

ELENILSON DE VARGAS FORTES

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO DE CHU-BEASLEY  
ESPECIALIZADO NO AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS  
CONTROLADORES SUPLEMENTARES E DISPOSITIVO FACTS  
IPFC**

Ilha Solteira  
2016





ELENILSON DE VARGAS FORTES

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO DE CHU-BEASLEY  
ESPECIALIZADO NO AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS  
CONTROLADORES SUPLEMENTARES E DISPOSITIVO FACTS  
IPFC**

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  
2016

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F738a Fortes, Elenilson de Vargas.  
aplicação do algoritmo genético de chu-beasley especializado no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares e dispositivo FACTS IPFC  
Elenilson de Vargas Fortes. - Ilha Solteira : [s.n.], 2016  
219 f.:il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2016

Orientador: Percival Bueno de Araujo

Inclui bibliografia

1. Modelo de Sensibilidade de Corrente. 2. Interline Power Flow Controller. 3. Metaheurísticas. 4. Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado. 5. Dispositivos FACTS.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: Aplicação do Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado no Ajuste dos Parâmetros dos Controladores Suplementares e Dispositivo FACTS IPFC.

**AUTOR: ELENILSON DE VARGAS FORTES**

**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. GIDEON VILLAR LEANDRO

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. LUÍS FERNANDO COSTA ALBERTO

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos-USP

Ilha Solteira, 21 de outubro de 2016



## **DEDICATÓRIA**

À minha família, minha esposa Eliane e minha filha Bruna, aos meus pais Ozilia e Jonas, meus irmãos Emerson, Jonas Junior, Jaqueline e Janielli por todo apoio, confiança e incentivo em todos os momentos.





## **AGRADECIMENTOS**

Nessa nova empreitada de minha vida tive a oportunidade de conhecer algumas pessoas que foram fundamentais nesta caminhada. Gostaria de agradecer a DEUS, pois sempre estive do meu lado nos momentos mais difíceis de minha vida.

O dia em que eu saí de casa, na igreja, minha querida mãe me pediu para tocar um hino “Deus vos guarde pelo seu poder”. Talvez ela sabia que a partir deste momento eu seguiria meu rumo na vida e não voltaria mais para casa. Mas também sabia ela que poderia confiar em mim, pois os ensinamentos de meus pais sempre foram exemplares. Portanto, quero aqui prestar uma homenagem aos meus pais Ozilia Loureti Fortes e Jonas de Vargas Fortes.

Quero também agradecer imensamente a minha esposa Eliane e a minha Filha Bruna, que mesmo longe durante este período no doutorado, foram firmes e leais. Obrigado pelo amor e carinho a mim concedidos e me desculpem pelos momentos em que não estive presente.

Aos meus queridos irmãos Emerson, Jonas Júnior, Jaqueline e Janielli pelo apoio em momento difíceis e pelo companheirismo que sempre foram de grande valia em todos os momentos de minha vida.

Ao pastor David Jonathan Flor e sua esposa Nilce Petry Flor pelos ensinamentos nos cultos e no catecismo durante o período que estiveram presentes na igreja de São João Batista de Panorama, Rio Bananal-ES.

Gostaria de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio e incentivo financeiro no período em que estive cursando o doutorado.

Ao meu orientador Percival Bueno de Araujo pela oportunidade de realizar este trabalho e, portanto, contribuir diretamente na minha formação profissional.

Aos meus colegas de departamento Ednei Miotto, Bruno Gamino, Luiz Fabiano e Carlos Pupin. Em especial ao Leonardo Henrique Macedo pela paciência, ensinamentos e trabalhos realizados em conjunto nesta Universidade.

Aos meus amigos pessoais, Antônio Falcão e Edinelço Dalcumune pelos conselhos a mim concedidos.

A todos os meus colegas de graduação e aos professores do ensino fundamental, médio,

graduação, do mestrado e doutorado pelos ensinamentos. Em especial professor Percival, José Anadir, Lenice, Santinha, Jamil, Lucilene Rosa e Gercílio.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás pelo aporte financeiro e afastamento de minhas atividades presenciais no local de trabalho que foram de muita valia e certamente tiveram papel inportantíssimo na minha formação.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## **EPIGRAFE**

*“ Alguns homens vêem as coisas como são, e dizem ‘Por quê?’  
Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo ‘Por que não?’ ”*

***Geroge Bernard Shaw (1856-1950)***



## RESUMO

Este trabalho apresenta o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros de controladores Proporcional-Integral e suplementares de amortecimento (Estabilizadores de Sistemas de Potência e *Interline Power Flow Controller - Power Oscillation Damping*) em sistemas elétricos de potência multimáquinas. O objetivo principal deste trabalho é inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas de baixa frequência classificadas como local e interárea. Para representar o sistema, é utilizado o Modelo de Sensibilidade de Corrente. Desse modo, todos os seus dispositivos e componentes foram modelados por injeção de corrente e, portanto, um novo modelo de injeção de corrente para o *Interline Power Flow Controller* é apresentado. Três sistemas teste foram utilizados nas simulações realizadas neste trabalho, sendo: Simétrico de Duas Áreas, *New England* e o Sul Brasileiro Reduzido. O desempenho da metodologia proposta (Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado), no que concerne ao ajuste dos parâmetros dos controladores, foi comparado a outros dois algoritmos bastantes difundidos na literatura: *Particle Swarm Optimization* e o Algoritmo Genético com Elitismo. Os resultados demonstraram que o algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado foi mais eficiente que as demais técnicas apresentadas, obtendo soluções robustas quando variações de cargas foram consideradas, sendo, portanto, credenciado como ferramenta no estudo da análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Palavras-chave: Algoritmo genético de chu-beasley especializado. Estabilidade a pequenas perturbações. Estabilizadores de sistemas de potência. *Interline power flow controller*. *Power oscillation damping*. Modelo de sensibilidade de corrente. Metaheurísticas.



## ABSTRACT

This work presents the Specialized Chu-Beasley's Genetic Algorithm to perform the coordinated tuning of the parameters of the Proportional-Integral and supplementary damping controllers (Power Systems Stabilizers and Interline Power Flow Controller - Power Oscillation Damping) in multi-machine electric power systems. The main objective is to insert damping to low-frequency oscillations, classified as a local and inter-area. The Current Sensitivity Model is used to represent the system. Thus, all devices and their components are modeled by current injection, and therefore a new current injection model for the Interline Power Flow Controller is presented. Three systems were used in the simulations: the two-areas symmetric, the New England, and the Reduced Southern Brazilian system. The performance of the proposed methodology (Specialized Chu-Beasley's Genetic Algorithm), for tuning of the parameters of the controllers was compared to two other algorithms, presented in the literature: The Particle Swarm Optimization method and a Genetic Algorithm with elitism. The results demonstrated that the Specialized Chu-Beasley's Genetic Algorithm was more effective than the other techniques presented, generating robust solutions when variations on the loads were considered, and therefore accredited it as a tool in the analysis of the study of small-signal stability.

**Keywords:** Specialized Chu-Beasley's Genetic Algorithm. Small-signal stability. Power Systems Stabilizers. Interline Power Flow Controller. Power oscillation damping. Current Sensitivity Model. Metaheuristics.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação de um IPFC com dois conversores série.	26
Figura 2	Circuito equivalente de um IPFC com duas fontes de tensão série.	27
Figura 3	Diagrama fasorial da tensão série injetada ( $n = j, k$ ).	28
Figura 4	Modelo de Injeção de Potência do IPFC.	32
Figura 5	Balanco de potência nas barras em que o IPFC encontra-se instalado.	33
Figura 6	Controle dos fluxos de potência pelo IPFC.	34
Figura 7	Representação do modelo de injeção de potência e controle dos fluxos.	35
Figura 8	Controladores PI para o IPFC.	36
Figura 9	Sistema de controle para componente em quadratura para o primeiro conversor.	37
Figura 10	Sistema de controle para componente em fase para o primeiro conversor.	37
Figura 11	Sistema de controle para componente em quadratura para o segundo conversor.	38
Figura 12	Enrolamentos do Gerador Síncrono Trifásico - 2 Polos.	44
Figura 13	Diagrama Unifilar de um Gerador Síncrono Conectado a uma Barra Genérica $k$ .	44
Figura 14	Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas.	47
Figura 15	Diagrama em Blocos do Regulador Automático de Tensão.	56
Figura 16	Modelo de Injeção de Corrente do IPFC.	64
Figura 17	Diagrama Unifilar - Balanço Nodal de Correntes.	65
Figura 18	Modelo Dinâmico para o ESP.	69
Figura 19	Modelo Dinâmico para o ESP: Bloco <i>Washout</i> .	69
Figura 20	Modelo Dinâmico para o ESP: Primeiro Bloco dos Compensadores.	70
Figura 21	Modelo Dinâmico para o ESP: Segundo Bloco dos Compensadores.	71
Figura 22	Modelo Dinâmico para o ESP: Malha de Controle dos RATs.	72
Figura 23	Modelo Dinâmico do Dispositivo IPFC-POD.	73

Figura 24	Modelo Dinâmico para o POD: Divisão do Bloco <i>Washout</i> .	73
Figura 25	Modelo Dinâmico para o POD: Divisão do Primeiro Bloco de Avanço/Atraso de Fase.	74
Figura 26	Modelo Dinâmico para o POD: Divisão do Segundo Bloco de Avanço/Atraso de Fase.	74
Figura 27	Modelo Dinâmico para o POD: Tensão em Quadratura do Conversor Primário do IPFC.	75
Figura 28	Deslocamento da posição de uma partícula.	88
Figura 29	Estrutura de dados e terminologia de um AG (Cromossomo com 9 genes e alelos binários)	93
Figura 30	Seleção por torneio no AGCBE.	102
Figura 31	Discretização de uma variável na melhoria local.	103
Figura 32	Representação de um indivíduo utilizado nos algoritmos AGCBE, AG e PSO.	105
Figura 33	Região de localização dos autovalores desejados ( $\lambda_i^{des}$ ).	106
Figura 34	Diagrama unifilar do sistema Simétrico de Duas Áreas.	110
Figura 35	Local de inserção do IPFC no Simétrico de Duas Áreas.	111
Figura 36	Perfil de tensão para o caso base no sistema Simétrico de Duas Áreas.	112
Figura 37	Fatores de participação de cada gerador em cada modo oscilatório do sistema Simétrico de Duas Áreas.	113
Figura 38	Perfil de tensão das barras do sistema Simétrico de Duas Áreas: sem e com a atuação do IPFC.	114
Figura 39	Controle dos fluxos de potência ativa realizado pelo IPFC no sistema Simétrico de Duas Áreas.	116
Figura 40	Número de cálculos da função objetivo: AGCBE, PSO e AG (Simétrico de Duas Áreas).	119
Figura 41	Posicionamento dos autovalores de interesse após o ajuste dos parâmetros dos controladores PIs, ESPs e POD: Simétrico de Duas Áreas.	121
Figura 42	Variação da velocidade angular do gerador G1.	122
Figura 43	Diagrama Unifilar do Sistema <i>New England</i> .	123

Figura 44	Local de inserção do IPFC no <i>New England</i> .	124
Figura 45	Perfil de tensão para o sistema <i>New England</i> para o caso base.	125
Figura 46	Fatores de participação do sistema <i>New England</i> (modos $\lambda_1$ a $\lambda_9$ ).	126
Figura 47	Perfil de tensão nas barras do sistema <i>New England</i> .	128
Figura 48	Controle dos fluxos de potência ativa executada pelo IPFC no sistema <i>New England</i> .	129
Figura 49	Número de cálculos da função objetivo: AGCBE, PSO e AG ( <i>New England</i> ).	132
Figura 50	Posicionamento dos autovalores de interesse após o ajuste dos parâmetros dos controladores PIs, ESPs e POD: <i>New England</i> .	135
Figura 51	Variações das velocidades angulares das máquinas G1, G3 a G10 do sistema <i>New England</i> .	136
Figura 52	Comparação entre os amortecimentos dos autovalores de interesse para diferentes níveis de carregamentos nas barras do sistema <i>New England</i> .	137
Figura 53	Diagrama unifilar do sistema Sul Brasileiro Reduzido.	138
Figura 54	Fatores de participação do sistema Sul Brasileiro (modos $\lambda_1$ a $\lambda_9$ ).	139
Figura 55	Número de cálculos da função objetivo: AGCBE, PSO e AG (Sul Brasileiro).	142
Figura 56	Posicionamento dos autovalores de interesse após o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs: Sul Brasileiro.	144
Figura 57	Variação Angular do Gerador G5.	145



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Variáveis da estrutura de controle do IPFC para o caso base - Simétrico de Duas Áreas.	110
Tabela 2	Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) do sistema Simétrico de Duas Áreas - caso base.	111
Tabela 3	Ganhos e constantes de tempos dos controladores PIs no sistema Simétrico de Duas Áreas.	114
Tabela 4	Variáveis da estrutura de controle do IPFC após o controle dos fluxos nas linhas $L_{11}$ e $L_{12}$ .	115
Tabela 5	Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) do sistema Simétrico de Duas Áreas - com atuação do IPFC.	116
Tabela 6	Comparação de desempenho do AGCBE, PSO e AG no sistema Simétrico de Duas Áreas.	118
Tabela 7	Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Simétrico de Duas Áreas).	120
Tabela 8	Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Simétrico de Duas Áreas).	120
Tabela 9	Ganhos, constantes de tempos dos controladores PIs ajustados pelo AGCBE (Simétrico de Duas Áreas).	121
Tabela 10	Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) ajustados pelo AGCBE: Simétrico de Duas Áreas	121
Tabela 11	Variáveis da estrutura de controle do IPFC para o caso base - <i>New England</i> .	124
Tabela 12	Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) do sistema <i>New England</i> - Caso base.	125
Tabela 13	Ganhos e constantes de tempos dos controladores PIs no sistema <i>New England</i> .	127

Tabela 14	Variáveis da estrutura de controle com atuação IPFC - <i>New England</i> .	128
Tabela 15	Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) do sistema <i>New England</i> - Com IPFC em operação.	130
Tabela 16	Comparação de desempenho do AGCBE, PSO e AG no sistema <i>New England</i> .	131
Tabela 17	Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE ( <i>New England</i> ).	133
Tabela 18	Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE ( <i>New England</i> ).	133
Tabela 19	Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE ( <i>New England</i> ).	134
Tabela 20	Ganhos, constantes de tempo dos controladores PIs ajustados pelo AGCBE ( <i>New England</i> ).	134
Tabela 21	Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) ajustados pelo AGCBE: <i>New England</i> .	134
Tabela 22	Autovalores de interesse ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) do sistema Sul Brasileiro.	138
Tabela 23	Comparação de desempenho do AGCBE, PSO e AG no sistema Sul Brasileiro	141
Tabela 24	Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Sul Brasileiro).	143
Tabela 25	Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Sul Brasileiro).	143
Tabela 26	Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) ajustados pelo AGCBE: Sul Brasileiro.	143
Tabela 27	Dados dos geradores síncronos - Simétrico de Duas Áreas.	159
Tabela 28	Dados dos reguladores automáticos de tensão - Simétrico de Duas Áreas.	159
Tabela 29	Dados das linhas de transmissão - Simétrico de Duas Áreas.	159
Tabela 30	Dados das barras e carregamentos - Simétrico de Duas Áreas.	160

Tabela 31	Dados dos geradores síncronos - <i>New England</i> .	161
Tabela 32	Dados dos reguladores automáticos de tensão - <i>New England</i> .	161
Tabela 33	Dados das linhas de transmissão - <i>New England</i> .	162
Tabela 34	Dados das barras e carregamentos - <i>New England</i> .	163
Tabela 35	Dados dos geradores síncronos - Sul Brasileiro.	165
Tabela 36	Dados dos reguladores automáticos de tensão - Sul Brasileiro.	165
Tabela 37	Dados das linhas de transmissão - Sul Brasileiro.	166
Tabela 38	Dados das barras e carregamentos - Sul Brasileiro.	168





## LISTA DE SIGLAS

SEPs	Sistemas Eléctricos de Potências
SEP	Sistema Eléctrico de Potência
ESP	Estabilizadores de Sistema de Potência
RATs	Reguladores Automáticos de Tensão
FACTS	Flexible AC Transmission System
SVC	Static Var Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Condensador
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn Off Thyristor
STATCOM	Static Synchronous Shunt Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller
GUPFC	Generalized Power Flow Controller
POD	Power Oscillation Damper
PI	Proporcional-Integral
DMC	Decentralized Modal Control
LMIs	Linear Matrix Inequalities
RNAs	Redes Neurais Artificiais
PSO	Particle Swarm Optimization
BFO	Bacterial Foraging Optimization
AG	Algoritmo Genético
AGs	Algoritmos Genéticos
AGCBE	Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado

MBI	Máquina Barra Infinita
MHP	Modelo de Heffron e Phillips
MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
MSC	Modelo de Sensibilidade de Corrente
VSC	Conversor Fonte de Tensão
CC	Corrente Contínua

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_i$	Tensão Complexa no Barramento $i$
$V_j$	Tensão Complexa no Barramento $j$
$V_k$	Tensão Complexa no Barramento $k$
$V_{pq_n}$	Tensão Controlável em Série
$x_{in}$	Reatância de Acoplamento
$V'_j$	Tensão na Barra Fictícia $j'$
$V'_k$	Tensão na Barra Fictícia $k'$
$P_i$	Potência Ativa Injetada na Barra $i$
$Q_i$	Potência Reativa Injetada na Barra $i$
$P_{ji}$	Fluxos de Potência Ativa entre as Barras $j, i$
$P_{ki}$	Fluxos de Potência Ativa entre as Barras $k$ e $i$
$Q_{ki}$	Fluxos de Potência Reativa entre as Barras $k$ e $i$
$Q_{ji}$	Fluxos de Potência Reativa entre as Barras $j$ e $i$
$I_{ij}$	Fluxo de Corrente entre as Barras $i$ e $j$
$I_{ik}$	Fluxo de Corrente entre as Barras $i$ e $k$
$I_{ji}$	Fluxo de Corrente entre as Barras $j$ e $i$
$I_{ki}$	Fluxo de Corrente entre as Barras $k$ e $i$
$\gamma_n$	Parâmetros das Tensões Séries Injetadas
$r_n$	Parâmetros das Tensões Séries Injetadas
$V_{qn}$	Componente em Fase da Fonte de Tensão Controlável Série $V_{pq_n}$
$V_{pn}$	Componente em Quadratura da Fonte de Tensão Controlável Série $V_{pq_n}$
$S_i$	Potência Complexa Injetada na Barra $i$
$S_{ji}$	Fluxo de Potência no Ramo $j - i$
$P_{ni}$	Fluxo de Potência Ativa na Linha $n - i$

$Q_{ni}$	Fluxo de Potência Ativa na Linha $n - i$
$P_{inj_i}$	Injeções de Potência Ativa na Barra $i$ comum a Instalação do IPFC
$Q_{inj_i}$	Injeções de Potência Reativa na Barra $i$ comum a Instalação do IPFC
$P_{inj_n}$	Injeções de Potência Ativa na Barra $n$ ( $n = j, k$ ) comum a Instalação do IPFC
$Q_{inj_n}$	Injeções de Potência Reativa na Barra $n$ ( $n = j, k$ ) comum a Instalação do IPFC
$P_{g_m}$	Potência Ativa Gerada Injetada na Barra $m$
$Q_{g_m}$	Potência Reativa Gerada Injetada na Barra $m$
$P_{l_m}$	Potência Ativa Drenada por Eventuais Cargas Conectadas a Barra $m$
$Q_{l_m}$	Potência Reativa Drenada por Eventuais Cargas Conectadas a Barra $m$
$P_{mk}$	Fluxo de Potência Ativa entre as Barras $m$ e $k$
$Q_{mk}$	Fluxo de Potência Reativa entre as Barras $m$ e $k$
$P_{l_j}$	Fluxo Controlado de Potência Ativa no Ramo $i - j$
$P_{l_k}$	Fluxo Controlado de Potência Ativa no Ramo $i - k$
$Q_{l_j}$	Fluxo Controlado de Potência reativa no Ramo $i - j$
$P_{ref_j}$	Fluxo Especificado de Potência Ativa no Ramo $i - j$
$Q_{ref_j}$	Fluxo Especificado de Potência Reativa no Ramo $i - j$
$P_{ref_k}$	Fluxo Especificado de Potência Ativa no Ramo $i - k$
$K_1$	Ganho do Primeiro Controlador PI
$V_{sup}$	Sinal Suplementar Proveniente do Controlador POD
$K_2$	Ganho do Segundo Controlador PI
$K_3$	Ganho do Terceiro Controlador PI
$T_{1_i}$	Constante de Tempo do Primeiro Controlador PI
$T_{2_i}$	Constante de Tempo do Segundo Controlador PI
$T_{3_i}$	Constante de Tempo do Terceiro Controlador PI
$V_{p_j}$	Componente em Quadratura para o Primeiro Conversor
$V_{p_k}$	Componente em Quadratura para o Segundo Conversor
$V_{q_j}$	Componente em Fase para o Primeiro Conversor

$V_{qk}$	Componente em Fase para o Segundo Conversor
$\delta_k$	Ângulo Interno do Gerador Síncrono $G_k$
$\mathbf{E}'_k$	Tensão Interna Fornecida Pelo Gerador $G_k$
$x'_{dk}$	Reatância Transitória do Gerador $G_k$
$\mathbf{I}_{G_k}$	Corrente Fornecida pelo Gerador $G_k$
$\mathbf{E}^*_k$	Tensão de Eixo em Quadratura do Gerador Síncrono
$V_{dk}$	Tensão Terminal de Eixo Direto do Gerador Síncrono
$V_{qk}$	Tensão Terminal de Eixo em Quadratura do Gerador Síncrono
$\mathbf{I}_{G_{dk}}$	Corrente de Eixo Direto Fornecida pelo Gerador Síncrono
$\mathbf{I}_{G_{qk}}$	Corrente de Eixo em Quadratura Fornecida pelo Gerador Síncrono
$P_{G_k}$	Potência Ativa Gerada pelo Gerador Síncrono
$Q_{G_k}$	Potência Reativa Gerada pelo Gerador Síncrono
$\bar{Z}_{ki}$	Impedância da Linha de Transmissão entre as Barras $k$ e $i$
$\bar{Z}_{kt}$	Impedância da Linha de Transmissão entre as Barras $k$ e $t$
$\mathbf{I}_{ki}$	Corrente que Circula entre as Barras $k$ e $i$
$\mathbf{I}_{kt}$	Corrente que Circula entre as Barras $k$ e $t$
$P_{ki}$	Potência Ativa Transferida da Barra $k$ para a Barra $i$
$Q_{ki}$	Potência Reativa Transferida da Barra $k$ para a Barra $i$
$P_{kt}$	Potência Ativa Transferida da Barra $k$ para a Barra $t$
$Q_{kt}$	Potência Reativa Transferida da Barra $k$ para a Barra $t$
$P_{kl}$	Potência Ativa Consumida por Eventuais Cargas Conectadas a Barra $k$
$Q_{kl}$	Potência Reativa Consumida por Eventuais Cargas Conectadas a Barra $k$
$\mathbf{I}_{lk}$	Corrente Consumida por Eventuais Cargas Conectadas a Barra $k$
$\mathbf{I}_{G_{rk}}$	Corrente de Componente Real Fornecidas Pela Máquina Síncrona
$\mathbf{I}_{G_{mk}}$	Corrente de Componente Imaginário Fornecidas Pela Máquina Síncrona
$\mathbf{I}_{ki_r}$	Corrente que Circula pelas Linha de Transmissão entre a Barra $k$ e $i$ em sua Componente de Eixo Real

$I_{ki_m}$	Corrente que Circula pela Linha de Transmissão entre a Barra $k$ e $i$ em sua Componente de Eixo Imaginário
$I_{kt_r}$	Corrente que Circula pela Linha de Transmissão entre a Barra $k$ e $t$ em sua Componente de Eixo Real
$I_{kt_m}$	Corrente que Circula pela Linha de Transmissão entre a Barra $k$ e $t$ em sua Componente de Eixo Imaginário
$S_{kl}$	Potência Complexa Consumida pela Carga $l$ Conectada a Barra $k$
$P_{lk}$	Potência Ativa Consumida pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$Q_{lk}$	Potência Reativa Consumida pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$I_{lk_r}$	Corrente Drenada Pela Carga $l$ Conectada à barra $k$ em Função de sua Componentes de Eixo Real
$I_{lk_m}$	Corrente Drenada Pela Carga $l$ Conectada à barra $k$ em Função de sua Componentes de Eixo Imaginário
$R1_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Real da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$R2_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Real da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$R3_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Real da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$R4_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Real da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$M1_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Imaginária da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$M2_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Imaginária da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$M3_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Imaginária da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$M4_{G_k}$	Coeficiente de Sensibilidade da Componente Imaginária da Corrente Terminal do Gerador Síncrono
$R1_{ki}$	Coeficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fasor Corrente

	que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$R2_{ki}$	Coefficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fator Corrente que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$R3_{ki}$	Coefficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fator Corrente que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$R4_{ki}$	Coefficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fator Corrente que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$M1_{ki}$	Coefficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$M2_{ki}$	Coefficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$M3_{ki}$	Coefficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$M4_{ki}$	Coefficiente de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente que Circula pela Linha de Transmissão que Conecta as Barras $k$ e $i$
$R1_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$R2_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$R3_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$R4_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Real do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$M1_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$M2_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$M3_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$
$M4_{lk}$	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária do Fator Corrente Drenado pela Carga $l$ Conectada à Barra $k$

$M_k$	Constante de Inércia da Máquina Síncrona
$P_{M_k}$	Potência Mecânica de Entrada da Máquina Síncrona
$D_k$	Coefficiente de Torque de Amortecimento do Laço Eletromecânico da Máquina Síncrona
$K1_k$	Coefficiente de Potência Elétrica do Gerador Síncrono
$K2_k$	Coefficiente de Potência Elétrica do Gerador Síncrono
$K3_k$	Coefficiente de Potência Elétrica do Gerador Síncrono
$K4_k$	Coefficiente de Potência Elétrica do Gerador Síncrono
$T'_{d0_k}$	Constante de Tempo Transitória de Eixo Direto em Circuito Aberto
$x_{d_k}$	Reatância Síncrona de Eixo Direto do Gerador
$K5_k$	Coefficiente de Variação da Tensão Interna do Gerador Síncrono
$K6_k$	Coefficiente de Variação da Tensão Interna do Gerador Síncrono
$K7_k$	Coefficiente de Variação da Tensão Interna do Gerador Síncrono
$K8_k$	Coefficiente de Variação da Tensão Interna do Gerador Síncrono
$K8_k$	Coefficiente de Reação de Armadura do Gerador Síncrono
$K7_k$	Coefficiente de Reação de Armadura do Gerador Síncrono
$V_{ref_k}$	Tensão de Referência do Gerador Síncrono
$K_{r_k}$	Ganho do Regulador Automático de Tensão
$T_{r_k}$	Constante de Tempo do Regulador Automático de Tensão
$E_{fd_k}$	Tensão de campo da Máquina Síncrona
$\Delta x$	Vetor de Variáveis de Estado do Modelo Sensibilidade de Corrente
$\Delta u$	Vetor de Variáveis de Entrada do Modelo Sensibilidade de Corrente
$\Delta z$	Vetor de Variáveis Algébricas do Modelo Sensibilidade de Corrente
$I_{inj_{ir}}$	Injeção de Corrente na Barra $i$ nas Componentes de Eixo Real
$I_{inj_{im}}$	Injeção de Corrente na Barra $i$ nas Componentes de Eixo Imaginário
$I_{inj_{nr}}$	Injeção de Corrente na Barra $n$ ( $n = j, k$ ) nas Componentes de Eixo Real
$I_{inj_{nm}}$	Injeção de Corrente na Barra $n$ ( $n = j, k$ ) nas Componentes de Eixo Imaginário



$K_{ESP}$	Ganho do Estabilizador do Sistema de Potência
$T_{\omega}$	Constante de <i>Washout</i> do Estabilizador do Sistema de Potência
$T_1$	Constante de Tempo do Estabilizador do Sistema de Potência
$T_2$	Constante de Tempo do Estabilizador do Sistema de Potência
$T_3$	Constante de Tempo do Estabilizador do Sistema de Potência
$T_4$	Constante de Tempo do Estabilizador do Sistema de Potência
$\Delta\dot{V}_{1k}$	Variável de Estado Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{11k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{12k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{13k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{14k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{15k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{16k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{17k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$\Delta\dot{V}_{2k}$	Variável de Estado Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{21k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{22k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{23k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{24k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{25k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{26k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{27k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{28k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$\Delta\dot{V}_{sk}$	Variável de Estado Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{31k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{32k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{33k}$	Coefficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência

$Z_{34_k}$	Coeficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{35_k}$	Coeficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{36_k}$	Coeficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{37_k}$	Coeficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{38_k}$	Coeficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{39_k}$	Coeficiente Proveniente do Estabilizador do Sistema de Potência
$Z_{41_k}$	Coeficiente Proveniente da Tensão de Campo da Máquina Síncrona
$Z_{42_k}$	Coeficiente Proveniente da Tensão de Campo da Máquina Síncrona
$Z_{43_k}$	Coeficiente Proveniente da Tensão de Campo da Máquina Síncrona
$Z_{44_k}$	Coeficiente Proveniente da Tensão de Campo da Máquina Síncrona
$K_{POD}$	Ganho do <i>Power Oscillation Damping</i>
$T_{p1}$	Constante de Tempo do <i>Power Oscillation Damping</i>
$T_{p2}$	Constante de Tempo do <i>Power Oscillation Damping</i>
$T_{p3}$	Constante de Tempo do <i>Power Oscillation Damping</i>
$T_{p4}$	Constante de Tempo do <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta P_{km}$	Variações da Potência Ativa da Linha que Conecta Barras $k$ e $m$
$\Delta \dot{Y}_1$	Variável de Estado Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta \dot{Y}_2$	Variável de Estado Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta \dot{Y}_3$	Variável de Estado Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta \dot{V}_{p_j}$	Variável de Estado Proveniente do Controlador Proporcional-Integral
$C_{11}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{12}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{13}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{14}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{15}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{21}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{22}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>

$C_{23}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{24}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{25}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{26}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{31}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{32}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{33}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{34}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{35}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{36}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{37}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{41}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{42}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{43}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{44}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{45}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{46}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{47}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{48}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$C_{49}$	Coeficiente Proveniente do <i>Power Oscillation Damping</i>
$r_1$	Distribuições Aleatórias entre 0 e 1
$r_2$	Distribuições Aleatórias entre 0 e 1
$co_i$	Fatores cognitivos no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$P_{best_i}(t)$	Melhores posições de cada indivíduo no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$so_i$	Fatores sociais no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$G_{best}$	Melhor posição entre os indivíduos no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$x_i(t)$	Posição do indivíduo no <i>Particle Swarm Optimization</i>

$v_i(t)$	Velocidade do indivíduo no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$w$	Fator de Inércia do <i>Particle Swarm Optimization</i>
$w_{max}$	Valor Máximo do Fator de Inércia do <i>Particle Swarm Optimization</i>
$w_{min}$	Valor Mínimo do Fator de Inércia do <i>Particle Swarm Optimization</i>
$t_{max}$	Número Máximo de Iterações do <i>Particle Swarm Optimization</i>
$c_1$	Constante de Aceleração do Fator Cognitivo
$c_2$	Constante de Aceleração do Fator Social
$v_{max}$	Velocidade Máxima Permitido no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$x_{max}$	Valor Máximo Permitido para uma Partícula no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$x_{min}$	Valor Mínimo Permitido para uma Partícula no <i>Particle Swarm Optimization</i>
$n_{pop}$	Número de Agentes Pertencentes a uma População
$P$	População Inicial Utilizada no Algoritmo Genético Com Elitismo
$P'$	População Formada a Partir da Aplicação dos Operadores Genéticos Utilizada no Algoritmo Genético Com Elitismo
$P_E$	População Elitizada
$F(x^r)$	Função de Objetivo
$f(x^r)$	Função <i>fitness</i>
$h(x^r)$	Função <i>unfitness</i>
$\rho$	Fator de Ponderação
$\lambda_i^{des}$	Autovalores de Interesse Desejados
$\xi_i^{des}$	Amortecimentos Desejados
$\xi_i^{calc}$	Amortecimentos Calculados
$\lambda_i^{calc}$	Autovalores de Interesse calculados
$\Delta_i$	Passo de Discretização
$u_i$	Limite Superior de uma Variável
$l_i$	Limite Inferior de uma Variável
$\Gamma$	Número Inteiro de Discretizações

