o BA foram utilizados os seguintes valores iniciais que podem ser encontrados em Peres *et al.* (2015): Volume  $A_0 = 0,25$ , taxa de emissão de pulso  $r_0 = 0,5$ , e a frequência variando dentro da seguinte faixa:  $f_{min} = 0$  e  $f_{max} = 2Hz$ . Também foi considerado  $\mu = \gamma = 0,9$ .

Finalmente, o NBA utiliza os mesmo valores para os parâmetros comuns com o BA, ou seja, Volume  $A_0 = 0,25$ , taxa de emissão de pulso  $r_0 = 0,5$ , frequência variando dentro da seguinte faixa:  $f_{min} = 0$  e  $f_{max} = 2Hz$ , e  $\mu = \gamma = 0,9$ . Já os parâmetros específicos do NBA tiveram seus *setups* revistos para a utilização no problema proposto nesta tese. Para isso, uma série de simulações adicionais, não demonstradas aqui, foram realizadas para encontrar um conjunto de valores iniciais para estes parâmetros que tiveram como ponto de partida os valores utilizados em Meng *et al.* (2015). Por fim, os valores adotados nesta tese são os seguintes:  $P \in [0,5 ; 0,8]$ ,  $G=10$ ,  $C \in [0,1 ; 0,9]$ ,  $\theta \in [0,5 ; 1]$ ,  $w \in [0,5 ; 0,9]$ .

Para possibilitar uma análise estatística mais significativa e justa, cada algoritmo foi executado 100 vezes, e cada teste foi limitado a um máximo de 1000 avaliações da função objetivo dada na equação (178) e sujeito às restrições dadas nas equações (179) – (182).

Na Tabela 9 é apresentado, para as duas faixas de amortecimento mínimo desejado ( $\xi^{des} \geq 10\%$ , e  $\xi^{des} \geq 15\%$ ), os valores da taxa de convergência, tempos de convergência médio, mínimo e máximo, e desvio padrão médio. Salienta-se que as tentativas que não convergiram dentro do limite máximo de avaliações da função objetivo, não tiveram seu tempo considerado nas estatísticas. Considerando a primeira faixa de amortecimento,  $\xi^{des} \geq 10\%$ , observa-se que todos os algoritmos testados alcançam 100% de convergência. Porém, quando é avaliado o tempo médio gasto para obtenção de um ajuste factível e o desvio padrão médio, o NBA destaca-se entre as técnicas avaliadas com os menores valores encontrados para este caso. Isto contribui para a redução do esforço computacional e demonstra uma baixa taxa de dispersão em torno do tempo médio de convergência.

Quando se considera a segunda faixa de amortecimento desejado, com um índice de amortecimento mais rigoroso ( $\xi^{des} \geq 15\%$ ), PSO, BFO, AG e NBA apresentam taxas de convergência muito próximas e também bastante elevadas, 98%, 97%, 97% e

100% respectivamente. A exceção fica por conta do BA clássico que atinge apenas 67% de convergência para o caso considerado. Embora o PSO, BFO, AG e o NBA apresentem taxas de convergência próximas, o NBA destaca-se em relação aos três primeiros devido ao tempo médio de convergência menor bem como o desvio padrão.

Ainda considerando a Tabela 9, quando se compara o BA com o NBA, fica evidente que as alterações feitas neste último, com relação à diversificação de *habitats* e compensação adaptativa do efeito Doppler de ecos, agregaram vantagens evolutivas ao algoritmo, e tornaram o NBA um método mais eficiente, rápido, e muito bem adaptado ao problema abordado nesta tese.

Tabela 9 - Comparação de desempenho dos algoritmos avaliados

Algoritmo	Taxa de amortecimento (%)	Taxa de convergência (%)	Tempo de convergência (s)			Desvio Padrão
			Médio	Min.	Max.	
PSO	≥ 10	100	10,45	2,03	111,51	9,53
	≥ 15	98	23,59	3,48	129,51	15,15
BFO	≥ 10	100	24,48	2,23	168,34	25,09
	≥ 15	97	34,86	2,53	224,12	26,98
AG	≥ 10	100	10,40	3,91	63,91	6,17
	≥ 15	97	36,77	5,67	191,43	22,60
BA	≥ 10	100	12,99	2,75	152,19	12,62
	≥ 15	67	14,34	2,66	115,01	12,25
NBA	≥ 10	100	4,52	1,91	12,54	1,95
	≥ 15	100	12,11	2,75	94,79	9,54

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

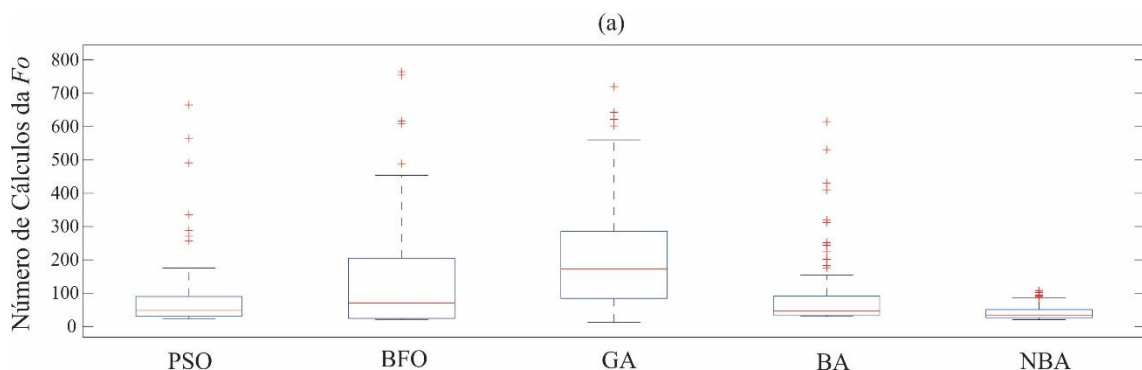
Um gráfico de *Box Plot*<sup>1</sup> é apresentado na Figura 32. O *Box Plot* é representado por um retângulo (alinhado verticalmente ou horizontalmente). As extremidades do retângulo estão relacionadas ao primeiro quartil (*Q1*) e terceiro quartil (*Q3*). A linha que secciona o retângulo é referente ao segundo quartil (*Q2*) também chamada de mediana. A reta que se estende verticalmente ou horizontalmente a partir da caixa indica a variabilidade fora do quartil superior e inferior e os segmentos de retas em seus extremos representam o limite superior (maior valor observado) e inferior (menor valor observado) respectivamente. Os valores atípicos ou *outliers* (valores discrepantes) podem ser plotados como pontos individuais.

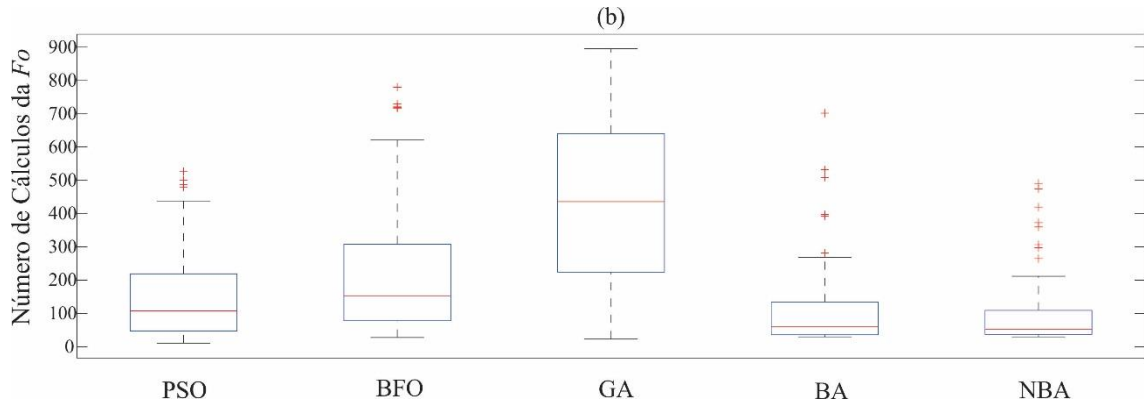
<sup>1</sup> Um *Box Plot*, ou diagrama de caixa, é uma representação gráfica que capta importantes aspectos de um conjunto de dados e permite analisar e comparar a variação de uma variável entre diferentes grupos de dados.

Na Figura 32 (a) é comparado o número de cálculos da função objetivo (equação (178)) para encontrar uma solução factível quando considera-se a primeira faixa de amortecimento desejado, ou seja,  $\xi^{des} \geq 10\%$ . A análise da Figura 32(a) permite observar que o AG possui uma distribuição de dados praticamente simétrica, enquanto as demais técnicas apresentam distribuições de dados assimétricas. O NBA apresenta o melhor desempenho em relação às técnicas avaliadas e isso se dá pelo menor número de cálculos da  $Fo$  e por um menor desvio padrão em relação à mediana, que representa 50% dos valores do conjunto de dados. Além disso, no NBA 75% dos testes realizados encontram uma solução factível com menos de 50 cálculos da  $Fo$ , como pode ser observado nesta mesma figura. Os valores simbolizados por cruzes vermelhas acima do valor máximo observado para cada técnica são chamados *outliers*, ou valores discrepantes da amostra de dados.

A segunda faixa de amortecimento desejado, ou seja,  $\xi^{des} \geq 15\%$  é considerada na Figura 32 (b). Mais uma vez o AG apresenta uma distribuição de dados praticamente simétrica enquanto as outras técnicas apresentam uma distribuição de dados assimétrica. Por se tratar de uma faixa de amortecimento mínimo mais rigoroso que o anterior, observa-se que o número de cálculos da  $Fo$  necessários para encontrar soluções factíveis, aumenta para todas as técnicas avaliadas. Porém, mais uma vez, o NBA destaca-se com um número menor de cálculos da  $Fo$  necessários para atender às restrições do problema quando comparado às demais técnicas. Sendo que em 75% dos testes realizados o NBA encontra uma solução factível com até 120 cálculos da  $Fo$  como é possível visualizar nesta figura. Por fim, destaca-se o desempenho superior do NBA para ambas as faixas de amortecimento e sua contribuição para a redução do esforço computacional empregado na solução deste problema.

Figura 32 – Número de cálculos da  $Fo$ : PSO, BFO, GA, BA e NBA (Sistema Simétrico de Duas Áreas).





Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Um ajuste, selecionado aleatoriamente entre os 100 testes factíveis alcançados pelo NBA ajustado com um índice de 15% de amortecimento desejado, foi utilizado para ajustar os controladores ESP e POD, cujos valores dos parâmetros são destacados na Tabela 10. Considerando o ajuste mostrado na Tabela 10, foram recalculados os autovalores da matriz de estados do SEP e os modos oscilatórios de interesse são apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 - Parâmetros dos controladores ESPs e GUPFC-POD

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	$K$
ESP G1	0,810	0,368	2,708
ESP G2	0,790	0,450	4,937
GUPFC – POD	0,630	0,205	0,611

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 11 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação dos controladores

Modos	Autovalores	$\xi$ (p.u.)	$\omega_n$ (Hz)
L1	$-1,950 \pm j 6,054$	0,307	1,012
L2	$-1,230 \pm j 5,556$	0,216	0,906
I	$-1,645 \pm j 4,132$	0,369	0,707

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Os dados apresentados na Tabela 11 permitem concluir que o ajuste dos controladores realizado pelo NBA cumpriu o objetivo que era fornecer um amortecimento mínimo de 15% para todos os modos oscilatórios de interesse.

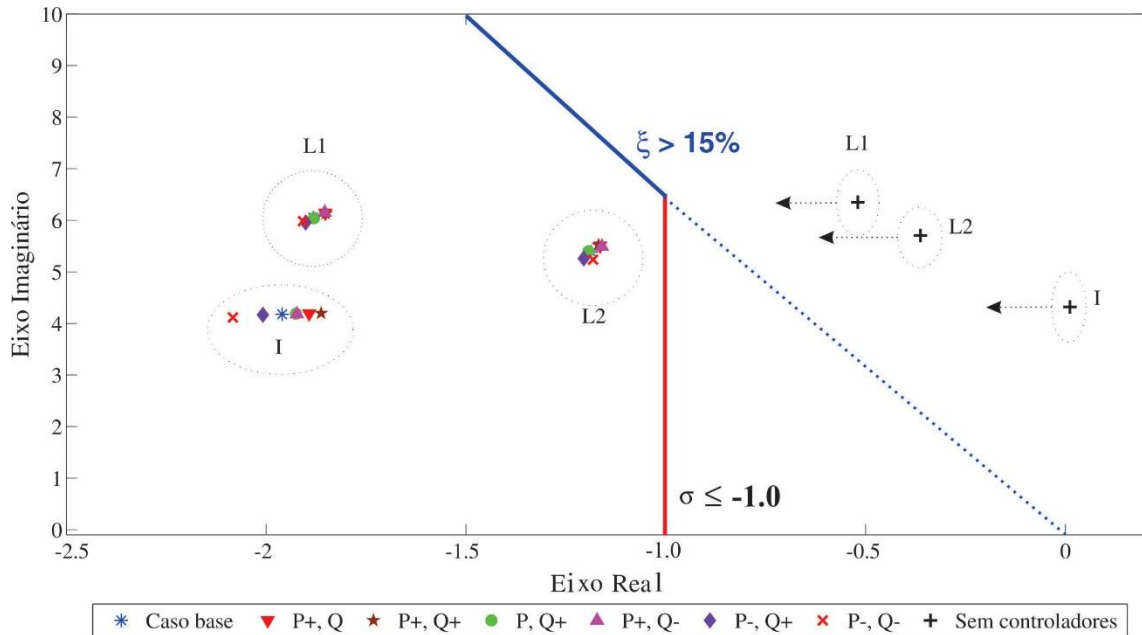


Para evidenciar a qualidade e robustez dos ajustes encontrados pelo NBA, o ponto de operação do sistema simétrico de duas áreas foi variado gerando diferentes cenários de carga. Além do caso base, e do caso sem controladores, outros 24 cenários de carga foram considerados. Estes cenários são formados por quatro diferentes fatores de incremento nas cargas ativa e reativa (2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%) e por um conjunto de seis combinações diferentes de variações de potências ativa e reativa em todas as barras de carga do sistema teste [(P+, Q), (P+, Q+), (P, Q+), (P+, Q-), (P-, Q+), (P-, Q-)].

A alocação dos autovalores de interesse dentro de uma região determinada segundo as restrições e índices de desempenho discutidos na seção 4.4 podem ser observados nas Figuras 33 a 36. Para todos os cenários o NBA desloca os autovalores de interesse para o semiplano esquerdo do plano complexo atendendo à restrição de amortecimento mínimo desejado, e a restrição que determina um valor mínimo para a parte real dos autovalores de interesse ( $\sigma_i \leq -1,0$ ).

Para facilitar a visualização dos modos oscilatórios de interesse em cada um dos 24 cenários considerados, foram construídas as Tabelas 12 a 15 que destacam para cada cenário o autovalor, seu amortecimento (em p.u.) e sua frequência (em Hz). Na ordem em que se apresenta, a Figura 33 está relacionada à Tabela 12, a Figura 34 com a Tabela 13, a Figura 35 com a Tabela 14 e, por fim, a Figura 36 com a Tabela 15. Uma primeira análise das Tabelas 12 a 15 mostra que a frequência dos modos oscilatórios de interesse pouco variou para os diferentes cenários considerados. Também fica evidente que em todos os casos considerados, o amortecimento dos modos oscilatórios de interesse foi superior ao mínimo estipulado em projeto ( $\xi^{des} \geq 15\%$ ).

Figura 33 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 2,5% nas cargas do SEP).



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

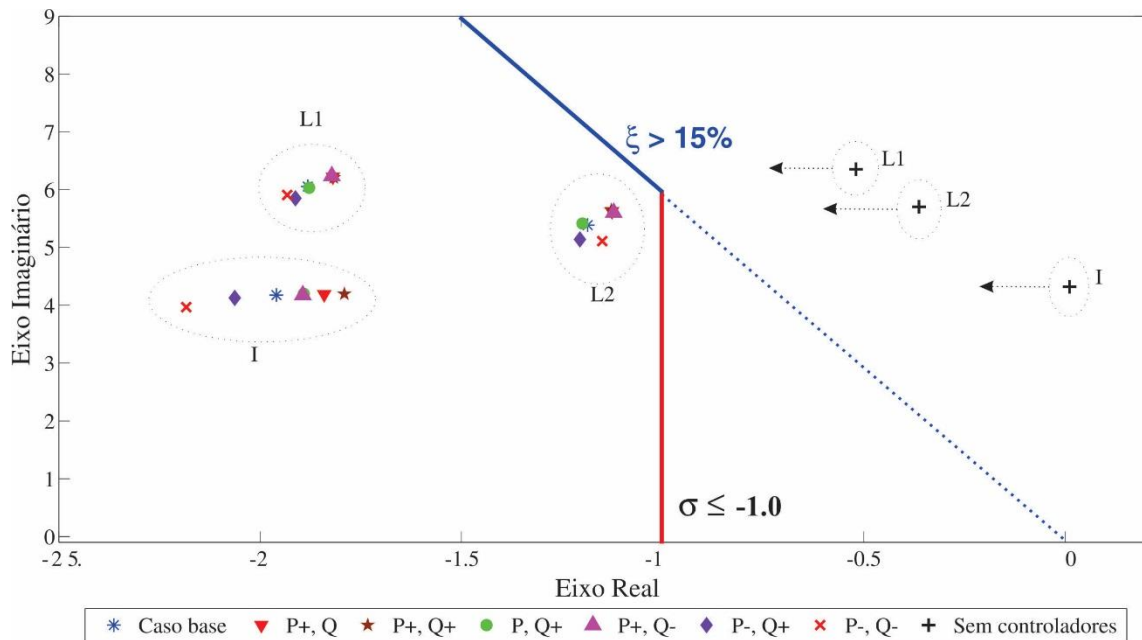
Tabela 12 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 2,5% nas cargas do SEP.