$\varphi$	Número aleatório entre 0 e 1
$\gamma$	Fator de Escala
$s_k$	Entrada do Vetor de Sensibilidade $s$
$Y$	Número Máximo de Iterações sem a Ocorrência de Alguma Melhoria no Procedimento de Busca Local
$\tau$	Número Iterações sem Melhoria no Procedimento de Busca Local
$\omega_{ni}$	Frequência Natural não Amortecida
$\xi_i$	Coefficiente de Amortecimento
$Q1$	Primeiro Quartil
$Q3$	Terceiro Quartil
$Q2$	Segundo Quartil
$\lambda_i$	Autovalor de Interesse



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	22
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
<b>2</b>	<b>O DISPOSITIVO <i>INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER</i> (IPFC)</b>	<b>25</b>
2.1	INTRODUÇÃO	25
2.2	ASPECTOS GERAIS DO <i>INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER</i>	25
2.3	MODELO MATEMÁTICO DO <i>INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER</i>	26
2.4	MODELO DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA PARA O IPFC	31
2.5	INCLUSÃO DO IPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA	32
2.6	CONTROLE DO FUXO DE POTÊNCIA PELO IPFC	33
2.7	IMPLEMENTAÇÃO DO IPFC NO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	34
2.8	ESTRUTURA DE CONTROLE DO IPFC	36
2.9	INCLUSÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO IPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA	38
2.10	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	41
<b>3</b>	<b>MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE: SISTEMA MULTIMÁQUINAS</b>	<b>43</b>
3.1	INTRODUÇÃO	43
3.2	EQUAÇÕES BÁSICAS DO MSC	43
3.3	CORRENTES GERADAS E FLUXOS DE CORRENTE NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS	47
<b>3.3.1</b>	<b>Máquina síncrona</b>	<b>47</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Linhas de transmissão</b>	<b>48</b>

<b>3.3.3</b>	<b>Corrente drenada pelas cargas</b>	<b>48</b>
3.4	COEFICIENTES DO MODELO SE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	49
3.5	BALANÇO NODAL DE CORRENTE NO SISTEMAS MULTIMÁQUINAS	53
3.6	EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	54
<b>3.6.1</b>	<b>Equações eletromecânicas da máquina síncrona</b>	<b>54</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Tensão interna da máquina síncrona</b>	<b>55</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Tensão de campo da máquina síncrona</b>	<b>56</b>
3.7	MSC NA FORMA DE ESPAÇO DE ESTADO	57
3.8	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	59
<b>4</b>	<b>INCLUSÃO DO IPFC E DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES ESP E POD NO MSC</b>	<b>61</b>
4.1	INTRODUÇÃO	61
4.2	MODELO DE INJEÇÃO DE CORRENTE PARA O IPFC	62
4.3	BALANÇO NODAL DE CORRENTES CONSIDERANDO A ATUAÇÃO DO IPFC	64
4.4	INCLUSÃO DO IPFC NO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	65
4.5	CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO	68
<b>4.5.1</b>	<b>Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP)</b>	<b>68</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Power Oscillation Damping</b>	<b>73</b>
4.6	INCLUSÃO DOS CONTROLADORES ESPs E IPFC-POD NO MSC	77
4.7	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	82
<b>5</b>	<b>TÉCNICAS DE AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES</b>	<b>85</b>
5.1	INTRODUÇÃO	85
5.2	<i>PARTICLE SWARM OPTIMIZATION</i>	86
5.3	ALGORITMO GENÉTICO	90



5.3.1	<b>Terminologia básica e operadores de reprodução</b>	<b>91</b>
5.3.2	<b>Mecanismos de seleção de indivíduos</b>	<b>94</b>
5.3.3	<b>Algoritmo genético com elitismo</b>	<b>94</b>
5.4	ALGORITMO GENÉTICO DE CHU-BEASLEY (AGCB)	96
5.4.1	<b>Aspectos gerais do algoritmo genético de Chu-Beasley</b>	<b>96</b>
5.4.2	<b>Manipulação das inactibilidades</b>	<b>99</b>
5.4.3	<b>Melhoria local e controle da diversidade na população</b>	<b>99</b>
5.5	ALGORITMO GENÉTICO DE CHU-BEASLEY ESPECIALIZADO	100
5.5.1	<b>Seleção de descendentes</b>	<b>101</b>
5.5.2	<b>Busca local baseada em sensibilidades</b>	<b>102</b>
5.6	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO SUJEITAS AS CONDIÇÕES DE RESTRIÇÃO	105
5.7	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	107
6	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b>	<b>109</b>
6.1	INTRODUÇÃO	109
6.2	SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS	109
6.2.1	<b>Localização dos dispositivos de controles (ESPs e IPFC-POD)</b>	<b>112</b>
6.2.2	<b>Influência do IPFC no controle de tensão e nos fluxos de potência no sistema Simétrico de Duas Áreas</b>	<b>113</b>
6.2.3	<b>Ajustes dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e IPFC-POD no sistema Simétrico de Duas Áreas</b>	<b>115</b>
6.2.3.1	<i>Performance dos algoritmos AGCBE, PSO e AG no Simétrico de Duas Áreas</i>	<i>117</i>
6.2.3.2	<i>Análise da estabilidade a pequenas perturbações no sistema Simétrico de Duas Áreas</i>	<i>120</i>
6.3	SISTEMA NEW ENGLAND	123
6.3.1	<b>Localização dos dispositivos de controles (ESPs e IPFC-POD)</b>	<b>125</b>

<b>6.3.2</b>	<b>Influência do IPFC no controle de tensão e nos fluxos de potência no sistema</b>	
	<i>New England</i>	<b>127</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Ajustes dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e IPFC-POD no sistema</b>	
	<i>New England</i>	<b>128</b>
<b>6.3.3.1</b>	<i>Performance dos algoritmos AGCBE, PSO e AG no New England</i>	<b>131</b>
<b>6.3.3.2</b>	<i>Análise da estabilidade a pequenas perturbações no sistema New England</i>	<b>133</b>
<b>6.4</b>	<b>SISTEMA SUL BRASILEIRO</b>	<b>137</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Ajustes dos parâmetros dos controladores ESPs</b>	<b>139</b>
<b>6.4.1.1</b>	<i>Performance dos algoritmos AGCBE, PSO e AG no Sul Brasileiro</i>	<b>140</b>
<b>6.4.1.2</b>	<i>Análise da estabilidade a pequenas perturbações no sistema Sul Brasileiro</i>	<b>142</b>
<b>6.5</b>	<b>CONCLUSÕES DO CAPÍTULO</b>	<b>145</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>147</b>
<b>7.1</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>147</b>
<b>7.2</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>149</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>151</b>
	<b>ANEXO A - DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS</b>	<b>159</b>
	<b>ANEXO B - DADOS DO SISTEMA <i>NEW ENGLAND</i></b>	<b>161</b>
	<b>ANEXO C - DADOS DO SISTEMA SUL BRASILEIRO</b>	<b>165</b>
	<b>APÊNDICE A - ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS</b>	<b>169</b>
	<b>APÊNDICE B - DERIVADAS DA MATRIZ JACOBIANA</b>	<b>173</b>
	<b>APÊNDICE C - DERIVADAS DA MATRIZ QUE COMPÕE O FLUXO DE CARGA EXPANDIDO</b>	<b>179</b>

<b>APÊNDICE D - LINEARIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE AS BARRAS <math>K</math> E <math>M</math></b>	<b>185</b>
---	------------

<b>APÊNDICE E - DERIVADAS DAS CORRENTES INJETADAS PELO IPFC (<math>J_{3_{ipfc}}</math> e <math>J_{4_{ipfc}}</math>)</b>	<b>187</b>
---	------------



## 1 INTRODUÇÃO

Desde o advento da eletricidade, popularizada principalmente por meio da ideias de patentes inovadoras de Nikola Tesla, muitas transformações ocorreram e, certamente, não há mais como viver no mundo atual sem os benefícios que ela traz. Sua utilização vai desde um simples acender de uma lâmpada, que ilumina nossos lares, ao funcionamento de mega máquinas instaladas em indústrias que produzem todo tipo de manufaturas, essenciais ao nosso cotidiano. Mas, nem sempre foi assim. Antes de sua popularização, no século XX, houve uma época em que a única forma de se obter energia era, por exemplo, através da tração animal ou da queima da madeira. Durante o século passado, por meio de novas tecnologias, esta situação mudou radicalmente. Com o crescimento da população mundial e o desenvolvimento de novas tecnologias, surgiram novas demandas e, naturalmente, precisou-se aumentar o fornecimento de energia elétrica para suprir as necessidades da demanda populacional.

Entretanto, para que a eletricidade chegue ao seu destino, ou seja, nas indústrias, nos comércios e nas residências, deve-se fornecer o suporte necessário para que isso ocorra. Por exemplo, o devido manejo e planejamento da rede, adequada operação e manutenção dos Sistemas Elétricos de Potências (SEPs) devem ser rigorosamente colocados em prática com a finalidade de que a energia elétrica que está sendo fornecida, na medida do possível, possa atender ao consumidor final, sem constrangimentos. Esta deve obedecer a rígidos padrões de qualidades impostos por agências reguladoras, ou seja, sem interrupções e dentro de normas pré estabelecidas de tensão e frequência, por exemplo. Nesse sentido, faz necessário o estudo de todos os componentes que constituem o Sistema Elétrico de Potência (SEP) com o intuito de prever possíveis eventualidades que possam acontecer.

No entanto, quando surgiram os primeiros sistemas elétricos, estes eram de pequeno porte e possuíam características bem distintas dos sistemas atuais. Em geral, eram sistemas com geradores operando de forma isolada com a finalidade de suprir as demandas locais das cargas conectadas a estes. Na atualidade, em sua grande maioria, os SEPs estão interligados. Existem vantagens e desvantagens de se interligar os SEPs. Como vantagens, pode-se melhor aproveitar o potencial energético, e ainda, ocorre uma maior confiabilidade no sistema elétrico, visto que se por alguma razão venha acontecer alguma eventualidade em determinada unidade geradora, esta pode ter suas necessidades supridas por outra unidade geradora. Como desvantagens, cita-se o fato de que, em geral, SEPs interligados são caracterizados por longas linhas de transmissão (altas impedâncias), o que torna o sistema de transmissão “fraco” (limitação na transferência de potência entre áreas), podendo comprometer sua operação.

Toda essa diversidade na geração, transmissão e na distribuição encontrada atualmente nos SEPs faz com que sua correta e segura operação seja mais complexa. No entanto, é imprescindível, para o bom funcionamento dos equipamentos elétricos, que se mantenha nos SEPs níveis adequados de tensão e frequência (dentro das normas vigentes), bem como a garantia do fornecimento de energia elétrica com um número mínimo de interrupções possíveis. Esses dois princípios básicos garantem a segurança e a confiabilidade dos consumidores de energia, tornam o SEP mais confiável, seguro e garantem a sua estabilidade.

A estabilidade está relacionada com a capacidade que os SEPs possuem de permanecerem em equilíbrio, dadas as condições normais de operação. Além disso, devem evoluir para um novo ponto de equilíbrio aceitável após serem submetidos a perturbações. Estas perturbações podem ser de pequena ou de grande magnitude (KUNDUR et al., 2004).

Uma das vertentes da operação e planejamento dos SEPs é a estabilidade. Estes estudos analisam o desempenho do sistema elétrico quando submetido a grandes perturbações (retirada de linhas de transmissão e/ou de unidades geradoras, por exemplo) e é chamada de estabilidade transitória. Quando se trata de variações normais da carga nos barramentos do SEP o estudo é denominado de estabilidade a pequenas perturbações (ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994).

Nessa pesquisa, será dada ênfase à análise da estabilidade a pequenas perturbações. Basicamente, estas pequenas perturbações presentes no SEP são oriundas de oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Dependendo de sua magnitude são desencadeados uma série de eventos que podem comprometer a operação do SEP, ou até mesmo torná-lo instável. Essas oscilações são classificadas como do tipo local, interárea ou intraplanta e podem ser identificados a partir da análise da sua frequência de ocorrência ( $\omega_n$ ) (LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994; SAUER; PAI, 1998).

Os modos locais de oscilação ocorrem quando geradores síncronos de determinada unidade geradora oscilam contra o restante do sistema ou, simplesmente, contra outra unidade geradora dentro da mesma área onde ambas estão inseridas. Oscilações eletromecânicas de baixa frequência classificadas como interárea ocorrem quando há interação entre diversas unidades geradoras, principalmente, quando certos grupos de geradores inseridos em uma mesma área, oscilam contra determinados grupos de geradores pertencentes à áreas vizinhas. Por fim, os modos intraplanta ocorrem quando geradores síncronos de uma mesma planta de geração oscilam entre si. Neste trabalho, devido à topologia dos sistemas testes (ver Capítulo 6 e Anexos A, B e C), são de interesse as oscilações eletromecânicas de baixa frequência classificadas como locais e interárea.

Em geral, as oscilações eletromecânicas de baixa frequência são caracterizadas por possuírem frequência na faixa de 0,2 a 2,5 Hz. Em particular, os modos locais possuem frequência oscilação na faixa de 0,8 a 2,0 Hz, os modos interáreas na faixa de 0,2 a 0,8 Hz e os intraplantas 1,5 a 2,5 Hz. Observe que existe uma faixa de frequência comum entre os modos locais e interáreas (0,7 a 0,8 Hz) e entre os modos locais e os intraplantas (1,5 a 2,0 Hz) (LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994; SAUER; PAI, 1998). Isto exige em alguns casos que outra técnica seja utilizada para verificar e classificar as oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Uma técnica que pode ser utilizada é baseada nos fatores de participação de cada gerador síncrono (MARTINS; LIMA, 1990; KUNDUR, 1994).

A presença de oscilações eletromecânicas de baixa frequência (principalmente as de modo local e modo interárea) podem comprometer a operação do SEP, motivo pelo qual, estratégias de controle para se introduzir amortecimento a estas oscilações devem ser aplicadas.

Os primeiros passos para se inserir amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência foram apresentados por DeMello e Concordia (1969). Os autores apresentaram o conceito dos Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP). Este dispositivo de controle é adicionado à malha de controle dos Reguladores Automáticos de Tensão (RATs) e atua no controle da tensão terminal de saída das máquinas síncronas (DE MELLO; CONCORDIA, 1969; ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981). Estudos mostram que quando os parâmetros (constantes de tempo e ganhos) desse dispositivo são bem ajustados este atua introduzindo amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência classificadas como modo local (LARSEN; SWANN, 1981). Todavia, quando o ESP é utilizado para inserir amortecimento as oscilações do tipo interárea seu desempenho não é satisfatório e podem, dependendo dos ajustes obtidos, prejudicar os modos locais antes estáveis (MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012).

Conforme já frisado inicialmente, os SEPs atuais se tornaram bem mais complexos, quando comparados aos seus precursores. Os atuais são compostos por diversos elementos individuais, com características dinâmicas bem distintas. Todavia, estes elementos estão conectados e formam um grande e conglomerado complexo sistema, em condições de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica em uma grande extensão territorial (VALLE, 2014), algo até então inconcebível no início do século XX. As longas linhas de transmissão, característica dos SEPs atuais, faz com que surjam as oscilações eletromecânicas de baixa frequência classificadas como interárea.

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência novos dispositivos automáticos de compensação foram sendo incorporados aos SEPs com o objetivo de melhorar seu controle

e torná-lo mais flexível e porque não, mais seguro. Em especial, na transmissão de energia elétrica, se destacam os *Flexible AC Transmission System* (FACTS) (MATHUR; VARMA, 2002; SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999; SEN; SEN, 2009; WATANABE et al., 1998). Esses dispositivos tornaram menos rígidos os sistemas de transmissão (invariabilidade de seus parâmetros), permitindo aumentar a capacidade de transferência de potência entre os sistemas já existentes. Dependendo do tipo de FACTS é possível o controle contínuo dos fluxos de potência (ativa e reativa) em locais específicos dos sistemas de transmissão e uma melhora significativa (nas proximidades de sua instalação) dos problemas referentes aos níveis de tensão dos SEPs (VALLE, 2014).

Existem várias formas de se classificar os dispositivos FACTS, sendo comum, segundo Hingorani e Gyugyi (1999), classificá-los em quatro gerações:

- Na primeira geração estão os dispositivos comutados por tiristores e podem estar tanto ligados em derivação ou em série com suas respectivas linhas de transmissão. Destacam nessa geração os FACTS *Static Var Compensator* (SVC) (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999) e o *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC) (SONG; JOHNS, 1999; WATANABE et al., 1998; MENEZES; ARAUJO; FORTES, 2014; FORTES et al., 2015).
- Na segunda geração encontram-se os comutados por transístores que utilizam a tecnologia *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) ou *Gate Turn Off Thyristor* (GTO). Nesta geração destacam-se o *Static Synchronous Shunt Compensator* (STATCOM) (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999; PEREIRA, 2009), o qual está conectado em derivação com a rede de transmissão e o compensador série *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) (HINGORANI; GYUGYI, 1999; PUPIN, 2009).
- A terceira geração é formada por FACTS que integram na mesma linha de transmissão, dispositivos série e em derivação. Nesta geração pode ser citado o *Unified Power Flow Controller* (UPFC) (HINGORANI; GYUGYI, 1999; AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007; FURINI, 2008; MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012), formado a partir da combinação do SSSC e do STATCOM.
- Na quarta geração, encontram-se os FACTS que realizam compensação série e em derivação em linhas de transmissão distintas. Nesta categoria está o *Interline Power Flow Controller* (IPFC) (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999; VALLE, 2010), que pode ser representado a partir da combinação de dois ou mais SSSC's e o *Generalized Power Flow*



*Controller* (GUPFC) (ZHANG; HANDSCHIN; YAO, 2001; VALLE, 2014) representado a partir da combinação de um IPFC com um STATCOM.

Um dispositivo FACTS não tem a capacidade de inserir amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência. No entanto, estudos posteriores mostraram que quando na malha de controle de um dispositivo FACTS é adicionado o controlador *Power Oscillation Dampers* (POD) (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994), este conjunto FACTS-POD é capaz de inserir amortecimento as oscilações eletromecânicas de baixa frequência do tipo interárea (MENEZES; ARAUJO; FORTES, 2014; FORTES et al., 2015; FURINI; ARAUJO, 2008; PEREIRA, 2009; PUPIN, 2009; VALLE, 2010; VALLE, 2014; NOROOZIAN et al., 2001).

Nesse trabalho será investigada a atuação do dispositivo FACTS de quarta geração, denominado *Interline Power Flow Controller* no que se refere ao amortecimento das oscilações interárea. Para esse fim será adicionado à sua malha de controle o controlador suplementar POD e espera-se que o conjunto IPFC-POD possa atuar de forma correta, inserindo amortecimento desejado ao modo interárea.

Ademais, conforme será detalhado neste trabalho, foi deduzido um modelo matemático que permite representar o dispositivo FACTS IPFC no SEP, sendo possível, a partir desse modelo, realizar tanto uma abordagem estática quanto dinâmica do sistema elétrico. Foi proposto um modelo de injeção de potência para o IPFC (Fluxo Expandido), sendo possível a partir de então, representá-lo tanto em um programa de fluxo de potência, quanto executá-lo em programas que efetuam a análise dinâmica do SEP. Para representar a dinâmica do controlador no SEP, é apresentado nesse trabalho uma proposta de modelagem para a estrutura do sistema de controle do IPFC, baseados no controlador Proporcional-Integral (PI), fundamentado nos trabalhos de Valle (2010), Zhang, Yokoyama e Ide (2009). Esta modelagem permitirá analisar a influência do IPFC no que se refere à estabilidade a pequenas perturbações no SEP, objetivo principal deste trabalho.

Na abordagem estática, isto é, desconsiderando-se as dinâmicas das máquinas síncronas e dos controladores existentes no SEP, foi verificado a eficácia do dispositivo IPFC quanto ao gerenciamento dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e conseqüentemente sua atuação na correção dos possíveis problemas de subtensão encontrados no sistema teste utilizado neste trabalho (simétrico de duas áreas (KUNDUR, 1994)).

Neste trabalho, conforme será mostrado em detalhes no Capítulo 2, o IPFC será configurado para atuar no gerenciamento e controle de dois fluxos de potência ativa e uma reativa em duas linhas de transmissão distintas.

A localização dos controladores suplementares de amortecimento, ESPs e do conjunto IPFC-POD, será determinada de duas formas distintas. Para os ESPs são utilizados os fatores de participação (KUNDUR, 1994). O local de instalação do conjunto IPFC-POD será determinado de forma empírica. Explica-se: executa-se o fluxo expandido e inicialmente verificam-se quais as barras do sistema em que ocorrem problemas de subtensão (abaixo de 0,95 pu do valor nominal, por exemplo). Com base nessas informações é efetuada a escolha do melhor local (verificando sempre a quantidade mínima de linhas para instalação do dispositivo) e em seguida é realizada sua instalação. Espera-se, desta forma, que o IPFC por meio do gerenciamento dos fluxos de potência ativa e reativa possa corrigir o problema revelado (subtensão).

Determinada a localização dos controladores suplementares de amortecimento, deve-se efetuar o correto ajuste dos seus parâmetros, sendo esta etapa essencial para o fornecimento adequado do amortecimento desejado ao SEP. Na literatura, basicamente, são quatro as opções utilizadas para realizar estes ajustes: técnicas fundamentadas em teorias clássicas, no controle robusto, inteligência artificial e as baseadas em otimização.

Na teoria de controle clássico citam-se o Método dos Resíduos (YANG; LIU; MCCLELLY, 1998) e o *Decentralized Modal Control* (DMC) (CHEN; HSU, 1987; ARAUJO; ZANETA, 2001; VALLE; ARAUJO, 2015).

Na teoria de controle robusto, cita-se o trabalho de Miotto e Covacic (2011). Nesse artigo, os autores apresentaram um projeto de ajuste simultâneo e coordenado de controladores suplementares ESPs e PODs baseado e estruturado na forma de *Linear Matrix Inequalities* (LMIs).

Técnicas baseadas em inteligência artificial, tais como Lógica Fuzzy (ZADEH, 1965) e Redes Neurais Artificiais (RNAs) (HAYKIN, 2001) também podem ser convenientemente implementadas e conseqüentemente utilizadas no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento. No caso da Lógica Fuzzy citam-se os trabalhos de Yixin et al. (1999) e Nguyen e Gianto (2008). Em relação as RNAs podem ser citados os trabalhos de Mishra et al. (2002) e Pereira (2009).

Recentemente, técnicas de otimização baseadas em enxame de partículas têm sido objeto de estudo na análise da estabilidade a pequenas perturbações. Neste caso, é possível citar os algoritmos *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995), o *Bacterial Foraging Optimization* (BFO) (PASSINO, 2002) e o Algoritmo Genético (AG) (HOLLAND, 1992). Na literatura, com sucesso, estes algoritmos foram implementados e utilizados no ajuste simultâneo e coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento. No caso do PSO, citam-se os trabalhos de Menezes (2014), Valle (2014) e Hasanvand et al.

(2016). No BFO podem ser citados os trabalhos de Abd-Elazim e Ali (2012), Menezes, Araujo e Fortes (2014) Fortes et al. (2015). Em relação AG pode ser citado o trabalho de Hassan et al. (2014).

Em Valle (2014), o autor realizou o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento considerando o FACTS GUPFC em suas simulações. Nesse trabalho, foi introduzido os controladores PI para representar a dinâmica do dispositivo GUPFC no SEP. Entretanto, os parâmetros dos controladores PI foram considerados fixos.

Diferentemente do que foi apresentado por Valle (2014), nesse trabalho é proposto realizar o ajuste coordenado e simultâneo tanto dos parâmetros dos controladores PI, quanto dos controladores suplementares de amortecimento (ESPs e IPFC-POD) por meio de uma técnica de otimização que é baseada nos Algoritmos Genéticos (AGs), (HOLLAND, 1992). A técnica que será utilizada é denominada Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado (AGCBE) e está fundamentada nos trabalhos de Chu e Beasley (1997) e Uzinski, Possagnolo e Romero (2015). Resultados obtidos neste trabalho, prontamente mostrados na Capítulo 6, permitem concluir que o algoritmo proposto (AGCBE) é extremamente eficiente, credenciando-o como ferramenta para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD.

Para validar a técnica proposta (AGCBE) e credenciá-la como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações, o AGCBE foi comparado a outras duas técnicas de otimização amplamente difundidas na literatura: o *Particle Swarm Optimization* (KENNEDY; EBERHART, 1995) e o Algoritmo Genético com Elitismo (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; MITCHELL, 1998). Detalhes sobre os algoritmos propostos neste trabalho, tais como metodologias de funcionamentos e equacionamentos podem ser prontamente averiguados no Capítulo 5.

Conforme poderá ser verificado em detalhes no Capítulo 6, as simulações com os algoritmos propostos foram realizadas em três sistemas testes: Simétrico de Duas Áreas (KUNDUR, 1994), *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001) e no Sul Brasileiro Reduzido (VALLE, 2014). As simulações realizadas obedeceram aos seguintes critérios: 100 testes realizados para cada algoritmo, limitados a 2000 mil cálculos de suas respectivas funções objetivos. Nos testes realizados foram utilizados os seguintes dados como critério de comparação entre os algoritmos: número de cálculos da função objetivo, tempo de convergência e número de vezes que cada algoritmo obteve sua respectiva convergência em cada um dos 100 testes executados.

Para analisar e representar o SEP, o modelo pode ser linear. Um modelo linear amplamente difundido na literatura e utilizado em estudos relacionados com estabilidade às pequenas

perturbações em sistemas Máquina Barra Infinita (MBI) é o modelo linear denominado Heffron e Phillips (MHP). A utilização deste modelo produz resultados confiáveis, como pode ser encontrado na literatura afim (HEFFRON; PHILLIPS, 1952; DE MELLO; CONCORDIA, 1969; ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994).

Desde então diversas pesquisas foram realizadas com a finalidade de se buscar a generalização deste modelo para o sistema multimáquinas (CHEN; HSU, 1987; MOUSSA; YU, 1974). Contudo, a necessidade da manutenção do barramento infinito, bem como a redução do SEP às barras terminais dos geradores, são fatores que limitam o MHP expandido para sistemas multimáquinas.

Na tentativa de superar as limitações do MHP foi proposto um modelo baseado no balanço nodal de potência ativa e de potência reativa em cada barra do SEP. Este modelo é chamado de Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) (DA COSTA, 1992; DECKMANN; DA COSTA, 1994) e apresenta excelentes resultados quando este é utilizado na análise da estabilidade a pequenas perturbações (PUPIN, 2009; MENEZES; ARAUJO; FORTES, 2014; MENEZES, 2014; FURINI, 2008; VALLE, 2010; VALLE, 2014; MOURA; FURINI; ARAUJO, 2012; VALLE; ARAUJO, 2015).

Recentemente, outro modelo linear vem sendo utilizado no estudo da estabilidade a pequenas perturbações e é baseado no balanço nodal de correntes em cada barra do SEP. Este modelo, chamado de Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC), foi proposto inicialmente por Sauer e Pai (1998). Com pequenas modificações, foi desenvolvido por Pádua Júnior (2014) e Takahashi (2013). Tanto no MSP quanto no MSC não existe a necessidade da manutenção do barramento infinito e a rede de transmissão é preservada. Com isto, fica facilitada a inclusão de novos componentes no SEP, como os dispositivos FACTS.

O MSC é o modelo utilizado neste trabalho para analisar e representar o SEP e é um dos diferenciais dessa pesquisa, já que obrigatoriamente todos os componentes, controladores (ESPs e do conjunto IPFC-POD) e dispositivos inseridos no SEP deverão ser modelados por injeção de corrente, o que não é convencional.

Os resultados apresentados nesse trabalho (ver Capítulo 6) foram obtidos pela implementação computacional utilizando-se o *software* Matlab<sup>®</sup>, sem o auxílio de qualquer *toolbox*. Foi realizada a implementação do PSO, AG com Elitismo e do AGCBE e das equações apresentadas nos Capítulos 2, 3 e 4. As simulações foram realizadas em um computador com a seguinte configuração: Intel Core i5-3230M, 64-bit, 2,60 GHz, 12 GB de RAM com 4 núcleos de processamento.

## 1.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições desse trabalho são:

1. Utilizar o MSC para representar os SEPs utilizados para realizar as simulações neste trabalho (Simétrico de Duas Áreas, *New England* e no Sul Brasileiro Reduzido) e, portanto, credenciá-lo como ferramenta na análise da estabilidade à pequenas perturbações;
2. Deduzir e apresentar um modelo de injeção de corrente para o IPFC que possa ser utilizado para representá-lo matematicamente no MSC e conseqüentemente utilizá-lo na análise da estabilidade à pequenas perturbações;
3. Implementar computacionalmente os modelos dinâmicos dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD no MSC para sistemas multimáquinas, tendo em vista a análise da estabilidade a pequenas perturbações do SEP;
4. Apresentar e implementar computacionalmente o AGCBE, AG e o PSO de forma que estes algoritmos possam realizar, de forma coordenada e simultânea, o ajuste dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD;
5. Validar o AGCBE como ferramenta no estudo da análise da estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Quanto à organização, este trabalho é estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 2 será apresentado, em detalhes, o dispositivo FACTS IPFC. As principais contribuições desse Capítulo consistem em apresentar um modelo de injeção de potência para o IPFC e implementá-lo em programas de fluxo de potência, apresentar uma proposta de modelagem para a estrutura do sistema de controle do IPFC, baseados nos controladores PIs e obter as equações diferenciais que permitem modelar o IPFC em programas de análise de estabilidade a pequenas perturbações.

No Capítulo 3 será apresentado e deduzido o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC). Este modelo, conforme será mostrado, baseia-se no fato de que os balanços nodais de correntes em cada barra do SEP devem ser satisfeitos ininterruptamente em qualquer processo dinâmico.

No Capítulo 4 será apresentado um modelo de injeção de corrente para o IPFC, as equações dinâmicas que representam os controladores ESPs e os conjunto IPFC-POD e, conseqüentemente, a inclusão das equações no MSC.

No Capítulo 5 são apresentados três técnicas de otimização (*Particle Swarm Optimization*, Algoritmo Genético com Elitismo e Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado) que serão utilizadas ajustar os parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos a partir de simulações realizadas nos seguintes sistemas testes: Simétrico de Duas Áreas, *New England* e no Sul Brasileiro Reduzido. Estas simulações tiveram o propósito de validar o algoritmo proposto (AGCBE) como ferramenta para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações de um SEP.

No Capítulo 7 são tratadas de algumas considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

Por fim, seguem o Anexo e os Apêndices, necessários para uma melhor compreensão do trabalho.

## 2 O DISPOSITIVO *INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER* (IPFC)

### 2.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas elétricos eram pequenos e não estavam interligados. Em vista disso, não apresentavam grande complexidade, pois possuíam poucas interconexões. Atualmente o cenário é outro e a cada dia há um aumento da demanda por eletricidade. A princípio, a construção de novas unidades geradoras poderiam resolver o problema da demanda. Entretanto, os altos custos envolvidos na expansão do sistema elétrico, tais como construção de novas usinas e linhas de transmissão, e também as restrições ambientais, inviabilizam na maioria dos casos esta expansão.