Casos	Modos	Autovalores	$\xi$ (p.u.)	$\omega_n$ (Hz)
(P+, Q)	L1	$-1,908 \pm j 6,157$	0,296	1,026
	L2	$-1,184 \pm j 5,654$	0,205	0,919
	I	$-1,621 \pm j 4,120$	0,366	0,705
(P+, Q+)	L1	$-1,908 \pm j 6,153$	0,296	1,025
	L2	$-1,179 \pm j 5,666$	0,204	0,921
	I	$-1,600 \pm j 4,117$	0,362	0,703
(P, Q+)	L1	$-1,950 \pm j 6,050$	0,307	1,012
	L2	$-1,226 \pm j 5,571$	0,215	0,908
	I	$-1,622 \pm j 4,129$	0,366	0,706
(P+, Q-)	L1	$-1,908 \pm j 6,162$	0,296	1,027
	L2	$-1,188 \pm j 5,641$	0,206	0,917
	I	$-1,642 \pm j 4,123$	0,370	0,706
(P-, Q+)	L1	$-1,983 \pm j 5,942$	0,317	0,997
	L2	$-1,279 \pm j 5,454$	0,228	0,892
	I	$-1,649 \pm j 4,147$	0,369	0,710

(P-, Q-)	L1	$-1,980 \pm j 5,956$	0,316	0,999
	L2	$-1,284 \pm j 5,416$	0,231	0,886
	I	$-1,701 \pm j 4,152$	0,380	0,715

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Figura 34 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 5% nas cargas do SEP).



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

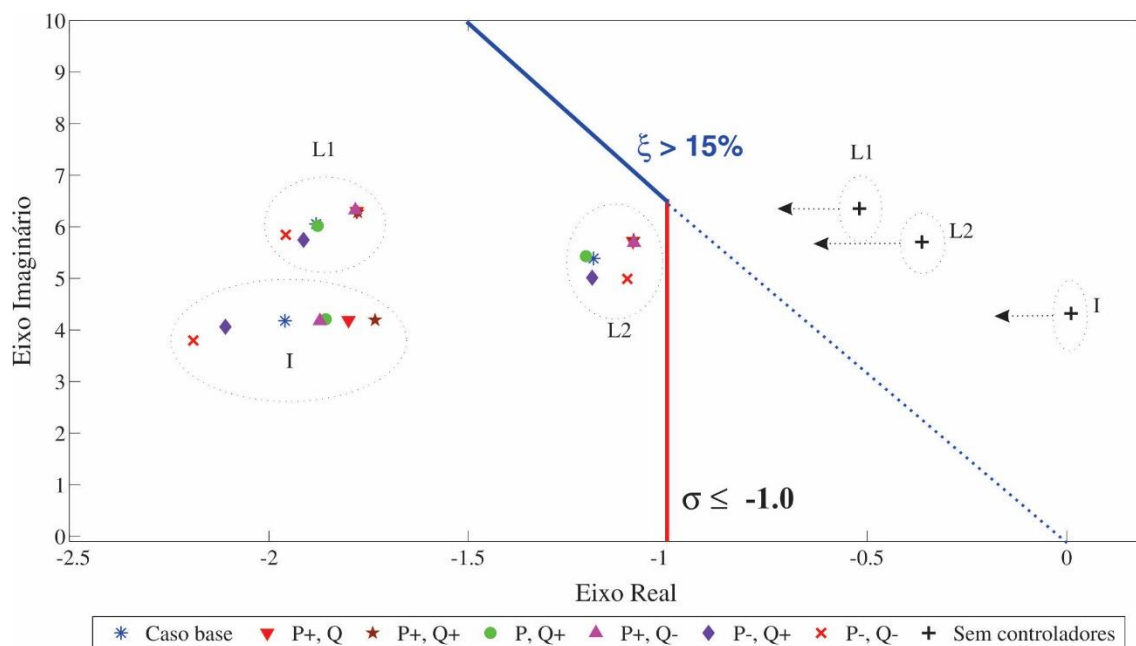
Tabela 13 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 5,0% nas cargas do SEP.

Casos	Modos	Autovalores	$\xi$ (p.u.)	$\omega_n$ (Hz)
(P+, Q)	L1	$-1,866 \pm j 6,247$	0,286	1,038
	L2	$-1,130 \pm j 5,751$	0,193	0,933
	I	$-1,602 \pm j 4,108$	0,363	0,702
(P+, Q+)	L1	$-1,863 \pm j 6,240$	0,286	1,037
	L2	$-1,120 \pm j 5,770$	0,191	0,936
	I	$-1,566 \pm j 4,101$	0,357	0,699
(P, Q+)	L1	$-1,950 \pm j 6,045$	0,307	1,011
	L2	$-1,221 \pm j 5,584$	0,214	0,910

	<b>I</b>	<b>-1,600 ± j 4,125</b>	<b>0,362</b>	<b>0,704</b>
( P+ , Q- )	L1	-1,868 ± j 6,255	0,286	1,039
	L2	-1,139 ± j 5,731	0,195	0,930
	I	-1,640 ± j 4,114	0,370	0,705
( P- , Q+ )	L1	-2,010 ± j 5,810	0,327	0,978
	L2	-1,322 ± j 5,353	0,239	0,878
	I	-1,656 ± j 4,162	0,369	0,713
( P- , Q- )	L1	-2,003 ± j 5,849	0,324	0,984
	L2	-1,317 ± j 5,261	0,243	0,863
	I	-1,801 ± j 4,164	0,397	0,722

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Figura 35 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 7,5% nas cargas do SEP).



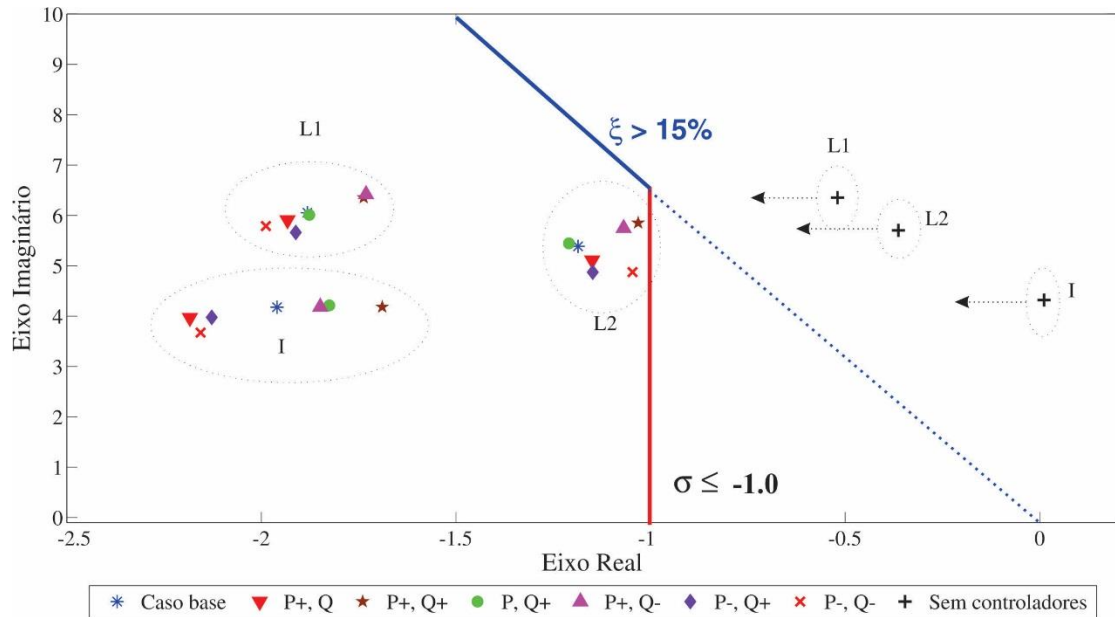
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 14 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 7,5% nas cargas do SEP.

<b>Casos</b>	<b>Modos</b>	<b>Autovalores</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>	<b><math>\omega_n</math> (Hz)</b>
( P+ , Q )	L1	-1,817 $\pm$ j 6,334	0,275	1,049
	L2	-1,084 $\pm$ j 5,833	0,183	0,944
	I	-1,585 $\pm$ j 4,099	0,361	0,699
( P+ , Q+ )	L1	-1,813 $\pm$ j 6,326	0,275	1,047
	L2	-1,069 $\pm$ j 5,857	0,179	0,948
	I	-1,536 $\pm$ j 4,088	0,352	0,695
( P , Q+ )	L1	-1,951 $\pm$ j 6,040	0,307	1,010
	L2	-1,214 $\pm$ j 5,598	0,212	0,912
	I	-1,577 $\pm$ j 4,121	0,357	0,702
( P+ , Q- )	L1	-1,820 $\pm$ j 6,345	0,276	1,051
	L2	-1,097 $\pm$ j 5,807	0,186	0,951
	I	-1,638 $\pm$ j 4,108	0,370	0,704
( P- , Q+ )	L1	-2,022 $\pm$ j 6,667	0,336	0,958
	L2	-1,372 $\pm$ j 5,234	0,254	0,861
	I	-1,666 $\pm$ j 4,185	0,369	0,717
( P- , Q- )	L1	-2,008 $\pm$ j 5,754	0,329	0,970
	L2	-1,308 $\pm$ j 5,069	0,249	0,833
	I	-1,953 $\pm$ j 4,132	0,427	0,727

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Figura 36 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 10% nas cargas do SEP).



Fonte: Própria do Autor.

Tabela 15 - Autovalores Dominantes: Sistema simétrico de duas áreas após atuação de controladores. Variação de 10,0% nas cargas do SEP.

Casos	Modos	Autovalores	$\xi$ (p.u.)	$\omega_n$ (Hz)
(P+, Q)	L1	$-1,770 \pm j 6,412$	0,266	1,059
	L2	$-1,031 \pm j 5,916$	0,172	0,956
	I	$-1,570 \pm j 4,089$	0,358	0,697
(P+, Q+)	L1	$-1,764 \pm j 6,403$	0,266	1,057
	L2	$-1,011 \pm j 5,943$	0,168	0,960
	I	$-1,510 \pm j 4,074$	0,348	0,692
(P, Q+)	L1	$-1,951 \pm j 6,036$	0,308	1,010
	L2	$-1,207 \pm j 5,612$	0,210	0,914
	I	$-1,557 \pm j 4,116$	0,354	0,700
(P+, Q-)	L1	$-1,759 \pm j 6,441$	0,263	1,063
	L2	$-1,081 \pm j 5,855$	0,182	0,948
	I	$-1,630 \pm j 4,109$	0,369	0,704
(P-, Q+)	L1	$-1,998 \pm j 5,539$	0,339	0,940
	L2	$-1,430 \pm j 5,043$	0,273	0,834
	I	$-1,694 \pm j 4,232$	0,372	0,725

(P-, Q-)	L1	$-2,009 \pm j 5,690$	0,333	0,960
	L2	$-1,231 \pm j 4,876$	0,245	0,840
	I	$-2,097 \pm j 3,977$	0,466	0,716

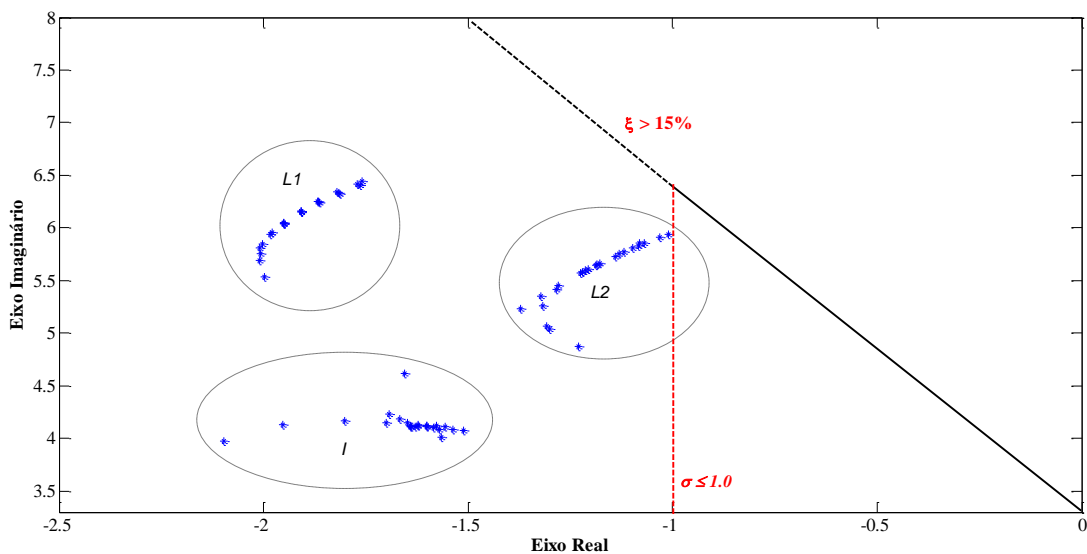
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na Figura 37 estão reunidos os 24 cenários de variação de carga em um único gráfico. Isso facilita visualizar o comportamento dos autovalores de interesse com a variação da carga do sistema teste e corrobora com os valores apresentados nas Tabelas 12 a 15.

Os resultados apresentados na Tabela 9 e nas Figuras 33 a 37 destacam a eficiência do NBA para o ajuste coordenado de controladores suplementares empregados no SEP, além disso, destacam a qualidade e robustez do ajuste encontrado em relação à variação do ponto de operação do sistema teste, aliado à redução no esforço e do tempo computacional.

Para analisar a estabilidade no domínio do tempo, uma perturbação de 0,05p.u. foi propositalmente adicionada à potência mecânica do gerador G4 (gerador de referência do sistema simétrico de duas áreas). Esta perturbação pode ser comparada a uma pequena variação na carga do SEP, o que resultará em um conseqüente ajuste da geração. Cabe aqui reiterar que uma pequena variação na carga do SEP pode ser considerada um evento comum ao longo do dia.

Figura 37 - Alocação dos autovalores de interesse considerando 24 diferentes cenários de carga.

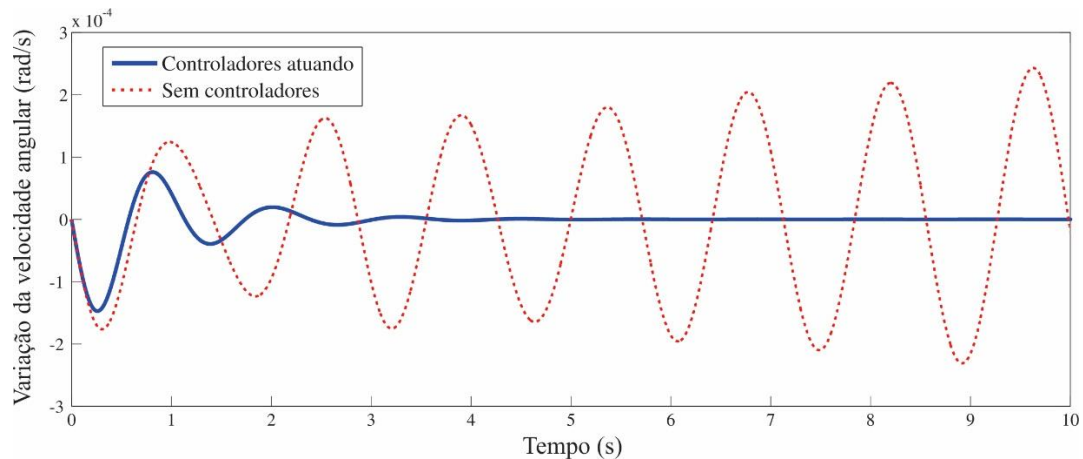


Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A variação da velocidade angular do gerador G1 após esta perturbação pode ser visualizado na Figura 38, enquanto o comportamento da variação angular deste mesmo gerador na Figura 39. Finalmente, na Figura 40 é apresentado o fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 6 e 7, o qual é usado como sinal de entrada do dispositivo GUPFC que encontra-se instalado no SEP entre as barras 7 e 8 sendo a barra 7 a barra comum do dispositivo. Conforme apresentado na Tabela 5 e considerando o Caso IV, o fluxo de potência ativa neste trecho após a ação do GUPFC era de 689,32MW e após a perturbação o fluxo se estabiliza em um novo patamar próximo de 689,55MW. Porém, sem ação dos controladores suplementares de amortecimento, observa-se que o SEP torna-se instável após a perturbação.

Da mesma forma, nas Figuras 38 e 39 são consideradas duas situações: a primeira sem atuação dos controladores suplementares de amortecimento, e a segunda, com a atuação dos controladores previamente ajustados com os parâmetros da Tabela 10. Nestas figuras a curva em vermelho mostra o sistema instável (oscilação de amplitude crescente ao longo do tempo) para a condição testada sem a instalação dos controladores suplementares de amortecimento. Após a inclusão dos controladores ESPs e GUPFC-POD, ajustados através do NBA, o SEP passa a ser estável (oscilação rapidamente amortecida com valor final tendendo a zero, como pode ser observada na curva de cor azul).

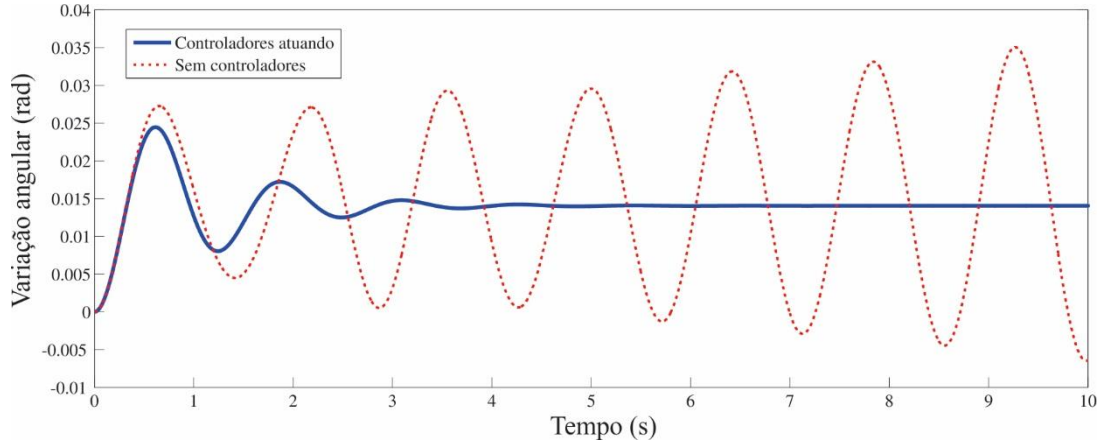
Figura 38 - Variação da velocidade angular do gerador G1 do sistema simétrico de duas áreas



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

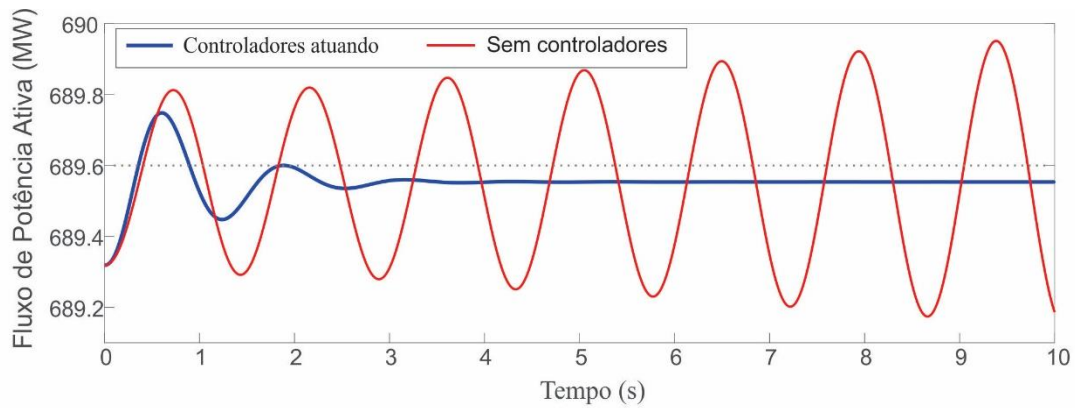


Figura 39 - Variação angular do gerador G1 do sistema simétrico de duas áreas



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Figura 40 – Fluxo de potência ativa entre as barra 6 e 7 do sistema simétrico de duas áreas



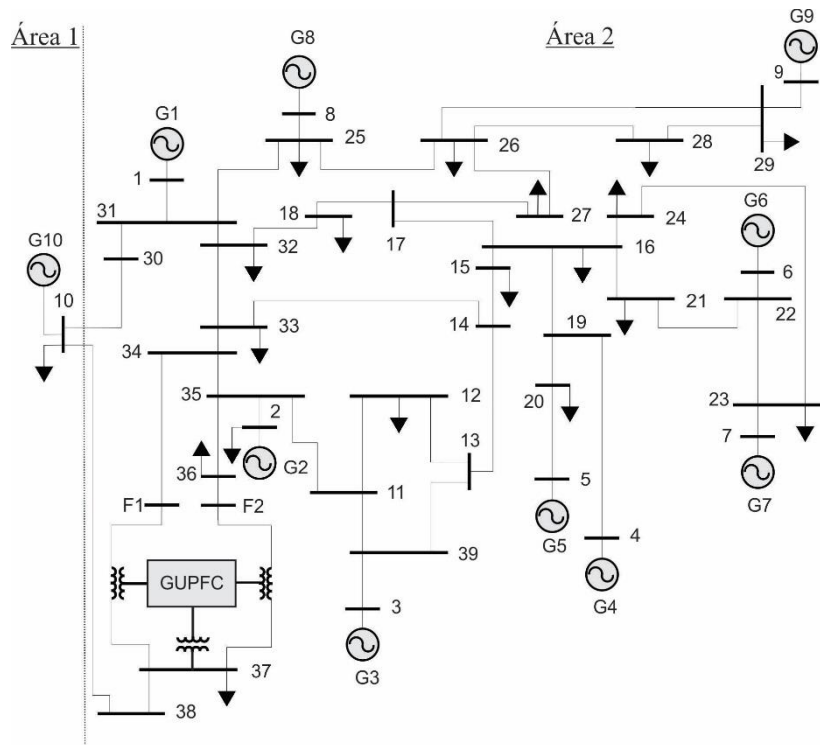
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

## 5.5 SISTEMA *NEW ENGLAND* – GUPFC INCLUSO NO SEP

O segundo SEP analisado nesta tese é conhecido como Sistema *New England*. Este é composto por 10 geradores, 41 barras (incluindo as duas barras fictícias F1 e F2), 48 ramos (incluindo dois ramos adicionais,  $37 - F1$  e  $37 - F2$ ), pelas reatâncias dos transformadores de acoplamento do GUPFC (com valores de 0,01p.u.), e por duas áreas distintas (veja diagrama unifilar representado na Figura 41). Os dados das barras, do sistema de transmissão, dos geradores, dos RATs e do fluxo de potência convergido para o ponto de operação considerado no caso base estão descritos no Anexo A e também podem ser encontrados em Araujo e Zaneta (2001).

A área 1 equivale ao sistema denominado *New York*, o qual é representado de maneira compacta pelo gerador equivalente G10. A área 2, que representa o restante do SEP ilustrado na Figura 41 é chamada de sistema *New England*. Neste sistema foi escolhida a barra 37 como barra comum para a instalação do GUPFC e os fluxos de potências ativa e reativa serão controlados nas linhas de transmissão que ligam as barras fictícias F1 e F2 às barras 34 e 36 do SEP, respectivamente.

Figura 41 - Diagrama Unifilar: Sistema *New England*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente será avaliada a estabilidade do sistema *New England*, para o ponto de operação que representa o caso base. Para este caso é desconsiderada a introdução de controladores suplementares de amortecimento e o dispositivo FACTS permanece desligado, ou seja, não controla os fluxos de potências ativa e reativa nas duas LTs onde está instalado. Para esta situação, GUPFC inoperante, as variáveis da estrutura de controle do dispositivo assumem valor muito pequeno, próximo de zero como ilustrado na Tabela 16. Observa-se que estas variáveis tem valor muito pequeno e, por isso, não exercem controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa, nem controla a tensão no barramento comum de instalação ( $Q_{sh} = 0$ ), ou seja, o dispositivo está desligado. Cabe lembrar que os valores das constantes de tempo

e dos ganhos da estrutura do controlador PI do GUPFC foram mantidos fixos de acordo com a Tabela 2 apresentada na Seção 5.2.

Tabela 16 - Valores das variáveis de controle do GUPFC (Caso base – dispositivo desligado)

Variáveis do Sistema de Controle do GUPFC				
$V_{pj}$ (p.u.)	$V_{qj}$ (p.u.)	$V_{pk}$ (p.u.)	$V_{qk}$ (p.u.)	$I_q$ (p.u.)
2,683e-08	-1,074e-06	2,683e-08	-1,073e-06	5,961e-05

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Com os dados do sistema teste, mais o ponto de operação inicial, é construído o modelo do sistema na forma de espaço de estados utilizando as variáveis de estado e algébricas descritas no Capítulo 3. Desse modelo são obtidos os autovalores da matriz de estados  $\mathbf{A}$  (equações (109) e (110)) para o sistema *New England*. Na Tabela 17 são apresentados os autovalores de interesse para a análise da estabilidade do sistema teste. São nove pares complexos conjugados incluindo as taxas de amortecimento  $\zeta$  e a frequência natural não amortecida  $\omega_n$  a eles associados.

Analisando as frequências ( $\omega_{ni}$ ) dos modos oscilatórios de interesse na Tabela 17 observa-se que oito são modos locais (L1 a L8) e apenas um é modo interárea (I). Destes, quatro possuem parte real positiva (L5, L6, L7, e I) caracterizando a instabilidade do SEP para o ponto de operação considerado no caso base.

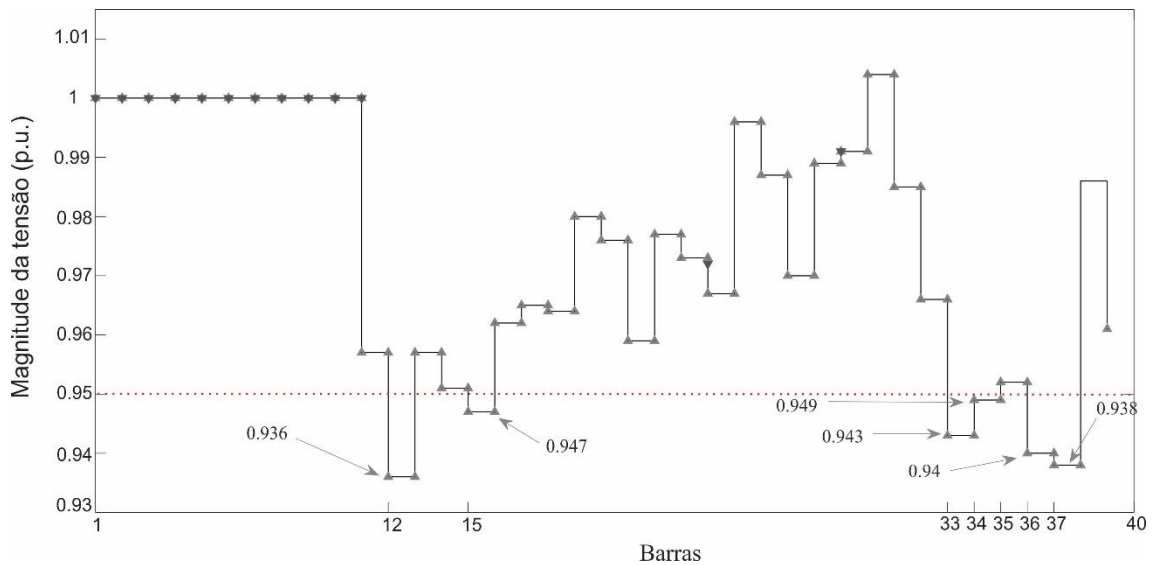
Tabela 17: Autovalores Dominantes, coeficiente de amortecimento, frequências naturais – Sistema *New England* (caso base – GUPFC desligado).

Modo	Autovalores	$\zeta$ (p.u.)	$\omega_n$ (Hz)
L1	-0,2399 ± j 8,309	0,02886	1,3224
L2	-0,1824 ± j 8,264	0,02207	1,3152
L3	-0,2641 ± j 8,083	0,03265	1,2865
L4	-0,2116 ± j 7,167	0,02951	1,1406
<b>L5</b>	<b>0,0849 ± j 6,848</b>	<b>-0,0124</b>	<b>1,0899</b>
<b>L6</b>	<b>0,1719 ± j 5,912</b>	<b>-0,02906</b>	<b>0,9409</b>
<b>L7</b>	<b>0,1251 ± j 6,355</b>	<b>-0,01968</b>	<b>1,0115</b>
L8	-0,1087 ± j 6,451	0,01685	1,0267
<b>I</b>	<b>0,0042 ± j 3,505</b>	<b>-0,00121</b>	<b>0,5578</b>

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Considerando ainda o caso base, o perfil de tensões do SEP após a solução do fluxo de potência é mostrado na Figura 42. Observa-se que além do problema relacionado à instabilidade oscilatória devido aos quatro modos instáveis (Tabela 17), tem-se também um problema relacionado ao baixo nível de tensão em algumas barras do sistema teste (níveis de tensão abaixo de 0,95 p.u.).

Figura 42 - Perfil de tensão: Sistema *New England* sem a atuação de controladores



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Verifica-se a partir dos dados apresentados na Tabela 17 e na Figura 42 que o sistema *New England* possui dois problemas a serem corrigidos: (1) o problema de subtensão verificado nas barras 12, 15, 33, 36, e 37, isto é, perfil de tensão fora dos limites de valores aceitáveis ( $\pm 5\%$  do valor nominal); (2) o problema de instabilidade do SEP ocasionado pela presença de modos oscilatórios instáveis (local e interárea).

A escolha do local de instalação do dispositivo FACTS GUPFC levou em conta algumas questões de ordem técnica. Como discutido anteriormente, este dispositivo pode gerenciar cinco variáveis do SEP, dois fluxos de potências ativa e reativa em duas linhas de transmissão além da tensão na sua barra comum de instalação. Assim, como a barra 37 apresenta problema de subtensão, somado ao fato dela estar próxima a outras barras com o mesmo problema (barras 12, 15, 33, e 36), considerando também a necessidade de pelo menos duas linhas paralelas disponíveis para instalação do dispositivo, escolheu-se, como local adequado a instalação do GUPFC no sistema *New England* o trecho entre as barras 37 – 34 e 37 – 36 conforme indicado na Figura 40.

Os resultados seguintes consideram dois estudos de caso, além do caso base, onde o dispositivo GUPFC está incluso no sistema teste, e são descritos da seguinte forma:

- Caso I – Apenas a tensão na barra 37 é ajustada para 1,0 p.u. e os valores dos fluxos de potências ativa e reativa nas linhas em que o GUPFC controla são especificados iguais aos valores encontrados no caso base; com isso o dispositivo não modifica os fluxos de potências ativa e reativa nos ramos  $F1-34$  e  $F2-36$ ;
- Caso II – É considerado um aumento de 10% nos fluxos de potência ativa nas duas linhas de transmissão controladas pelo GUPFC. Para os fluxos de potência reativa, foi considerado um valor duas vezes maior do que o encontrado no caso base para a linha que liga a barra fictícia F1 à barra 34. Já para o trecho  $F2-36$  foi considerado um aumento de 10 vezes em relação ao caso base. Em ambos os trechos os fluxos de potência reativa foram invertidos com o intuito de elevar as tensões das barras deficientes.

Na Tabela 18 são apresentadas as magnitudes de tensão das barras 12, 15, 33, 34, 36 e 37 para os dois casos analisados.

Tabela 18: Magnitudes e ângulos das tensões das barras deficientes – Caso I e Caso II.

Barra	Caso I		Caso II	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
12	0,936	-6,417	<b>0,953</b>	-6,111
15	0,947	-8,477	<b>0,955</b>	-7,700
33	0,943	-10,281	<b>0,961</b>	-9,689
34	0,949	-8,934	<b>0,997</b>	-8,683
36	0,940	-10,772	<b>0,974</b>	-10,559
37	<b>1,000</b>	-12,835	<b>1,000</b>	-7,842

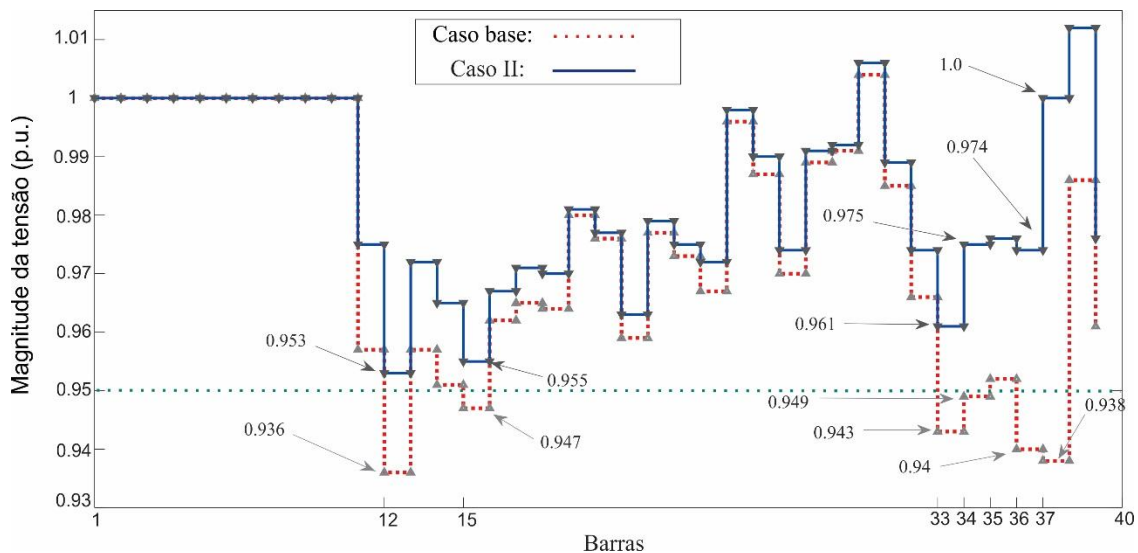
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Como pode ser observado nesta Tabela, para o Caso I o GUPFC elevou de forma correta a tensão da barra 37 para 1,0 p.u., fornecendo para isso uma potência reativa através do conversor *shunt* de 88,3 MVar. Porém, nas condições estabelecidas para o Caso I, isso não foi suficiente para levar as tensões nas demais barras deficientes para

dentro da faixa requerida de operação (valores acima de 0,95 p.u.). A melhora efetiva do perfil de tensão do SEP ocorre quando o Caso II é simulado, ou seja, quando o GUPFC modifica os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas por ele controladas. Para manter a tensão da barra 37 em 1,0 p.u. e corrigir a tensão das demais barras deficientes para dentro da faixa requerida, o conversor *shunt* forneceu uma potência reativa de aproximadamente 273 MVar.