Com isto as linhas de transmissão estão expostas a limites térmicos ou de estabilidade limitando consideravelmente o nível de potência que pode ser transmitido, dentro de certa margem, com segurança (WATANABE et al., 1998).

Com tais restrições, tornou-se necessário o desenvolvimento de dispositivos que pudessem controlar os fluxos de potências em determinadas linhas de um sistema elétrico. Neste contexto, isto é, sistemas com fluxos de potências que possam ser manipulados, surgiram os FACTS. Contudo, os FACTS devem ser tratados sempre como alternativa na tentativa de suprir o aumento da demanda por energia, maximizando o potencial elétrico já instalado, controlando o fluxo de potência já existente (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999).

Além de realizar o controle do fluxo de potência, é importante destacar outras características que estes dispositivos possuem. Dentre elas, podem-se citar: melhoramento na eficiência da transmissão das linhas já existentes no SEP; realocar e controlar o fluxo de potência em pontos estratégicos em determinadas linhas de transmissão; controle de reativos e estabilidade de tensão e de ângulo (POMILIO; PAREDES; DECKMANN, 2013).

Dentre os diversos FACTS existentes, neste trabalho o interesse é o *Interline Power Flow Controller*. Dentre as características deste dispositivo, destaca-se o fato de poder gerenciar os fluxos de potências (ativa e reativa) em distintas linhas de transmissão do SEP. Os detalhes deste dispositivo serão apresentados a seguir.

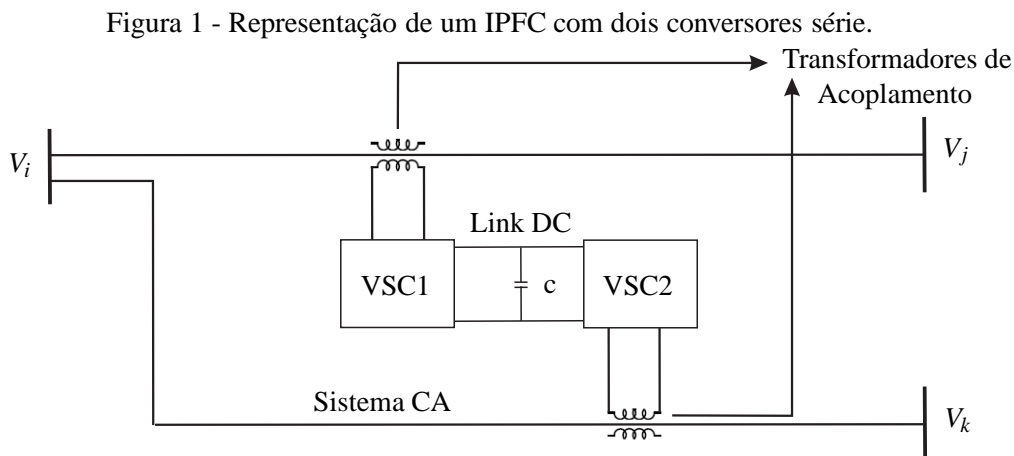
### 2.2 ASPECTOS GERAIS DO *INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER*

O *Interline Power Flow Controller*, ou simplesmente IPFC, faz parte da quarta geração dos dispositivos FACTS e foi proposto inicialmente por Gyugyi, Sen e Schauderr (1999). Este

FACTS possui algumas vantagens relativamente importantes em relação aos demais dispositivos existentes e devem ser mencionadas. Em linhas gerais, o IPFC pode gerenciar e controlar fluxos de potência na subestação onde encontra-se instalado. Por meio do controle dos fluxos, o dispositivo pode reduzir as sobrecargas de transmissão de potência e compensar as quedas de tensão, o que o torna mais versátil na transmissão de potência numa dada subestação se for comparado a outros FACTS existentes, (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999; VALLE, 2010).

Além disso o IPFC faz uso da tecnologia Conversor Fonte de Tensão (VSC), no qual combina dois ou mais compensadores séries estáticos síncronos acoplados via um elo de corrente contínua (CC) comum para facilitar o fluxo de potência ativa bidirecional entre os terminais dos SSSC's, (VALLE, 2010). Isto possibilita que, de forma simultânea ou de forma seletiva, se possa controlar os parâmetros que definem os fluxos de potência nas linhas de transmissão, isto é, controle da magnitude e dos ângulos da tensão dos barramentos do SEP. Portanto, dependendo da configuração adotada, o IPFC permite de forma efetiva controlar os fluxos de potências ativa e reativa, bem como realizar compensação série nas linhas onde se encontra acoplado.

Para melhor entendimento sobre o dispositivo IPFC, segue a Figura 1. Observe que há apenas dois conversores compensando 2 linhas de transmissão entre as barras  $i$  e  $j$  e  $i$  e  $k$ . Contudo, este conceito pode ser generalizado com  $n$  conversores compensando  $n$  linhas em cada subestação onde o dispositivo encontra-se instalado.



Fonte: Adaptado de (ZHANG, 2006).

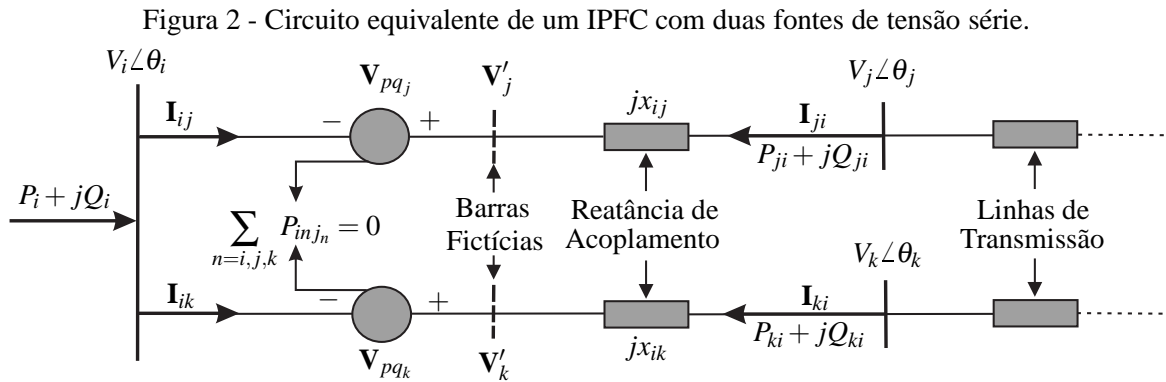
### 2.3 MODELO MATEMÁTICO DO INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER

Como discutido na Seção 2.2, o IPFC pode ser representado por meio de uma combinação de dois ou mais conversores série no qual trabalham simultaneamente conectados por um elo



CC comum (TECRATHANA et al., 2005). Analisando a Figura 1 é possível inferir que o IPFC pode de forma efetiva controlar três fluxos de potência independentes nas duas linhas de transmissão onde encontra-se instalado (ZHANG, 2006), podendo controlar dois fluxos ativos e um reativo ou dois fluxos reativos e um ativo.

Com o objetivo de formular um modelo matemático que represente o IPFC, considere a Figura 2 onde é mostrado o circuito equivalente do IPFC.



Na Figura 2 tem-se as três barras onde atuará o IPFC designadas por  $i$ ,  $j$  e  $k$  e representadas respectivamente, por suas tensões complexas  $\mathbf{V}_i$ ,  $\mathbf{V}_j$  e  $\mathbf{V}_k$ . Observe que o IPFC possui duas fontes de tensão síncrona que injeta uma tensão controlável série denotada por  $\mathbf{V}_{pq_n}$  em que  $n = j, k$ . Além disso, cada fonte de tensão encontra-se em série com sua respectiva reatância de acoplamento designada por  $x_{in}$ . Entre a tensão série e a reatância de acoplamento encontram-se as tensões,  $\mathbf{V}'_j$  e  $\mathbf{V}'_k$  de duas barras fictícias indicadas por  $j'$  e  $k'$ .

Ainda analisando a Figura 2, pode-se observar que  $P_i$  e  $Q_i$  representam as injeções de potência ativa e reativa na barra  $i$ . As grandezas  $P_{ji}$  e  $P_{ki}$  e  $Q_{ki}$ ,  $Q_{ji}$  indicam os fluxos de potências ativa e reativa, do ramo em que encontra instalado o IPFC, deixando a barra  $j$  e  $k$ , respectivamente. De forma análoga,  $\mathbf{I}_{ij}$  e  $\mathbf{I}_{ik}$  designam as correntes que deixam a barra  $i$ , enquanto que  $\mathbf{I}_{ji}$  e  $\mathbf{I}_{ki}$  representam as correntes saindo das barras  $j$  e  $k$ , respectivamente. Por fim, assumindo-se que as perdas ativas são nulas, tem-se que a potência ativa fornecida por um dos conversores será sempre igual à demanda de potência ativa do outro. Logo assume-se que  $\sum_{n=i,j,k} P_{in} = 0$ . Essa restrição também é conhecida como “Invariância de Potência Ativa do IPFC” (VALLE, 2010). Mais detalhes sobre este modelo podem ser obtidos em (TECRATHANA et al., 2005) e Zhang (2003).

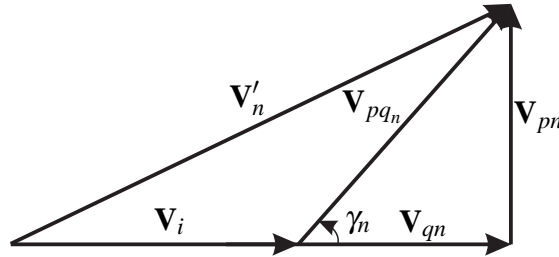
Segundo Zhang, Yokoyama e Ide (2009) e Valle (2010), o controle do fluxo de potência na linha de transmissão no qual o IPFC encontra-se instalado poderá ser realizado por meio controle da magnitude e do ângulo da tensão série injetada  $\mathbf{V}_{pq_n}$  e pode ser expresso conforme

a equação (1).

$$\mathbf{V}_{pq_n} = r_n e^{j\gamma_n} \mathbf{V}_i \quad (1)$$

Na equação (1)  $\mathbf{V}_{pq_n}$  ( $n = j, k$ ) representa os fasores das tensões série injetadas tal como mostrada na Figura 2. Além disso,  $\gamma_n$  ( $0 < \gamma_n < 2\pi$ ) e  $r_n$  ( $0 < r_n < r_n^{\max}$ ) são parâmetros das tensões séries injetadas em que  $r_n = \frac{V_{pq_n}}{V_i}$  e  $\gamma_n$  é o ângulo de  $\mathbf{V}_{pq_n}$  em relação à tensão da barra  $\mathbf{V}_i$  (ZHANG; YOKOYAMA, 2008; VALLE, 2010). A Figura 3 sintetiza essas informações.

Figura 3 - Diagrama fasorial da tensão série injetada ( $n = j, k$ ).



Fonte: Adaptado de Zhang, Yokoyama e Ide (2009).

Observe que baseado no diagrama fasorial mostrado na Figura 3, tem-se que a tensão controlável  $\mathbf{V}_{pq_n}$  pode ser decomposta em componente em fase ( $V_{qn}$ ) e outra em quadratura ( $V_{pn}$ ), conforme está descrito em (2).

$$\mathbf{V}_{pq_n} = \mathbf{V}_{qn} + j\mathbf{V}_{pn} \quad (2)$$

Por outro lado, segue de (1) a equação (3).

$$\mathbf{V}_{pq_n} = r_n (\cos \gamma_n + j \sin \gamma_n) \mathbf{V}_i \quad (3)$$

Separando parte real da parte imaginária de (3) e comparando com a equação (2) obtêm-se as expressões que representam  $\mathbf{V}_{qn}$  e  $\mathbf{V}_{pn}$  conforme (4) e (5), respectivamente.

$$\mathbf{V}_{qn} = r_n \mathbf{V}_i \cos \gamma_n \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_{pn} = r_n \mathbf{V}_i \sin \gamma_n \quad (5)$$

Baseado no circuito equivalente do IPFC mostrado na Figura 2 são obtidas as equações (6) e (7).

$$\mathbf{V}'_j = \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_{pq_j} \quad (6)$$

$$\mathbf{V}'_k = \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_{pq_k} \quad (7)$$

Substituindo (1) em (6) e (7), em que  $n = j, k$  obtêm-se (8) e (9).

$$\mathbf{V}'_j = \mathbf{V}_i + r_j e^{j\gamma_j} \mathbf{V}_i \quad (8)$$

$$\mathbf{V}'_k = \mathbf{V}_i + r_k e^{j\gamma_k} \mathbf{V}_i \quad (9)$$

Ainda analisando a Figura 2 e desconsiderando a resistência de acoplamento do transformador, a corrente injetada na barra  $i$  pelo IPFC pode ser expressa pela equação (10).

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{I}_{ij} + \mathbf{I}_{ik} = \frac{\mathbf{V}'_j - \mathbf{V}_j}{jx_{ij}} + \frac{\mathbf{V}'_k - \mathbf{V}_k}{jx_{ik}} \quad (10)$$

Considerando que  $\mathbf{V}_i = V_i \angle \theta_i$ ,  $\mathbf{V}_j = V_j \angle \theta_j$ ,  $\mathbf{V}_k = V_k \angle \theta_k$  e substituindo as expressões obtidas para  $\mathbf{V}'_j$  e  $\mathbf{V}'_k$  em (8) e (9) na equação (10), respectivamente, tem-se (11).

$$\mathbf{I}_i = \frac{V_i \angle \theta_i + r_j e^{j\gamma_j} \mathbf{V}_i - V_j \angle \theta_j}{jx_{ij}} + \frac{V_i \angle \theta_i + r_k e^{j\gamma_k} \mathbf{V}_i - V_k \angle \theta_k}{jx_{ik}} \quad (11)$$

Após algumas manipulações algébricas na equação (11), finalmente chega-se à expressão (12).

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_i = & V_i \sin \theta_i \left( \frac{1}{x_{ij}} + \frac{1}{x_{ik}} \right) + V_i \left( \frac{r_j \sin(\gamma_j + \theta_i)}{x_{ij}} + \frac{r_k \sin(\gamma_k + \theta_i)}{x_{ik}} \right) - \frac{V_j \sin \theta_j}{x_{ij}} - \frac{V_k \sin \theta_k}{x_{ik}} \\ & + j \left[ -V_i \cos \theta_i \left( \frac{1}{x_{ij}} - \frac{1}{x_{ik}} \right) - V_i \left( \frac{r_j \cos(\gamma_j + \theta_i)}{x_{ij}} + \frac{r_k \cos(\gamma_k + \theta_i)}{x_{ik}} \right) + \frac{V_j \cos \theta_j}{x_{ij}} \right. \\ & \left. + \frac{V_k \cos \theta_k}{x_{ik}} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

A equação (12) representa a corrente injetada na barra comum de instalação do IPFC (barra  $i$ ).

A potência complexa ( $S_i$ ) injetada na barra  $i$  pode ser calculada substituindo (12) na equação (13).

$$S_i = \mathbf{V}_i \mathbf{I}_i^* = (V_i \cos \theta_i + jV_i \sin \theta_i) \mathbf{I}_i^* \quad (13)$$

Após alguns cálculos algébricos efetuados em (12) e separando a parte real ( $P_i$ ) da parte imaginária ( $Q_i$ ) da potência complexa  $S_i$  encontram-se as equações (14) e (15), respectivamente. Estas representam as injeções de potências ativa e reativa na barra  $i$  comum ao IPFC.

$$P_i = \sum_{n=j,k} \frac{V_i V_n}{x_{in}} \sin(\theta_i - \theta_n) + V_i^2 \sum_{n=j,k} r_n \frac{1}{x_{in}} \sin \gamma_n \quad (14)$$

$$Q_i = V_i^2 \left( \frac{1}{x_{ij}} + \frac{1}{x_{ik}} \right) - \sum_{n=j,k} \frac{V_i V_n}{x_{in}} \cos(\theta_i - \theta_n) + V_i^2 \sum_{n=j,k} \frac{r_n}{x_{in}} \cos \gamma_n \quad (15)$$

Calculada a potência  $S_i$  injetada na barra  $i$  e analisando novamente a Figura 2, é possível obter a potência  $S_{ji}$  que circula pelo ramo  $j-i$  comum ao IPFC. Para tanto, segue a equação (16) que fornece o fluxo de corrente que circula no ramo  $j-i$ .

$$\mathbf{I}_{ji} = \frac{\mathbf{V}_j - \mathbf{V}'_j}{jx_{ij}} = \frac{V_j \angle \theta_j - V_i \angle \theta_i - r_j e^{j\gamma_j} V_i \angle \theta_i}{jx_{ij}} \quad (16)$$

Após alguns cálculos matemáticos efetuados em (16) obtêm-se a equação (17), que representa o fluxo de corrente que circula pelo ramo  $j - i$  comum ao IPFC.

$$\mathbf{I}_{ji} = \frac{V_j \sin \theta_j - V_i \sin \theta_i - r_j V_i \sin(\gamma_j + \theta_i)}{x_{ij}} + j \left[ \frac{-V_j \cos \theta_j + r_j V_i \cos(\gamma_j + \theta_i) + V_i \cos \theta_i}{x_{ij}} \right] \quad (17)$$

Analogamente, é possível encontrar a corrente que circula pelo ramo  $k - i$  comum ao IPFC como pode ser observada na equação (18).

$$\mathbf{I}_{ki} = \frac{V_k \sin \theta_k - V_i \sin \theta_i - r_k V_i \sin(\gamma_k + \theta_i)}{x_{ik}} + j \left[ \frac{-V_k \cos \theta_k + r_k V_i \cos(\gamma_k + \theta_i) + V_i \cos \theta_i}{x_{ik}} \right] \quad (18)$$

Para o cálculo do o fluxo de potência no ramo  $j - i$  ( $S_{ji}$ ) comum ao IPFC, segue a equação (19).

$$S_{ji} = \mathbf{V}_j \mathbf{I}_{ji}^* \quad (19)$$

Assumindo que  $\mathbf{V}_j = V_j \cos \theta_j + jV_j \sin \theta_j$  e substituindo (18) em (19) seguem as equações (20) e (21). Estas representam, respectivamente, os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $j - i$  comum ao IPFC.

$$P_{ji} = -\frac{V_i V_j}{x_{ij}} \sin(\theta_i - \theta_j) - \frac{r_j V_i V_j}{x_{ij}} \sin(\theta_{ij} + \gamma_j) \quad (20)$$

$$Q_{ji} = \frac{V_j^2}{x_{ij}} - \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \cos(\theta_i - \theta_j) - \frac{r_j V_i V_j}{x_{ij}} \cos(\theta_{ij} + \gamma_j) \quad (21)$$

Uma análise similar no ramo  $k - i$  fornece as equações (22) e (23). Estas indicam, respectivamente, os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $k - i$  comum ao IPFC.

$$P_{ki} = -\frac{V_i V_k}{x_{ik}} \sin(\theta_i - \theta_k) - \frac{r_k V_i V_k}{x_{ik}} \sin(\theta_{ik} + \gamma_k) \quad (22)$$

$$Q_{ki} = \frac{V_k^2}{x_{ik}} - \frac{V_i V_k}{x_{ik}} \cos(\theta_i - \theta_k) - \frac{r_k V_i V_k}{x_{ik}} \cos(\theta_{ik} + \gamma_k) \quad (23)$$

Nas equações (20), (21), (22) e (23)  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  e  $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$ .

Usando as expressões deduzidas que representam os fluxos de potências (ativa e reativa) nos ramos  $j - i$  e  $k - i$  indicadas nas equações (20), (21), (22) e (23), estas podem ser reescritas conforme (24) e (25).

$$P_{ni} = -\frac{V_i V_n}{x_{in}} \sin(\theta_i - \theta_n) - \frac{r_n V_i V_n}{x_{in}} \sin(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (24)$$

$$Q_{ni} = \frac{V_n^2}{x_{in}} - \frac{V_i V_n}{x_{in}} \cos(\theta_i - \theta_n) - \frac{r_n V_i V_n}{x_{in}} \cos(\theta_{in} + \gamma_n) \quad (25)$$

Nas equações (24) e (25)  $n = j, k$  e  $\theta_{in} = \theta_i - \theta_n$ .

Por fim, substituindo as expressões descritas em (4) e (5) nas equações que representam os fluxos de potências ativa e reativa encontradas em (14), (15), (24) e (25) é possível deduzir as expressões (26), (27), (28) e (29)

$$P_i = - \sum_{n=j,k} V_i V_n b_{in} \sin(\theta_{in}) - V_i \underbrace{\sum_{n=j,k} b_{in} V_{p_n}}_{\text{IPFC}} \quad (26)$$

$$Q_i = -V_i^2 b_{ii} + \sum_{n=j,k} V_i V_n b_{in} \cos(\theta_{in}) - V_i \underbrace{\sum_{n=j,k} b_{in} V_{q_n}}_{\text{IPFC}} \quad (27)$$

$$P_{ni} = V_i V_n b_{in} \sin \theta_{in} + \underbrace{V_n b_{in} (V_{q_n} \sin \theta_{in} + V_{p_n} \cos \theta_{in})}_{\text{IPFC}} \quad (28)$$

$$Q_{ni} = -V_n^2 b_{in} + V_i V_n b_{in} \cos \theta_{in} + \underbrace{V_n b_{in} (V_{q_n} \cos \theta_{in} - V_{p_n} \sin \theta_{in})}_{\text{IPFC}} \quad (29)$$

Nas equações (26), (27), (28) e (29)  $\theta_{in} = \theta_i - \theta_n$ ,  $b_{in} = -\frac{1}{x_{in}}$ ,  $b_{ii} = -\sum_{n=j,k} \frac{1}{x_{in}}$  e a parte destacada com a inscrição “IPFC” se refere à contribuição do dispositivo no fluxo de potência comum no ramo em que o IPFC encontra-se instalado.

#### 2.4 MODELO DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA PARA O IPFC

O modelo de injeção de Potência do IPFC pode ser obtido analisando as equações mostradas em (26), (27), (28) e (29). Para tanto, primeiramente segundo Monticelli (1983) as expressões dos fluxos de potências ativa ( $P_{ni}$ ) e reativa ( $Q_{ni}$ ) em uma linha de transmissão qualquer (considerando suas respectivas resistências e reatâncias) são dadas pelas equações (30) e (31), respectivamente.

$$P_{ni} = V_i^2 g_{in} - V_i V_n g_{in} \cos \theta_{in} + V_n V_i b_{in} \sin \theta_{in} \quad (30)$$

$$Q_{ni} = -V_i^2 (b_{in} + b_{in}^{sh}) + V_i V_n b_{in} \cos \theta_{in} + V_i V_n g_{in} \sin \theta_{in} \quad (31)$$

Observe que desconsiderando a resistência nas equações descritas em (30) e (31), estas são exatamente iguais às expressões deduzidas em (28) e (29), omitindo, é claro, a parcela que contém a contribuição do IPFC.

Desta forma, pode-se afirmar que as parcelas que representam as injeções de potência nos ramos em que o dispositivo encontra-se instalado ( $P_{inj_i}$ ,  $Q_{inj_i}$ ,  $P_{inj_n}$  e  $Q_{inj_n}$ ) são dadas pelas equações (32), (33), (34) e (35), em que  $n = j, k$ .

$$P_{inj_i} = -V_i \sum_{n=j,k} b_{in} V_{p_n} \quad (32)$$

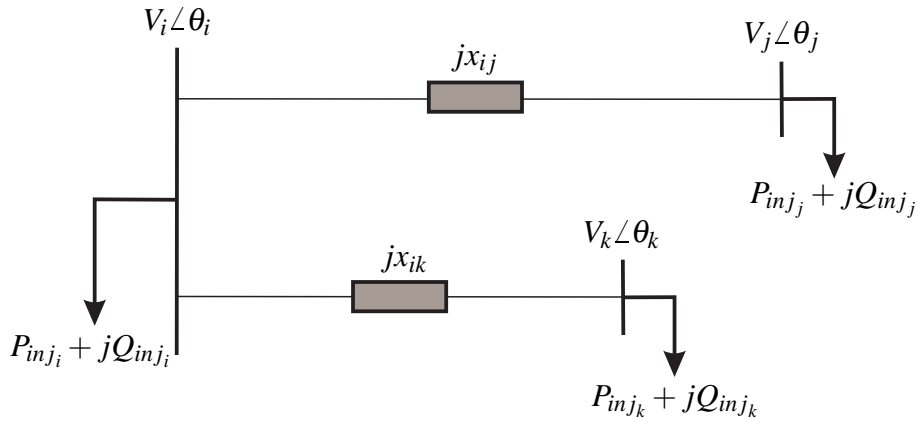
$$Q_{inj_i} = -V_i \sum_{n=j,k} b_{in} V_{q_n} \quad (33)$$

$$P_{inj_n} = V_n b_{in} (V_{q_n} \sin \theta_{in} + V_{p_n} \cos \theta_{in}) \quad (34)$$

$$Q_{inj_n} = V_n b_{in} (V_{q_n} \cos \theta_{in} - V_{p_n} \sin \theta_{in}) \quad (35)$$

Definidas as injeções de potência conforme as equações (32), (33), (34) e (35) nas barras comuns ao IPFC, pode-se representar o modelo de Injeção de Potência para este dispositivo conforme a Figura 4.

Figura 4 - Modelo de Injeção de Potência do IPFC.



Fonte: Adaptado de Zhang (2006).

Note que a modelagem deduzida para o IPFC (equações (32) - (35) representadas na Figura 4) facilita a inclusão do dispositivo em um programa de fluxo de carga convencional, já que a modelagem proposta ao IPFC não modifica as equações de fluxo de carga e ainda considera sua contribuição como se fossem injeções de potências nas barras comuns ao dispositivo.

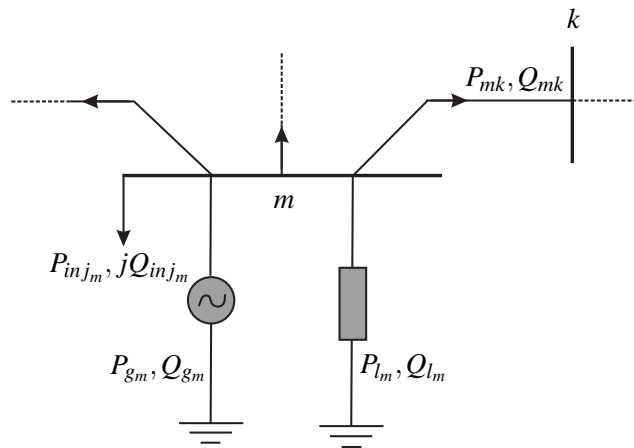
## 2.5 INCLUSÃO DO IPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA

Para a inclusão do IPFC no Fluxo de Potência será utilizado o Método de Newton Raphson (MONTICELLI, 1983) e está fundamentada nos trabalhos de (KOPCAK, 2007) e Valle (2010). O objetivo principal da inclusão do IPFC no Fluxo de Potência é fazer com que todos os *mismatches* de potências ativa e reativa sejam satisfeitos a todo instante em cada barra do sistema em que o dispositivo encontra-se instalado. Naturalmente, nas barras em que o IPFC não está instalado o Fluxo de Potência é exatamente igual ao convencional.

Considere o caso em que se tenha uma barra genérica de geração  $m$ . Sejam  $P_{g_m}$  e  $Q_{g_m}$  as respectivas gerações de potências ativa e reativa chegando na barra  $m$ . Considere que a esta barra  $m$  eventuais cargas possam estar a ela conectadas. A potência ativa e reativa possivelmente

drenada por essas eventuais cargas são representadas por  $P_{l_m}$  e  $Q_{l_m}$ . Considere ainda que esta barra  $m$  esteja interligada a outra barra  $k$  em que não encontra-se instalado o IPFC. Sejam  $P_{mk}$  e  $Q_{mk}$  os fluxos de potências ativa e reativa que é transmitido da barra  $m$  em direção à barra  $k$ . Por fim, se na barra  $m$  for instalado um IPFC, as injeções de potências ativa e reativa inserida pelo dispositivo podem ser representadas por  $P_{inj_m}$  e  $Q_{inj_m}$ . Para melhor entendimento segue a Figura 5 que mostra com detalhes esta situação.

Figura 5 - Balanço de potência nas barras em que o IPFC encontra-se instalado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após efetuar análise da Figura 5, pode-se concluir que nas barras em que o dispositivo IPFC encontra-se instalado, os balanços de potências de ativa e reativa podem ser representados pelas equações (36) e (37), respectivamente. Contudo, nas barras em que o IFPC não está instalado, o balanço de potências ativa e reativa não difere do Fluxo de Potência convencional.

$$P_{g_m} - P_{inj_m} - P_{l_m} - P_{mk} = 0 \quad (36)$$

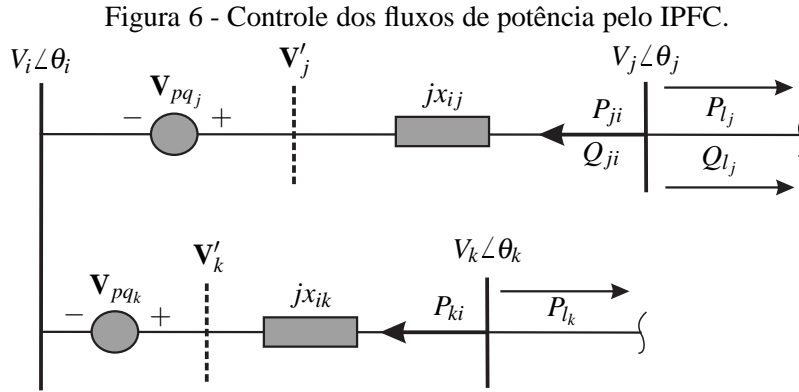
$$Q_{g_m} - Q_{inj_m} - Q_{l_m} - Q_{mk} = 0 \quad (37)$$

## 2.6 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA PELO IPFC

Sabe-se que os compensadores série são poderosos instrumentos no que se refere ao controle de fluxos de potência em linhas de transmissão (VALLE, 2010). No caso deste trabalho, o IPFC apresenta quatro variáveis de controle sendo elas  $P_{ref_j}$  e  $Q_{ref_j}$  (fluxos de potências, ativa e reativa, que deixam a barra  $j$ ) e  $P_{ref_k}$  e  $Q_{ref_k}$  (fluxos de potências, ativa e reativa, que deixam a barra  $k$ ).

Entretanto, conforme já citado, devido a invariância de potência ativa ( $\sum_{n=i,j,k} P_{inj_n} = 0$ ), os graus de controle livres de um IPFC com exatamente dois conversores série são três. A quarta variável é usada para fechar o balanço de potência entre os dois conversores (VALLE, 2010).

Neste trabalho, conforme mostrado na Figura 6, serão controlados os fluxos de potências  $P_{l_j}$ ,  $P_{l_k}$  e  $Q_{l_j}$ . As restrições de controle dos fluxos de potências ativa e reativa do controlador são apresentadas no conjunto de equações (38).



Fonte: Adaptado de Zhang, Yokoyama e Ide (2009).

$$P_{l_j} - P_{ref_j} = 0 \quad (38a)$$

$$P_{l_k} - P_{ref_k} = 0 \quad (38b)$$

$$Q_{l_j} - Q_{ref_j} = 0 \quad (38c)$$

No conjunto de equações (38),  $P_{ref_j}$  e  $Q_{ref_j}$  são valores especificados para o controle dos fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $i - j$ , enquanto que  $P_{ref_k}$  se refere ao valor especificado para o controle do fluxo de potência ativa no ramo  $i - k$ . Mais detalhes sobre o controle de fluxo no IPFC podem ser averiguados em (VALLE, 2010; ZHANG; YOKOYAMA; IDE, 2009).