Na Figura 43 é comparado o perfil de tensão do caso em que o GUPFC está desligado (caso base) com o Caso II onde o dispositivo está atuando no controle de fluxo que possibilita ter o melhor perfil de tensão para o sistema *New England*, ou seja, todas as barras com níveis de tensão acima de 0,95 p.u.

Figura 43 - Perfil de tensão: Sistema *New England* - comparação entre o Caso Base e o Caso II.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na Tabela 19 são comparados os fluxos de potências ativa e reativa para o caso onde o GUPFC está inserido no SEP sem atuar sobre qualquer parâmetro do mesmo (situação em que o dispositivo encontra-se desligado), com o Caso II onde o GUPFC está atuando sobre os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas controladas pelo dispositivo. Os valores de potência ativa são expressos em (MW) e os de potência reativa em (MVar). Ainda com relação à Tabela 19 é possível concluir que o GUPFC atuou de forma correta no controle dos fluxos de potência, visto que os valores especificados pelo operador na linha de transmissão que liga a barra fictícia F1 à barra 34 do sistema foram  $P_j^{ref} = -3,08396 pu$  e  $Q_j^{ref} = 0,83002 pu$ . Já para a linha de transmissão que liga a barra fictícia F2 à barra 36, os valores

especificados pelo operador foram  $P_k^{ref} = -2,28973 pu$  e  $Q_k^{ref} = 0,9232 pu$ . Para os dois casos foram considerados uma potência de base  $S_B$  igual a 100MVA.

Tabela 19: Fluxos de potências ativa e reativa controlados pelo GUPFC (Sistema *New England*).

Linha De - Para	Com GUPFC – Caso base				Com GUPFC – Caso II			
	$P_{km}$	$Q_{km}$	Perdas		$P_{km}$	$Q_{km}$	Perdas	
			P	Q			P	Q
38 - 10	-33,90	-110,65	0,04	1,00	15,34	-13,99	0,024	0,61
37 - 38	-33,48	-139,24	0,422	6,65	15,37	-52,01	0,03	0,48
<b>F1 - 34</b>	<b>-280,36</b>	<b>-41,5</b>	<b>0,72</b>	<b>10,07</b>	<b>-308,40</b>	<b>83,0</b>	<b>0,856</b>	<b>11,99</b>
<b>F2 - 36</b>	<b>-208,16</b>	<b>-9,23</b>	<b>0,197</b>	<b>2,26</b>	<b>-228,97</b>	<b>92,32</b>	<b>0,258</b>	<b>2,97</b>
36 - 35	-441,35	-88,61	1,37	21,01	-462,23	12,78	1,353	20,75
2 - 35	543,77	231,01	0,00	87,26	542,69	133,25	0,00	78,07
11 - 35	348,39	25,12	0,936	10,96	366,30	-48,42	1,001	11,73
35 - 34	448,51	71,05	0,456	5,92	444,41	11,03	0,415	5,39
34 - 33	166,97	30,68	0,26	4,15	134,74	94,91	0,239	3,83

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Além do correto gerenciamento dos fluxos de potências ativa e reativa nas linhas que o GUPFC exerce o controle, pode-se destacar outra vantagem após a inclusão do dispositivo no SEP, que está relacionada à redução das perdas no sistema de transmissão conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20: Geração de potências ativa e reativa antes e após a instalação do GUPFC (Sistema *New England*).

Caso base (GUPFC desligado)		Caso I		Caso II	
PG (MW)	QG (MVAR)	PG (MW)	QG (MVAR)	PG (MW)	QG (MVAR)
6172,77	1464,00	6172,39	1361,56	6171,69	1103,09

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Por último a Tabela 21 traz uma comparação bastante interessante a respeito do comportamento dos autovalores de interesse antes da instalação do dispositivo e após a sua instalação considerando as situações ilustradas nos Casos I e II.

Tabela 21: Autovalores dominantes e coeficientes de amortecimento para os casos analisados.

Modo	Caso base (GUPFC desligado)		
	Autovalores	$\xi$ (p.u.)	$\omega_n$ (Hz)
L1	-0,2410 ± j 8,309	0,02899	1,3231
L2	-0,1845 ± j 8,263	0,02232	1,3155
L3	-0,2645 ± j 8,083	0,03269	1,2872
L4	-0,2116 ± j 7,167	0,02951	1,1411
<b>L5</b>	<b>0,0849 ± j 6,848</b>	<b>-0,01241</b>	<b>1,09</b>
<b>L6</b>	<b>0,1718 ± j 5,912</b>	<b>-0,02905</b>	<b>0,9413</b>
<b>L7</b>	<b>0,1251 ± j 6,355</b>	<b>-0,01968</b>	<b>1,0117</b>
L8	-0,1087 ± j 6,451	0,01685	1,0268
<b>I</b>	<b>0,0042 ± j 3,505</b>	<b>-0,00119</b>	<b>0,5578</b>
Modo	Caso I		
L1	-0,2408 ± j 8,309	0,02897	1,323
L2	-0,1828 ± j 8,26	0,02223	1,3156
L3	-0,2644 ± j 8,083	0,03269	1,2872
L4	-0,2116 ± j 7,167	0,02951	1,1411
<b>L5</b>	<b>0,0877 ± j 6,848</b>	<b>-0,01282</b>	<b>1,0899</b>
<b>L6</b>	<b>0,1731 ± j 5,914</b>	<b>-0,02925</b>	<b>0,9417</b>
<b>L7</b>	<b>0,1187 ± j 6,359</b>	<b>-0,01866</b>	<b>1,0123</b>
L8	-0,1092 ± j 6,451	0,01693	1,0267
<b>I</b>	<b>0,0095 ± j 3,533</b>	<b>-0,00269</b>	<b>0,5623</b>
Modo	Caso II		
L1	-0,2411 ± j 8,323	0,02896	1,3251
L2	-0,1887 ± j 8,277	0,02279	1,3177
L3	-0,2661 ± j 8,096	0,03286	1,2892
L4	-0,2323 ± j 7,199	0,03216	1,1464
<b>L5</b>	<b>0,0733 ± j 6,839</b>	<b>-0,01072</b>	<b>1,0885</b>
<b>L6</b>	<b>0,1802 ± j 5,914</b>	<b>-0,0305</b>	<b>0,9417</b>
<b>L7</b>	<b>0,1612 ± j 6,395</b>	<b>-0,0252</b>	<b>1,018</b>
L8	-0,1367 ± j 6,484	0,02108	1,0322
<b>I</b>	<b>-0,0045 ± j 3,560</b>	<b>0,00128</b>	<b>0,5667</b>

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Com os resultados da Tabela 21, quando compara-se o caso onde o sistema teste está com o GUPFC no modo desligado com o Caso II, onde o mesmo está controlando fluxos em



determinados trechos do sistema, observa-se o que autovalor referente ao modo interárea torna-se estável, embora com um grau de amortecimento baixo. Quanto aos modos locais, percebe-se pouca influência do GUPFC na estabilização destes modos como pode ser confirmado pelos resultados da Tabela 21.

Dessa forma, conclui-se que será necessária a introdução dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e POD no sistema *New England* para atuar no amortecimento dos modos instáveis e melhorar a margem de amortecimento dos demais modos oscilatórios fracamente amortecidos. Na próxima seção serão abordados a instalação e o ajuste destes controladores de modo que os objetivos de inserir taxas de amortecimento mínimas desejadas para os modos oscilatórios de interesse sejam alcançadas.

## 5.6 SISTEMA *NEW ENGLAND* – INCLUSÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO ESP E GUPFC-POD.

Nesta seção serão analisados e avaliados os resultados do NBA para ajuste dos controladores ESPs e GUPFC-POD, instalados no sistema *New England*, com o objetivo de fornecer amortecimento suplementar aos modos oscilatórios instáveis ou fracamente amortecidos. O desempenho do NBA foi comparado com outras quatro técnicas bioinspiradas (PSO, BFO, AG e BA), para duas faixas de amortecimento mínimo ( $\xi^{des} \geq 10\%$  e  $\xi^{des} \geq 15\%$ ). A qualidade do ajuste encontrado pelo NBA foi avaliada submetendo o sistema teste a um conjunto de diferentes cenários de carga e verificando a manutenção da estabilidade para cada uma das diferentes condições operacionais.

Assim como no sistema simétrico de duas áreas, para o sistema *New England* também foram considerados sinais locais para as entradas dos controladores suplementares. Desse modo, o ESP tem como sinal de entrada a velocidade angular do gerador onde está instalado, enquanto no POD o sinal de entrada é o fluxo de potência ativa na linha de transmissão adjacente à instalação do dispositivo FACTS, ou seja, a variação da potência ativa entre as barras 38 e 37. A saída do ESP será utilizada para modular a tensão de campo do gerador síncrono ( $E_{fd_k}$ ), enquanto a saída do controlador POD ( $\Delta V_{sup}$ ) modulará a componente em quadratura ( $V_{pj}$ ) do conversor secundário do dispositivo GUPFC.

Os parâmetros dos controladores ESP e POD instalados no sistema *New England* também estão sujeitos às restrições. Desta vez, os limites impostos às variáveis dos controladores suplementares são representados segundo as restrições dadas nas equações (185) e (186).

$$0,1 \leq T_{1n} \leq 1,5, \quad 0,01 \leq T_{2n} \leq 0,5, \quad 1,0 \leq K_{ESP} \leq 10,0 \quad (185)$$

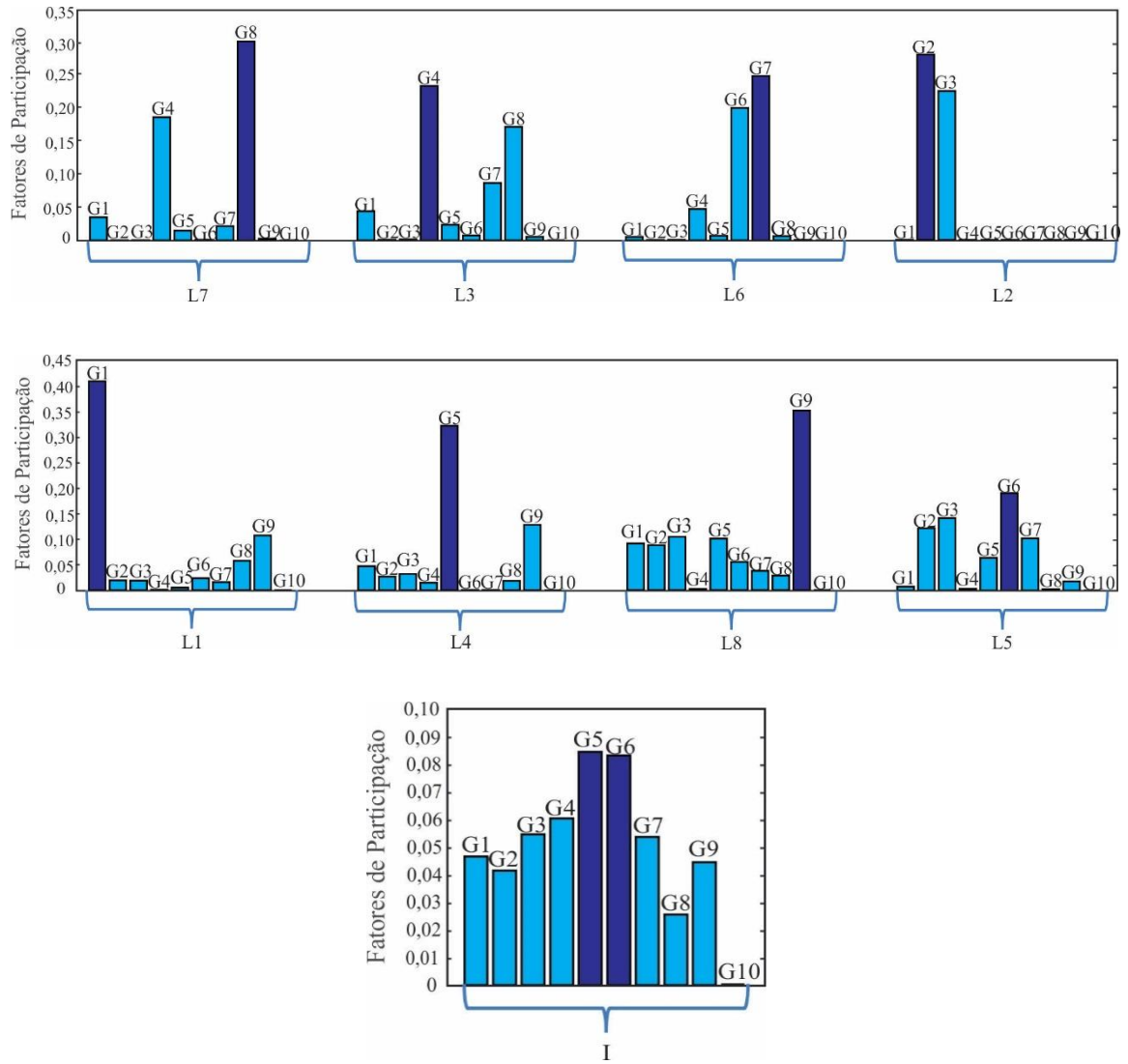
$$0,1 \leq T1^P \leq 0,4, \quad 0,1 \leq T2^P \leq 0,4, \quad 0,05 \leq K_{POD} \leq 0,5 \quad (186)$$

Para determinar a localização que melhor contribua para uma atuação mais efetiva dos controladores ESPs, uma análise prévia dos fatores de participação (KUNDUR, 1994) foi realizada. Na Figura 44 são apresentadas de forma gráfica quais unidades geradoras tem maior influência (ou participação) nos modos oscilatórios de interesse verificados no sistema *New England*. Nesta figura os geradores G1, G2, G4, G5, G6, G7, G8 e G9 são os mais participativos, respectivamente, nos modos locais L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7 e L8. Assim, com o objetivo de garantir que estes modos locais atinjam os níveis de amortecimento desejado, os geradores G1, G2, G4, G5, G6, G7, G8 e G9 deveriam ser equipados com controladores ESPs. Porém, algumas simulações adicionais mostraram que para o modo oscilatório L5 o gerador mais participativo (G6) não é o mais qualificado para a instalação do ESP, visto que o controlador instalado nesta máquina síncrona contribuía negativamente com o amortecimento do modo oscilatório L6 e por consequência interferia na convergência e no tempo de convergência dos métodos de ajuste dos parâmetros destes controladores. Dessa forma, para evitar estes problemas, optou-se por a instalação de um ESP no gerador G3, que é o segundo mais participativo para aquele modo.

Com relação ao modo oscilatório interárea observa-se uma distribuição da participação entre os geradores mais uniformizada, o que justifica tecnicamente a utilização do recurso GUPFC – POD para inserir amortecimento desejado a este modo de oscilação.

Dessa forma, para inserir amortecimento desejado aos modos locais e interárea presentes no sistema teste, serão instalados 8 controladores ESPs nos geradores G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8, G9 e um conjunto GUPFC – POD entre as barras 37 – 34 e 37 – 36 conforme já discutido anteriormente.

Figura 44 - Fatores de participação de cada gerador em cada modo oscilatório do sistema *New England*



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Da mesma forma que as simulações realizadas com o sistema simétrico de duas áreas, cada algoritmo foi executado 100 vezes, e cada teste foi limitado a um máximo de 1000 avaliações da função objetivo dada na equação (178) e sujeito às restrições dadas nas equações (179) a (182).

Na Tabela 22 são apresentados, para as duas faixas de amortecimento desejado ( $\xi^{des} \geq 10\%$ , e  $\xi^{des} \geq 15\%$ ), os valores da taxa de convergência, tempos de convergência médio, mínimo e máximo, e desvio padrão médio. Salienta-se que as tentativas que não convergiram dentro do limite máximo de avaliações da função objetivo, não tiveram seu tempo considerado nas estatísticas.