## 2.7 IMPLEMENTAÇÃO DO IPFC NO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

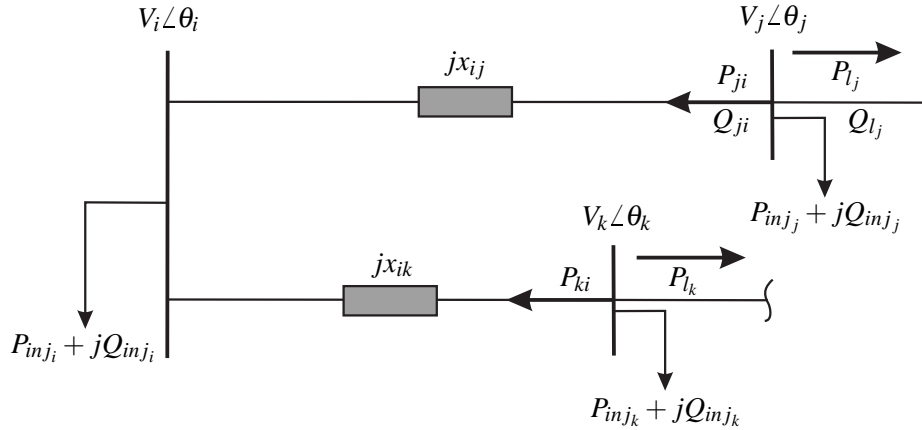
Conforme já discutido, um IPFC que possui  $k$  conversores série, necessariamente  $(k - 1)$  conversores poderão atuar no controle de potências ativa e reativa. Portanto, haverá um entre os  $k$  conversores séries existentes que poderá controlar apenas a potência ativa ou a potência reativa. Isso acontece devido ao fato de que este conversor deverá fechar o balanço de potência ativa nos  $k$  conversores série (ZHANG X.-P; PAL, 2006).

Para entendimento de como são obtidas as equações que expressam  $P_{l_j}$ ,  $P_{l_k}$  e  $Q_{l_j}$  exibidas no conjunto de equações (38), segue a Figura 7.

Analisando a Figura 7 verifica-se que  $P_{l_j}$ ,  $P_{l_k}$  e  $Q_{l_j}$  podem ser escritas conforme o conjunto de equações (39).



Figura 7 - Representação do modelo de injeção de potência e controle dos fluxos.



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

$$\begin{aligned}
 P_{l_j} &= -P_{ji} - P_{inj_j} \\
 &= -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij})
 \end{aligned} \tag{39a}$$

$$\begin{aligned}
 P_{l_k} &= -P_{ki} - P_{inj_k} \\
 &= -V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik})
 \end{aligned} \tag{39b}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{l_j} &= -Q_{ji} - Q_{inj_j} \\
 &= V_j^2 b_{ij} - V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij})
 \end{aligned} \tag{39c}$$

Assim, pode-se representar de forma compacta a matriz jacobiana do fluxo de potência com um IPFC instalado nas linhas de transmissão entre a  $i$ -ésima e  $j$ -ésima e a  $i$ -ésima e  $k$ -ésima barras de um SEP qualquer, conforme equacionamento (40). Para tanto, suponha que sejam válidas todas as restrições de controle dos fluxos de potência e as restrições dos *mismatches* de potência nas barras descritas até o presente momento.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} P_{ref_j} - P_{l_j} \\ Q_{ref_j} - Q_{l_j} \\ P_{ref_k} - P_{l_k} \\ \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta Q_k \\ -P_{inj_n} \end{bmatrix}}_{\text{Mismatches}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_j}{\partial V_{p_j}} & \frac{\partial P_j}{\partial V_{q_j}} & [0] & \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] & [0] \\ \frac{\partial Q_j}{\partial V_{p_j}} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_{q_j}} & [0] & \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] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{\partial P_k}{\partial V_{p_k}} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_j} & [0] & \frac{\partial P_k}{\partial V_i} & \frac{\partial P_k}{\partial V_j} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{q_k}} \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_{p_j}} & [0] & [0] & \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_i}{\partial V_{q_k}} \\ \frac{\partial P_j}{\partial V_{p_j}} & \frac{\partial P_j}{\partial V_{q_j}} & [0] & \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] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{\partial P_k}{\partial V_{p_k}} & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_i} & [0] & \frac{\partial P_k^*}{\partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{q_k}} \\ [0] & \frac{\partial Q_i}{\partial V_{q_j}} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_{p_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} & [0] \\ \frac{\partial Q_j}{\partial V_{p_j}} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_{q_j}} & [0] & \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] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{p_k}} & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_j} & [0] & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_i} & \frac{\partial P_k}{\partial V_j} & [0] & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{q_k}} \\ \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{p_j}} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{q_j}} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{p_k}} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_i} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_j} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{q_k}} \end{bmatrix}}_{\text{Matriz Jacobiana}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta v_{p_j} \\ \Delta v_{q_j} \\ \Delta v_{p_k} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \\ \Delta \theta_k \\ \Delta v_i \\ \Delta v_j \\ \Delta v_k \\ \Delta v_{q_k} \end{bmatrix}}_{\text{Variáveis}} \tag{40}$$

As expressões das derivadas que compõe a matriz jacobiana em (40) encontram-se no

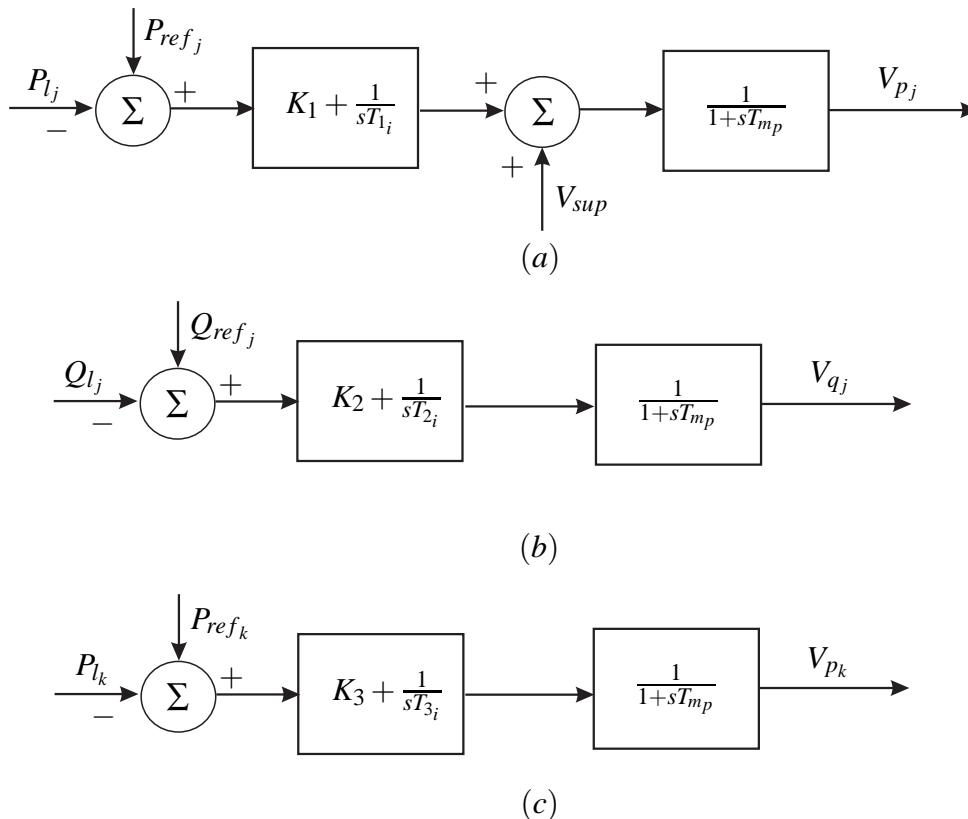
Apêndice B, representadas pelo conjunto de equações (191) a (200). Na formulação apresentada na formação da matriz jacobiana, vale destacar que os elementos que formam a matriz que estão destacados com “\*” têm em sua composição a soma das parcelas referentes às derivadas que possuem algumas das variáveis exclusivas do IPFC ( $V_{p_j}$ ,  $V_{p_k}$ ,  $V_{q_j}$  ou  $V_{q_k}$ ). Em relação às linhas da matriz jacobiana, as três primeiras são formadas por derivadas obtidas por meio das equações descritas em (38). Os elementos da matriz presentes nas próximas seis linhas estão relacionados com os *mismatches* de potências na  $i$ -ésima,  $j$ -ésima e  $k$ -ésima barras que são as barras comuns do IPFC, descritas nas equações (26) a (29). Por fim, a última linha está relacionada com a invariância da potência ativa, equação (41).

$$\sum_{n=i,j,k} P_{injn} = -V_i b_{ij} V_{p_j} - V_i b_{ik} V_{p_k} + V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij}) + V_k b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik}) = 0 \quad (41)$$

## 2.8 ESTRUTURA DE CONTROLE DO IPFC

A estrutura de controle utilizada neste trabalho para o IPFC (controladores PI) baseia-se nos trabalhos de Zhang, Yokoyama e Ide (2009), Valle e Araujo (2015) e são mostrados na Figura 8.

Figura 8 - Controladores PI para o IPFC.

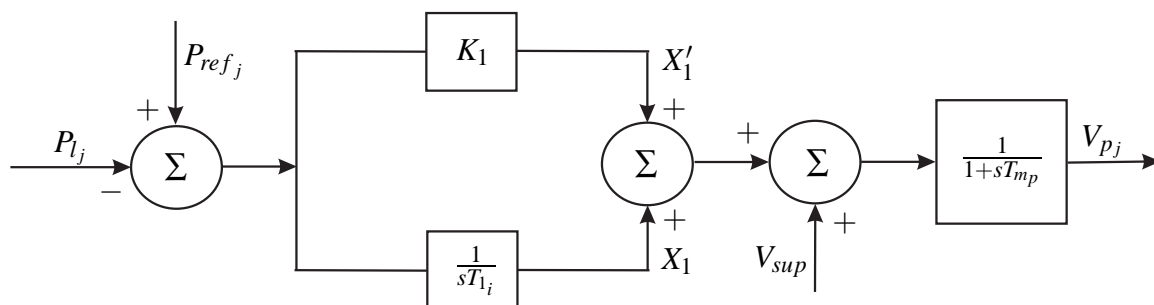


Fonte: Adaptado de Valle e Araujo (2015).

Cada controlador exibido na Figura 8 relaciona-se com uma das variáveis das fontes controláveis ( $V_{p_j}$ ,  $V_{q_j}$  e  $V_{p_k}$ ). A quarta variável ( $V_{q_k}$ ), no entanto, está relacionada com a invariância de potência ativa (equação 41).

A partir do diagrama de blocos mostrado na Figura 8, é possível encontrar as equações diferenciais que representam o comportamento dinâmico do IPFC. Primeiramente serão representadas, a partir da Figura 8 (a), as equações que descrevem a dinâmica da componente em quadratura para o primeiro conversor ( $V_{p_j}$ ), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Sistema de controle para componente em quadratura para o primeiro conversor.



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

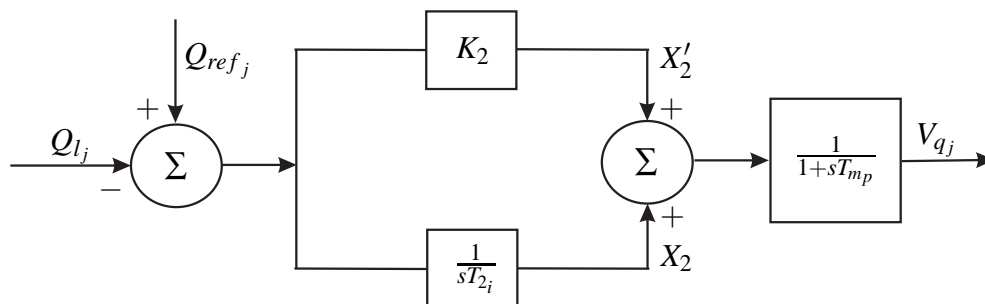
A partir do diagrama em blocos da Figura 9 são obtidas as equações (42) e (43).

$$\dot{V}_{p_j} = \frac{K_1}{T_{m_p}} (P_{ref_j} - P_{l_j}) + \frac{1}{T_{m_p}} X_1 + \frac{1}{T_{m_p}} V_{sup} - \frac{1}{T_{m_p}} V_{p_j} \quad (42)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_{1_i}} (P_{ref_j} - P_{l_j}) \quad (43)$$

Analogamente, observando a Figura 8 (b), é possível representar a componente em fase para o primeiro conversor ( $V_{q_j}$ ) conforme diagrama de blocos indicado na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de controle para componente em fase para o primeiro conversor.



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

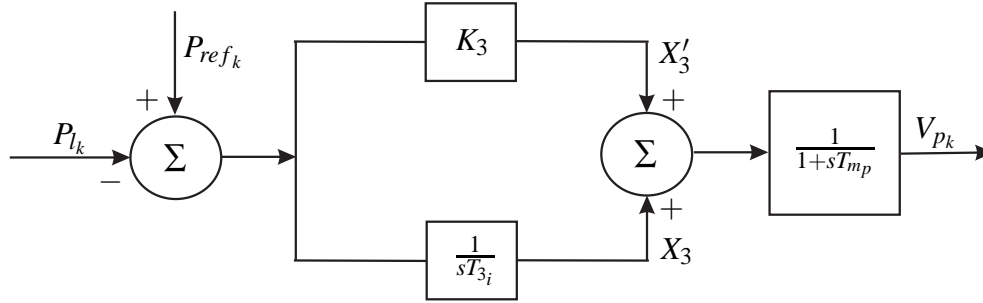
Desta forma tem-se as equações (44) e (45).

$$\dot{V}_{q_j} = \frac{K_2}{T_{m_p}} (Q_{ref_j} - Q_{l_j}) + \frac{1}{T_{m_p}} X_2 - \frac{1}{T_{m_p}} V_{q_j} \quad (44)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_{2i}} (Q_{ref_j} - Q_{l_j}) \quad (45)$$

Por fim, analisando a Figura 8 (c), é possível representar, em diagrama de blocos, a componente em quadratura para o segundo conversor ( $V_{pk}$ ), conforme Figura 11.

Figura 11 - Sistema de controle para componente em quadratura para o segundo conversor.



Fonte: Adaptado de Valle (2010).

Após analisar a Figura 11, tem-se as expressões (46) e (47).

$$\dot{V}_{pk} = \frac{K_3}{T_{mp}} (P_{ref_k} - P_{lk}) + \frac{1}{T_{mp}} X_3 - \frac{1}{T_{mp}} V_{pk} \quad (46)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{3i}} (P_{ref_k} - P_{lk}) \quad (47)$$

Nas Figuras 9, 10 e 11  $T_{1i}$ ,  $T_{2i}$ ,  $T_{3i}$  e  $T_{mp}$  são constantes de tempos, enquanto que  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são os ganhos dos controladores PIs.

É importante destacar que nas equações que descrevem o comportamento dinâmico do IPFC, equações (42) a (47), as variáveis  $P_{l_j}$ ,  $Q_{l_j}$  e  $P_{l_k}$  estão relacionadas com os fluxos controlados nas linhas de transmissão. As grandezas  $P_{ref_j}$  e  $Q_{ref_j}$  referem-se aos valores especificados de potências ativa e reativa no trecho  $i - j$  e  $P_{ref_k}$  refere-se ao valor especificado do fluxo de potência ativa no ramo  $i - k$ . Além disso, a variável  $V_{sup}$  descrita em (42) é nula, já que esta relacionada com o sinal suplementar fornecido pelo controlador POD, e este ainda não encontra-se atuando no IPFC.

## 2.9 INCLUSÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO IPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA

Para a inclusão das equações diferenciais no fluxo de potência deve-se considerar o sistema operando em regime permanente. Desta forma, as equações diferenciais que representam a dinâmica do IPFC (equações (42) a (47)) são igualadas a zero e, portanto, passam a ser equações algébricas. A grande vantagem de se representar o problema desta forma está no fato de que a

solução do fluxo de potência expandido (KOPCAK, 2007) (com as novas equações diferenciais do IPFC) se resume em identificar as raízes de um conjunto de equações não lineares, que pode ser solucionado utilizando-se o método de Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983). As equações que serão utilizadas no fluxo de potência expandido serão apresentadas na sequência.

Substituindo (39) em (42) e (43), (39c) em (44) e (45), (39b) em (46) e (47) é possível deduzir o conjunto de expressões (48), (49) e (50), respectivamente.

$$\dot{V}_{p_j} = \frac{K_1}{T_{m_p}} \left( P_{ref_j} + V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij}) \right) + \frac{1}{T_{m_p}} (X_1 + V_{sup} - V_{p_j}) \quad (48a)$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \frac{1}{T_{1_i}} \left( P_{ref_j} + V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{p_j} \cos \theta_{ij} \right) \quad (48b)$$

$$\dot{V}_{q_j} = \frac{K_2}{T_{m_p}} \left( Q_{ref_j} - V_j^2 b_{ij} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + v_j b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij}) \right) + \frac{1}{T_{m_p}} (X_2 - V_{q_j}) \quad (49a)$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_{2_i}} \left( Q_{ref_j} - V_j^2 b_{ij} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{q_j} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{p_j} \cos \theta_{ij} \right) \quad (49b)$$

$$\dot{V}_{p_k} = \frac{K_3}{T_{m_p}} \left( P_{ref_k} + V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_k b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik}) \right) + \frac{1}{T_{m_p}} (X_3 - V_{p_k}) \quad (50a)$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{1}{T_{3_i}} \left( P_{ref_k} + V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_k b_{ik} V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_k b_{ik} V_{p_k} \cos \theta_{ik} \right) \quad (50b)$$

Assim, as equações do fluxo de potência e as equações diferenciais que representam a dinâmica do IFPC (descritas no conjunto de equações (48), (49) e (50)), com dois conversores (conforme representado na Figura 2), podem ser escritas conforme a equação (51). As expressões das derivadas presentes no sistema matricial (51) encontram-se no Apêndice C deste trabalho, conjunto de equações (201) a (212).

A matriz Jacobiana com fluxo expandido considerando a atuação dos controladores PI descrita em (51) é similar à matriz Jacobiana apresentada na equação (40). Na formulação apresentada, observe que o bloco da matriz Jacobiana cujos elementos encontram-se na parte inferior direita da matriz é semelhante à matriz Jacobiana do Fluxo de Potência convencional (MONTICELLI, 1983). A diferença basicamente se resume nos elementos que estão destacados com “\*”. Estes elementos têm em sua composição soma de parcelas referentes às derivadas que possuem algumas das variáveis exclusivas do IPFC ( $V_{p_j}$ ,  $V_{p_k}$ ,  $V_{q_j}$  ou  $V_{q_k}$ ). Além disso, este bloco apresenta uma linha e uma coluna a mais, se comparado com a matriz Jacobiana do Fluxo de Potência convencional, devido à equação de invariância de potência ativa (equação 41). Vale destacar ainda que os elementos da matriz Jacobiana localizados no bloco inferior à esquerda (com exceção da última linha) representam as derivadas da potência injetada pelo dispositivo nas barras  $i$ ,  $j$  e  $k$ . Por fim, o bloco da matriz Jacobiana cujos elementos encontram-se na parte

superior à direita e à esquerda, são oriundos das derivadas das expressões (48) a (50). Estas representam as equações diferenciais que constituem a parte dinâmica do IFPC.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_{p_j} \\ \Delta \dot{X}_1 \\ \Delta \dot{V}_{q_j} \\ \Delta \dot{X}_2 \\ \Delta \dot{V}_{p_k} \\ \Delta \dot{X}_3 \\ \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta Q_k \\ -P_{inj_n} \end{bmatrix}}_{\text{Mismatches}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_{p_j}} & \frac{\partial V_{p_j}}{\partial X_1} & \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_{q_j}} & [0] & [0] & [0] & \frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_j} & [0] & \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_i} & \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_j} & [0] & [0] \\ \frac{\partial X_1}{\partial V_{p_j}} & [0] & \frac{\partial X_1}{\partial V_{q_j}} & [0] & [0] & [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] & [0] \\ \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_{p_j}} & [0] & \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_{q_j}} & \frac{\partial V_{q_j}}{\partial X_2} & [0] & [0] & \frac{\partial V_{q_j}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{q_j}}{\partial \theta_j} & [0] & \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_i} & \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_j} & [0] & [0] \\ \frac{\partial X_2}{\partial V_{p_j}} & [0] & \frac{\partial X_2}{\partial V_{q_j}} & [0] & [0] & [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] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \frac{\partial V_{p_k}}{\partial V_{p_k}} & \frac{\partial V_{p_k}}{\partial X_3} & \frac{\partial V_{p_k}}{\partial \theta_i} & [0] & \frac{\partial V_{p_k}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_{p_k}}{\partial V_i} & [0] & \frac{\partial V_{p_k}}{\partial V_k} & \frac{\partial V_{p_k}}{\partial V_{q_k}} \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \frac{\partial X_3}{\partial V_{p_k}} & [0] & \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 X_3}{\partial V_{q_k}} \\ \hline \frac{\partial P_{inj_i}}{\partial V_{p_j}} & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \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_i}{\partial V_{q_k}} \\ \frac{\partial P_{inj_j}}{\partial V_{p_j}} & [0] & \frac{\partial P_{inj_j}}{\partial V_{q_j}} & [0] & [0] & [0] & \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] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \frac{\partial P_{inj_k}}{\partial V_{p_k}} & [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 P_k}{\partial V_{q_k}} \\ [0] & [0] & \frac{\partial Q_{inj_i}}{\partial V_{q_j}} & [0] & \frac{\partial Q_{inj_i}}{\partial V_{p_k}} & [0] & \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} & [0] \\ \frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial V_{p_j}} & [0] & \frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial V_{q_j}} & [0] & [0] & [0] & \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] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \frac{\partial Q_{inj_k}}{\partial V_{p_k}} & [0] & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_i} & [0] & \frac{\partial Q_k^*}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_i} & [0] & \frac{\partial Q_k^*}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{q_k}} \\ \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{p_j}} & [0] & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{q_j}} & [0] & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{p_k}} & [0] & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_i} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_j} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{inj_n}}{\partial V_{q_k}} \end{bmatrix}}_{\text{Matriz Jacobiana}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta v_{p_j} \\ \Delta X_1 \\ \Delta v_{q_j} \\ \Delta X_2 \\ \Delta v_{p_k} \\ \Delta X_3 \\ \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \\ \Delta \theta_k \\ \Delta v_i \\ \Delta v_j \\ \Delta v_k \\ \Delta v_{q_k} \end{bmatrix}}_{\text{Variáveis}} \quad (51)$$

## 2.10 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foi apresentado o dispositivo FACTS IPFC. Trata-se de um poderoso dispositivo capaz de controlar os fluxos de potências ativa e reativa entre as barras em que está instalado. Além disso, foi deduzido todo o equacionamento necessário para inclusão do IPFC em programa de fluxo de potência. Em especial, destacam-se as equações (26), (27), (28) e (29). Estas expressões representam as potências injetadas e os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão comuns à instalação do IPFC.

Na sequência foi obtida uma representação matricial considerando a atuação do IPFC (fluxo expandido). Inicialmente este equacionamento foi descrito em (40) considerando as restrições de controle dos fluxos de potência e as restrições dos *mismatches* de potência nas barras comuns a instalação do IPFC (conjunto de equações (38) e (39)). Em seguida, após ser considerada a estrutura de controle utilizada neste trabalho (controladores PI - Figura 8) e as equações (43) a (47) foi deduzido e descrito um sistema matricial considerando a atuação desses controladores (equação (51)).

No próximo Capítulo será apresentado e deduzido o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC). Neste modelo deverão ser incluídas as variáveis de estado e algébricas que encontram-se nas equações deduzidas para o IPFC neste Capítulo. Esta inclusão é necessária para que posteriormente, o MSC juntamente com o IPFC e dispositivos de controle suplementar de amortecimento (ESP e POD) possam ser utilizados no estudo da estabilidade a pequenas perturbações do SEP.



### 3 MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE: SISTEMA MULTIMÁQUINAS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo, são apresentadas as características principais, bem como o equacionamento do MSC multimáquinas. Este modelo é baseado no balanço nodal de correntes em cada barra do sistema (PÁDUA JÚNIOR, 2014; TAKAHASHI, 2013), balanço este que deve ser satisfeito a todo e qualquer instante de tempo em todas as barras do SEP. Este modelo, conforme será descrito, pode ser utilizado no estudo da estabilidade a pequenas perturbações. Para a dedução do MSC assumem-se condições balanceadas, ausência de saturação e o gerador síncrono é representado por 3 enrolamentos no estator (fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ ) e um enrolamento no rotor (excitação).

#### 3.2 EQUAÇÕES BÁSICAS DO MSC

Para a dedução do MSC o gerador síncrono é representado por três enrolamentos no estator (fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ ) e um enrolamento no rotor (enrolamento de campo -  $fd$ ), conforme diagrama esquemático mostrado na Figura 12.

Os enrolamentos do estator são fixos e, por simplicidade, suas grandezas são mensuradas em um sistema de coordenadas comumente designado como sistema de coordenadas real e imaginário ( $r, m$ ). O rotor, que é a parte girante do gerador síncrono, têm suas grandezas expressas em um sistema de coordenadas rotativo, também conhecido como eixo direto e eixo em quadratura ou ainda, sistemas de coordenadas rotativo ( $d, q$ ).

Para se referir as grandezas do sistema de coordenadas ( $r, m$ ) para o sistema de coordenadas ( $d, q$ ) é utilizada a matriz de transformação  $T$ , conforme a equação (52). A operação inversa (sistema ( $d, q$ ) para sistema ( $r, m$ )) é realizada segundo a equação (53) (ANDERSON; FOUAD, 1993).

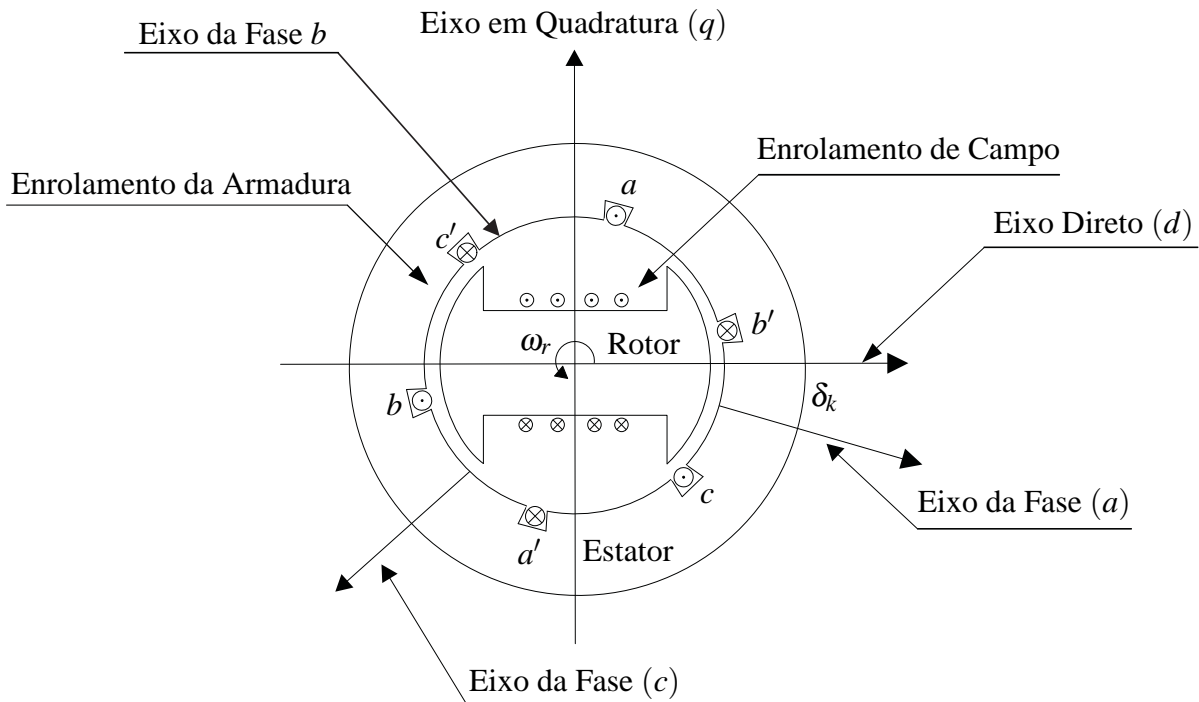
$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & -\cos \delta_k \\ \cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & \cos \delta_k \\ -\cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (53)$$

Nas equações (52) e (53)  $\delta_k$  é o ângulo interno do gerador síncrono  $G_k$  conectado à barra  $k$ .

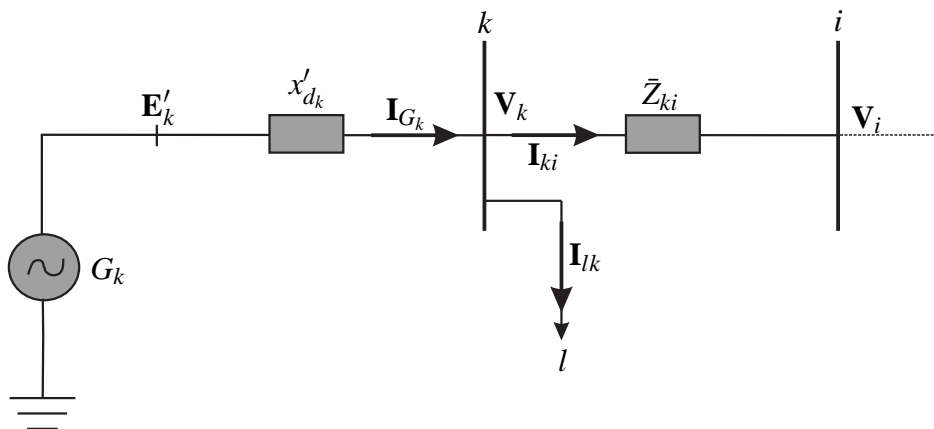
Para a dedução do MSC considere um gerador síncrono  $G_k$ , ligado a uma barra genérica

Figura 12 - Enrolamentos do Gerador Síncrono Trifásico - 2 Polos.



Fonte: Adaptado de Kundur (1994).

$k$ , com tensão terminal  $\mathbf{V}_k$ . Sejam  $\mathbf{E}'_k$ ,  $x'_{dk}$  e  $\mathbf{I}_{G_k}$  a tensão interna, a reatância transitória de eixo direto e a corrente fornecida pelo gerador  $G_k$ , respectivamente. Suponha-se que na barra genérica  $k$  esteja interligada uma eventual carga designada por  $l$ . A corrente drenada por esta eventual carga será chamada de  $\mathbf{I}_{lk}$ . Suponha ainda uma linha de transmissão de impedância  $\bar{Z}_{ki}$  interligando a barra  $k$  a uma barra  $i$ , que possui tensão  $\mathbf{V}_i$ . A corrente que circula por esta linha é chamada de  $\mathbf{I}_{ki}$ . O diagrama unifilar mostrado na Figura 13 sintetiza estas informações.

Figura 13 - Diagrama Unifilar de um Gerador Síncrono Conectado a uma Barra Genérica  $k$ .