Considerando a primeira faixa de amortecimento,  $\xi^{des} \geq 10\%$ , observa-se que o AG alcançou uma taxa de convergência de 98% enquanto as demais alcançaram 100% de taxa convergência. Com relação ao tempo médio e o desvio padrão médio, o NBA se sobressai em relação às outras técnicas avaliadas, apresentando valores bem inferiores aos métodos PSO, BFO e AG. Isto contribui para a redução do esforço computacional e demonstra uma baixa taxa de dispersão em torno do tempo médio de convergência e, conseqüentemente, ao número médio de cálculos da função objetivo.

Tabela 22 - Comparação de desempenho dos algoritmos avaliados

Algoritmo	Taxa de amortecimento (%)	Taxa de convergência (%)	Tempo de convergência (s)			Desvio Padrão
			Médio	Mín.	Max.	
PSO	$\geq 10$	100	57,8	7,13	229,7	38,07
	$\geq 15$	42	180,5	32,3	491,1	98,23
BFO	$\geq 10$	100	38,2	6,44	361,9	41,66
	$\geq 15$	70	137,1	14,3	394,4	95,67
AG	$\geq 10$	98	137,1	14,3	394,4	95,67
	$\geq 15$	70	295,3	22,3	2016,1	176,17
BA	$\geq 10$	100	13,6	11,4	26,11	2,17
	$\geq 15$	75	21,2	11,7	58,24	8,49
NBA	$\geq 10$	100	12,7	11,4	17,21	0,88
	$\geq 15$	100	18,3	12,4	61,27	5,14

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

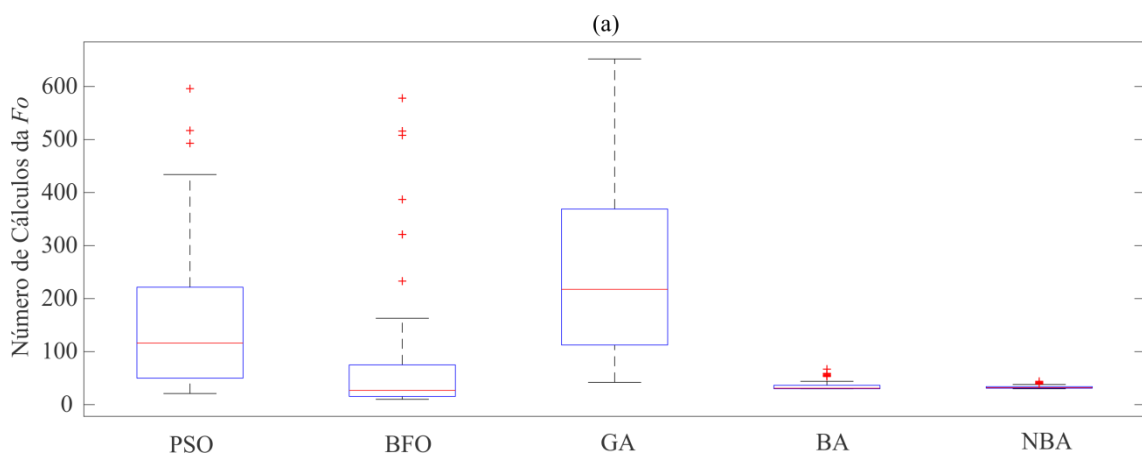
Quando a segunda faixa de amortecimento desejado é considerada, com um índice de amortecimento mínimo mais rigoroso ( $\xi^{des} \geq 15\%$ ), percebe-se uma queda acentuada na taxa de convergência dos métodos sendo o PSO o mais afetado com apenas 42% de taxa de convergência, depois BFO e AG com 70% e o BA com 75% de sucesso para encontrar um ajuste factível dentro do limite de cálculos da função objetivo. A exceção fica por conta do NBA que obteve 100% de convergência, ou seja, para todos os testes realizados a técnica

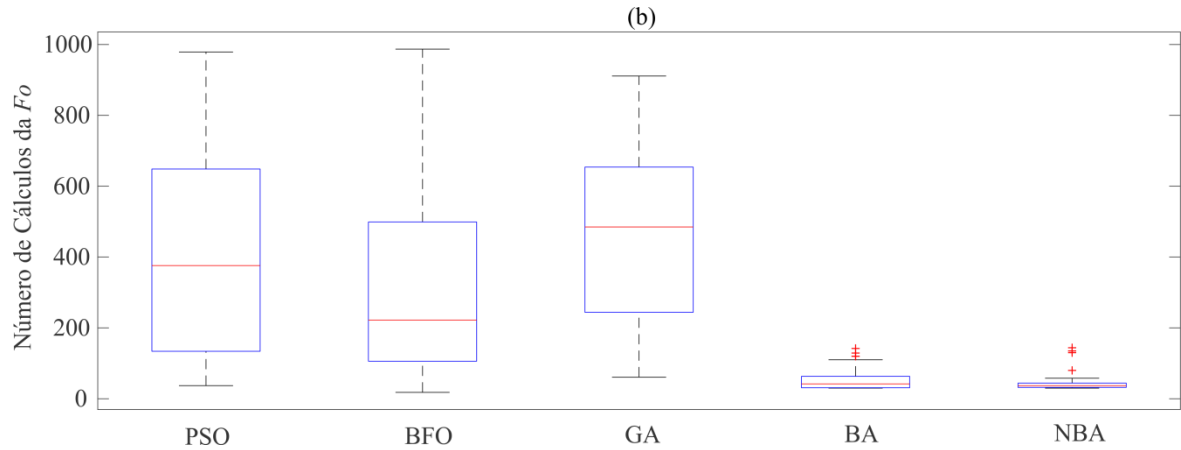
utilizada encontrou uma solução factível para o problema. Quanto aos valores apresentados para o tempo médio e desvio padrão médio, o NBA mais uma vez se sobressai em relação às demais técnicas avaliadas, apresentando valores bem inferiores.

Na Figura 45, um gráfico de *Box Plot* compara o desempenho dos métodos avaliados em relação ao número de cálculos da função objetivo necessários para encontrar uma solução factível ao problema proposto considerando dois diferentes níveis de amortecimento desejado ((a)  $\xi^{des} \geq 10\%$ , e (b)  $\xi^{des} \geq 15\%$ ). A análise desta figura permite concluir que os algoritmos BA e NBA necessitam de um número menor de cálculos da  $Fo$  para encontrar uma solução factível do problema se comparados ao PSO, BFO e AG. Também é possível afirmar que BA e NBA têm desempenhos próximos no que se refere ao número de cálculos da  $Fo$ . Porém, o NBA destaca-se sobremaneira em relação ao próprio BA e a todos os outros algoritmos avaliados quando observa-se a taxa de convergência dos algoritmos ilustrada na Tabela 22. Observe que para ambos os índices de amortecimento, o NBA atinge 100%.

Por fim, ainda considerando os números apresentados na Tabela 22, quando é feita a comparação do BA com o NBA, fica evidente que as alterações feitas neste último, com relação à diversificação de *habitats* e compensação adaptativa do efeito Doppler de ecos, agregaram vantagens evolutivas ao algoritmo, e tornaram o NBA um método mais eficiente, rápido e muito bem adaptado ao problema abordado nesta tese.

Figura 45 - Número de cálculos da  $Fo$ : PSO, BFO, GA, BA e NBA (Sistema *New England*).





Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Um ajuste, selecionado aleatoriamente entre os 100 testes factíveis alcançados pelo NBA ajustado com 15% de amortecimento mínimo, foi utilizado para os controladores ESPs e GUPFC – POD, cujos valores dos parâmetros (tempos em segundos e ganhos em p.u.) são destacados na Tabela 23.

Tabela 23 - Parâmetros dos controladores ESPs e GUPFC-POD

<b>Dispositivo</b>	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	$K$
ESP G1	1,112	0,059	6,953
ESP G2	0,719	0,049	6,541
ESP G3	0,685	0,034	8,593
ESP G4	0,630	0,035	6,078
ESP G5	0,550	0,041	9,900
ESP G7	0,517	0,050	8,747
ESP G8	0,657	0,037	9,229
ESP G9	0,392	0,088	6,184
GUPFC – POD	0,174	0,238	0,225

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Considerando o ajuste mostrado na Tabela 23, foram recalculados os autovalores da matriz de estados do SEP e os modos oscilatórios de interesse são apresentados na Tabela 24. Os autovalores apresentados na Tabela 24, que foram encontrados após o ajuste dos controladores suplementares de amortecimento com os parâmetros mostrados na Tabela 23, serão chamados a partir deste ponto de caso base para o sistema *New England*.

Tabela 24: Autovalores Dominantes, coeficiente de amortecimento, frequências naturais – Sistema New England.

<b>Modos</b>	<b>Autovalores</b>	<b><math>\xi</math> (p.u.)</b>	<b><math>\omega_n</math> (Hz)</b>
L1	-1,289 ± j 8,475	0,1504	1,364
L2	-1,393 ± j 7,259	0,1885	1,176
L3	-1,089 ± j 6,761	0,1590	1,089
L4	-1,457 ± j 6,516	0,2182	1,063
L5	-1,004 ± j 5,916	0,1674	0,955
L6	-1,266 ± j 5,246	0,2354	0,859
L7	-1,098 ± j 4,748	0,2253	0,776
L8	-0,965 ± j 5,028	0,1884	0,815
I	- 0,723 ± j 3,521	0,2011	0,572

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A análise dos dados apresentados na Tabela 24 permite concluir que o ajuste dos controladores realizado pelo NBA cumpriu o objetivo que era fornecer um amortecimento mínimo de 15% para todos os modos oscilatórios de interesse. Da mesma forma que realizado para o sistema simétrico de duas áreas, a qualidade dos ajustes encontrados pelo NBA para o sistema *New England* foi avaliada. Para isso o ponto de operação do SEP foi alterado gerando diferentes cenários de carga. Além do caso base e do caso sem controladores, outros 24 cenários de carga foram considerados. Estes cenários são formados por quatro diferentes fatores de incremento nas cargas ativa e reativa (2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%) e por um conjunto de seis combinações diferentes de variações de potências ativa e reativa em todas as barras de carga do sistema teste [(P+, Q), (P+, Q+), (P, Q+), (P+, Q-), (P-, Q+), (P-, Q-)].

A alocação dos autovalores de interesse dentro de uma região determinada de acordo com as restrições e índices de desempenho discutidos na seção 4.4 podem ser observados nas Figuras 46 a 49. A análise destas figuras permite concluir que para todos os cenários o NBA desloca os autovalores de interesse para o semiplano esquerdo do plano complexo atendendo à restrição de amortecimento mínimo desejado superior ao estipulado em projeto ( $\xi^{des} \geq 15\%$ ). Também fica evidente que para todos os casos a restrição que determina um valor mínimo para a parte real dos autovalores de interesse

( $\sigma_i \leq -0,4$ ) é atendida em conformidade com projeto inicial dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e POD.

Figura 46 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 2,5% nas cargas do SEP).

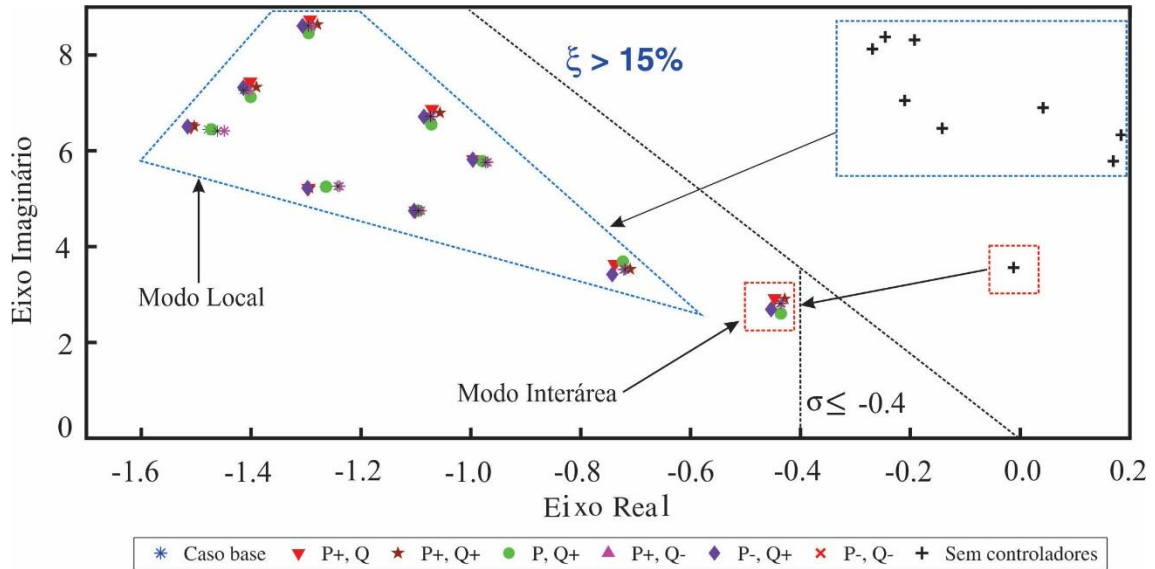


Figura 47 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 5,0% nas cargas do SEP).

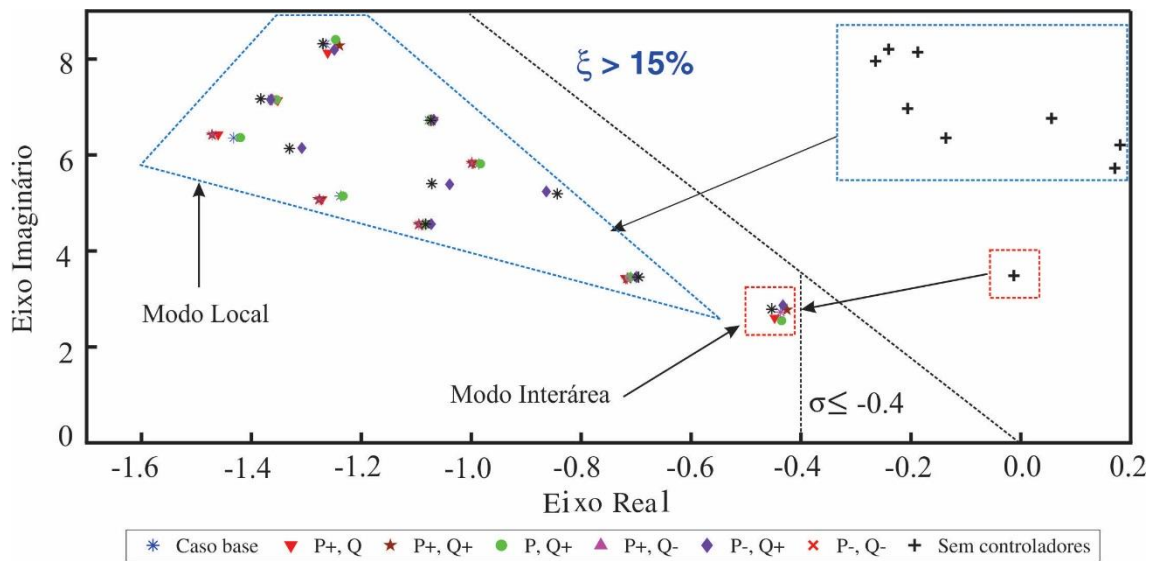
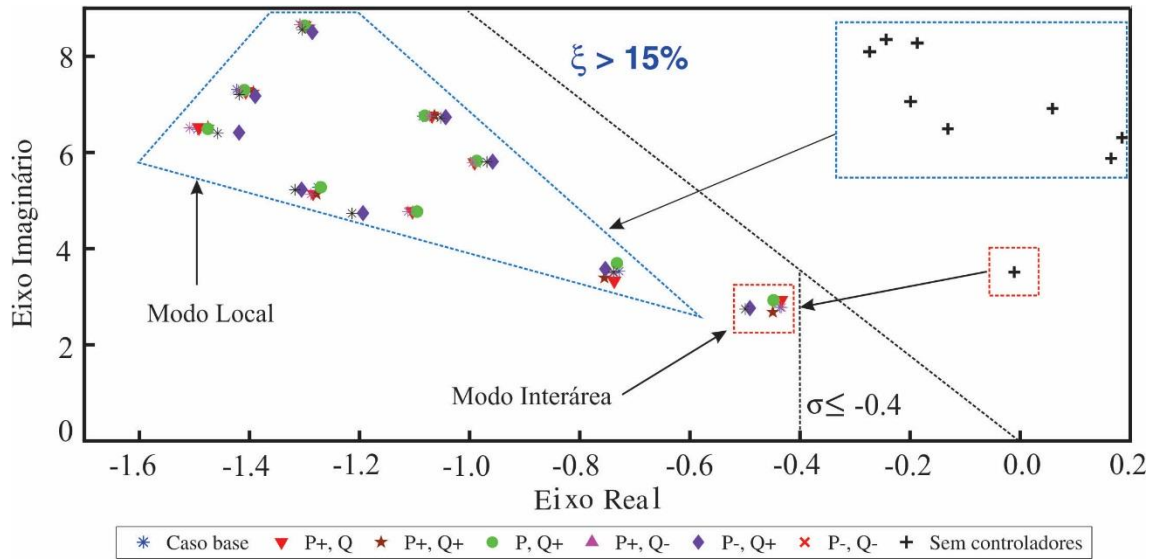


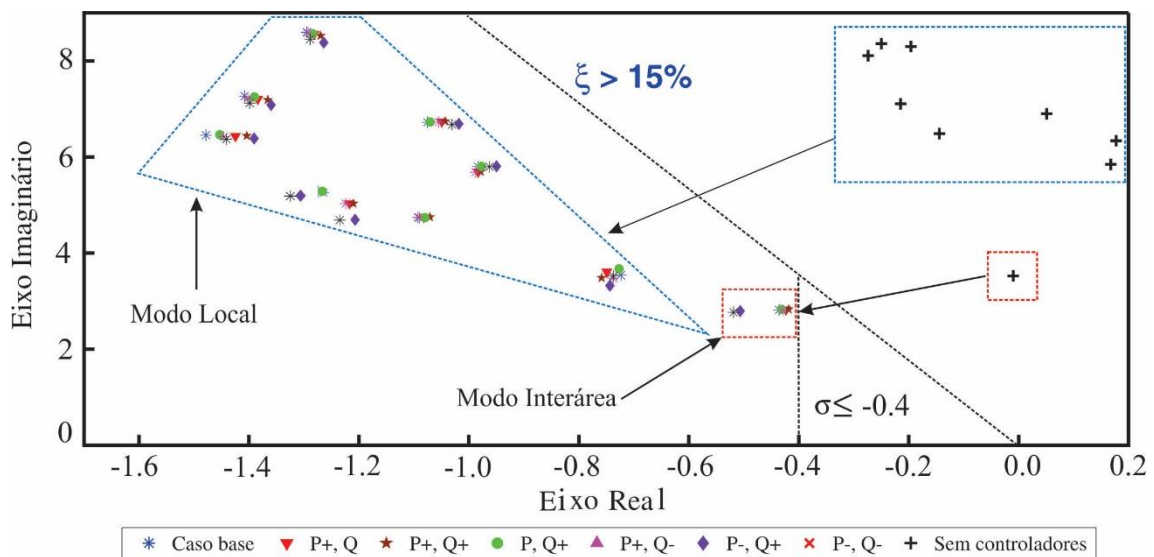


Figura 48 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 7,5% nas cargas do SEP).



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Figura 49 - Alocação dos autovalores de interesse dentro da região determinada pelo projeto dos controladores suplementares de amortecimento (Variação de 10% nas cargas do SEP).

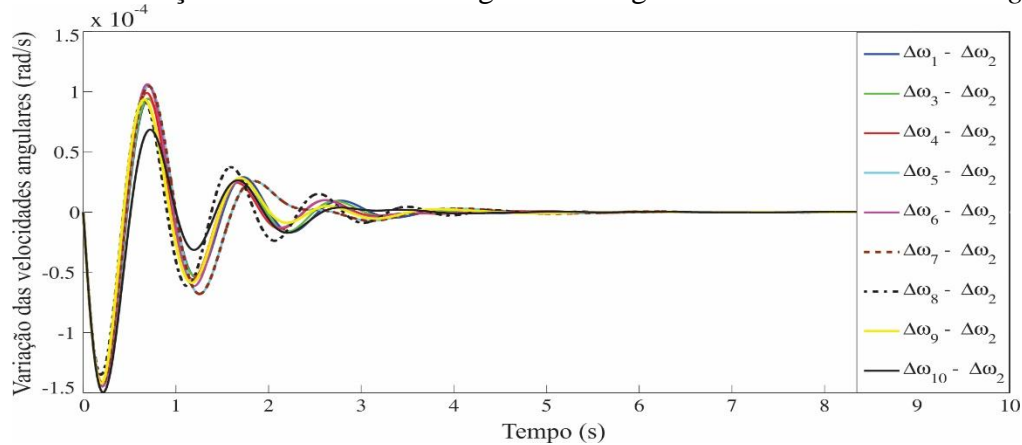


Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Para analisar a estabilidade no domínio do tempo, uma perturbação de 0,05 p.u. foi propositalmente adicionada à potência mecânica do gerador G2 (gerador de referência do sistema *New England*). Para as simulações seguintes foi considerado que o SEP está operando com a atuação dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e GUPFC-POD previamente ajustados com os parâmetros da Tabela 23. As curvas de variação das velocidades angulares das

unidades geradoras que compõem o sistema *New England* após a ocorrência da perturbação são apresentadas na Figura 50. Verifica-se que o ajuste encontrado pelo NBA aumenta a margem de estabilidade do sistema mantendo-o fortemente amortecido na ocorrência de pequenas perturbações.

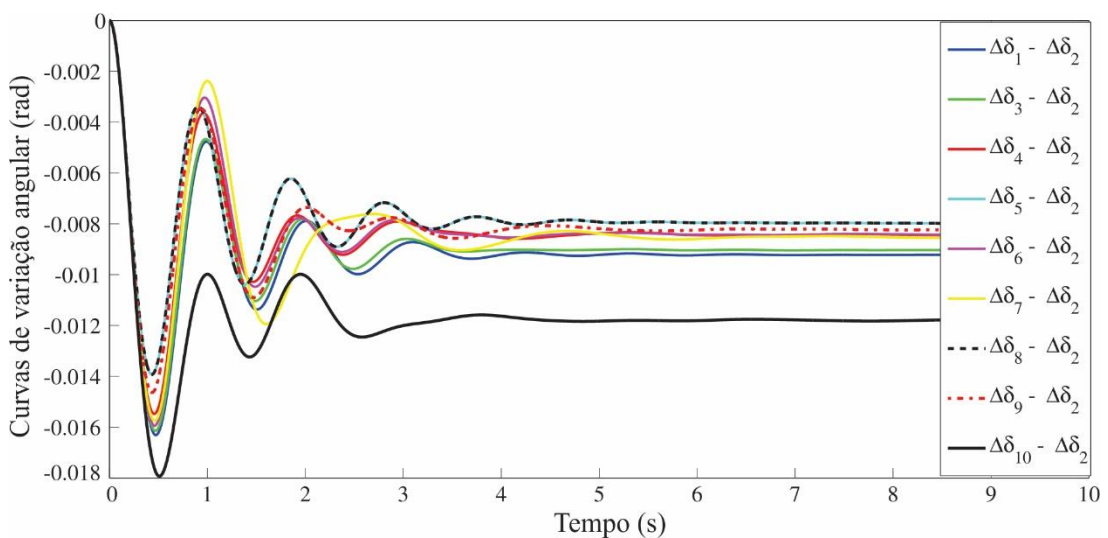
Figura 50 - Variações das velocidades angulares dos geradores do sistema *New England*



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na Figura 51 é mostrado o comportamento das curvas de variação angular das unidades geradoras que compõem o sistema *New England*. Mais uma vez observa-se que a perturbação inserida no sistema teste não foi capaz de levar o SEP à instabilidade em regime permanente, corroborando para afirmar a eficiência do NBA utilizado nesta tese como ferramenta de ajuste de controladores de amortecimento empregados no SEP.

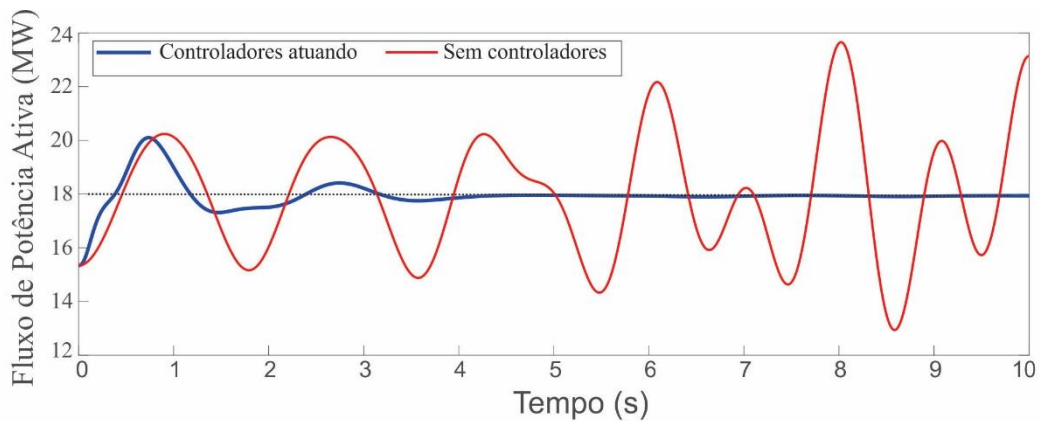
Figura 51 - Variações angulares dos geradores do sistema *New England*



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Finalmente, na Figura 52 é apresentado o fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 37 e 38, o qual é usado como sinal de entrada do dispositivo GUPFC que encontra-se instalado no SEP no trecho entre as barras 37 - 34 e 37 - 36 sendo a barra 37 a barra comum do dispositivo. Considerando o Caso II apresentado na Tabela 19, o fluxo de potência ativa neste trecho após a ação do GUPFC era de 15,37MW e após a perturbação o fluxo se estabiliza rapidamente em um novo patamar próximo de 18,0MW. Porém, como pode ser visualizado na Figura 52, sem ação dos controladores suplementares de amortecimento observa-se que SEP perde a estabilidade após a aplicação dessa mesma perturbação na potência mecânica do gerador G2.

Figura 52 – Fluxo de potência ativa entre as barras 37 e 38 do sistema *New England*



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

## 5.7 CONCLUSÕES

Neste Capítulo foram apresentados os resultados das simulações realizadas em dois sistemas testes amplamente conhecidos na literatura: sistema simétrico de duas áreas e sistema *New England*. A formulação desenvolvida nos Capítulos anteriores foi utilizada para modelar o SEP, o dispositivo FACTS GUPFC e sua estrutura de controle, além dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e POD. Inicialmente foi verificada a instabilidade de ambos os sistemas testes para os pontos de operação considerados como caso base; esta verificação foi realizada no domínio do tempo e no domínio da frequência.

O primeiro sistema teste analisado é conhecido na literatura como sistema simétrico de duas áreas. Este SEP apresentou três modos oscilatórios sendo dois deles estáveis e fracamente amortecidos chamados modos locais de oscilação, ou seja, autovalores com pares complexos conjugados situados no semiplano esquerdo do plano complexo. O terceiro modo oscilatório era instável e com frequência característica de modo de oscilação interárea. Assim, o par complexo conjugado que representa o modo interárea tinha parte real positiva, indicando a instabilidade do SEP para ponto de operação considerado.

Algumas simulações tiveram o intuito de avaliar o desempenho do dispositivo GUPFC no controle de fluxos de potências ativa e reativa, bem como na melhoria do perfil global de tensão do sistema teste analisado. Verificou-se que o dispositivo além de manter a tensão na barra comum de instalação dentro dos limites estabelecidos em projeto, atuou corretamente no gerenciamento dos fluxos ativo e reativo nas linhas de transmissão em que o mesmo exercia controle, maximizando a utilização do sistema de transmissão sem atingir os limites térmicos das LTs. Sua contribuição na redução das perdas do sistema de transmissão também foi destacada durante as análises realizadas nesta tese.

Entretanto, embora corrigindo de forma eficiente o problema de subtensão no sistema teste, o GUPFC, atuando em malha aberta, não foi efetivo para a estabilização do SEP, visto que para isso, o modo interárea deveria ser reposicionado no semiplano esquerdo do plano complexo, o que não ocorreu simplesmente pelo controle de fluxo realizado pelo dispositivo. Desse modo, com o intuito de solucionar o problema de instabilidade observado no sistema teste, foram introduzidos e ajustados os controladores suplementares de amortecimento ESP e POD.

Uma técnica de ajuste desses controladores apresentada no Capítulo 4, o NBA, foi modificada e ajustada para posterior implementação computacional, tendo seu desempenho sido avaliado e comparado a outras quatro técnicas da mesma família de algoritmos inspirados na natureza (PSO, BFO, AG e BA). A técnica utilizada obteve resultados muito satisfatórios e se destacou em relação aos demais métodos avaliados no quesito tempo médio de convergência, taxa de convergência, número de avaliações da função objetivo e desvio padrão para os testes realizados. A fim de avaliar a qualidade dos ajustes encontrados pelo NBA, um ajuste foi escolhido aleatoriamente dentre o conjunto dos ajustes factíveis encontrados pelo método. O ajuste selecionado foi submetido a 24 diferentes cenários de carga e os índices de desempenho mínimos foram todos mantidos dentro dos limites definidos durante a fase de projeto dos controladores, o que permite concluir que o ajuste encontrado apresenta uma certa robustez em relação aos resultados obtidos.

Algumas simulações no domínio do tempo avaliaram o comportamento do sistema simétrico de duas áreas quando o mesmo foi submetido a uma pequena perturbação. Os gráficos de variação angular, variação da velocidade angular e fluxo de potência ativa na linha adjacente a instalação do dispositivo FACTS demonstraram que o sistema simétrico de duas áreas se tornou estável após a instalação dos controladores ESP e POD com seus parâmetros devidamente ajustados pelo NBA.

O segundo sistema analisado (sistema *New England*), por tratar-se de um SEP de médio porte, apresentou para o ponto de operação considerado no caso base, nove modos oscilatórios, sendo oito modos locais (L1 a L8) e um modo interárea (I), definidos de acordo com a sua frequência de oscilação. Destes oito modos locais, os modos L5, L6 e L7, bem como o modo interárea, apresentaram característica instável, ou seja, parte real positiva. Os demais modos locais apresentavam-se fracamente amortecidos. Inicialmente o dispositivo FACTS GUPFC foi instalado adequadamente no sistema teste para gerenciar os fluxos ativo e reativo de modo a resolver o problema relacionado com subtensões presentes em várias barras do sistema *New England*. Novas simulações mostraram mais uma vez a eficiência do GUPFC no controle dos fluxos de potência, na melhoria global dos níveis de tensão do sistema teste, com todas as barras dentro dos limites de tensão requeridos, e na redução das perdas ativas no sistema de transmissão.

Para avaliar a estabilidade dinâmica, estabilizar os modos instáveis e inserir amortecimento adicional aos modos fracamente amortecidos, controladores suplementares de amortecimento ESPs e POD foram criteriosamente instalados no sistema *New England* e seus parâmetros foram ajustados pelo método discutido no Capítulo 4. Simulações comparando o desempenho dos métodos avaliados mostraram a superioridade da técnica utilizada nesta tese (NBA) para o ajuste desses controladores, ressaltando sua alta taxa de sucesso e redução do esforço computacional para a solução do problema proposto.

Da mesma forma que para o sistema simétrico de duas áreas, o segundo sistema teste também foi submetido a 24 diferentes cenários de carga a fim de avaliar o conjunto de parâmetros encontrados pelo NBA para os controladores ESPs e GUPFC – POD. Os resultados das simulações demonstraram a eficiência do ajuste encontrado mantendo todos os autovalores de interesse dentro das regiões definidas na fase de projeto desses controladores. Novas simulações no domínio do tempo foram realizadas para avaliar o comportamento do sistema *New England* quando o mesmo foi submetido a uma pequena perturbação. Analisando os gráficos de variação angular, variação da velocidade angular e fluxo de potência ativa na linha adjacente à instalação do dispositivo FACTS, foi possível concluir que

o sistema *New Engand* se tornou estável após a instalação e ajuste dos controladores pelo NBA.

Finalmente, a realização deste trabalho de doutoramento permitiu destacar algumas importantes contribuições e conclusões:

- a) Avaliou a eficiência do dispositivo FACTS GUPFC juntamente com sua estrutura de controle baseada em controladores PI, para o controle de fluxos de potência em diferentes rotas do sistema de transmissão, para a redução das perdas no sistema de transmissão, para a melhoria do perfil de tensão e para o aumento da segurança operacional do SEP;
- b) Avaliou a efetividade dos controladores suplementares de amortecimento ESP e POD na melhoria da estabilidade nos SEPs analisados;
- c) E por fim, concluir que a técnica avaliada nesta tese, o *Novel Bat Algorithm*, tem grande potencial para ser utilizada como ferramenta de sintonia de controladores suplementares de amortecimento e, por consequência, na análise da estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Uma das principais contribuições desta pesquisa de doutoramento foram as modificações, ajustes, implementação e validação do *Novel Bat Algorithm*, um novo método para o ajuste coordenado de controladores suplementares de amortecimento usualmente empregados no SEP para melhoria da estabilidade a pequeno sinal. O NBA é uma evolução da versão clássica do algoritmo do morcego (*Bat Algorithm*) que incorpora em sua estrutura dois aspectos principais que tornam seu desempenho muito superior ao BA. O primeiro aspecto está relacionado ao mecanismo de compensação adaptativa do efeito Doppler do eco, o que influencia diretamente na melhoria da busca local realizada pelo morcego. A segunda característica incorpora aspectos da física quântica ao algoritmo, e isso faz com que o morcego possa optar entre o comportamento quântico ou o comportamento baseado na mecânica clássica Newtoniana. Essa segunda característica afeta diretamente a diversificação de habitats de busca de alimento.

Os resultados apresentados nas simulações realizadas no Capítulo 5 destacaram a eficiência do NBA, principalmente após as modificações e ajustes implementados durante a pesquisa, para a determinação dos parâmetros de ajuste (constantes de tempo e ganhos) para os controladores ESP e GUPFC-POD, visto que para todos os ensaios executados, os ajustes encontrados pelo método estabilizavam os dois sistemas testes avaliados.