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Considerando que as tensões  $\mathbf{V}_k$  e  $\mathbf{V}_i$  são dadas pelas expressões (54) e (55), por inspeção, a partir do diagrama unifilar mostrado na Figura 13, pode ser escrita a expressão (56) (tensão

$\mathbf{E}'_k$ ).

$$\mathbf{V}_k = V_k \angle \theta_k = V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k \quad (54)$$

$$\mathbf{V}_i = V_i \angle \theta_i = V_i \cos \theta_i + jV_i \sin \theta_i \quad (55)$$

$$\mathbf{E}'_k = \mathbf{V}_k + jx'_{d_k} \mathbf{I}_{G_k} \quad (56)$$

As expressões (54), (55), (56) e a corrente  $\mathbf{I}_{G_k}$  podem de forma conveniente serem representadas por meio de suas componentes de eixo real e eixo imaginário ( $r, m$ ), conforme as equações (57), (58), (59) e (60), respectivamente.

$$\mathbf{V}_k = V_{r_k} + jV_{m_k} \quad (57)$$

$$\mathbf{V}_i = V_{r_i} + jV_{m_i} \quad (58)$$

$$\mathbf{E}'_k = E'_{r_k} + jE'_{m_k} \quad (59)$$

$$\mathbf{I}_{G_k} = I_{G_{r_k}} + jI_{G_{m_k}} \quad (60)$$

Segundo Anderson e Fouad (1993) e Kundur (1994), é definida uma tensão, designada por  $\mathbf{E}_{a_k}$ , em fase com o eixo em quadratura, que possibilita localizar o sistema de coordenadas rotativo ( $d_k, q_k$ ) de cada gerador. Esta tensão, segundo os autores, é expressa pela equação (61) em que  $x_{q_k}$  é a reatância síncrona do eixo em quadratura do gerador  $G_k$ .

$$\mathbf{E}_{a_k} = \mathbf{V}_k + jx_{q_k} \mathbf{I}_{G_k} \quad (61)$$

Por outro lado, a tensão  $E_{a_k}$  também pode ser escrita como na equação (62).

$$\mathbf{E}_{a_k} = E_{a_k} \cos \delta_k + jE_{a_k} \sin \delta_k \quad (62)$$

Substituindo (57) na expressão obtida em (54) chega-se na equação (63).

$$V_{r_k} + jV_{m_k} = V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k \quad (63)$$

A partir da equação (63) pode ser escrita a equação (64).

$$\begin{bmatrix} V_{r_k} \\ V_{m_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k \cos \theta_k \\ V_k \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (64)$$

A equação (65) é obtida pela aplicação da matriz de transformação de coordenadas na equação (64).

$$\begin{bmatrix} V_{d_k} \\ V_{q_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \\ V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \end{bmatrix} \quad (65)$$

Substituindo as expressões obtidas em (57), (59) e (60) em (56) é obtida a equação (66).

$$E'_{r_k} + jE'_{m_k} = (V_{r_k} - x'_{d_k} I_{G_{m_k}}) + j(V_{m_k} + x'_{d_k} I_{G_{r_k}}) \quad (66)$$

A forma matricial dada em (67) é obtida da equação (66), pela separação das partes real e imaginária da tensão  $\mathbf{E}'_k$ .

$$\begin{bmatrix} V_{r_k} \\ V_{m_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{r_k} \\ E'_{m_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{d_k} \\ -x'_{d_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{G_{m_k}} \\ I_{G_{r_k}} \end{bmatrix} \quad (67)$$

Aplicando a matriz de transformação de coordenadas na equação (67), é obtida a equação (68).

$$\begin{bmatrix} V_{d_k} \\ V_{q_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{d_k} \\ E'_{q_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{d_k} \\ -x'_{d_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{G_{d_k}} \\ I_{G_{q_k}} \end{bmatrix} \quad (68)$$

Substituindo as equações (57), (60) e (62) em (61) obtêm-se a expressão (69).

$$E_{a_k} \cos \delta_k + jE_{a_k} \sin \delta_k = (V_{r_k} - x_{q_k} I_{G_{m_k}}) + j(V_{m_k} + x_{q_k} I_{G_{r_k}}) \quad (69)$$

A equação matricial (70) é obtida a partir da equação (69), pela separação das parcelas real e imaginária.

$$\begin{bmatrix} V_{r_k} \\ V_{m_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a_k} \cos \delta_k \\ E_{a_k} \sin \delta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x_{q_k} \\ -x_{q_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{G_{r_k}} \\ I_{G_{m_k}} \end{bmatrix} \quad (70)$$

No sistema de coordenadas rotativo ( $d_k, q_k$ ), a equação (70) é escrita como na equação (71).

$$\begin{bmatrix} V_{d_k} \\ V_{q_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x_{q_k} \\ -x_{q_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{G_{d_k}} \\ I_{G_{q_k}} \end{bmatrix} \quad (71)$$

Igualando as expressões (65), (68) e (71) obtêm-se as equações (72) e (73), em que  $V_{d_k}$  e  $V_{q_k}$  são, respectivamente, a tensão terminal de eixo direto e de eixo em quadratura do gerador  $G_k$ .

$$V_{d_k} = V_k \sin(\delta_k - \theta_k) = E'_{d_k} + x'_{d_k} I_{G_{d_k}} = x_{q_k} I_{G_{q_k}} \quad (72)$$

$$V_{q_k} = V_k \cos(\delta_k - \theta_k) = E'_{q_k} - x'_{d_k} I_{G_{d_k}} = E_{a_k} - x_{q_k} I_{G_{d_k}} \quad (73)$$

Decorre imediatamente das equações (72) e (73) as equações (74) e (75).

$$\mathbf{I}_{G_{d_k}} = \frac{E'_{q_k} - V_{q_k}}{x'_{d_k}} \quad (74)$$

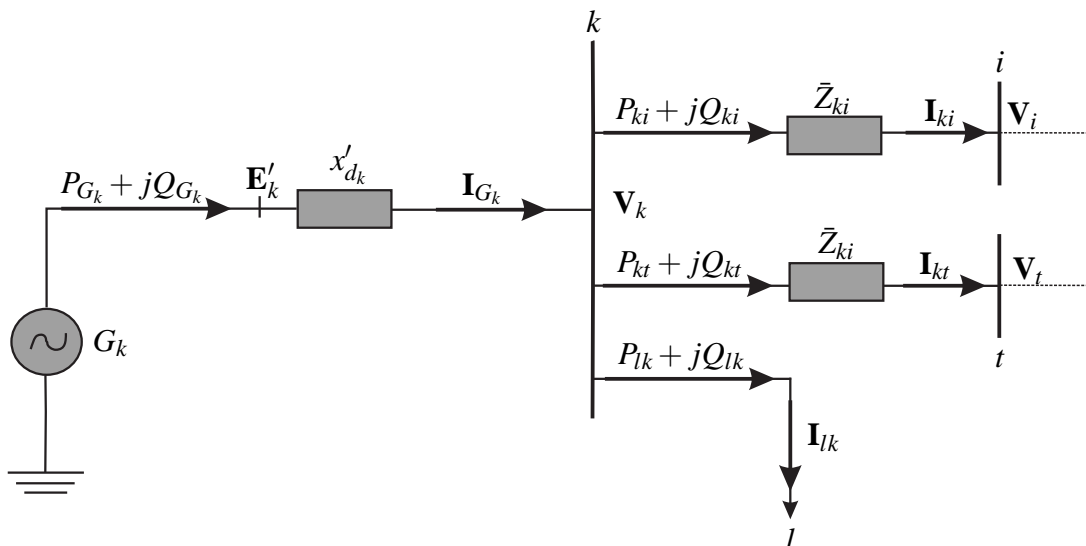
$$\mathbf{I}_{G_{q_k}} = \frac{V_{d_k}}{x_{q_k}} \quad (75)$$

As equações (74) e (75) representam as correntes de eixo direto ( $\mathbf{I}_{G_{dk}}$ ) e em quadratura ( $\mathbf{I}_{G_{qk}}$ ), fornecidas pelo gerador síncrono  $G_k$ .

### 3.3 CORRENTES GERADAS E FLUXOS DE CORRENTE NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS

Para a completa dedução do MSC é necessário que se obtenha as expressões (Subseções 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3), em eixo real e imaginário, das correntes fornecidas pelo gerador síncrono, das que circulam pelas linhas de transmissão e as que, eventualmente, podem ser drenadas por eventuais cargas conectadas nas barras do sistema. Para tanto, considere a Figura 14.

Figura 14 - Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 14 o gerador  $G_k$  entrega à barra  $k$  as potências ativa ( $P_{G_k}$ ) e reativa ( $Q_{G_k}$ ). Ainda na Figura 13 a barra de geração  $k$  está interligada a outras duas barras denominadas de  $i$  e  $t$ . Essas barras estão conectadas ao barramento  $k$  através de duas linhas de transmissão de impedâncias  $\bar{Z}_{ki}$  e  $\bar{Z}_{kt}$ , respectivamente. Por essas linhas circulam correntes  $\mathbf{I}_{ki}$  entre as barras  $k$  e  $i$  e  $\mathbf{I}_{kt}$  entre as barras  $k$  e  $t$ . Considere também os fluxos de potências ativa e reativa  $P_{ki}$  e  $Q_{ki}$  entre as barras  $k$  e  $i$  e  $P_{kt}$  e  $Q_{kt}$  entre as barras  $k$  e  $t$ . A eventual carga ligada à barra  $k$  consome, respectivamente, potências ativa ( $P_{lk}$ ) e reativa ( $Q_{lk}$ ), bem como uma corrente  $\mathbf{I}_{lk}$ .

#### 3.3.1 Máquina síncrona

Aplicando a matriz de transformação de coordenadas (equação 53) nas equações (74) e (75), obtém-se (76).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{G_{r_k}} \\ \mathbf{I}_{G_{m_k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & \cos \delta_k \\ -\cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E'_{q_k} - V_{q_k}}{x'_{d_k}} \\ \frac{V_{d_k}}{x_{q_k}} \end{bmatrix} \quad (76)$$

O sistema matricial descrito em (76) pode, de forma adequada, ser reescrito conforme (77) e (78) e representam as correntes de componente real ( $\mathbf{I}_{G_{r_k}}$ ) e imaginário ( $\mathbf{I}_{G_{m_k}}$ ) fornecidas pela máquina síncrona.

$$\mathbf{I}_{G_{r_k}} = \sin \delta_k \left( \frac{E'_{q_k} - V_{q_k}}{x'_{d_k}} \right) + \cos \delta_k \left( \frac{V_{d_k}}{x_{q_k}} \right) \quad (77)$$

$$\mathbf{I}_{G_{m_k}} = -\cos \delta_k \left( \frac{E'_{q_k} - V_{q_k}}{x'_{d_k}} \right) + \sin \delta_k \left( \frac{V_{d_k}}{x_{q_k}} \right) \quad (78)$$

### 3.3.2 Linhas de transmissão

Ao analisar a Figura 14 é possível inferir expressões que representam as correntes que circulam nas linhas de transmissão. Estas são representadas pelas expressões (79) e (80).

$$\mathbf{I}_{ki} = \frac{\mathbf{V}_k - \mathbf{V}_i}{\bar{\mathbf{Z}}_{ki}} = I_{r_{ki}} + jI_{m_{ki}} \quad (79)$$

$$\mathbf{I}_{kt} = \frac{\mathbf{V}_k - \mathbf{V}_t}{\bar{\mathbf{Z}}_{kt}} = I_{r_{kt}} + jI_{m_{kt}} \quad (80)$$

Supondo que as impedâncias entre as barras  $k$  e  $i$ , aqui representadas por  $\bar{\mathbf{Z}}_{ki}$  e  $\bar{\mathbf{Z}}_{kt}$ , entre as barras  $k$  e  $t$  possam ser respectivamente representadas por  $\bar{\mathbf{Z}}_{ki} = r_{ki} + jx_{ki}$  e  $\bar{\mathbf{Z}}_{kt} = r_{kt} + jx_{kt}$  e substituindo (54), (57) e (58) em (79) e (80) obtêm-se (81) e (82).

$$\mathbf{I}_{ki_r} = \frac{r_{ki}(V_k \cos \theta_k - V_i \cos \theta_i) + x_{ki}(V_k \sin \theta_k - V_i \sin \theta_i)}{|\bar{\mathbf{Z}}_{ki}|^2} \quad (81)$$

$$\mathbf{I}_{ki_m} = \frac{r_{ki}(V_k \sin \theta_k - V_i \sin \theta_i) - x_{ki}(V_k \cos \theta_k - V_i \cos \theta_i)}{|\bar{\mathbf{Z}}_{ki}|^2} \quad (82)$$

Analogamente, tem-se as expressões (83) e (84).

$$\mathbf{I}_{kt_r} = \frac{r_{kt}(V_k \cos \theta_k - V_t \cos \theta_t) + x_{kt}(V_k \sin \theta_k - V_t \sin \theta_t)}{|\bar{\mathbf{Z}}_{kt}|^2} \quad (83)$$

$$\mathbf{I}_{kt_m} = \frac{r_{kt}(V_k \sin \theta_k - V_t \sin \theta_t) - x_{kt}(V_k \cos \theta_k - V_t \cos \theta_t)}{|\bar{\mathbf{Z}}_{kt}|^2} \quad (84)$$

As expressões (81), (82) e (83), (84) representam as correntes que circulam pelas linhas de transmissão entre a barra  $k$  e  $i$  ( $\mathbf{I}_{ki_r}$  e  $\mathbf{I}_{ki_m}$ ) e a barra  $k$  e  $t$  ( $\mathbf{I}_{kt_r}$  e  $\mathbf{I}_{kt_m}$ ) respectivamente, em função de suas componentes de eixo real e eixo imaginário.

### 3.3.3 Corrente drenada pelas cargas

A potência complexa  $S_{kl}$  consumida pela carga  $l$  (ver Figura 14), pode ser calculada utilizando-se a equação (85), sendo  $P_{lk}$  e  $Q_{lk}$ , respectivamente, potências ativa e reativa consumidas pela carga  $l$  conectada à barra  $k$ .

$$S_{kl} = \mathbf{V}_k \mathbf{I}_{lk}^* \quad (85)$$

Como  $\dot{S}_{kl} = P_{lk} + jQ_{lk}$  e substituindo (54) em (85) tem-se (86).

$$\mathbf{I}_{lk} = \frac{P_{lk} \cos \theta_k + Q_{lk} \sin \theta_k}{V_k} - j \frac{Q_{lk} \cos \theta_k - P_{lk} \sin \theta_k}{V_k} \quad (86)$$

A equação (86) pode ser rearranjada de tal forma a obter as expressões (87) e (88). Estas representam as correntes drenadas pelas eventuais cargas conectadas à barra  $k$ , em função de suas componentes de eixo real ( $I_{lk_r}$ ) e eixo imaginário ( $I_{lk_m}$ ), respectivamente.

$$I_{lk_r} = \frac{P_{lk} \cos \theta_k + Q_{lk} \sin \theta_k}{V_k} \quad (87)$$

$$I_{lk_m} = - \left( \frac{Q_{lk} \cos \theta_k - P_{lk} \sin \theta_k}{V_k} \right) \quad (88)$$

## 3.4 COEFICIENTES DO MODELO SE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

A corrente fornecida pelo gerador síncrono em função das componentes de eixo real e eixo imaginário são dadas pelas equações (77) e (78), respectivamente. Substituindo as expressões obtidas para  $V_{d_k}$  e  $V_{q_k}$  descrita em (65) em (77) e (78), são encontradas as equações (89) e (90).

$$I_{G_{r_k}} = \frac{1}{x'_{d_k}} \sin \delta_k E'_{q_k} - \frac{1}{x'_{d_k}} \sin \delta_k V_k \sin(\delta_k - \theta_k) + \frac{1}{x_{q_k}} \cos \delta_k V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (89)$$

$$I_{G_{m_k}} = -\frac{1}{x'_{d_k}} \cos \delta_k E'_{q_k} + \frac{1}{x'_{d_k}} \cos \delta_k V_k \cos(\delta_k - \theta_k) + \frac{1}{x_{q_k}} \sin \delta_k V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (90)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, as equações (89) e (90) podem ser linearizadas e os resultados são apresentados nas expressões (91) e (92).

$$\Delta I_{G_{r_k}} = R1_{G_k} \Delta E'_{q_k} + R2_{G_k} \Delta \delta_k + R3_{G_k} \Delta V_k + R4_{G_k} \Delta \theta_k \quad (91a)$$

$$\begin{aligned} R1_{G_k} &= \frac{\partial I_{G_{r_k}}}{\partial E'_{q_k}} \\ &= \frac{1}{x'_{d_k}} \sin \delta_k \end{aligned} \quad (91b)$$

$$R2_{G_k} = \frac{\partial I_{G_{r_k}}}{\partial \delta_k}$$

$$= \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \cos \delta_k + \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \cos(2\delta_k - \theta_k) \quad (91c)$$

$$R3_{G_k} = \frac{\partial I_{G_{rk}}}{\partial V_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} \sin \delta_k \cos(\delta_k - \theta_k) + \frac{1}{x_{qk}} \cos \delta_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (91d)$$

$$R4_{G_k} = \frac{\partial I_{G_{rk}}}{\partial \theta_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} V_k \sin \delta_k \sin(\delta_k - \theta_k) - \frac{1}{x_{qk}} V_k \cos \delta_k \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (91e)$$

$$\Delta I_{G_{mk}} = M1_{G_k} \Delta E'_{qk} + M2_{G_k} \Delta \delta_k + M3_{G_k} \Delta V_k + M4_{G_k} \Delta \theta_k \quad (92a)$$

$$M1_{G_k} = \frac{\partial I_{G_{mk}}}{\partial E'_{qk}} = -\frac{1}{x'_{dk}} \cos \delta_k \quad (92b)$$

$$M2_{G_k} = \frac{\partial I_{G_{mk}}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \sin \delta_k + \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \sin(2\delta_k - \theta_k) \quad (92c)$$

$$M3_{G_k} = \frac{\partial I_{G_{mk}}}{\partial V_k} = \frac{1}{x'_{dk}} \cos \delta_k \cos(\delta_k - \theta_k) + \frac{1}{x_{qk}} \sin \delta_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (92d)$$

$$M4_{G_k} = \frac{\partial I_{G_{mk}}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{x'_{dk}} V_k \cos \delta_k \sin(\delta_k - \theta_k) - \frac{1}{x_{qk}} V_k \sin \delta_k \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (92e)$$

Os coeficientes  $R1_{G_k}$ ,  $R2_{G_k}$ ,  $R3_{G_k}$  e  $R4_{G_k}$  são chamados de “Coeficientes de Sensibilidade da Componente Real da Corrente Terminal do Gerador Síncrono”. Analogamente, os termos  $M1_{G_k}$ ,  $M2_{G_k}$ ,  $M3_{G_k}$  e  $M4_{G_k}$  são os “Coeficientes de Sensibilidade da Componente Imaginária da Corrente Terminal do Gerador Síncrono” (PÁDUA JÚNIOR, 2014; TAKAHASHI, 2013).

De maneira análoga, a linearização das equações (81) e (82) fornecem as expressões (93) e (94), entre duas barras quaisquer do sistema aqui representadas por  $k$  e  $i$ .

$$\Delta I_{ki,r} = R1_{ki} \Delta V_k + R2_{ki} \Delta \theta_k + R3_{ki} \Delta V_i + R4_{ki} \Delta \theta_i \quad (93a)$$



$$\begin{aligned}
R1_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial V_k} \\
&= \frac{1}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \cos \theta_k + x_{ki} \sin \theta_k)
\end{aligned} \tag{93b}$$

$$\begin{aligned}
R2_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial \theta_k} \\
&= -\frac{V_k}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \sin \theta_k - x_{ki} \cos \theta_k)
\end{aligned} \tag{93c}$$

$$\begin{aligned}
R3_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial V_i} \\
&= -\frac{1}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \cos \theta_k + x_{ki} \sin \theta_k)
\end{aligned} \tag{93d}$$

$$\begin{aligned}
R4_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial \theta_i} \\
&= \frac{V_i}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \sin \theta_k - x_{ki} \cos \theta_k)
\end{aligned} \tag{93e}$$

$$\Delta I_{ki_m} = M1_{ki} \Delta V_k + M2_{ki} \Delta \theta_k + M3_{ki} \Delta V_i + M4_{ki} \Delta \theta_i \tag{94a}$$

$$\begin{aligned}
M1_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial V_k} \\
&= \frac{1}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \sin \theta_k - x_{ki} \cos \theta_k)
\end{aligned} \tag{94b}$$

$$\begin{aligned}
M2_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial \theta_k} \\
&= \frac{V_k}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \cos \theta_k + x_{ki} \sin \theta_k)
\end{aligned} \tag{94c}$$

$$\begin{aligned}
M3_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial V_i} \\
&= -\frac{1}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \sin \theta_k - x_{ki} \cos \theta_k)
\end{aligned} \tag{94d}$$

$$\begin{aligned}
M4_{ki} &= \frac{\partial I_{ki_r}}{\partial \theta_i} \\
&= -\frac{V_i}{|\bar{Z}_{ki}|^2} (r_{ki} \cos \theta_k + x_{ki} \sin \theta_k)
\end{aligned} \tag{94e}$$

Os coeficientes  $R1_{ki}$ ,  $R2_{ki}$ ,  $R3_{ki}$  e  $R4_{ki}$  são denominados “Coeficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Real”, enquanto que  $M1_{ki}$ ,  $M2_{ki}$ ,  $M3_{ki}$  e  $M4_{ki}$  são chamados de “Coeficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária” do fasor corrente que circula pela linha de transmissão que conecta as barras  $k$  e  $i$  (PÁDUA JÚNIOR, 2014;

TAKAHASHI, 2013).

Por fim, a linearização das equações (87) e (88), que representam as expressões da corrente drenada pelas eventuais cargas conectadas a uma barra nas componentes de eixo real e imaginário, fornecem as expressões (95) e (96).

$$\Delta I_{l_rk} = R1_{l_k} \Delta V_k + R2_{l_k} \Delta \theta_k + R3_{l_k} \Delta P_{lk} + R4_{l_k} \Delta Q_{lk} \quad (95a)$$

$$\begin{aligned} R1_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_rk}}{\partial V_k} \\ &= - \left( \frac{P_{lk} \cos \theta_k + Q_{lk} \sin \theta_k}{V_k^2} \right) \end{aligned} \quad (95b)$$

$$\begin{aligned} R2_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_rk}}{\partial \theta_k} \\ &= - \left( \frac{P_{lk} \sin \theta_k - Q_{lk} \cos \theta_k}{V_k} \right) \end{aligned} \quad (95c)$$

$$\begin{aligned} R3_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_rk}}{\partial P_{lk}} \\ &= \frac{\cos \theta_k}{V_k} \end{aligned} \quad (95d)$$

$$\begin{aligned} R4_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_rk}}{\partial Q_{lk}} \\ &= \frac{\sin \theta_k}{V_k} \end{aligned} \quad (95e)$$

$$\Delta I_{l_mk} = M1_{l_k} \Delta V_k + M2_{l_k} \Delta \theta_k + M3_{l_k} \Delta P_{lk} + M4_{l_k} \Delta Q_{lk} \quad (96a)$$

$$\begin{aligned} M1_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_mk}}{\partial V_k} \\ &= - \left( \frac{P_{lk} \sin \theta_k - Q_{lk} \cos \theta_k}{V_k^2} \right) \end{aligned} \quad (96b)$$

$$\begin{aligned} M2_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_mk}}{\partial \theta_k} \\ &= \frac{P_{lk} \cos \theta_k + Q_{lk} \sin \theta_k}{V_k} \end{aligned} \quad (96c)$$

$$\begin{aligned} M3_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_mk}}{\partial P_{lk}} \\ &= \frac{\sin \theta_k}{V_k} \end{aligned} \quad (96d)$$

$$\begin{aligned}
M4_{l_k} &= \frac{\partial I_{l_k}}{\partial Q_{lk}} \\
&= -\frac{\cos \theta_k}{V_k}
\end{aligned} \tag{96e}$$

Os coeficientes  $R1_{l_k}$ ,  $R2_{l_k}$ ,  $R3_{l_k}$  e  $R4_{l_k}$  são chamados de “Coeficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Real”, enquanto que os termos  $M1_{l_k}$ ,  $M2_{l_k}$ ,  $M3_{l_k}$  e  $M4_{l_k}$  são chamados de “Coeficientes de Sensibilidade de Corrente da Componente Imaginária” do fasor corrente drenado pela carga  $l$  conectada a barra  $k$  (PÁDUA JÚNIOR, 2014; TAKAHASHI, 2013).

### 3.5 BALANÇO NODAL DE CORRENTE NO SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

O MSC tem como princípio fundamental o balanço nodal de correntes em cada barra do SEP. As equações (97) e (98) expressam matematicamente este balanço.

$$\Delta I_{G_{r_k}} - \Delta I_{l_{r_k}} - \sum_{j \in \Omega_k} \Delta I_{kj_r} = 0 \tag{97}$$

$$\Delta I_{G_{m_k}} - \Delta I_{l_{m_k}} - \sum_{j \in \Omega_k} \Delta I_{kj_m} = 0 \tag{98}$$

Substituindo-se as equações (91), (93) e (95) em (97) são obtidos o balanço nodal de correntes de componente real (equação (99)).

$$\begin{aligned}
&R2_{G_k} \Delta \delta_k + R1_{G_k} \Delta E'_{q_k} + (R4_{G_k} - R1_{l_k} - \sum_{j \in \Omega_k} R2_{kj}) \Delta \theta_k - R4_{kj} \sum_{j \in \Omega_k} \Delta \theta_j + (R3_{G_k} - R2_{l_k} \\
&- \sum_{j \in \Omega_k} R1_{kj}) \Delta V_k - \sum_{j \in \Omega_k} R3_{kj} \Delta V_j - R3_{l_k} \Delta P_{lk} - R4_{l_k} \Delta Q_{lk} = 0
\end{aligned} \tag{99}$$

Por simplicidade são definidos os coeficientes  $A_{m_k}$  e  $B_{m_k}$ , como pode ser observado nas equações (100) e assim obter (101).

$$A_{r_k} = R4_{G_k} - R1_{l_k} - \sum_{j \in \Omega_k} R2_{kj} \tag{100a}$$

$$B_{r_k} = R3_{G_k} - R2_{l_k} - \sum_{j \in \Omega_k} \Gamma 1_{kj} \tag{100b}$$

$$\begin{aligned}
&R2_{G_k} \Delta \delta_k + R1_{G_k} \Delta E'_{q_k} + A_{r_k} \Delta \theta_k - R4_{kj} \sum_{j \in \Omega_k} \Delta \theta_j + B_{r_k} \Delta V_k - \sum_{j \in \Omega_k} R3_{kj} \Delta V_j - R3_{l_k} \Delta P_{lk} - R4_{l_k} \Delta Q_{lk} \\
&= 0
\end{aligned} \tag{101}$$

Substituindo as expressões (92), (94) e (96) em (98) obtêm-se o balanço nodal de correntes de componente imaginário conforme equação (102).

$$\begin{aligned}
& M2_{G_k} \Delta \delta_k + M1_{G_k} \Delta E'_{qk} + (M4_{G_k} - M1_{l_k} - \sum_{j \in \Omega_k} M2_{kj}) \Delta \theta_k - M4_{kj} \sum_{j \in \Omega_k} \Delta \theta_j + (M3_{G_k} - M2_{l_k} \\
& - \sum_{j \in \Omega_k} M1_{kj}) \Delta V_k - \sum_{j \in \Omega_k} M3_{kj} \Delta V_j - M3_{l_k} \Delta P_{lk} - M4_{l_k} \Delta Q_{lk} = 0
\end{aligned} \quad (102)$$

Para facilidade de notação também são definidos os coeficientes  $A_{m_k}$  e  $B_{m_k}$ , como pode ser observado nas equações (103) de onde vem (104).

$$A_{m_k} = M4_{G_k} - M1_{l_k} - \sum_{j \in \Omega_k} M2_{kj} \quad (103a)$$

$$B_{m_k} = M3_{G_k} - M2_{l_k} - \sum_{j \in \Omega_k} M1_{kj} \quad (103b)$$

$$\begin{aligned}
& M2_{G_k} \Delta \delta_k + M1_{G_k} \Delta E'_{qk} + A_{m_k} \Delta \theta_k - M4_{kj} \sum_{j \in \Omega_k} \Delta \theta_j + B_{m_k} \Delta V_k - \sum_{j \in \Omega_k} M3_{kj} \Delta V_j - M3_{l_k} \Delta P_{lk} \\
& - M4_{l_k} \Delta Q_{lk} = 0
\end{aligned} \quad (104)$$

As equações (101) e (104) são expressões algébricas e representam, em sua forma incremental, o balanço nodal de correntes em cada barra do sistema multimáquinas.

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

Para finalizar a representação do SEP pelo MSC se faz necessário inserir as equações diferenciais que regem a dinâmica das variáveis das máquinas síncronas. Estas equações são apresentadas a seguir.

#### 3.6.1 Equações eletromecânicas da máquina síncrona

Segundo Anderson e Fouad (1993), Kundur (1994), deMello e Concordia (1969), a equação (105) representa a relação entre as grandezas mecânicas em função das grandezas elétricas, que é chamada equação de balanço (ou equação "swing") da máquina síncrona.

$$M_k \frac{\partial \delta_k^2}{\partial t^2} = P_{M_k} - P_{G_k} - D_k \frac{\partial \delta_k}{\partial t} \quad (105)$$

Em (105)  $M_k$  ( $M_k = 2H_k$ ) e representa a constante de inércia da máquina síncrona,  $P_{M_k}$  é potência mecânica de entrada,  $P_{G_k}$  é a potência ativa gerada pelo gerador síncrono e  $D_k$  coeficiente de torque de amortecimento do laço eletromecânico (DE MELLO; CONCORDIA, 1969).

A equação (105) pode ser decomposta em duas outras equações diferenciais de grau um

conforme conjunto de equações (106).

$$\Delta\dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k}(\Delta P_{M_k} - \Delta P_{G_k} - D_k \Delta\omega_k) \quad (106a)$$

$$\Delta\dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta\omega_k \quad (106b)$$

Em (106) a variação da potência gerada da máquina síncrona,  $\Delta P_{G_k}$ , pode ser linearizada conforme (107) e os seus respectivos coeficientes são mostrados em (108).

$$\Delta P_{G_k} = K1_k \Delta\delta_k + K2_k \Delta E'_{qk} + K3_k \Delta V_k + K4_k \Delta\theta_k \quad (107)$$

$$\begin{aligned} K1_k &= \frac{\partial P_{G_k}}{\partial \delta_k} \\ &= \frac{V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \cdot E'_{qk}}{x'_{dk}} + V_k^2 \cos(2(\delta_k - \theta_k)) \left( -\frac{1}{x'_{dk}} + \frac{1}{x_{qk}} \right) \end{aligned} \quad (108a)$$

$$\begin{aligned} K2_k &= \frac{\partial P_{G_k}}{\partial E'_{qk}} \\ &= \frac{V_k}{x'_{dk}} \sin(\delta_k - \theta_k) \end{aligned} \quad (108b)$$

$$\begin{aligned} K3_k &= \frac{\partial P_{G_k}}{\partial V_k} \\ &= \frac{\sin(\delta_k - \theta_k) \cdot E'_{qk}}{x'_{dk}} + V_k \sin(2(\delta_k - \theta_k)) \left( -\frac{1}{x'_{dk}} + \frac{1}{x_{qk}} \right) \end{aligned} \quad (108c)$$

$$\begin{aligned} K4_k &= \frac{\partial P_{G_k}}{\partial \theta_k} \\ &= -\frac{V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \cdot E'_{qk}}{x'_{dk}} - V_k^2 \cos(2(\delta_k - \theta_k)) \left( -\frac{1}{x'_{dk}} + \frac{1}{x_{qk}} \right) \end{aligned} \quad (108d)$$

Substituindo os coeficientes calculados em (108) na equação (106a) tem-se (109).

$$\Delta\dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k}(\Delta P_{M_k} - K1_k \Delta\delta_k - K2_k \Delta E'_{qk} - K3_k \Delta V_k - K4_k \Delta\theta_k - D_k \Delta\omega_k) \quad (109)$$

A equação (109) representa a interação dinâmica entre as variáveis elétricas e mecânicas da máquina síncrona e os coeficientes  $K1_k$ ,  $K2_k$ ,  $K3_k$  e  $K4_k$  estão associados à potência do gerador  $G_k$  em que  $K1_k = -K4_k$ .

### 3.6.2 Tensão interna da máquina síncrona

As variações internas da tensão da máquina síncrona são expressas pela equação (110) (ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994).

$$T'_{d0_k} E'_{q_k} = E_{f_{d_k}} - E'_{q_k} - (x_{d_k} - x'_{d_k}) \mathbf{I}_{G_{d_k}} \quad (110)$$

Na equação (110)  $T'_{d0_k}$  é a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto,  $E_{f_{d_k}}$  representa a tensão aplicada ao circuito de campo do gerador síncrono e  $x_{d_k}$  é a reatância síncrona de eixo direto do gerador  $k$ .