Para validar o NBA, algumas análises estatísticas foram realizadas, e seu desempenho foi comparado a outras quatro técnicas de ajustes bem conhecidos na literatura (PSO, BFO, AG e BA) e aplicados amplamente em diversos problemas de engenharia. Em todos os casos analisados o desempenho do NBA foi superior às outras técnicas utilizadas na avaliação. A qualidade dos ajustes encontrados pelo NBA também foi considerada. Para isso, o SEP foi submetido a 24 diferentes cenários operacionais, onde foi observado que em todos os casos os SEPs simulados mantiveram-se estáveis atendendo todas as restrições e requisitos mínimos de amortecimento definidos durante a fase de projeto dos controladores empregados. Desse modo, conclui-se que o NBA é uma ferramenta com grande potencial a ser explorado para a solução de problemas relacionados à análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Outra importante contribuição desse trabalho foi a implementação e avaliação de uma modelagem para o dispositivo FACTS GUPFC que pode ser utilizada tanto em análises a pequenas perturbações quanto em análises em regime permanente, para isso foi apresentada

uma metodologia para a inclusão do GUPFC no algoritmo de Newton-Raphson utilizando a ferramenta denominada de fluxo de potência expandido. Simulações mostraram a correta atuação do dispositivo FACTS no controle da tensão no barramento comum de instalação, no gerenciamento dos fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão onde está instalado, bem como na redução das perdas do sistema de transmissão e no aumento da margem de segurança operacional do SEP por meio do controle dos limites térmicos do sistema de transmissão. Estes aspectos corroboram para afirmar que o GUPFC é um dos mais modernos e completos dispositivos FACTS em estudo na atualidade.

## 6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Dados os resultados e conclusões obtidas nesta tese a respeito da modelagem do dispositivo FACTS GUPFC por injeção de potência e seu correto funcionamento no gerenciamento dos fluxos de potência nos sistemas testes utilizados, bem como a implementação e validação do *Novel Bat Algorithm* para o ajuste de controladores suplementares de amortecimento empregados na análise da estabilidade a pequenas perturbações no SEP, abre-se caminho para investigações mais aprofundadas e exploração de novas fronteiras do conhecimento científico.

Neste sentido, como orientações de trabalhos futuros o autor destaca algumas propostas que deverão ser analisadas com rigor:

- i. Modelar o dispositivo FACTS *Generalized Unified Power Flow Controller*, pelo Modelo de Injeção de Corrente e incluí-los no Modelo de Sensibilidade de Corrente, para realizar análises estáticas e dinâmicas nos SEPs;
- ii. Avaliar o uso de controladores robustos e/ou de ganhos fixos ajustados de maneira a garantir a estabilidade a pequenas perturbações considerando as incertezas e variações no carregamento dos SEPs.
- iii. Propor, implementar e simular novas *meta-heurísticas*, híbridas ou não, e utilizá-las no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e POD, e comparar os resultados obtidos com outras técnicas de otimização;



- iv. Propor, implementar e simular novas estruturas, não convencionais, para os controladores suplementares de amortecimento ESP, POD e também para a estrutura de controle do dispositivo GUPFC, e comparar os resultados obtidos.
- v. Analisar a eficiência do NBA para o ajuste dos parâmetros da estrutura de controle adotada para o GUPFC (controladores PI) de modo a inserir amortecimento adicional aos modos oscilatórios de baixa frequência observados nos SEPs avaliados nesta tese.

## REFERÊNCIAS

- ABD-ELAZIM, S. M.; ALI, E. S. Synergy of particle swarm optimization and bacterial foraging for TCSC damping controller design. *WSEAS Trans Power System*, Zographou, v. 8, n. 2, p. 74-83, 2013.
- ALI, E.; ABD-ELAZIM, S. TCSC damping controller design based on bacteria foraging optimization algorithm for a multi-machine power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Oxford, v. 37, p. 23-30, 2012.
- ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. New York: IEEE Power Systems Engineering Series, 1993. 464 p.
- ARAUJO, P. B.; ZANETA, L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. *International Journal of Electric Power System & Energy Systems*, London, v. 23, n. 3, p. 173-178, 2001.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, New York, v. 35, n. 3, p. 268-308, 2003.
- CASTRO, M. S. *A Influência de controladores FACTS na estabilidade de ângulo a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência*. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2005.
- CHAUDHURI, B; C. PAL, B. Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 19, n. 1, p. 499-506, 2004.
- CHEN, C. L.; HSU, Y. Y. Coordinated synthesis of multimachine power system stabilizer using an efficient decentralized modal control (DMC) algorithm. *Power Engineering Review*, Piscataway, v. PER-7, n. 8, p. 32-33, 1987.
- CHONG, E. K. P.; ZAK, S. H. *An Introduction to Optimization (Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization)*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley-Interscience, 2008.
- DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. A Power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 9, n. 2, p. 965-971, 1994.
- DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. Synchronizing and damping torques obtained from a power sensitivity model. In: COLLOQUIUM OF CIGRÉ STUDY COMMITTEE, 38., 1993, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: [s. n.], 1993. p. 361-364.
- DEMELLO, F. P.; CONCÓRDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. 88, n. 4, p. 316 - 329, 1969.

DEG, J.; ZHANG, X. – P. Robust damping control of power systems with TCSC: A Multi-Model BMI approach with  $H_2$  performance. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 29, n. 4, p. 1512-1521, 2014.

ESLAMI, M.; SHAREEF, H.; KHAJEHZADEH, M. Optimal design of damping controllers using a new hybrid artificial bee colony algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 52, p. 42-54, 2013.

FORTES, E. V.; MACEDO, L. H.; ARAUJO, P. B.; ROMERO, R. A VNS algorithm for the design of supplementary damping controllers for small-signal stability analysis. *Electrical Power and Energy Systems*, London, v. 94, p. 41–56, 2018.

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.

FURINI, M. A.; PEREIRA, A. L. S.; ARAUJO, P. B. Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 33, n. 3, p. 615 – 622, 2011.

FURINI, M. A. *Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2008.

FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. A comparative study of the damping oscillation function of TCSC and UPFC. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, Bogotá. *Proceedings...* Bogotá: IEEE, 2008. p. 1–6.

GANDOMI, A. H.; YANG, X. S.; TALATAHARI, S.; ALAVI, A. H. *Metaheuristic algorithms in modeling and optimization*. Oxford: Elsevier, 2013. p. 1-24.

GYUGYI, L.; SCHAUDER, C. D.; WILLIAMS, S.; 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.; MOGHVVEMI, 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, p. 2957-2966, 2014.

HAYKIN, S. S. *Redes neurais*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HEFFRON, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of a modern amplitude voltage regulator on underexcited operation large turbine generators. *AIEE transactions on power apparatus and systems*, Piscataway, v. 71, p. 692-697, 1952.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: John Wiley, 1999. 452 p.

HINGORANI, N. G. High power electronics and flexible AC transmission systems. *IEEE Power Engineering Review*, New York, v. 76, n. 4, p. 3 – 4, 1988.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge: MIT, 1992. 211 p. (Bradford book).

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. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 817–824, 2000.

HUSSEIN, T.; SAAD, M. S.; ELSHAFEI, A. L.; BAHGAT, A. Damping inter-area modes of oscillation using an adaptive fuzzy power system stabilizer. *Electric Power System Research*, Amsterdam, v. 80, n. 12, p. 1428-1436, 2010.

KARABOGA, D. *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. [S. l.], 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.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 27., Perth. *Proceedings...* Perth: IEEE, 1995. v. 4, p. 1942–1948.

KIMBARK, E. W. *Power system stability*. New York: Wiley & Sons, 1956.

KLEIN M., ROGERS G. J.; KUNDUR P. A fundamental study of inter-area oscillation in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 6, n. 3, p. 914 – 921, 1991.

KOPCAK, I. *Uma plataforma unificada para análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência*. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

KOPCAK, I.; DA COSTA, V. F.; SILVA, L. C. P. da. A generalized load flow method including the steady state characteristic of dynamic devices. In: IEEE LAUSANNE POWER TECH, 2007, Lausanne. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2007. p. 86–91.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V; ANDERSSON, G; BOSE, A; CANIZARES, C; HATZIARGYRIOU, N; HILL, D; STANKOVIC, A; TAYLOR, C; CUTSEM, V. T.; VITTAL, T. Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on power systems*, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 1387-1401, 2004.

KUNDUR, P. *Power system stability and control*. United States of America: Electric Power Research Institute, 1994. 1176 p.

KUNDUR P.; KLEIN M.; ROGERS G. J.; ZYWNO M. S. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 4, n. 2, p. 614 – 626, 1989.

KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; BRETAS, N. G. Robust control methodology for the design of supplementary damping controllers for FACTS devices. *Revista Controle e Automação*, v. 20, n. 2, p. 192-205, 2009.

LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers, Part I: general concepts, Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts, Part III: Practical Considerations. *IEEE Power Apparatus and Systems*, New York, v. PAS-100, n. 12, p. 3017 – 3046, 1981.

LEE, S.-H.; CHU, C.-C. Power flow computations of convertible static compensators for large-scale power systems. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2004. *Proceedings...* Denver: [s. n.], 2004. v. 1, p. 1172-1177.

LUBIS, R. S.; HADI, S. P.; TUMIRAN. Dynamic simulation of the generalized unified power flow controller in multi-machine power systems. *International Journal of Electrical & Computer Sciences*, Saddar, v. 12, n. 3, p. 75-84, 2012.

LUBIS, R. S.; HADI, S. P.; TUMIRAN. Modeling of the generalized unified power flow controller for optimal power flow. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATICS (ICEEI), 2011, Bandung. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2011. p. 1-6.

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*, Heidelberg, v. 28, n. 6, p. 762-773, 2017.

MARTINS N.; LIMA L. T. G.; PINTO, H. J. C. P. Computing dominant poles of power system transfer functions. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, p. 162 – 170, 1996.

MARTINS N.; LIMA L. T. G. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 5, n. 4, p. 74-82, 1990.

MENG, X. B.; GAO, X. Z.; LIU, Y.; ZHANG, H. A novel bat algorithm with habitat selection and Doppler effect in echoes for optimization. *Expert Systems with Applications*, v. 42, n. 17-18, p. 6350-6364, 2015.

MILANO, F. *Power system modelling and scripting*. London: Springer, 2010. 558 p.

MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; GAMINO, BRUNO R.; MARTINS, L. F. B. Coordinated Tuning of the Parameters of PSS and POD Controllers Using Bio-inspired Algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 54, n. 4, p. 3845-3857, 2018.

MIOTTO, E. L.; DE ARAUJO, PERCIVAL B.; GAMINO, BRUNO R.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B. Coordinated tuning of the parameters of supplementary controllers damping using bioinspired algorithms. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 12th, Curitiba. *Anais...* Curitiba: [s. n.], 2016. p. 1-8.

MIOTTO, E.; COVACIC, M. Study of stability dynamic in a multimachine power system using robust controllers PSS and POD. In: POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE - APPEEC, 2., 2011, Wuhan. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2011. p. 1–5.

MISHRA, S.; DASH, P.; HOTA, P.; TRIPATHY, M. Genetically optimized neuro-fuzzy ipfc for damping modal oscillations of power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 17, n. 4, p. 1140–1147, 2002.

MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Estudo das limitações impostas ao amortecimento de oscilações eletromecânicas pelos zeros da FTMA de controladores suplementares. *Controle & Automação*, Campinas, v. 23, p. 190-201, 2012.

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.

NGUYEN, T.; GIANTO, R. Neural networks for adaptive control coordination of PSSs and FACTS devices in multimachine power system. *IET Generation, Transmission Distribution*, Stevenage, v. 2, n. 3, p. 355–372, 2008.

NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. Damping of power system oscillations by use of controllable components. *IEEE Transactions Power Delivery*, Piscataway, v. 9, p. 2046 – 2054, 1994.

OLIVEIRA, R. V. D.; KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; BRETAS, N. G. Automatic tuning method for the design of supplementary damping controllers for flexible alternating current transmission system devices. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 3, p. 919-929, 2009.

PANDA, S.; YEGIREDDY, N. K.; MOHAPATRA, S. K. Hybrid BFOA-PSO approach for coordinated design of PSS and SSSC-based controller considering time delays. *Int. Journal Electric Power Energy System*, London, v. 49, p. 221-233, 2013.

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, 2016, Macao. *Anais...* Piscataway: IEEE, 2015. p. 1-6.

PASERBA, J. J. How facts controller benefit AC transmission systems. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, New York, v. 3, n. 7-12, p. 991-998, 2003.

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

PERES, W.; OLIVEIRA, E. J. et. al., Coordinated tuning of power system stabilizers using bio-inspired algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 64, p. 419-428, 2015.

PUPIN, C. E. *Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos multimáquinas com dispositivos FACTS do tipo SSSC e controladores suplementares (POD e PSS)*. 2009. 146 f. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira, 2009.

RAMOS, R. A.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. A new methodology for the coordinated design of robust decentralized power system damping controllers. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 19, p. 444-454, 2004.

RAO, S. *Engineering optimization: theory and practice*. New Age International: [s. n.], 1996.

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

SIEMENS. *Flexible AC Transmission Systems*. [S. l.], 2017. Disponível em: <<https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/high-voltage/facts.html>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC transmission system (FACTS)*. England: The Institute of Electrical Engineers, TJ International, 1999. 592 p.

SUN, J.; FANG, W.; Wu, X.; PALADE, V.; XU, W. Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization: Analysis of Individual Particle Behavior and Parameter Selection Evolutionary Computation, 20: 349 – 393, 2012.

TAN, K.; CHIAM, S.; MAMUN, A.; GOH, C. Balancing exploration and exploitation with adaptive variation for evolutionary multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 197, n. 2, p. 701-713, 2009.

TAYLOR, C. W. *Power system voltage stability*. New York: McGraw-Hill, 1993.

UZUNOVIC, E.; FARDANESH, B.; HOPKINS, L.; SHPERLING, B.; ZELINGHER, S.; SCHUFF, A. NYPA convertible static compensator (CSC) application phase I: STATCOM. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2001, Atlanta. *Proceedings...* Atlanta: IEEE, 2001. v. 2, p. 1139–1143.

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. 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. Análise das estruturas de controle do UPFC no amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema elétrico de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE 2012), 4., 2012, Goiânia. *Proceedings...* Goiânia: SBSE, 2012. p. 1-6.

VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. Comparação das estruturas de controle do IPFC e de técnicas de ajuste dos parâmetros do controlador POD. In: X CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (CBQEE 2013), 10., 2013, Araxá. *Proceedings...* Araxá: CBQEE, 2013. p. 1-6.

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 - UNICAMP, Campinas, 2010.

VALLE, D. B.; KOPCAK, I.; DA COSTA, V. F. Modelagem do interline power flow controller (IPFC) no fluxo de carga e análise de carregamento do sistema. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3., Belém. *Anais...* Belém: [s.n.], p. 1-6, 2010.

WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia FACTS - tutorial. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39 –55, 1998.

WANG, H. F.; SWIFT, F. J. An unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations part II: multi-machine power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v.13, n. 4, p. 1355-1362, 1998.

YANG, X. S. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. University of Cambridge, United Kingdom: Second Edition Luniver, 2010.

YANG, X. S. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. University of Cambridge, United Kingdom: Luniver, 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...* Heidelberg: Springer-Verlag, 2009a.

YANG, X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. In: PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON STOCHASTIC ALGORITHMS: FOUNDATIONS AND APPLICATIONS, 2009, Heidelberg. *Proceeding...* Heidelberg: Springer-Verlag, p. 169-178, 2009b.

YANG, X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In: \_\_\_\_\_. *Nature inspired cooperative strategies for optimization* (NICSO 2010). New York: Springer, 2010. p. 65 – 74,

YANG, X. S. Optimization and metaheuristic algorithms in engineering. In: YANG, X. S.; GANDOMI, A. H.; TALATAHARI, S.; ALAVI, A. H. *Metaheuristics in Water, Geotechnical and transport Engineering*. Oxford: Elsevier, 2013. p. 1-23.



YANG, N.; LIU Q.; MCCALLEY, J. D. TCSC controller design for damping interárea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 13, n. 14, p. 1304–1310, 1998.

YIXIN, N.; ON, M. L.; ZHENYU, H.; SHOUSUN, C.; BAOLIN, Z. Fuzzy logic damping controller for FACTS devices in interconnected power systems. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS- ISCAS, 99., 1999, Orlando. *Proceedings...Orlando: IEEE*, 1999. v. 5, p. 591–594.

YU, Y. N. *Electric power system dynamic*. New York: Academic, 1983. 255 p.

ZADEH, L. Fuzzy sets. *Information and Control*, Maryland Heights, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZHENENKO G. N.; FARAH, H. Simultaneous optimization of the adjustable parameters in multi-machine power systems. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 7, p. 103–108, 1984.

## ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTES

Este Anexo apresenta os dados dos geradores, dos reguladores automáticos de tensão, das linhas de transmissão e das barras referentes aos dois sistemas teste utilizados nas simulações anteriores. As Tabelas de 25 a 28 referem-se aos dados do sistema Simétrico de Duas Áreas (SAUER; PAI, 1998), já as Tabelas de 29 a 32 referem-se aos dados do sistema *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001).

Tabela 25 - Dados dos geradores (Sistema Simétrico de Duas Áreas).

Unidade Geradora	H(s)	T' <sub>do</sub>	x' <sub>d</sub> (pu)	x <sub>q</sub> (pu)	x <sub>d</sub> (pu)	D
1	54	8	0,033	0,19	0,2	0,1
2	54	8	0,033	0,19	0,2	0,1
3	63	8	0,033	0,19	0,2	0,1
4	63	8	0,033	0,19	0,2	0,1

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 26 - Dados dos reguladores automáticos de tensão (Sistema Simétrico de Duas Áreas).