Por meio da equação (72) é possível encontrar (111). Substituindo a expressão (111) em (110), obtêm-se a equação (112).

$$\mathbf{I}_{G_{d_k}} = \frac{E'_{q_k} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{d_k}} \quad (111)$$

$$T'_{d0_k} E'_{q_k} = E_{f_{d_k}} - \frac{x_{d_k}}{x'_{d_k}} E'_{q_k} + V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \left( \frac{x_{d_k}}{x'_{d_k}} - 1 \right) \quad (112)$$

Ao se considerar pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio, a equação (112) pode ser linearizada e reescrita de acordo com a equação (113), em que  $K5_k$ ,  $K6_k$ ,  $K7_k$  e  $K8_k$  são os coeficientes que relacionam-se com a variação da tensão interna da máquina síncrona e, escritos no conjunto de equações (114).

$$\Delta E'_{q_k} = \frac{1}{T'_{d0_k}} \left( \Delta E_{f_{d_k}} + K5_k \Delta E'_{q_k} + K6_k \Delta \delta_k + K7_k \Delta \theta_k + K8_k \Delta V_k \right) \quad (113)$$

$$K5_k = \frac{\partial(E'_{q_k})}{\partial E'_{q_k}} = -\frac{x_{d_k}}{x'_{d_k}} \quad (114a)$$

$$K6_k = \frac{\partial(E'_{q_k})}{\partial \delta_k} = V_k \left( \frac{x'_{d_k} - x_{d_k}}{x'_{d_k}} \right) \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (114b)$$

$$K7_k = \frac{\partial(E'_{q_k})}{\partial \theta_k} = V_k \left( \frac{x_{d_k} - x'_{d_k}}{x'_{d_k}} \right) \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (114c)$$

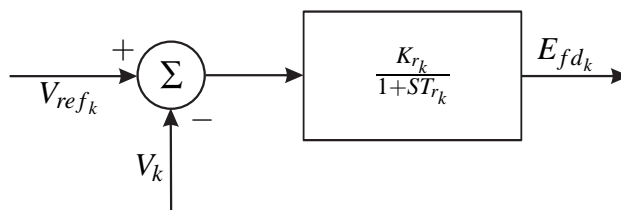
$$K8_k = \frac{\partial(E'_{q_k})}{\partial V_k} = \left( \frac{x_{d_k} - x'_{d_k}}{x'_{d_k}} \right) \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (114d)$$

A expressões obtidas em  $K8_k$  e  $K7_k$  são conhecidas na literatura como “coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono  $k$ ”.

### 3.6.3 Tensão de campo da máquina síncrona

Para considerar no modelo os efeitos do enrolamento de campo ( $fd_k$ ), considera-se o Regulador Automático de Tensão (RAT) do gerador  $k$ . O RAT tem como função regular a tensão de excitação da máquina síncrona ( $E_{fd_k}$ ), levando em consideração as variações da tensão terminal ( $V_k$ ), em comparação a uma tensão de referência já especificada ( $V_{ref_k}$ ), conforme diagrama de blocos mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Diagrama em Blocos do Regulador Automático de Tensão.



Fonte: Adaptado de Furini (2008).

O RAT que será utilizado no MSC baseia-se em um modelo de primeira ordem, representado por um ganho  $K_{r_k}$  e uma constante de tempo  $T_{r_k}$ , frequentemente utilizado em pesquisas relacionadas com a estabilidade a pequenas perturbações (DE MELLO; CONCORDIA, 1969; KUNDUR, 1994; DECKMANN; DA COSTA, 1994).

Ao analisar a Figura 15 pode-se obter a equação (115) (que representa a tensão de campo ( $E_{fd_k}$ ) no domínio da frequência). Aplicando-se a Transformada Inversa de Laplace obtém-se a equação (116) (que representa a tensão de campo ( $\dot{E}_{fd_k}$ ) no domínio do tempo).

$$E_{fd_k} = \frac{K_{r_k}}{1+sT_{r_k}}(V_{ref_k} - V_k) \quad (115)$$

$$\dot{E}_{fd_k} = -\frac{1}{T_{r_k}}E_{fd_k} + \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}}V_{ref_k} - \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}}V_k \quad (116)$$

Admitindo pequenos desvios em torno do ponto de operação, a equação (116) pode ser linearizada e, portanto, obter a expressão (117).

$$\Delta \dot{E}_{fd_k} = -\frac{1}{T_{r_k}}\Delta E_{fd_k} + \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}}\Delta V_{ref_k} - \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}}\Delta V_k \quad (117)$$

## 3.7 MSC NA FORMA DE ESPAÇO DE ESTADO

A representação geral do MSC na forma de espaço de estado é obtida por meio das equações algébricas disponíveis em (101) e (104) e as equações diferenciais obtidas em (109), (110) e (117). Admitindo-se que o sistema seja constituído de  $ng$  geradores e  $nb$  barras, os vetores de variáveis de estado ( $\Delta x$ ), de entrada ( $\Delta u$ ) e de variáveis algébricas ( $\Delta z$ ) são dados de

acordo com o conjunto de equações (118). Estas definem a representação do MSC no domínio do tempo.

$$\begin{aligned}
 [\Delta x] &= \left[ [\Delta\omega_1 \cdots \Delta\omega_{n_g}] [\Delta\delta_1 \cdots \Delta\delta_{n_g}] [\Delta E'_{q_1} \cdots \Delta E'_{q_{n_g}}] [\Delta E_{fd_1} \cdots \Delta E_{fd_{n_g}}] \right]^t \\
 [\Delta u] &= \left[ [\Delta P_{m_1} \cdots \Delta P_{m_{n_g}}] [\Delta V_{ref_1} \cdots \Delta V_{ref_{n_g}}] [\Delta P_{l_1} \cdots \Delta P_{l_{n_b}}] [\Delta Q_{l_1} \cdots \Delta Q_{l_{n_b}}] \right]^t \\
 [\Delta z] &= [[\Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_{n_b}] [\Delta V_1 \cdots \Delta V_{n_b}]]^t
 \end{aligned} \tag{118}$$

Para completa representação do MSC para sistemas multimáquinas no domínio do tempo, conforme disposto nas expressões matriciais (119) e (120), considere  $k = 1, \dots, n_g$  e  $n = 1, \dots, n_b$ .

Na equação matricial (120), as componentes da matriz  $J4$  dadas por  $J4_{11}$ ,  $J4_{12}$ ,  $J4_{21}$  e  $J4_{22}$  são compostas pelos coeficientes encontrados no balanço nodal de correntes descrito em (101) e (104), incluindo todas as barras do sistema. É fácil verificar, a partir das expressões (119) e (120), que todo equipamento com características dinâmicas, isto é, motores de indução, FACTS, ESPs, PODs, entre outros equipamentos, podem ser incluídos com certa facilidade nas equações gerais do MSC.

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_k \\ \Delta \dot{\delta}_k \\ \Delta \dot{E}'_{q_k} \\ \Delta \dot{E}_{fd_k} \end{bmatrix}}_{\Delta \dot{x}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{D_k}{M_k} & -\frac{K1_k}{M_k} & -\frac{K2_k}{M_k} & [0] \\ \omega_{0_k} & [0] & [0] & [0] \\ [0] & K\phi_k & \frac{K5_k}{T'_{d0_k}} & \frac{1}{T'_{d0_k}} \\ [0] & [0] & [0] & -\frac{1}{T_{r_k}} \end{bmatrix}}_{J1} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_{q_k} \\ \Delta E_{fd_k} \end{bmatrix}}_{\Delta x} \\
 + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{k4_k}{M_k} & [0] & -\frac{k3_k}{M_k} & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ \frac{k8_k}{M_k} & [0] & \frac{k7_k}{M_k} & [0] \\ [0] & [0] & -\frac{k4_k}{T_{r_k}} & [0] \end{bmatrix}}_{J2} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \end{bmatrix}}_{\Delta z} &+ \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{M_k} & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} & [0] & [0] \end{bmatrix}}_{B1} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P_{m_k} \\ \Delta V_{ref_k} \\ \Delta P_{l_n} \\ \Delta Q_{l_n} \end{bmatrix}}_{\Delta u} \\
 \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} [0] & R2_{G_k} & R1_{G_k} & [0] \\ [0] & M2_{G_k} & M1_{G_k} & [0] \end{bmatrix}}_{J3} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_{q_k} \\ \Delta E_{fd_k} \end{bmatrix}}_{\Delta x} + \underbrace{\begin{bmatrix} [J4_{11}] & [J4_{12}] \\ [J4_{13}] & [J4_{22}] \end{bmatrix}}_{J4} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \end{bmatrix}}_{\Delta z}
 \end{aligned} \tag{119}$$



$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} [0] & [0] & -R3_{l_n} & -R4_{l_n} \\ [0] & [0] & -M3_{l_n} & -M4_{l_n} \end{bmatrix}}_{B2} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P_{m_k} \\ \Delta V_{ref_k} \\ \Delta P_{l_n} \\ \Delta Q_{l_n} \end{bmatrix}}_{\Delta u} \quad (120)$$

Em uma forma mais compacta, as expressões (119) e (120), podem ser representadas por meio da equação (121).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \quad (121)$$

A expressão (121) pode ser decomposta em duas outras expressões, conforme (122) e (123).

$$\Delta \dot{x} = J1\Delta x + J2\Delta z + B1\Delta u \quad (122)$$

$$J3\Delta x + J4\Delta z + B2\Delta u = 0 \quad (123)$$

A partir da equação (123) é possível obter a expressão (124).

$$\Delta z = -J4^{-1}B2\Delta u - J4^{-1}J3\Delta x \quad (124)$$

Substituindo (124) em (122), encontra-se a expressão (125) para  $\Delta \dot{x}$ .

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= J1\Delta x + J2(-J4^{-1}B2\Delta u - J4^{-1}J3\Delta x) + B1\Delta u \\ &= J1\Delta x - J2J4^{-1}B2\Delta u - J2J4^{-1}J3\Delta x + B1\Delta u \\ &= (J1 - J2J4^{-1}J3)\Delta x + (B1 - J2J4^{-1}B2)\Delta u \end{aligned} \quad (125)$$

A expressão (125) pode de forma conveniente ser escrita conforme destaca equação (126). Esta por sua vez é denominada representação no espaço de estado.

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (126)$$

A matriz  $A = (J1 - J2J4^{-1}J3)$  é comumente chamada de matriz de estado e  $B = (B1 - J2J4^{-1}B2)$  de matriz de entradas.

### 3.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foi deduzido o Modelo de Sensibilidade de Corrente. Conforme foi observado, trata-se de um modelo linear e as equações que o representam na forma de espaço de estado foram descritas em (119) e (120). Desta forma, este modelo pode ser útil em análises de estabilidade do Sistema Elétrico de Potência sujeito a pequenas perturbações.

Este modelo, conforme foi mostrado, baseia-se no fato de que os balanços nodais de correntes em cada barra do sistema elétrico de potência devem ser satisfeitos ininterruptamente em qualquer processo dinâmico. Mostrou-se que o MSC é formado por equações diferenciais (variáveis de estado  $\Delta\dot{\omega}_k$ ,  $\Delta\dot{\delta}_k$ ,  $\Delta\dot{E}'_{qk}$  e  $\Delta\dot{E}'_{fdk}$ ) e por equações algébricas (variáveis algébricas  $\Delta\theta_k$  e  $\Delta V_k$ ).

Fica claro, a partir de uma análise do Modelo de Sensibilidade de Corrente, o acesso às variáveis algébricas ( $\Delta\theta_k$  e  $\Delta V_k$ ), em todas as barras do SEP. Portanto, pode-se concluir que o MSC preserva o sistema externo de transmissão. Em outras palavras, isso implica dizer que se, por alguma eventualidade, alguma variável algébrica tenha que ser introduzida em algum controlador, o MSC permite esta inclusão, já que este preserva estas variáveis algébricas.

No próximo Capítulo, será realizada a inclusão das equações (variáveis de estado e algébricas) encontrados para o IPFC no Capítulo 2 no MSC. A completa representação e dedução dos modelos para controladores ESPs e do conjunto IPFC-POD também serão realizadas, para posterior inclusão no MSC. A partir do modelo obtido após a inclusão do IPFC, ESPs e do conjunto IPFC-POD no MSC será possível realizar os estudos referentes às oscilações eletromecânicas de baixa frequência do SEP.

## 4 INCLUSÃO DO IPFC E DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES ESP E POD NO MSC

### 4.1 INTRODUÇÃO

Os conceitos básicos no estudo das oscilações eletromecânicas foram fundamentados utilizando-se o Modelo de Heffron-Phillips (MHP) (DE MELLO; CONCORDIA, 1969). Na literatura, este modelo é bastante difundido, sendo utilizado em vários trabalhos (KUNDUR, 1994; SAUER; PAI, 1998; ANDERSON; FOUAD, 1993). Contudo, este modelo apresenta limitações e a sua dependência do barramento infinito como referência angular do sistema impõe sérias dificuldades na expansão para sistemas multimáquinas. Grande parte das limitações foram sanadas e sua expansão para sistemas considerados de médio e grande porte foi realizada (MOUSSA; YU, 1974; MAC-LEOD, 1992), sendo posteriormente (modelo expandido) utilizado em trabalhos relacionados a análise da estabilidade de sistema multimáquinas quando sujeitos a pequenas perturbações (MOTA; NASCIMENTO, 2008; ARAUJO; ZANETA, 2001; CHEN; HSU, 1987). Uma limitação que ainda persiste é a eliminação do sistema de transmissão externo, o que dificulta, por exemplo, a representação de dispositivos FACTS.

Outro modelo utilizado no estudo de oscilações eletromecânicas de baixa frequência é denominado Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) e foi proposto por Deckmann e da Costa (1994). Este modelo tem sido bastante utilizado nos estudos de oscilações eletromecânicas apresentando resultados similares aos obtidos pelo MHP (MENEZES, 2010; PUPIN, 2009; MENEZES, 2014; VALLE, 2010; VALLE, 2014; MENEZES; ARAUJO; FORTES, 2014). Neste modelo não há necessidade de manutenção do barramento infinito e a facilidade de representação de sistemas multimáquinas na forma de espaço de estado é uma das principais características do modelo.

Recentemente outro modelo que tem sido estudado e utilizado no estudo das oscilações eletromecânicas de baixa frequência é o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (TAKAHASHI, 2013; PÁDUA JÚNIOR, 2014; FORTES et al., 2015). Tal como no MSP neste modelo não há necessidade de manutenção do barramento infinito como referência angular e o sistema de transmissão também é preservado. O MSC será utilizado neste trabalho e sua representação é dada pelas equações (119) e (120).

Em relação aos dispositivos FACTS, estudos apontam que quando em sua malha de controle for acoplado um controlador suplementar conhecido como *Power Oscillation Damping* (POD) (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994), este é capaz de fornecer amortecimento aos modos oscilatórios de baixa frequência.

Neste trabalho o FACTS de interesse é o IPFC e na literatura especializada este dispositivo é foco de vários estudos (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999; ZHANG, 2003; ZHANG; YOKOYAMA; IDE, 2008; VINKOVIC; MIHALIC, 2009; VALLE, 2010; VALLE; KOPCAK; Da Costa, 2010; REZAEI et al., 2013; VALLE; ARAUJO, 2013).

Quando se trata de amortecer as oscilações eletromecânicas o IPFC produz bons resultados, desde que os parâmetros de seu controlador adicional estejam bem ajustados (ZHANG; YOKOYAMA; IDE, 2008; VINKOVIC; MIHALIC, 2009; VALLE, 2010; REZAEI et al., 2013; VALLE; ARAUJO, 2013).

Em Zhang (2003) o IPFC é modelado para posterior inclusão no fluxo de potência de Newton-Raphson. Em Valle (2010) e Valle, Kopcak e Da Costa (2010) os autores utilizam o IPFC modelado por injeção de potência e a análise da estabilidade a pequenas perturbações é realizada com o SEP representado pelo MSP.

Não é comum encontrar trabalhos que relacionam o IPFC com um modelo de injeção de corrente. Em Rezaei et al. (2013) os autores propõem um modelo de injeção de corrente para o IPFC. Neste trabalho são consideradas fontes de corrente em derivação para a dedução do modelo e o objetivo é a melhoria da estabilidade dinâmica do SEP. Em Vinkovic e Mihalic (2009) o modelo de injeção de corrente para o IPFC é baseado no método de Newton-Raphson (semelhante ao modelo proposto por Valle (2010)). Nesse artigo as correntes injetadas pelo IPFC são obtidas após a convergência do “fluxo expandido de corrente”. Também é realizada uma comparação com outros métodos baseados em fluxos expandidos.

Um das contribuições deste trabalho é o modelo de injeção de corrente para o IPFC que será utilizado. Diferentemente do proposto por Rezaei et al. (2013) e Vinkovic e Mihalic (2009), o IPFC será modelado a partir do circuito equivalente mostrado na Figura 2. As correntes injetadas pelo dispositivo serão calculadas diretamente das fontes de tensão série (considerando as respectivas reatâncias de acoplamento de cada transformador referente a cada fonte de tensão série). Além disso, o modelo de injeção de corrente proposto possui a significativa vantagem de ficar independente dos parâmetros  $r_n$  e  $\gamma_n$  (equação 1) eliminando, desta forma, a necessidade prévia de seus cálculos (este procedimento não é realizado em Rezaei et al. (2013) e em Vinkovic e Mihalic (2009)).

Outra contribuição deste trabalho é a inclusão das equações do IPFC modelados por injeção de corrente no MSC. Isto se faz necessário porque será feita a análise da estabilidade a pequenas perturbações do SEP, considerando a atuação do IPFC.

Do exposto, neste Capítulo será deduzido o modelo de injeção de corrente para o IPFC

(Seção 4.2) e em seguida estas equações serão incluídas no MSC. Além disso, conforme Seção 4.5, serão apresentados os controladores ESPs e o conjunto IPFC-POD. A inclusão desses controladores no MSC também é realizada.

#### 4.2 MODELO DE INJEÇÃO DE CORRENTE PARA O IPFC

No Capítulo 2 foram deduzidas as expressões que fornecem as injeções de potências ativa e reativa nas barras  $i$ ,  $j$  e  $k$  de instalação do IPFC (equações (26), (27), (28) e (29)). Também foram escritas expressões que determinam as correntes injetadas nas barras  $i$ ,  $j$  e  $k$  (equações (12), (17) e (18)).

Substituindo (4) e (5) (expressões que representam  $\mathbf{V}_{qn}$  e  $\mathbf{V}_{pn}$ ,  $n = j, k$ ) em (12) encontra-se (127).

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_i = & -V_i \sin \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) - \sum_{n=j,k} b_{in} (V_{pn} \cos \theta_i + V_{qn} \sin \theta_i) + b_{ij} V_j \cos \theta_j + b_{ik} V_k \sin \theta_k \\ & + j \left[ V_i \cos \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) + \sum_{n=j,k} b_{in} (V_{qn} \cos \theta_i - V_{pn} \sin \theta_i) - b_{ij} V_j \cos \theta_j - b_{ik} V_k \cos \theta_k \right] \end{aligned} \quad (127)$$

Analogamente, substituindo (4) e (5) em (17) e (18) é possível encontrar a equação (128).

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{ni} = & b_{in} (V_i \sin \theta_i - V_n \sin \theta_n) + b_{in} (V_{pn} \cos \theta_i - V_{qn} \sin \theta_i) + j [b_{in} (V_n \cos \theta_n - V_i \cos \theta_i) \\ & + b_{in} (V_{pn} \cos \theta_i - V_{qn} \cos \theta_i)] \end{aligned} \quad (128)$$

Nas equações (127) e (128)  $b_{in} = -\frac{1}{x_{in}}$  e  $n = j, k$ .

Ainda em relação às equações (127) e (128) é possível representá-las em função de suas componentes de eixo real e eixo imaginário ( $r, m$ ) conforme conjunto de equações (129).

$$I_{i_r} = -V_i \sin \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) + b_{ij} V_j \cos \theta_j + b_{ik} V_k \sin \theta_k - \underbrace{\sum_{n=j,k} b_{in} (V_{pn} \cos \theta_i + V_{qn} \sin \theta_i)}_{\text{IPFC}} \quad (129a)$$

$$I_{i_m} = V_i \cos \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) - b_{ij} V_j \cos \theta_j - b_{ik} V_k \cos \theta_k + \underbrace{\sum_{n=j,k} b_{in} (V_{qn} \cos \theta_i - V_{pn} \sin \theta_i)}_{\text{IPFC}} \quad (129b)$$

$$I_{i_r} = b_{in} (V_i \sin \theta_i - V_n \sin \theta_n) + \underbrace{b_{in} (V_{pn} \cos \theta_i + V_{qn} \sin \theta_i)}_{\text{IPFC}} \quad (129c)$$

$$I_{i_m} = b_{in} (V_n \cos \theta_n - V_i \cos \theta_i) + \underbrace{b_{in} (V_{pn} \sin \theta_i - V_{qn} \cos \theta_i)}_{\text{IPFC}} \quad (129d)$$

No conjunto de equações (129) assume-se que  $\mathbf{I}_i = I_{i_r} + jI_{i_m}$  e  $\mathbf{I}_{ni} = I_{ni_r} + jI_{ni_m}$ . A parte sublinhada com a descrição “IPFC” está relacionada com a contribuição do dispositivo na injeção de corrente na barra  $i$  (componentes de eixo real e eixo imaginário) e no fluxo de corrente entre as barras  $i - j$  e  $i - k$  (componentes de eixo real e eixo imaginário), local de instalação do IPFC.

Dessa forma, as equações que descrevem as injeções de corrente nas barras em que o IPFC encontra-se instalado são dadas por (130), (131), (132) e (133).

$$I_{inj_{ir}} = - \sum_{n=j,k} b_{in} (V_{p_n} \cos \theta_i + V_{q_n} \sin \theta_i) \quad (130)$$

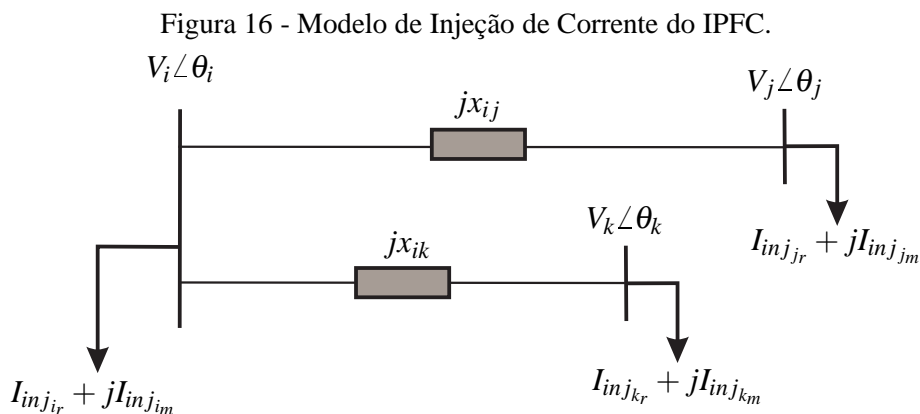
$$I_{inj_{im}} = \sum_{n=j,k} b_{in} (V_{q_n} \cos \theta_i - V_{p_n} \sin \theta_i) \quad (131)$$

$$I_{inj_{nr}} = b_{in} (V_{p_n} \cos \theta_i + V_{q_n} \sin \theta_i) \quad (132)$$

$$I_{inj_{nm}} = b_{in} (V_{p_n} \sin \theta_i - V_{q_n} \cos \theta_i) \quad (133)$$

Nas equações (130), (131), (132) e (133) denomina-se  $I_{inj_{ir}}$  e  $I_{inj_{im}}$ , respectivamente, a injeção de corrente na barra  $i$  nas componentes de eixo real e eixo imaginário e  $I_{inj_{nr}}$  e  $I_{inj_{nm}}$  como a corrente injetada na barra  $n$  ( $n = j, k$ ) nas componentes de eixo real e eixo imaginário.

Definidas as injeções de correntes nas barras em que o IPFC está instalado, o modelo de injeção de corrente é mostrado na Figura 16.



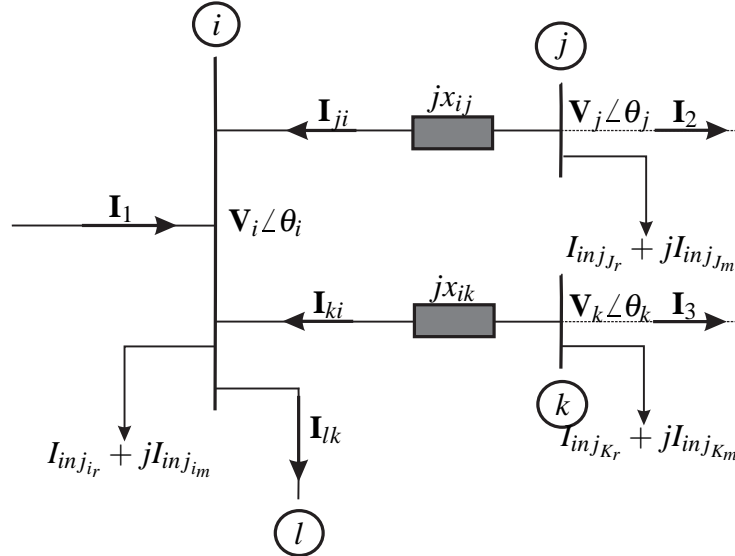
Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.3 BALANÇO NODAL DE CORRENTES CONSIDERANDO A ATUAÇÃO DO IPFC

Para o balanço nodal de correntes nas barras comuns à instalação do IPFC (barras  $i$ ,  $j$  e  $k$ ) considere a Figura 17. Nesta Figura  $\mathbf{I}_1$ ,  $\mathbf{I}_2$  e  $\mathbf{I}_3$  são correntes que estão entrando e saindo, respectivamente, das barras  $i$ ,  $j$  e  $k$ . A corrente drenada por uma eventual carga conectada à

barra  $i$  é  $I_{lk}$ . As correntes que estão relacionadas com as injeções de corrente nas barras  $i$ ,  $j$  e  $k$  são  $I_{inj_i}$ ,  $I_{inj_j}$  e  $I_{inj_k}$ .

Figura 17 - Diagrama Unifilar - Balanço Nodal de Correntes.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O balanço nodal de correntes (nas componentes de eixo real e eixo imaginário) nas barras de instalação do IPFC, é realizado analisando a Figura 17 e é dado pelas equações (134), (135) e (136).

$$\overbrace{I_{1r} - I_{inj_{ir}} - I_{lk_r} + I_{ji_r} + I_{ki_r}}^{\text{Barra } i \text{ (Eixo Real)}} = 0 \quad (134a)$$

$$\overbrace{I_{1m} - I_{inj_{im}} - I_{lk_m} + I_{ji_m} + I_{ki_m}}^{\text{Barra } i \text{ (Eixo Imaginário)}} = 0 \quad (134b)$$

$$\overbrace{I_{ji_r} + I_{inj_{jr}} + I_{2r}}^{\text{Barra } j \text{ (Eixo Real)}} = 0 \quad (135a)$$

$$\overbrace{I_{ji_m} + I_{inj_{jm}} + I_{2m}}^{\text{Barra } j \text{ (Eixo Imaginário)}} = 0 \quad (135b)$$

$$\overbrace{I_{ki_r} + I_{inj_{kr}} + I_{3r}}^{\text{Barra } k \text{ (Eixo Real)}} = 0 \quad (136a)$$

$$\overbrace{I_{ki_m} + I_{inj_{km}} + I_{3m}}^{\text{Barra } k \text{ (Eixo Imaginário)}} = 0 \quad (136b)$$

A equação (134) está relacionada com o balanço nodal de correntes na barra  $i$ , (135) com o balanço nodal de corrente da barra  $j$  e (136) com o balanço nodal de correntes na barra  $k$ , nas componentes de eixo real e eixo imaginário. Estas equações são as expressões algébricas do balanço nodal de correntes nas barras de instalação do IPFC.

## 4.4 INCLUSÃO DO IPFC NO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

Para a inclusão do modelo do IPFC (equações diferenciais (42) a (47) e equações algébricas (134), (135) e (136)) no MSC as equações (119) e (120) são modificadas assumindo a forma dada em (137) e (138). Nesta representação foi considerado o SEP formado por  $ng$  geradores e  $nb$  barras ( $k = 1, \dots, ng$  e  $n = 1, \dots, nb$ ). O vetor de variáveis de estado é ( $\Delta x_{ipfc}$ ), o de variáveis de entrada é ( $\Delta u_{ipfc}$ ) e o de variáveis algébricas é ( $\Delta z_{ipfc}$ ).

As equações (137) e (138) e as equações (119) e (120) apresentam diferenças substanciais. Primeiro, pode-se observar que a matriz  $J1_{ipfc}$  contém 6 linhas e 6 colunas a mais que a matriz  $J1$ , considerando, é claro, a atuação de um IPFC instalado nas linhas entre as barras  $i - j$  e  $i - k$ . Essas variáveis de estado são exclusivas do equacionamento obtido para os controladores PI (equações (48) a (50)). Analogamente, a matriz  $J3_{ipfc}$  terá a mesma dimensão de  $J1_{ipfc}$ .

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_k \\ \Delta \dot{\delta}_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 \end{bmatrix}}_{\Delta \dot{x}_{ipfc}} &= \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] & \left[ \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{pj}} \right] & \left[ \frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1} \right] & \left[ \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{qj}} \right] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{\partial X_1}{\partial V_{pj}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial X_1}{\partial V_{qj}} \right] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{pj}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{qj}} \right] & \left[ \frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2} \right] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{\partial X_2}{\partial V_{pj}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial X_2}{\partial V_{qj}} \right] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}} \right] & \left[ \frac{\partial V_{pk}}{\partial X_3} \right] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{\partial X_3}{\partial V_{pk}} \right] & [0] \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_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 \end{bmatrix}}_{\Delta x_{ipfc}} \\
 & \quad \underbrace{J1_{ipfc}} \\
 & + \underbrace{\begin{bmatrix} & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ [0] & \left[ \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_i} \right] & \left[ \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_j} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_i} \right] & \left[ \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_j} \right] & [0] & [0] \\ [0] & \left[ \frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} \right] & \left[ \frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial X_1}{\partial V_i} \right] & \left[ \frac{\partial X_1}{\partial V_j} \right] & [0] & [0] \\ [0] & \left[ \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i} \right] & \left[ \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_i} \right] & \left[ \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_j} \right] & [0] & [0] \\ [0] & \left[ \frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} \right] & \left[ \frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial X_2}{\partial V_i} \right] & \left[ \frac{\partial X_2}{\partial V_j} \right] & [0] & [0] \\ [0] & \left[ \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} \right] & \left[ \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_i} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_k} \right] & \left[ \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}} \right] \\ [0] & \left[ \frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} \right] & \left[ \frac{\partial X_3}{\partial V_i} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial X_3}{\partial V_k} \right] & \left[ \frac{\partial X_3}{\partial V_{pk}} \right] \end{bmatrix}}_{J2_{ipfc}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \\ \Delta V_{qk} \end{bmatrix}}_{\Delta z_{ipfc}}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& + \left[ \begin{array}{c|cccc} [B1] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ \hline [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \Delta P_{m_k} \\ \Delta V_{ref_k} \\ \Delta P_{l_n} \\ \Delta Q_{l_n} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_k} \\ \Delta P_{ref_k} \end{array} \right] \quad (137) \\
& \underbrace{\hspace{10em}}_{B1_{ipfc}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\Delta u_{ipfc}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[ \begin{array}{c} [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c|cccc} [J3] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{q_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_k}} \right] & [0] \\ \hline \left[ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{q_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_k}} \right] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{p_k}} \right] & [0] & [0] \\ \left[ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{q_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_k}} \right] & [0] & [0] \\ \left[ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{q_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_k}} \right] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \left[ \frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{p_k}} \right] & [0] & [0] \\ \left[ \frac{\partial PE}{\partial V_{p_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial PE}{\partial V_{q_j}} \right] & [0] & \left[ \frac{\partial PE}{\partial V_{p_k}} \right] & [0] & [0] \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_{qk} \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_{p_j} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{q_j} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{p_k} \\ \Delta X_3 \end{array} \right] \\
& \underbrace{\hspace{10em}}_{J3_{ipfc}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\Delta x_{ipfc}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \underbrace{\left[ \begin{array}{cc} [J4_{11_{ipfc}}] & [J4_{12_{ipfc}}] \\ [J4_{13_{ipfc}}] & [J4_{22_{ipfc}}] \end{array} \right]}_{J4_{ipfc}} \underbrace{\left[ \begin{array}{c} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \\ \Delta V_{q_k} \end{array} \right]}_{\Delta z_{ipfc}} + \left[ \begin{array}{c|cccc} [B2] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ \hline [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \Delta P_{m_k} \\ \Delta V_{ref_k} \\ \Delta P_{l_n} \\ \Delta Q_{l_n} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_k} \\ \Delta P_{ref_k} \end{array} \right] \\
& \underbrace{\hspace{10em}}_{B2_{ipfc}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\Delta u_{ipfc}} \quad (138)
\end{aligned}$$

Em relação à matriz  $J2_{ipfc}$  e  $J4_{ipfc}$  estas contêm uma linha e uma coluna a mais que a matriz  $J2$  e  $J4$  respectivamente, devido a inclusão da variável algébrica definida como  $V_{qk}$ . As componentes da matriz  $J4$  dadas por  $J4_{11_{ipfc}}$ ,  $J4_{12_{ipfc}}$ ,  $J4_{21_{ipfc}}$  e  $J4_{22_{ipfc}}$  são compostas pelos coeficientes encontrados no balanço nodal de correntes descrito no conjunto de equações (134) a (136).