Unidade Geradora	T <sub>r</sub> (s)	K <sub>r</sub>
1	0,001	200
2	0,001	200
3	0,001	200
4	0,001	200

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 27 - Dados das linhas de transmissão (Sistema Simétrico de Duas Áreas).

Linha	Barra Inicial	Barra Final	R (série) (pu)	X (série) (pu)	G (shunt) (pu)	B (shunt) (pu)
1	1	5	0,001	0,012	-	-
2	2	6	0,001	0,012	-	-
3	7	8	0,022	0,22	-	0,33
4	7	8	0,022	0,22	-	0,33
5	7	8	0,022	0,22	-	0,33
6	6	7	0,002	0,02	-	0,03
7	6	7	0,002	0,02	-	0,03
8	4	10	0,001	0,012	-	-
9	3	9	0,001	0,012	-	-
10	9	8	0,002	0,02	-	0,03
11	9	8	0,002	0,02	-	0,03
12	5	6	0,005	0,05	-	0,075
13	5	6	0,005	0,05	-	0,075
14	10	9	0,005	0,05	-	0,075
15	10	9	0,005	0,05	-	0,075

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 28 - Dados das barras (Sistema Simétrico de Duas Áreas).

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Potência Ativa (pu)	Potência Reativa (pu)
1	1,0	8,683	7,0	1,9597
2	1,0	-2,088	7,0	5,0525
3	1,0	-11,924	7,0	6,0155
4	1,0	0	7,4369	2,3608
5	0,973	3,846	-	-
6	0,936	-6,928	-	-
7	0,886	-16,162	-11,59	-2,12
8	0,865	-26,575	-15,75	-2,88
9	0,924	-16,765	-	-
10	0,968	-5,149	-	-

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 29: Dados dos geradores (*New England*).

Unidade Geradora	H(s)	T' <sub>do</sub>	x' <sub>d</sub> (pu)	x <sub>q</sub> (pu)	x <sub>d</sub> (pu)	D
1	42,0	10,20	0,031	0,0609	0,1000	4,00
2	30,3	6,56	0,0697	0,2820	0,2950	9,75
3	35,8	5,70	0,0531	0,2370	0,2495	10,0
4	28,6	6,56	0,0436	0,2580	0,2620	10,0
5	26,0	5,40	0,1320	0,6200	0,6700	3,00
6	34,8	7,30	0,0500	0,2410	0,2540	10,0
7	26,4	5,66	0,0490	0,2920	0,2950	8,00
8	24,3	6,70	0,0570	0,2800	0,2900	9,00
9	34,5	4,79	0,0570	0,2050	0,2106	14,0
10	1e9	7,00	0,0001	1e-10	1e-10	10,0

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 30: Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão (*New England*).

Unidade Geradora	T <sub>r</sub> (s)	K <sub>r</sub>
1	0,06	5,0
2	0,05	6,2
3	0,06	5,0
4	0,06	5,0
5	0,02	40,0
6	0,02	5,0
7	0,02	40,0
8	0,02	5,0
9	0,02	40,0
10	9999	0,001

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 31: Dados das linhas de transmissão (*New England*).

Barra Inicial	Barra Final	R (série) (pu)	X (série) (pu)	B (shunt) (pu)
30	31	0,0035	0,0411	0,6987
30	10	0,0010	0,0250	0,7500
31	32	0,0013	0,0151	0,2572
31	25	0,0070	0,0086	0,1406
32	33	0,0013	0,0213	0,2214
32	18	0,0011	0,0133	0,2138
34	33	0,0008	0,0128	0,1342
33	14	0,0008	0,0129	0,1328
35	34	0,0002	0,0026	0,0434
36	35	0,0006	0,0092	0,1130
11	35	0,007	0,0082	0,1389
37	F1	0	0,0100	0
37	F2	0	0,0100	0
F1	34	0,0008	0,0046	0,1476
F2	36	0,0004	0,0046	0,0780
37	38	0,0023	0,0363	0,3804
38	10	0,0010	0,0250	1,2
39	11	0,0004	0,0043	0,0729
39	13	0,0004	0,0043	0,0729
13	14	0,0009	0,0101	0,1723
14	15	0,0018	0,0217	0,366
15	16	0,0009	0,0094	0,1710
16	17	0,0007	0,0089	0,1342
16	19	0,0016	0,0195	0,3040
16	21	0,0008	0,0135	0,2548
16	24	0,0003	0,0059	0,0680
17	18	0,0007	0,0082	0,1319
17	27	0,0013	0,0173	0,3216
21	22	0,0008	0,0140	0,2565
22	23	0,0006	0,0096	0,1846
23	24	0,0022	0,0350	0,3610
25	26	0,0032	0,0323	0,5130
26	27	0,0014	0,0147	0,2396

26	28	0,0043	0,0474	0,7802
26	29	0,0057	0,0625	1,029
28	29	0,0014	0,0151	0,249
12	11	0,0016	0,0435	0
12	13	0,0016	0,0435	0
2	35	0	0,0250	0
39	3	0	0,0200	0
19	4	0,0007	0,0142	0
20	5	0,0009	0,0180	0
22	6	0	0,0143	0
23	7	0,0005	0,0272	0
25	8	0,0006	0,0232	0
31	1	0	0,0181	0
29	9	0,0008	0,0156	0
19	20	0,0007	0,0138	0

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 32: Dados das barras e carregamento (*New England* -- Fluxo Convergado).

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	PG (MW)	QG (MW)	PL (MW)	QL (MW)
1	2	1,0	-3,699	250	87,79	0	0
2	3	1,0	0,000	552,77	236,01	9	5
3	2	1,0	2,266	650	237,27	0	0
4	2	1,0	4,326	632	141,36	0	0
5	2	1,0	3,429	508	132,83	0	0
6	2	1,0	6,323	650	193,93	0	0
7	2	1,0	9,506	560	132,64	0	0
8	2	1,0	2,387	540	36,91	0	0
9	2	1,0	8,394	830	66,23	0	0
10	2	1,0	-11,71	1000	198,89	1104	250
11	0	0,957	-6,426	0	0	0	0
12	0	0,936	-6,424	0	0	8	88
13	0	0,957	-6,289	0	0	0	0
14	0	0,951	-8,129	0	0	0	0
15	0	0,947	-8,487	0	0	320	153

Continuação Tabela 32

16	0	0,962	-6,819	0	0	329	32
17	0	0,965	-8,066	0	0	0	0
18	0	0,964	-9,080	0	0	158	30
19	0	0,980	-0,873	0	0	0	0
20	0	0,976	-1,878	0	0	628	103
21	0	0,959	-4,160	0	0	274	115
22	0	0,977	0,862	0	0	0	0
23	0	0,973	0,539	0	0	275	85
24	0	0,967	-6,728	0	0	309	-92
25	0	0,996	-4,826	0	0	224	48
26	0	0,987	-6,104	0	0	139	17
27	0	0,970	-8,318	0	0	281	76
28	0	0,989	-2,165	0	0	206	28
29	0	0,991	0,920	0	0	284	27
30	0	1,004	-9,747	0	0	0	0
31	0	0,985	-6,331	0	0	0	0
32	0	0,966	-9,429	0	0	322	2
33	0	0,943	-10,289	0	0	500	184
34	0	0,949	-8,940	0	0	0	0
35	0	0,952	-8,210	0	0	0	0
36	0	0,940	-10,778	0	0	233	84
37	0	0,938	-12,753	0	0	522	176
38	0	0,986	-12,174	0	0	0	0
39	0	0,962	-5,506	0	0	0	0
<i>F1</i>	0	-	-	-	-	-	-
<i>F2</i>	0	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

## APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS, ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO E SUBMETIDOS

1. **MIOTTO, E. L.;** FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B. Ajuste dos Parâmetros de Controladores Suplementares pelo Algoritmo Particle Swarm Optimization Utilizando o Modelo de Sensibilidade de Corrente. In: *XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI*, Natal – RN, p. 1 – 8, 2015.
2. **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: *XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, Vitória. Anais do Congresso Brasileiro de Automática - CBA, p. 1 – 8. Vitória – ES, 2016.
3. **MIOTTO, E. L.;** FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.. Ajuste Coordenado dos Controladores ESP e GUPF-CPOD Através do Particle Swarm Optimization. In: *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, 2016, Natal – RN. IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, p. 1 – 8, 2016.
4. **MIOTTO, E. L.;** ARAUJO, P. B.; GAMINO, BRUNO 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/PR. 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications(INDUSCON). p. 1 – 8. DOI: [10.1109/INDUSCON.2016.7874510](https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2016.7874510)
5. **MIOTTO, E. L.;** ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B.; GAMINO, B. R.. Coordinated tuning of the parameters of PSS and POD controllers using the BAT algorithm. In: *XII LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION (CLAGTEE)*, Mar del Plata, 2017.
6. **MIOTTO, E. L.;** ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; GAMINO, BRUNO R.; MARTINS, L. F. B.. Coordinated Tuning of the Parameters of PSS and POD Controllers Using Bio-inspired Algorithms. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, v.54, n. 4, p. 3845 – 3857, (2018). DOI: [10.1109/TIA.2018.2824249](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2824249)
7. **MIOTTO, E. L.;** GAMINO, B. R.; DE ARAUJO, P. B.. Coordinated tuning of the parameters of PSS and POD controllers using a method based on the Novel Bat Algorithm. *Electrical Engineering - Springer (under review)*.



8. 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 de Energia Elétrica (CBQEE)*, 2017, Curitiba – PR. XII CBQEE. p. 1 – 6, 2017.
  
9. FORTES, E. V.; MACEDO, L. H.; MARTINS, L. F. B.; **MIOTTO, E. L.**. A Fireworks Metaheuristic for the Design of PSS and TCSC-POD Controllers for Small-Signal Stability Studies. In: *XII LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION (CLAGTEE)*. Mar del Plata, 2017.
  
10. 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: *XII LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION (CLAGTEE)*. Mar del Plata, 2017.
  
11. MARTINS, L. F. B.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; GAMINO, B. R.; **MIOTTO, E. L.**. 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 - SBAI*, Porto Alegre – RS, 2017.
  
12. FORTES, E. V.; **MIOTTO, E. L.**; ARAUJO, P. B.; PUPIN, C.; MENEZES, M. M. Ajuste dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento utilizando o algoritmo Bacterial Foraging Optimization. In: *XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*, 2015. Centro de Convenções Raymundo Asfora - Campina Grande – PB, 2015. p. 1 – 6.
  
13. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; GAMINO, B. R.; **MIOTTO, E. L.**. Ajuste Coordenado dos Parâmetros dos Controladores Estabilizadores de Sistema de Potência via Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado. In: *XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO*, 2016. Anais do *XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, p. 1 – 12. Vitória – ES, 2016.
  
14. 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:

*XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2016, 2016, vitória. Anais do Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2016. p. 1 – 6. Vitória – ES, 2016.*

15. GAMINO, B. R.; DE 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 – PR. 2016 *12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. p. 1 – 6. DOI: [10.1109/INDUSCON.2016.7874511](https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2016.7874511)
  
16. MARTINS, L. F. B.; GAMINO, B. R.; DE 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 – PR. 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). p. 1 – 6. DOI: [10.1109/INDUSCON.2016.7874534](https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2016.7874534)
  
17. PUPIN, C. E.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; **MIOTTO, E. L.**. Atuação do SSSC no Controle do Fluxo de Potência e Acrescentando Amortecimento as Oscilações Eletromecânicas. In: *XXII Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2018, João Pessoa – PB. Anais do Congresso Brasileiro de Automática. João Pessoa – PB, p. 1 – 8, 2018.*
  
18. FORTES, E. V.; MACEDO, L. H.; **MIOTTO, E. L.**; ARAUJO, P. B.; MARTINS, L. F. B.; PUPIN, C. E.. Projeto de Controladores Suplementares de Amortecimento Usando o Algoritmo de Busca em Vizinhança Variável. In: *XXII Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2018, João Pessoa – PB. João Pessoa – PB, p. 1 – 8, 2018.*
  
19. **MIOTTO, E. L.**; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.. Tuning of the parameters of damping controllers for power electrical systems using Bio-inspired Algorithms. In: 2018 *13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2018, São Paulo – SP. (*aceito para publicação*)
  
20. TAKAHASHI, A. L. M.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; **MIOTTO, E. L.**; MARTINS, L. F. B.. A current sensitivity model for power system stability studies. In: 2018 *13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2018, São Paulo – SP. (*aceito para publicação*)

## APÊNDICE B - ANÁLISE MODAL

A análise do comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência multimáquinas contendo dispositivos ESP e FACTS, quando este é submetido a pequenas perturbações pode ser obtida da sua representação na forma linearizada de espaço de estados de acordo com a equação (187) (FURINI, 2008).

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y = C\Delta x + D\Delta u \end{cases} \quad (187)$$

Na equação (187)  $\Delta \mathbf{x}$  é o vetor de variáveis de estado,  $\Delta \mathbf{y}$  é o vetor de saídas e  $\Delta \mathbf{u}$  o vetor de entradas. As matrizes  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{D}$  representam respectivamente a matriz de estados, matriz de entradas, matriz de saídas e matriz de realimentação.

Aplicando-se a Transformada de Laplace, pode-se obter uma função de transferência que definirá o comportamento do sistema como um todo de acordo com a equação (188) (FURINI, 2008).

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = C \frac{adj(sI-A)}{det(sI-A)} B + D \quad (188)$$

Todos os valores de  $s$  que satisfazem a equação  $det(sI - A) = 0$ , conhecida como equação característica da matriz  $\mathbf{A}$ , são conhecidos como os autovalores ( $\lambda_i$ ) da matriz  $\mathbf{A}$ . Os autovalores podem ocorrer em valores reais ou em pares complexos conjugados, sendo que os primeiros representam modos não oscilatórios e os segundos definem modos oscilatórios, sendo que seu amortecimento é dado pela parte real e a frequência de oscilação pela parte imaginária. Para cada modo oscilatório, associado a um par complexo conjugado ( $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ ) pode-se definir seu coeficiente de amortecimento que determina uma taxa de eliminação das oscilações de acordo com a equação (189) (FURINI, 2008).

$$\xi_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (189)$$

Para estudos de estabilidade a pequenas perturbações realiza-se a análise do sinal dos autovalores da matriz  $\mathbf{A}$ . O Primeiro Método de Lyapunov define que se o sistema possui todos os autovalores com parte real negativa este é estável, porém se ao menos um autovalor possui parte real positivo o sistema é instável, e se a parte real de qualquer autovalor for nula nada se pode afirmar sobre a estabilidade do sistema.

Para cada autovalor podemos definir os autovetores direito ( $\varphi_i$ ) e esquerdo ( $\psi_i$ ) que satisfazem as equações (190) e (191) respectivamente (FURINI, 2008).

$$A\varphi_i = \lambda_i\varphi_i \quad (190)$$

$$\psi_i A = \lambda_i\psi_i \quad (191)$$

O autovetor direito indica em quais variáveis do sistema o modo oscilatório pode ser observado, enquanto que o autovetor esquerdo determina a faixa de contribuição de uma variável num certo modo oscilatório.

Os autovetores direito e esquerdo podem ser combinados de forma a definir uma relação entre as variáveis de estado e os modos oscilatórios, essa relação é representada pelo fator de participação descrito na equação (192) (FURINI, 2008).

$$P_{ki} = \varphi_{ki}\psi_{ik} \quad (192)$$

O fator de participação define a participação relativa de uma variável de estado  $k$  em um determinado modo de oscilação  $i$ .

Uma vez obtidas às características de cada modo oscilatório, ações de controle devem ser tomadas para que este modo se torne mais amortecido. Para que o controlador inserido contribua de maneira positiva ao amortecimento deve-se escolher um conjunto de entrada e saída de maneira que se obtenha a maior controlabilidade e observabilidade. Ou seja, o modo oscilatório deve ser observável na variável de entrada do controlador, enquanto que a variável de saída deve produzir uma maior influência sobre o sistema. Os resíduos ( $R_i$ ) de uma função de transferência fornecem informações sobre a controlabilidade e observabilidade do conjunto entrada-saída para o controlador concomitantemente para um determinado modo de oscilação.

Considere que a função de transferência expressa na equação (188) possa ser expandida em frações parciais, tal que possa ser dada como na equação (193), em função das matrizes  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{B}$  e dos autovetores direito e esquerdo (MARTINS, LIMA, 1990; FURINI, 2008).

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \sum \frac{C\varphi_i\psi_i B}{(s-\lambda_i)} = \sum \frac{R_i}{(s-\lambda_i)} \quad (193)$$

Da equação (193) nota-se que o resíduo é dado pelo produto entre a observabilidade de uma entrada  $C_j$  e a controlabilidade de uma saída  $B_k$  associado a um determinado autovalor de acordo com o conjunto de equações (194) (MARTINS, LIMA, 1990; FURINI, 2008).

$$\begin{cases} \text{Obser} = C_j \varphi_i \\ \text{Cont} = \psi_i B_k \\ R_{ijk} = \text{Obser} \cdot \text{Cont} \end{cases} \quad (194)$$