As matrizes  $B1_{ipfc}$  e  $B2_{ipfc}$  diferem de  $B1$  e  $B2$  devido aos valores especificados para o controle do fluxo de potência ativa e reativa ( $P_{ref_j}$ ,  $P_{ref_j}$ ,  $Q_{ref_j}$ ,  $Q_{ref_j}$ ,  $P_{ref_k}$  e  $P_{ref_k}$ ) no ramo  $i - j$  e  $i - k$ .

#### 4.5 CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO

Nesta seção apresentam-se os modelos dos controladores ESPs e POD que serão utilizados neste trabalho. Basicamente estes dois controladores possuem estruturas idênticas, diferindo no modo de operação e entre os sinais de entrada e de saída de cada um deles.

Dentre os diversos sinais de entrada disponíveis (DE MELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981), neste trabalho os ESPs utilizarão as variações da velocidade angular do rotor ( $\Delta\omega$ ). Estes controladores atuam nas malhas de controle dos RATs dos geradores síncronos, inserindo sinais estabilizantes ( $\Delta V_s$ ) com o objetivo de introduzir amortecimento adicional aos modos locais de oscilação do SEP.

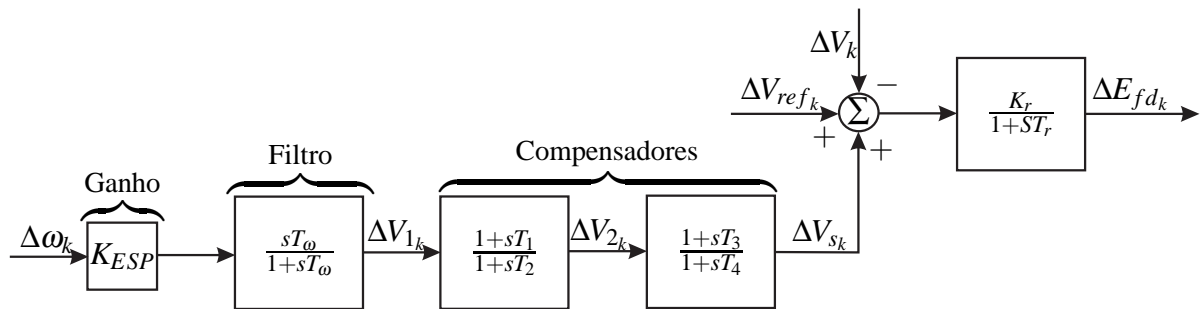
O POD é acoplado à malha de controle dos dispositivos FACTS (neste caso, o IPFC) e, neste trabalho, utilizará como sinal de entrada a variação da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) da linha de transmissão adjacente à sua instalação. Diferente do que ocorre com os ESPs, o conjunto IPFC-POD será responsável por inserir amortecimento às oscilações de modo interárea por meio de um sinal suplementar ( $\Delta V_{sup}$ ). A função deste sinal é modular a componente em quadratura ( $V_{p_j}$ ) do conversor primário do IPFC (VALLE, 2010; VALLE, 2014).

##### 4.5.1 Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP)

Atualmente a maioria dos SEPs operam de forma interligada, utilizando longas linhas de transmissão. Estas características de operação se justificam tanto por motivos econômicos quanto por motivos de segurança. Contudo, podem favorecer o aparecimento de oscilações eletromecânicas da baixa frequência e, portanto, ser prejudicial do ponto de vista da estabilidade (ROGERS, 2000). Tal problema é agravado ainda mais quando se considera a atuação dos RATs com ganhos elevados e constantes de tempo relativamente pequenas (ACHA et al., 2002; DE MELLO; CONCORDIA, 1969).

Para melhorar o desempenho dinâmico do SEP novos controladores foram acoplados à malha de controle dos RATs para inserir um sinal estabilizante na malha de regulação dos geradores. Esses controladores são conhecidos na literatura como Estabilizadores do Sistema de Potência (ESPs) (no inglês, *Power System Stabilizers - PSS*). Quando seus parâmetros são bem ajustados, são capazes de inserir amortecimento aos modos locais de oscilação (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 1993). O diagrama de blocos mostrado na Figura 18 representa a estrutura básica deste controlador.

Figura 18 - Modelo Dinâmico para o ESP.

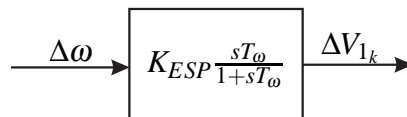


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Um ESP é composto por um ganho  $K_{ESP}$ , um bloco *washout* (filtro), determinado pela constante de tempo  $T_\omega$  e um conjunto de blocos de avanço-atraso de fase, denominado compensadores de fase, representado pelas constantes de tempo  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ . É usual adotar  $T_1 = T_3$  e  $T_2 = T_4$  (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 1993; DE MELLO; CONCORDIA, 1969).

Para a obtenção das equações diferenciais que representam os controladores ESPs, será considerada separadamente cada parte da Figura 18. Inicialmente considere a Figura 19 onde são mostrados o ganho  $K_{ESP}$ , o bloco *washout* e sua respectiva saída  $\Delta V_{1k}$ .

Figura 19 - Modelo Dinâmico para o ESP: Bloco *Washout*.



Fonte: Elaborado Pelo Autor.

Analisando a Figura 19 e utilizando a equação obtida em (109) (que representa a interação dinâmica entre as variáveis elétricas e mecânicas da máquina síncrona ( $\Delta\dot{\omega}_k$ )), obtém-se, em sua forma linearizada, uma nova variável de estado ( $\Delta\dot{V}_{1k}$ ) para a saída do bloco *washout*, conforme equação (139).

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{V}_{1k} &= \Delta \dot{\omega}_k \cdot K_{ESP} - \frac{1}{T_\omega} \Delta V_{1k} \\
&= -\frac{1}{T_\omega} \Delta Z_1 + \frac{K_{ESP}}{M_k} \Delta P_{m_k} - \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{1k} \Delta \delta_k - \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{2k} \Delta E'_{q_k} - \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{3k} \Delta V_k - \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{4k} \Delta \theta_k \\
&\quad - \frac{K_{ESP}}{M_k} D_k \Delta \omega_k \\
&= Z_{11k} \Delta V_{1k} + Z_{12k} \Delta P_{m_k} + Z_{13k} \Delta \delta_k + Z_{14k} \Delta E'_{q_k} + Z_{15k} \Delta V_k + Z_{16k} \Delta \theta_k + Z_{17k} \Delta \omega_k \quad (139)
\end{aligned}$$

Na equação (139) os coeficientes  $Z_{11k}$ ,  $Z_{12k}$ ,  $Z_{13k}$ ,  $Z_{14k}$ ,  $Z_{15k}$ ,  $Z_{16k}$  e  $Z_{17k}$  são dados conforme o conjunto de equações (140).

$$Z_{11k} = -\frac{1}{T_\omega} \quad (140a)$$

$$Z_{12k} = \frac{K_{ESP}}{M_k} \quad (140b)$$

$$Z_{13k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{1k} \quad (140c)$$

$$Z_{14k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{2k} \quad (140d)$$

$$Z_{15k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{3k} \quad (140e)$$

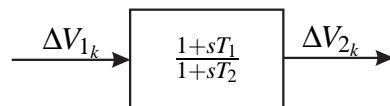
$$Z_{16k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{4k} \quad (140f)$$

$$Z_{17k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} D_k \quad (140g)$$

Os coeficientes  $K_{1k}$ ,  $K_{2k}$ ,  $K_{3k}$  e  $K_{4k}$ , presentes nas equações (139) e (140), estão definidos em (108). A magnitude da tensão terminal é  $V_k$ ,  $P_{m_k}$  é a potência mecânica de entrada e  $D_k$  o coeficiente de torque de amortecimento do laço eletromecânico da máquina síncrona (DE MELLO; CONCORDIA, 1969).

Prosseguindo, considere a Figura 20 que representa a primeira divisão do bloco dos compensadores.

Figura 20 - Modelo Dinâmico para o ESP: Primeiro Bloco dos Compensadores.



Fonte: Elaborado Pelo Autor.

Por inspeção na Figura 20 é possível deduzir a equação (141), que fornece o comportamento dinâmico da segunda variável de estado ( $\Delta \dot{V}_{2k}$ ), em sua forma linearizada, que é a saída do primeiro bloco dos compensadores de fase.

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{V}_{2k} &= \frac{1}{T_2} \Delta V_{1k} + \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_{1k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k} \\
&= \left( \frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_\omega} \right) \Delta Z_1 - \frac{1}{T_2} \Delta Z_2 + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} \Delta P_{m_k} - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{1k} \Delta \delta_k - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{2k} \Delta E'_{qk} \\
&\quad - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{3k} \Delta V_k - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{4k} \Delta \theta_k - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} D_k \Delta \omega_k \\
&= Z_{21k} \Delta Z_1 + Z_{22k} \Delta Z_2 + Z_{23k} \Delta P_{m_k} + Z_{24k} \Delta \delta_k + Z_{25k} \Delta E'_{qk} + Z_{26k} \Delta V_k + Z_{27k} \Delta \theta_k + Z_{28k} \Delta \omega_k
\end{aligned} \tag{141}$$

Na dedução da equação (141) foi utilizada (139). Os coeficientes  $Z_{21k}$ ,  $Z_{22k}$ ,  $Z_{23k}$ ,  $Z_{24k}$ ,  $Z_{25k}$ ,  $Z_{26k}$ ,  $Z_{27k}$  e  $Z_{28k}$ , que constam de (141) são mostrados no conjunto de equações (142).

$$Z_{21k} = \frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_\omega} \tag{142a}$$

$$Z_{22k} = -\frac{1}{T_2} \tag{142b}$$

$$Z_{23k} = \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \tag{142c}$$

$$Z_{24k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{1k} \tag{142d}$$

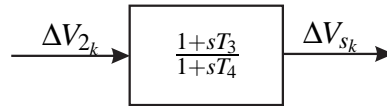
$$Z_{25k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{2k} \tag{142e}$$

$$Z_{26k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{3k} \tag{142f}$$

$$Z_{27k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{4k} \tag{142g}$$

$$Z_{28k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} D_k \tag{142h}$$

Figura 21 - Modelo Dinâmico para o ESP: Segundo Bloco dos Compensadores.



Fonte: Elaborado Pelo Autor.

Dada a Figura 21, por inspeção pode-se obter a equação (143) que descreve o comportamento dinâmico, em sua forma linearizada, da terceira variável de estado ( $\Delta \dot{V}_{sk}$ ), que é a saída do segundo bloco dos compensadores de fase.

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{V}_{sk} &= \frac{1}{T_4} \Delta V_{2k} + \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{V}_{2k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{sk} \\
&= \left( 1 - \frac{T_1}{T_\omega} \right) \frac{T_3}{T_2 T_4} \Delta Z_1 + \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \frac{1}{T_4} \Delta Z_2 - \frac{1}{T_4} \Delta Z_3 + \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4} \Delta P_{m_k} \Delta \delta_k - \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4} K_{1k}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{2k} \Delta E'_{qk} - \frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{3k} \Delta V_k - \frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{4k} \Delta \theta_k - \frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} D_k \Delta \omega_k \\
 & = Z_{31k} \Delta Z_1 + Z_{32k} \Delta Z_2 + Z_{33k} \Delta Z_3 + Z_{34k} \Delta P_{m_k} + Z_{35k} \Delta \delta_k + Z_{36k} \Delta E'_{qk} + Z_{37k} \Delta V_k + Z_{38k} \Delta \theta_k \\
 & + Z_{39k} \Delta \omega_k
 \end{aligned} \tag{143}$$

Na dedução da equação (143) foi utilizada a equação (141). Os coeficientes  $Z_{31k}$ ,  $Z_{32k}$ ,  $Z_{33k}$ ,  $Z_{34k}$ ,  $Z_{35k}$ ,  $Z_{36k}$ ,  $Z_{37k}$ ,  $Z_{38k}$  e  $Z_{39k}$  encontram-se no conjunto de equações (144).

$$Z_{31k} = \left(1 - \frac{T_1}{T_\omega}\right) \frac{T_3}{T_2 T_4} \tag{144a}$$

$$Z_{32k} = \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_4} \tag{144b}$$

$$Z_{33k} = -\frac{1}{T_4} \tag{144c}$$

$$Z_{34k} = \frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} \tag{144d}$$

$$Z_{35k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{1k} \tag{144e}$$

$$Z_{36k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{2k} \tag{144f}$$

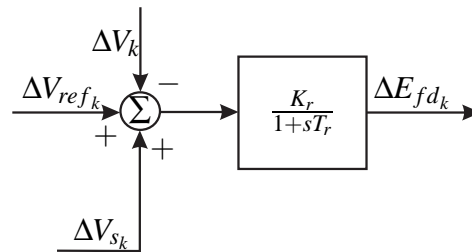
$$Z_{37k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{3k} \tag{144g}$$

$$Z_{38k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{4k} \tag{144h}$$

$$Z_{39k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} D_k \tag{144i}$$

A inclusão do ESP no MSC é finalizada adicionando o sinal suplementar  $V_{s_k}$  na malha de controle do RAT conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Modelo Dinâmico para o ESP: Malha de Controle dos RATs.



Fonte: Elaborado Pelo Autor.

Por inspeção na Figura 22 obtém-se a equação (145) que, em sua forma linearizada, é a equação diferencial referente à tensão de campo da máquina síncrona.

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{E}_{fdk} & = \frac{K_r}{T_r} \Delta V_{s_k} + \frac{K_k}{T_r} \Delta V_{ref_k} - \frac{K_r}{T_r} \Delta V_k - \frac{1}{T_r} \Delta E_{fdk} \\
 & = Z_{41k} \Delta V_{s_k} + Z_{42k} \Delta V_{ref_k} + Z_{43k} \Delta V_k + Z_{44k} \Delta E_{fdk}
 \end{aligned} \tag{145}$$

Na equação (145) os coeficientes  $Z_{41_k}$ ,  $Z_{42_k}$ ,  $Z_{43_k}$  e  $Z_{44_k}$  estão mostrados no conjunto de equações (146).

$$Z_{41_k} = \frac{K_r}{T_r} \quad (146a)$$

$$Z_{42_k} = \frac{K_r}{T_r} \quad (146b)$$

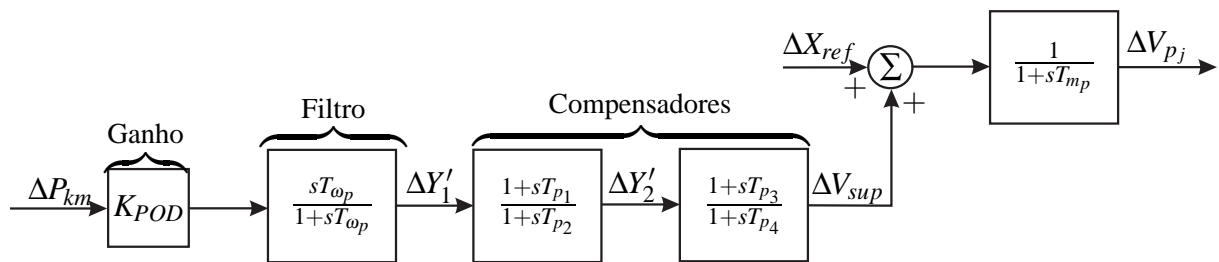
$$Z_{43_k} = -\frac{K_r}{T_r} \quad (146c)$$

$$Z_{44_k} = -\frac{1}{T_r} \quad (146d)$$

#### 4.5.2 Power Oscillation Damping

Nesse trabalho o controlador POD que será acoplado à malha de controle do dispositivo FACTS IPFC tem como saída um sinal suplementar ( $V_{sup}$ ). Este sinal deverá modular a componente de eixo em quadratura  $V_{pj}$  do conversor primário do IPFC e sua estrutura básica é mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Modelo Dinâmico do Dispositivo IPFC-POD.



Fonte: Adaptado de Moura, Furini e Araujo (2012), Menezes (2014) e Valle (2014).

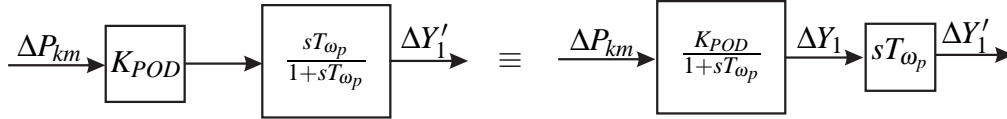
Observe que tanto o POD (Figura 23), quanto o ESP (18) possuem estruturas semelhantes. As grandezas presentes na estrutura do POD (ganho  $K_{POD}$  e Constantes de Tempos  $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$  e  $T_{p4}$ ) têm o mesmo significado que as do ESP.

O sinal de entrada para o controlador POD será a variação do fluxo de potencia ativa ( $\Delta P_{km}$ ) de uma linha de transmissão adjacente à barra de instalação do IPFC. A escolha deste sinal de entrada se justifica por duas razões. Por ser um sinal local diminui-se consideravelmente custos com sistemas de comunicação e, portanto, aumenta a confiabilidade da operação. Além disso, há uma alta observabilidade dos modos interárea para este sinal (YANG; LIU; MCCLELLY, 1998; FURINI; ARAUJO, 2008; WATANABE et al., 1998).

As equações diferenciais que representam o controlador POD são obtidas por um processo semelhante ao que foi utilizado na Subseção 4.5.1. Para tanto foram consideradas três subdivisões na estrutura de controle apresentado para o POD (Figura 23). São elas a Divisão do

bloco *Washout* (Figura 24) e a divisão do bloco de avanço/atraso em duas partes (Figuras 25 e 26).

Figura 24 - Modelo Dinâmico para o POD: Divisão do Bloco *Washout*.



Fonte: Adaptado de Valle (2014), Valle (2010).

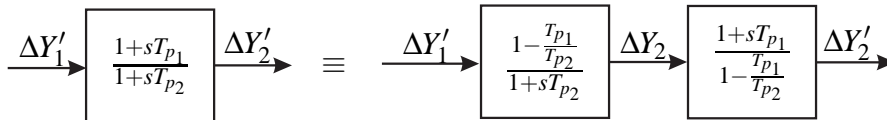
Analisando a Figura 24 e utilizando a equação que determina o fluxo de potência ativa linearizado ( $\Delta P_{km}$ ), ver Apêndice D (equação (214)), podem ser obtidas as equações (147) e (148).

$$\Delta \dot{Y}_1 = \frac{1}{T_{\omega p}} (A1_{km} K_{POD} \Delta \theta_k + A2_{km} K_{POD} \Delta \theta_m + A3_{km} K_{POD} \Delta V_k + A4_{km} K_{POD} \Delta V_m - \Delta Y_1) \quad (147)$$

$$\Delta Y'_1 = K_{POD} \Delta P_{km} - \Delta Y_1 \quad (148)$$

A equação (147) representa, em sua forma linearizada, o comportamento dinâmico de uma nova variável de estado ( $\Delta \dot{Y}_1$ ), saída do bloco *washout*, em função das variáveis algébricas e de estado.

Figura 25 - Modelo Dinâmico para o POD: Divisão do Primeiro Bloco de Avanço/Atraso de Fase.



Fonte: Adaptado de Valle (2014), Valle (2010).

A partir da Figura 25 e utilizando as equações (148) e (214) obtêm-se as equações (149) e (150).

$$\Delta \dot{Y}_2 = \frac{1}{T_{p2}} \left[ \left( 1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) [K_{POD} (A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta \theta_m + A3_{km} \Delta V_k + A4_{km} \Delta V_m) - \Delta Y_1] - \Delta Y_2 \right] \quad (149)$$

$$\Delta Y'_2 = \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) + \Delta Y_2 \quad (150)$$

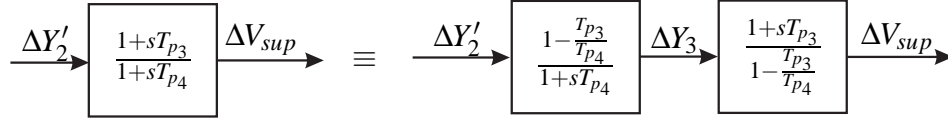
A equação (149) representa, em sua forma linearizada, a dinâmica de uma segunda variável de estado ( $\Delta \dot{Y}_2$ ), saída do primeiro bloco de avanço/atraso de fase, em função das variáveis algébricas e de estado.

Para a obtenção da terceira equação diferencial ( $\Delta \dot{Y}_3$ ) fornecida pelo controlador POD, considere a Figura 26.

Analisando a Figura 26 e utilizando as equações (150) e (214) obtêm-se as equações (151) e (152).



Figura 26 - Modelo Dinâmico para o POD: Divisão do Segundo Bloco de Avanço/Atraso de Fase.



Fonte: Adaptado de Valle (2014), Valle (2010).

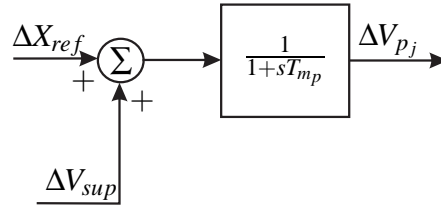
$$\Delta\dot{Y}_3 = \frac{1}{T_{p4}} \left\{ \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD}(A1_{km}\Delta\theta_k + A2_{km}\Delta\theta_m + A3_{km}\Delta V_k + A4_{km}\Delta V_m) - \Delta Y_1) \right] \left( 1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \right) - \Delta Y_3 \right\} \quad (151)$$

$$\Delta V_{sup} = \Delta Y_3 + \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD}\Delta P_{km} - \Delta Y_1) \right] \quad (152)$$

A equação (151) representa, em sua forma linearizada, a dinâmica de uma terceira variável de estado ( $\Delta\dot{Y}_3$ ) para o segundo bloco de avanço/atraso de fase, em função das variáveis algébricas e de estado.

Finalizando, para a obtenção da quarta equação diferencial ( $\Delta\dot{V}_{p_j}$ ) introduzida pelo controlador POD, considere a Figura 27. Esta equação diferencial relaciona-se com a tensão em quadratura do conversor primário do IPFC ( $V_{p_j}$ ) e é modulada por um bloco de primeira ordem conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Modelo Dinâmico para o POD: Tensão em Quadratura do Conversor Primário do IPFC.



Fonte: Adaptado de Valle (2014), Valle (2010).

Analisando a Figura 27 e utilizando as equações deduzidas em (152) e (214) obtém-se a equação (153).

$$\Delta\dot{V}_{p_j} = \frac{1}{T_{mp}} \left\{ \Delta Y_3 + \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD}(A1_{km}\Delta\theta_k + A2_{km}\Delta\theta_m + A3_{km}\Delta V_k + A4_{km}\Delta V_m) - \Delta Y_1) \right] \right\} + \frac{1}{T_{mp}} \Delta X_{ref} - \frac{1}{T_{mp}} \Delta V_{p_j} \quad (153)$$

A equação (153) representa, em sua forma linearizada, o comportamento dinâmico da tensão em quadratura do conversor primário do IPFC ( $\Delta\dot{V}_{p_j}$ ) em função das variáveis algébricas e de estado.

Manipulando a equação (147) é possível deduzir a equação (154) e seus coeficientes ( $C_{11}$ ,

$C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{14}$  e  $C_{15}$  são dados no conjunto de equações (155).

$$\Delta\dot{Y}_1 = C_{11}\Delta\theta_k + C_{12}\Delta\theta_m + C_{13}\Delta V_k + C_{14}\Delta V_m + C_{15}\Delta Y_1 \quad (154)$$

$$C_{11} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega_p}} A1_{km} \quad (155a)$$

$$C_{12} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega_p}} A2_{km} \quad (155b)$$

$$C_{13} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega_p}} A3_{km} \quad (155c)$$

$$C_{14} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega_p}} A4_{km} \quad (155d)$$

$$C_{15} = -\frac{1}{T_{\omega_p}} \quad (155e)$$

De maneira análoga a equação (149) pode ser escrita como em (156), com os coeficientes listados ( $C_{21}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{25}$  e  $C_{26}$ ) no conjunto de equações (157).

$$\Delta\dot{Y}_2 = C_{21}\Delta\theta_k + C_{22}\Delta\theta_m + C_{23}\Delta V_k + C_{24}\Delta V_m + C_{25}\Delta Y_1 + C_{26}\Delta Y_2 \quad (156)$$

$$C_{21} = \frac{A1_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (157a)$$

$$C_{22} = \frac{A2_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (157b)$$

$$C_{23} = \frac{A3_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (157c)$$

$$C_{24} = \frac{A4_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (157d)$$

$$C_{25} = -\frac{1}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (157e)$$

$$C_{26} = -\frac{1}{T_{p2}} \quad (157f)$$

Realizando-se o mesmo procedimento na equação (151) escreve-se a equação (158). Em seguida, são apresentados seus respectivos coeficientes ( $C_{31}$ ,  $C_{32}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{34}$ ,  $C_{35}$ ,  $C_{36}$  e  $C_{37}$ ) conforme conjunto de equações (159).

$$\Delta\dot{Y}_3 = C_{31}\Delta\theta_k + C_{32}\Delta\theta_m + C_{33}\Delta V_k + C_{34}\Delta V_m + C_{35}\Delta Y_1 + C_{36}\Delta Y_2 + C_{37}\Delta Y_3 \quad (158)$$

$$C_{31} = \frac{T_{p1}A1_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (159a)$$

$$C_{32} = \frac{T_{p1}A2_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (159b)$$

$$C_{33} = \frac{T_{p1}A3_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (159c)$$

$$C_{34} = \frac{T_{p1}A4_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (159d)$$

$$C_{35} = -\frac{T_{p1}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (159e)$$

$$C_{36} = \frac{1}{T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (159f)$$

$$C_{37} = -\frac{1}{T_{p4}} \quad (159g)$$

A equação (160) é resultado da manipulação de (153) e seus coeficientes ( $C_{41}$ ,  $C_{42}$ ,  $C_{43}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{45}$ ,  $C_{46}$ ,  $C_{47}$ ,  $C_{48}$  e  $C_{49}$ ) são dados no conjunto de equações (161).

$$\Delta\dot{V}_{p_j} = \overbrace{\frac{K_1}{T_{m_p}} \left(\Delta P_{ref_j} - \Delta P_{l_j}\right) + \frac{1}{T_{m_p}} \Delta X_1 + \frac{1}{T_{m_p}} \Delta V_{sup} - \frac{1}{T_{m_p}} \Delta V_{p_j}}^{\text{parcelas já incluídas no MSC}} + C_{41} \Delta \theta_k + C_{42} \Delta \theta_m + C_{43} \Delta V_k + C_{44} \Delta V_m + C_{45} \Delta Y_1 + C_{46} \Delta Y_2 + C_{47} \Delta Y_3 + C_{48} \Delta X_{ref} + C_{49} \Delta V_{p_j} \quad (160)$$

$$C_{41} = \frac{T_{p1} T_{p3} A1_{km} K_{POD}}{T_{p2} T_{p4} T_{m_p}} \quad (161a)$$

$$C_{42} = \frac{T_{p1} T_{p3} A2_{km} K_{POD}}{T_{p2} T_{p4} T_{m_p}} \quad (161b)$$

$$C_{43} = \frac{T_{p1} T_{p3} A3_{km} K_{POD}}{T_{p2} T_{p4} T_{m_p}} \quad (161c)$$

$$C_{44} = \frac{T_{p1} T_{p3} A4_{km} K_{POD}}{T_{p2} T_{p4} T_{m_p}} \quad (161d)$$

$$C_{45} = -\frac{T_{p1} T_{p3}}{T_{p2} T_{p4} T_{m_p}} \quad (161e)$$

$$C_{46} = \frac{T_{p3}}{T_{p4} T_{m_p}} \quad (161f)$$

$$C_{47} = \frac{1}{T_{m_p}} \quad (161g)$$

$$C_{48} = \frac{1}{T_{m_p}} \quad (161h)$$

$$C_{49} = -\frac{1}{T_{m_p}} \quad (161i)$$

Obtido o equacionamento necessário para inclusão dos controladores ESPs (equações (139), (141), (143), (145)) e IPFC-POD (equações (147), (149), (151) e (153)) no MSC, será mostrado na próxima Seção o modelo expandido do MSC considerando a atuação dos controladores.

#### 4.6 INCLUSÃO DOS CONTROLADORES ESPs E IPFC-POD NO MSC

Para a análise de um SEP representado pelo MSC onde se considera em operação as máquinas síncronas, RATs, ESPs e o conjunto IPFC-POD, as equações (137) e (138) deverão ser modificadas. A modificação se dá pela inclusão das equações (139), (141), (143), (145)

(referentes ao ESP) e (147), (149), (151) e (153) (referentes ao conjunto IPFC-POD). A inclusão dessas novas variáveis de estado provocará mudanças nas matrizes  $J1_{ipfc}$ ,  $J2_{ipfc}$ ,  $J3_{ipfc}$  e  $B1_{ipfc}$  (equações (137) e (138)) e pode ser analisada nas equações matriciais mostradas em (162) e (163).

$$\begin{array}{c}
\Delta \dot{\omega}_k \\
\Delta \dot{\delta}_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}_{1k} \\
\Delta \dot{V}_{2k} \\
\Delta \dot{V}_{sk} \\
\Delta \dot{Y}_1 \\
\Delta \dot{Y}_2 \\
\Delta \dot{Y}_3 \\
\hline
\Delta \dot{x}_{IE}
\end{array}
=
\begin{array}{c}
\begin{array}{c}
[J1] \\
\begin{array}{cccc}
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] \\
\hline
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] \\
\hline
[Z_{17k}] & [Z_{13k}] & [Z_{14k}] & [0] \\
[Z_{28k}] & [Z_{24k}] & [Z_{25k}] & [0] \\
[Z_{39k}] & [Z_{35k}] & [Z_{36k}] & [0] \\
\hline
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0]
\end{array}
\end{array}
\begin{array}{c}
[0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
\hline
\left[\frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{pj}} + C_{49}\right] & \left[\frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1}\right] & \left[\frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{qj}}\right] & [0] & [0] & [0] \\
\left[\frac{\partial X_1}{\partial V_{pj}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial X_1}{\partial V_{qj}}\right] & [0] & [0] & [0] \\
\left[\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{pj}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{qj}}\right] & \left[\frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2}\right] & [0] & [0] \\
\left[\frac{\partial X_2}{\partial V_{pj}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial X_2}{\partial V_{qj}}\right] & [0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}}\right] & \left[\frac{\partial V_{pk}}{\partial X_3}\right] \\
[0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{\partial X_3}{\partial V_{pk}}\right] & [0]
\end{array}
\begin{array}{c}
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [Z_{41k}] \\
\hline
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
\hline
[Z_{11k}] & [0] & [0] \\
[Z_{21k}] & [Z_{22k}] & [0] \\
[Z_{31k}] & [Z_{32k}] & [Z_{33k}] \\
\hline
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0]
\end{array}
\begin{array}{c}
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
\hline
[C_{45}] & [C_{46}] & [C_{47}] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
[0] & [0] & [0] \\
\hline
[C_{15}] & [0] & [0] \\
[C_{25}] & [C_{26}] & [0] \\
[C_{35}] & [C_{36}] & [C_{37}]
\end{array}
\end{array}
\begin{array}{c}
\Delta \omega_k \\
\Delta \delta_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_{1k} \\
\Delta V_{2k} \\
\Delta V_{sk} \\
\Delta Y_1 \\
\Delta Y_2 \\
\Delta Y_3 \\
\hline
\Delta x_{IE}
\end{array}
\end{array}
\begin{array}{c}
\Delta \dot{x}_{IE} \\
\hline
J1_C
\end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 [J_2] \\
 \hline
 \begin{array}{cccccc|cc|cc|cc}
 [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial V_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial V_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{q_j}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{q_j}}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_2}{\partial V_i} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_2}{\partial V_j} \end{bmatrix} & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_k}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_k}}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_k}}{\partial V_i} \end{bmatrix} & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_k}}{\partial V_k} \end{bmatrix} & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{p_k}}{\partial V_{p_k}} \end{bmatrix} \\
 [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_3}{\partial V_i} \end{bmatrix} & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_3}{\partial V_k} \end{bmatrix} & [0] & [0] & \begin{bmatrix} \frac{\partial X_3}{\partial V_{p_k}} \end{bmatrix} \\
 \hline
 [0] & [0] & [0] & [Z_{16_k}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [Z_{15_k}] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [Z_{27_k}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [Z_{26_k}] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [Z_{38_k}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [Z_{37_k}] & [0] & [0] & [0] \\
 \hline
 [0] & [0] & [0] & [C_{11}] & [C_{12}] & [0] & [0] & [0] & [C_{13}] & [C_{14}] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [C_{21}] & [C_{22}] & [0] & [0] & [0] & [C_{23}] & [C_{24}] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [C_{31}] & [C_{32}] & [0] & [0] & [0] & [C_{33}] & [C_{34}] & [0] & [0]
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \Delta \theta_1 \\
 \vdots \\
 \Delta \theta_i \\
 \Delta \theta_j \\
 \Delta \theta_k \\
 \Delta \theta_m \\
 \vdots \\
 \Delta V_1 \\
 \vdots \\
 \Delta V_i \\
 \Delta V_j \\
 \Delta V_k \\
 \Delta V_m \\
 \vdots \\
 \Delta V_{q_k} \\
 \underbrace{\hspace{1cm}}_{\Delta z_{IE}}
 \end{array}
 \end{array}
 \quad + \quad
 \underbrace{\hspace{12cm}}_{J_{2IC}}$$

$$\begin{aligned}
 & + \underbrace{\left[ \begin{array}{cccc|cccccc}
 & & & & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 & & & & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 & & & & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 & & & & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 \hline
 [B1] & & & & \left[\frac{K_1}{T_{mp}}\right] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [C_{48}] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{1}{T_{1i}}\right] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{K_2}{T_{mp}}\right] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{1}{T_{2i}}\right] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{K_3}{T_{mp}}\right] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{1}{T_{3i}}\right] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 \hline
 [Z_{12k}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [Z_{23k}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [Z_{34k}] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 \hline
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \underbrace{\left[ \begin{array}{c} \Delta P_{m_k} \\ \Delta V_{ref_k} \\ \Delta P_{l_n} \\ \Delta Q_{l_n} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_k} \\ \Delta P_{ref_k} \\ \Delta X_{ref} \end{array} \right]}_{\Delta u_E}
 \end{array} \right]}_{B1_C}
 \end{aligned}
 \tag{162}$$

$$\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} = [J3] \underbrace{\begin{bmatrix} -\left[\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{p_j}}\right] & [0] & -\left[\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{q_j}}\right] & [0] & -\left[\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{p_k}}\right] & [0] \\ \left[\frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_j}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{q_j}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_k}}\right] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{p_k}}\right] & [0] \\ \left[\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{p_j}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{q_j}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{p_k}}\right] & [0] \\ -\left[\frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_j}}\right] & [0] & -\left[\frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{q_j}}\right] & [0] & -\left[\frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_k}}\right] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & \left[\frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{p_k}}\right] & [0] \\ \left[\frac{\partial PE}{\partial V_{p_j}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial PE}{\partial V_{q_j}}\right] & [0] & \left[\frac{\partial PE}{\partial V_{p_k}}\right] & [0] \end{bmatrix}}_{J3_{IC}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\omega_k \\ \Delta\delta_k \\ \Delta E'_{q_k} \\ \Delta E_{fd_k} \\ \Delta V_{p_j} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{q_j} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{p_k} \\ \Delta X_3 \end{bmatrix}}_{\Delta x_{IE}}$$



$$\begin{aligned}
& + \underbrace{\begin{bmatrix} [J4_{11_{ipfc}}] & [J4_{12_{ipfc}}] \\ [J4_{13_{ipfc}}] & [J4_{22_{ipfc}}] \end{bmatrix}}_{J4_{ipfc}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\theta_n \\ \Delta V_n \\ \Delta V_{qk} \end{bmatrix}}_{\Delta z_{ipfc}} + \underbrace{\begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \end{bmatrix}}_{B2_{ipfc}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P_{m_k} \\ \Delta V_{ref_k} \\ \Delta P_{l_n} \\ \Delta Q_{l_n} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta Q_{ref_j} \\ \Delta P_{ref_k} \\ \Delta P_{ref_k} \end{bmatrix}}_{\Delta u_{ipfc}} \\
& \hspace{15em} (163)
\end{aligned}$$

As matrizes alteradas  $J1_{ipfc}$ ,  $J2_{ipfc}$ ,  $J3_{ipfc}$  e  $B1_{ipfc}$  foram renomeadas e após a inclusão dos ESPs e do conjunto IPFC-POD são denominadas  $J1_{Ic}$ ,  $J2_{Ic}$ ,  $J3_{Ic}$  e  $B1_{Ic}$ . As matrizes que não sofreram influência dos controladores ESPs permanecem com a mesma nomenclatura ( $J4_{ipfc}$  e  $B2_{ipfc}$ ). É importante destacar que para cada ESP acoplado a cada RAT implicará no surgimento de três novas variáveis de estado. Como consequência, três novas linhas e/ou colunas em determinadas matrizes do modelo ( $J1_{Ic}$ ,  $J2_{Ic}$ ,  $J3_{Ic}$  e  $B1_{Ic}$ ) deverão ser consideradas. A mesma análise é válida para cada conjunto IPFC-POD instalado no SEP.

#### 4.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

No Capítulo 2 foram apresentadas e deduzidas as equações do dispositivo FACTS IPFC, capaz de controlar os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão de sua instalação. No Capítulo 2 o modelo do IPFC foi baseado nos fluxos de potências ativa e reativa (modelo de injeção de potências) pois o objetivo principal era obter o equacionamento necessário para ser utilizado em um programa de fluxo de carga expandido. Com este programa pode-se simular a atuação do IPFC no controle de fluxo de potência entre as barras e nas linhas em que encontra-se instalado.

No Capítulo 3 foi equacionado o Modelo de Sensibilidade de Corrente que será utilizado para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações do SEP. Este modelo baseia-se no balanço nodal de correntes em cada barra do SEP, em cada instante. Em vista disso, neste Capítulo foi proposto um modelo de injeção de correntes para o IPFC (conjunto de equações (129)), o que

permitiu a inclusão de suas variáveis de estado e algébricas no MSC. Este procedimento foi realizado no equacionamento mostrado em (137) e (138).

Os controladores ESPs e o conjunto IPFC-POD foram modelados neste Capítulo (Seção 4.5). As etapas para obter suas equações diferenciais (equações (139), (141), (143) e (145) para o ESP e equações (147), (149), (151) e (153) para o POD) foram apresentadas.

Finalizando o Capítulo, os controladores ESP e POD foram incluídos no MSC (equações (162) e (163)). Este equacionamento possibilita realizar a análise da estabilidade a pequenas perturbações do SEP modelado pelo MSC e considerando a atuação do IPFC, ESP e POD.

No próximo Capítulo será apresentada uma técnica de otimização que deverá ser capaz de ajustar os parâmetros dos controladores ESPs ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_3$  e  $K_{ESP}$ ) e do conjunto IPFC-POD ( $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$ ,  $T_{p4}$  e  $K_{POD}$ ) para se obter um amortecimento predefinido para as oscilações eletromecânicas do SEP.

## 5 TÉCNICAS DE AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES

### 5.1 INTRODUÇÃO

Há na literatura uma diversidade de técnicas que podem ser utilizadas para realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento. Basicamente elas se dividem em duas categorias: as classificadas como clássicas e as baseadas técnicas de otimização.

Na teoria do controle clássico podem ser citados os Métodos dos Resíduos (YANG; LIU; MCCLELLY, 1998; VALLE, 2014) e o DMC (CHEN; HSU, 1987; VALLE; ARAUJO, 2015; ARAUJO; ZANETA, 2001). Estes métodos citados, destacam-se pelos bons resultados obtidos e podem ser utilizados tanto na determinação dos parâmetros dos controladores ESPs quanto do POD (VALLE; ARAUJO, 2015). Em particular, o método dos Resíduos é caracterizado por ser de fácil implementação computacional. Entretanto, tanto o Método dos Resíduos quanto o DMC apresentam desvantagens na sua utilização. No caso do Método dos Resíduos, o ajuste dos parâmetros dos controladores é realizado de forma individual, considera-se o sistema *Single-Input, Single-Output* (SISO). Assim, ao considerar todos os controladores simultaneamente em operação pode ocorrer que o amortecimento desejado obtido pelos ajustes individuais fornecidos a cada controlador inserido no SEP seja diferente do amortecimento global do sistema proposto inicialmente em projeto.

Para superar as limitações observadas no Método dos Resíduos, um ajuste coordenado e simultâneo dos parâmetros dos controladores ESPs e POD deve ser implementado. Com o DMC isto é possível. Inicialmente esta técnica foi utilizada para realizar o ajuste simultâneo e coordenado dos parâmetros dos controladores ESPs (CHEN; HSU, 1987; ARAUJO; ZANETA, 2001), tendo, portanto, sua atuação destacada nos modos locais de oscilação. Mais tarde seu conceito foi expandido para controlar e amortecer o modo interárea (FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011; VALLE; ARAUJO, 2015), sendo que os dispositivos FACTS utilizados nesses trabalhos para inserir amortecimento ao modo interárea foram o UPFC, STATCOM e GUPFC. Como desvantagem desta técnica cita-se o fato de que o DMC é caracterizado por um conjunto de equações não lineares que são solucionadas através de um método iterativo (por exemplo, Método de Newton-Raphson). Segundo Valle (2014) tal não linearidade do sistema e, conseqüentemente das equações do DMC, exige que os valores de inicialização do método DMC estejam no entorno de uma solução global. Assim, se faz necessário realizar um ajuste prévio através de um método não coordenado (por exemplo, Método dos Resíduos) e com os parâmetros obtidos desse método é inicializado o método DMC.

Em contraste com as técnicas da teoria clássica, as técnicas de otimização são poderosas ferramentas computacionais e têm apresentado ao longo dos últimos anos soluções satisfatórias aos mais diversos problemas de otimização encontrados na literatura. Em geral, estas técnicas destinam-se a minimizar ou maximizar uma função objetivo através da escolha dos valores de variáveis (reais ou inteiras). Estas variáveis são delimitadas por um intervalo e normalmente são geradas de forma aleatória. O objetivo é encontrar uma solução ótima para um dado problema com baixo custo computacional (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

O ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (ESPs e POD) utilizando técnicas de otimização é recente e vem apresentando excelentes resultados. Das técnicas utilizadas para este fim, pode-se citar *Bacterial Foraging Optimization* (BFO) (MENEZES, 2014; MENEZES; ARAUJO; FORTES, 2014; ABD-ELAZIM; ALI, 2012), *Particle Swarm Optimization* (PSO) (HASANVAND et al., 2016; SHAYEGHI; SAFARI; SHAYANFAR, 2010; MENEZES, 2014; VALLE, 2014), *Bacterial Foraging - Particle Swarm Optimization* (BF-PSO) (MENEZES, 2014) e o Algoritmo Genético (AG) (HASSAN et al., 2014).

O desempenho satisfatório das técnicas de otimização apresentadas foi determinante para a escolha desses métodos para, de forma coordenada, realizar os ajustes dos parâmetros dos controladores Proporcional-Integral (PI) e suplementares de amortecimento (PSSs e o conjunto IPFC-POD). Neste trabalho, uma técnica baseada no AG é selecionada e sua eficiência é testada quando o assunto é realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores supracitados. Mais especificamente, é utilizada uma técnica baseada no Algoritmo Genético e no Algoritmo Genético de Chu-Beasley, sendo esta denominada Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado (AGCBE) (CHU; BEASLEY, 1997; UZINSKI; POSSAGNOLO; ROMERO, 2015).

Em linhas gerais, o AGCB é especialmente modificado para atender as demandas do problema proposto. Estas modificações realizadas introduzem características importantes que o diferenciam do AG, tais como manipulação das infactibilidades, controle total da diversidade da população e uma heurística de Busca Local eficiente, características essas não presentes nos AGs tradicionais.

Com as modificações propostas no AGCB espera-se que estas possam ser eficazes no sentido de realizar o correto ajuste dos parâmetros do controladores PI, ESPs e no conjunto IPFC-POD e conseqüentemente validar a técnica proposta (AGCBE) como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Para testar o desempenho do AGCBE, esta terá seu desempenho comparado a outros dois

algoritmos disponíveis na literatura: o AG com Elitismo (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; MITCHELL, 1998) e o PSO (KENNEDY; EBERHART, 1995), motivo pelo qual estes dois algoritmos serão prontamente apresentados neste Capítulo.

## 5.2 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Uma das grandes vantagens do PSO frente a outros algoritmos existentes na literatura se resume no fato de que esta técnica estocástica pode ser facilmente implementada computacionalmente, se destacando por ser rápida e eficiente nos mais diversos tipos de problemas de otimização encontrados na literatura (KENNEDY; EBERHART; SHI, 2001).

Proposto por Kennedy e Eberhart (1995), o PSO é um algoritmo inspirado e formulado a partir de observações no comportamento de um bando qualquer de pássaros. O mecanismo de otimização implementado no PSO se baseia na busca por alimentos e na interação entre as aves durante o voo. Fazendo analogia a um problema de otimização, uma determinada área sobrevoada por pássaros é equivalente a um espaço de busca enquanto que o local em que a comida é encontrada é o mesmo que encontrar uma solução ótima para o problema. Os pássaros são normalmente chamados de partículas (variáveis do problema) e devem fazer uso da experiência adquirida pelo próprio bando com o intuito de se determinar a melhor região no espaço de busca (KENNEDY; EBERHART; SHI, 2001).

Para uma formulação matemática para o PSO, inicialmente considere um espaço de busca de dimensão  $n$ . Suponha que cada partícula  $i$  no espaço de busca possa ser representada de acordo com sua posição atual  $x_i(t) = [x_1^i(t), x_2^i(t), \dots, x_n^i(t)]$  e sua respectiva velocidade  $v_i(t) = [v_1^i(t), v_2^i(t), \dots, v_n^i(t)]$ . Durante o processo iterativo no espaço de busca, a cada passo  $t$ , a posição atual de cada partícula é medida através de uma função objetivo (devidamente mostrada na equação (175)). A partir da análise da função de avaliação é verificado a cada passo  $t$  se a posição da partícula na iteração  $t$  é melhor que as demais verificadas anteriormente. Caso isso ocorra, a posição dessa partícula é armazenada no vetor  $P_{best}^i(t) = [P_{best_1}^i(t), P_{best_2}^i(t), \dots, P_{best_n}^i(t)]$ . No decorrer do processo iterativo, a cada melhor avaliação *fitness*, este vetor é atualizado. Por fim, a melhor posição encontrada medida pela função de avaliação armazenada em  $P_{best}^i(t)$  é armazenada no vetor chamando  $G_{best}$ . A função de  $G_{best}$  é influenciar diretamente no movimento de todas as partículas, direcionando-as na direção do melhor *fitness* a cada iteração do processo de busca.

No PSO, o que determina o movimento de uma determinada partícula  $i$  no passo  $(t + 1)$  é a sua velocidade  $v_i(t)$  e pode ser analisada na equação (164).

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + c_1 r_1 co_i(t) + c_2 r_2 so_i(t) \quad (164)$$

Na equação (164),  $r_1$  e  $r_2$  são distribuições aleatórias entre 0 e 1. No mais,  $c_1$  e  $c_2$  são denominadas constantes de aceleração e são responsáveis por ponderar o fator cognitivo  $co_i(t)$  e fator social  $so_i(t)$ , respectivamente.

O fator cognitivo e o fator social mostrados na equação (164) são representados pelas equações (165) e (166).

$$co_i = P_{best_i}(t) - x_i(t) \quad (165)$$

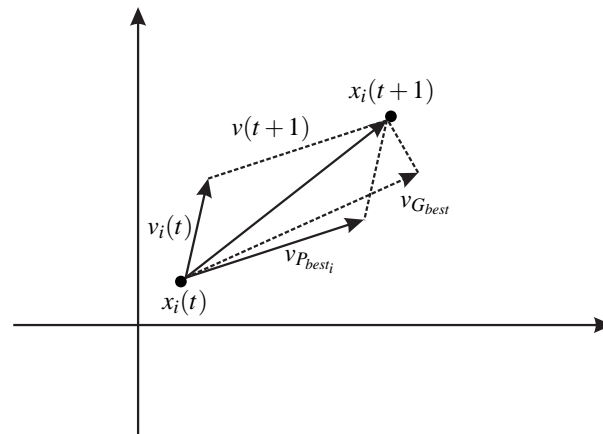
$$so_i = G_{best} - x_i(t) \quad (166)$$

Nas equações (165) e (166) o fatores cognitivos ( $co_i$ ) estão relacionados com cada um dos indivíduos com sua respectiva melhor posição ( $P_{best_i}(t)$ ), os fatores sociais ( $so_i$ ) estão relacionados com a melhor posição encontrada entre todos os indivíduos do enxame ( $G_{best}$ ) e  $x_i(t)$  é o vetor posição da partícula  $i$  na iteração  $t$ . No passo  $(t + 1)$ , a posição da partícula ( $x_i(t + 1)$ ) é atualizada conforme equação (168).

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (167)$$

Para exemplificar o deslocamento de uma partícula ( $x_i(t)$ ) após a iteração no algoritmo PSO ( $x_i(t + 1)$ ), é apresentada a Figura 28.

Figura 28 - Deslocamento da posição de uma partícula.



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

Na Figura 28,  $v_i(t)$  é a velocidade corrente da partícula, enquanto que  $v_{P_{best_i}}$  e  $v_{G_{best}}$  são as velocidades relacionadas a melhor posição individual e global das partículas do enxame.

Para melhorar o desempenho do PSO, Shi e Eberhart (1998) propuseram a introdução de um fator  $w$ , denominado fator de inércia, com o propósito de controlar o impacto das velocidades sobre as partículas do PSO. Segundo os autores, para melhor performance do algoritmo na busca de um ótimo local o ideal é considerar  $0,50 \leq w \leq 1,50$ . Segundo Shi e Eberhart (1998)

o fator de inércia pode ser obtido a partir da equação (168).

$$w = \frac{w_{max} - w_{min}}{t_{max}} t \quad (168)$$

Na equação (168)  $w_{max}$  e  $w_{min}$  são respectivamente os valores máximos e mínimos do fator de inércia, cujos valores são atribuídos de acordo com o problema de otimização.  $t_{max}$  é número máximo de iterações e  $t$  refere-se a iteração corrente utilizado no algoritmo.

Desta forma, conforme Shi e Eberhart (1998), pode-se rescrever a equação (164) de acordo com a equação (169).

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 r_1 co_i(t) + c_2 r_2 so_i(t) \quad (169)$$

Em relação as constantes  $c_1$  e  $c_2$  (constantes de aceleração) descritas na equações (164) e (169), Bratton e Kennedy (2007) afirmam que se  $c_1 + c_2 > 4,0$  a convergência do algoritmo pode ser mais eficiente, sendo recomendado em muitas aplicações  $c_1 + c_2 \approx 4,0$ .

A partir da definição da equação de velocidade mostrada na equação (169) é recomendável que a velocidade inerentes as partículas ( $v_i(t)$ ) seja fixada em um intervalo predeterminado  $[-v_{max}, v_{max}]$ . Isto se faz necessário, uma vez que pretende-se reduzir a probabilidade de que a partícula possa sair do seu referido espaço de busca. Considere que para um dado problema de otimização o espaço de busca seja determinado em  $[-x_{max}, x_{max}]$  (valores mínimos e máximos permitidos para uma partícula). Então, o valor de  $v_{max}$  é tipicamente ajustado de modo que  $v_{max} = k_{ps0} \cdot x_{max}$ , onde  $0,1 \leq k_{ps0} \leq 1,0$  (CORNE; DORIGO; GLOVER, 1999).

O controle da velocidade e da posição de cada partícula no PSO é realizado segundo equações (170) e (171).

$$v_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t+1) & \text{se } -v_{max} \leq v_i(t+1) \leq v_{max} \\ -v_{max} & \text{se } v_i(t+1) < -v_{max} \\ v_{max} & \text{se } v_i(t+1) > v_{max} \end{cases} \quad (170)$$

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + v_i(t+1) & \text{se } x_{min} \leq x_i(t) + v_i(t+1) \leq x_{max} \\ x_{min} & \text{se } x_i(t) + v_i(t+1) < x_{min} \\ x_{max} & \text{se } x_i(t) + v_i(t+1) > x_{max} \end{cases} \quad (171)$$

Nas equações (170) e (171)  $v_{max}$  é a velocidade máxima, enquanto que  $x_{max}$  e  $x_{min}$  são respectivamente os valores máximos e mínimos para cada partícula pode assumir no problema de otimização.

Na simulações que foram realizadas neste trabalho, foram considerados  $c_1 = c_2 = 2,05$ ;  $k_{ps0} = 0,05$ ;  $w_{max} = 1,4$ ;  $w_{min} = 0,5$  e o número de agentes ( $n_{pop}$ ) na população inicial foi de

$n_{pop} = 20$  partículas.

No Algoritmo 1 é mostrado um pseudocódigo do PSO utilizado neste trabalho.

---

**Algoritmo 1** Particle Swarm Optimization

---

```

1: Especificar Parâmetros:  $w, c_1, c_2, x_{min}, x_{max}, v_{max}, n_{pop}; t \leftarrow 0;$ 
2: Determinar  $x_i(0)$  e  $v_i(0)$ ;
3: Determinar a função objetivo de todas as partículas:  $f(x_i)$ ;
4: if  $f(x_i(t+1)) \leq f(x_i(t))$  then
5:   Determinar  $G_{best} = x_i$  e  $P_{best_i} = x_i$ ;
6: else
7:    $P_{best_i} = x_i$ ;
8: end if
9: while condição de parada não for satisfeita do
10:  Determinar e calcular  $co_i$  e  $so_i$ ;
11:  Atualizar velocidade e a posição de cada partícula:  $v_i$  e  $x_i$ ;
12:  Calcular e avaliar a função objetivo:  $f(x_i)$ 
13:  if  $f(x_i) \leq f(P_{best_i})$  then
14:     $f(P_{best_i}) = x_i$ ;
15:  else
16:     $P_{best_i} = P_{best_i}$ ;
17:  end if
18:  if  $f(x_i) \leq f(G_{best})$  then
19:     $f(G_{best}) = x_i$ ;
20:  else
21:     $G_{best} = G_{best}$ 
22:  end if
23:   $t \leftarrow t + 1$ ;
24: end while

```

---

Na linha 9 do Algoritmo 1 a frase “condição de parada não for satisfeita” é determinada por um número máximo de cálculos da função objetivo ou ainda pelo amortecimento mínimo desejado estipulado aos autovalores de interesse. Estes detalhes serão omitidos neste Capítulo e serão prontamente apresentados no Capítulo 6.

### 5.3 ALGORITMO GENÉTICO

O AG é um método de otimização cujo princípio fundamental está baseado na seleção natural proposta por Charles Darwin. Originalmente, o AG foi formulado por John Holland na década de 70 em seu livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*” (HOLLAND, 1992).

Em seu livro Holland (1992) estudou a evolução das espécies e já em sua época propôs um modelo heurístico simples, eficiente e robusto (baseado nos mecanismos da evolução e da genética) e que se fosse implementado computacionalmente poderia fornecer soluções



eficientes para problemas de otimização que eram então desconhecidos (LINDEN, 2006). A robustez incorporada pelos AGs está correlacionada com o fato de que soluções de qualidade podem ser obtidas independentes da seleção dos parâmetros iniciais (normalmente aleatória) (GOLDBERG, 2002).

### 5.3.1 Terminologia básica e operadores de reprodução

Os AGs, conforme já explicitado, são baseados na evolução das espécies. É de se esperar, portanto, que alguns termos e definições que são corriqueiramente utilizados nesses algoritmos façam alusão e comparações a conceitos relacionados com a Genética e/ou com a Biologia. Desta forma, para melhor entendimento dos AGs, serão apresentadas algumas das principais definições que são importantes para entender e implementar computacionalmente os AGs.

Primeiramente, vale ressaltar que existem dois tipos de reprodução verificados na natureza: *Assexuada* e *Sexuada*. A primeira relaciona-se com organismos mais primitivos. Basicamente neste tipo de reprodução, um organismo qualquer simplesmente se divide e dá origem a dois novos organismos e assim sucessivamente. Na sexuada há a necessidade da presença de dois organismos e, necessariamente, ocorre a troca de material genético num processo denominado *fecundação*. Esse processo é denominado nos AGs de *recombinação*.

Da Biologia e da Genética sabe-se que a essência de quaisquer organismos vivos são os cromossomos, sendo que seu número varia de espécie para espécie. Todos os cromossomos de um ser vivo formam o que chamamos de *genótipo* e as características observadas em qualquer ser vivo denomina-se *fenótipo* (AMABIS; MARTHO, 1985). Cada cromossomo é representado por seus respectivos *genes* e estes são formados por *alelos*. A localização do gene no cromossomo é chamada de *locus* (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

Similarmente, quaisquer soluções de um problema de otimização podem ser codificadas e representadas em uma estrutura de dados denominada de cromossomos (indivíduos). Esta primeira etapa que representa os AGs é extremamente importante para um bom desempenho do algoritmo, pois é nela que se define o genótipo e, conseqüentemente, a maneira com que este é mapeado no fenótipo.

O operador de mutação altera de forma aleatória um ou mais genes de um cromossomo. O que determina a probabilidade de ocorrência de mutação nesses genes alocados nos cromossomos é a *taxa de mutação* (GOLDBERG, 1989). O operador de recombinação consiste em obter novos indivíduos simplesmente efetuando a troca ou combinação dos alelos de dois ou mais cromossomos (GOLDBERG, 1989).

Na maioria dos AGs, a codificação utilizada é a binária, ou seja, o genótipo do cromossomo é determinado por arranjos cujos elementos são 0s e 1s.

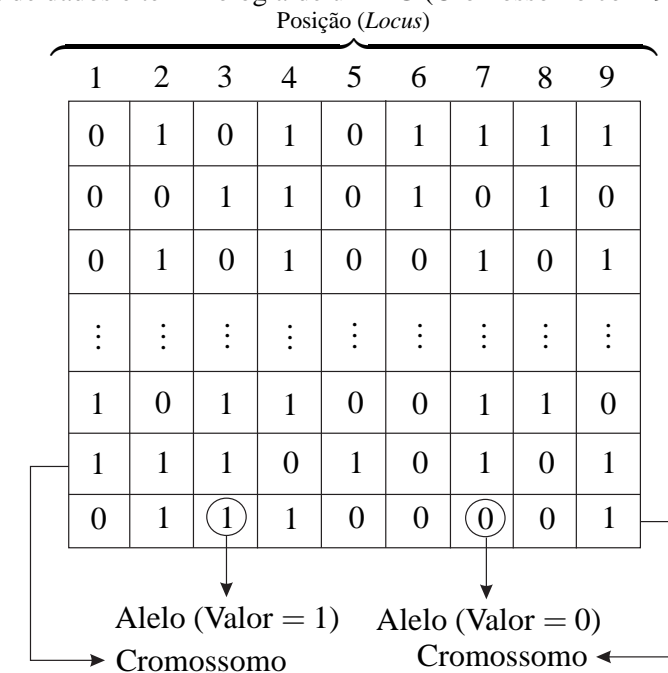
A partir das definições apresentadas, é natural que se faça uma correspondência entre os elementos que aparecem na reprodução sexuada com os conceitos que norteiam os AGs. Estes estão correlacionados da seguinte forma: Reprodução Sexuada  $\iff$  Algoritmo Genético, Genética  $\iff$  Problemas de Otimização, Cromossomos  $\iff$  Indivíduos, Genes  $\iff$  Variáveis e Alelos  $\iff$  Valor das variáveis (CASTRO, 2001; ZINI, 2009).

- **Cromossomos (Indivíduos):** Um cromossomo é constituído por genes (Variáveis do Problema). Portanto, fazendo analogia a um problema de otimização (Genética), cada cromossomo (Indivíduo) pode ser analisado como uma possível solução do problema proposto.
- **Genes (Variáveis):** São os elementos que compõem o cromossomo. Em um problema de otimização, cada gene (Variável do Problema) contém as características necessárias para representar um cromossomo que poderá ser uma possível solução do problema de otimização proposto.
- **Alelos:** Valor das Variáveis.
- **População:** A população é constituída por todas as possíveis soluções (indivíduos) do problema de otimização proposto.
- **Pais e Descendentes:** Os descendentes são soluções encontradas a partir dos operadores de recombinação e mutação aplicados em geral a um par de cromossomos, os quais são denominados de pais.
- **Geração:** Na Biologia, geração é o mesmo que produzir descendentes. A cada geração, seleciona-se indivíduos da população atual os quais são recombinados e/ou mutados, de forma que se obtenham os melhores descendentes.
- **Seleção:** Em uma população com  $M$  indivíduos e  $N$  descendentes há um total de  $M + N$  indivíduos para a próxima geração. Desta forma, um mecanismo de seleção natural é necessário para controlar o tamanho da população de forma a efetuar a escolha de  $M$  ou  $N$  indivíduos para a geração seguinte.
- **Operações Genéticas:** Relaciona-se com as ações que o algoritmo executa sobre cada indivíduo da população.

- **Região de Busca:** Todos os indivíduos pertencentes a uma população, são caracterizados por pertencerem a um determinado espaço de busca, ou seja, regiões que delimitam possíveis soluções factíveis do problema de otimização a ser resolvido.
- **Fitness:** Também conhecida como *medida de aptidão*, o valor do *fitness* de cada indivíduo de uma população é representado por um número positivo cujo objetivo é medir quão adequada é a solução que está sendo avaliada. Naturalmente, o *fitness* muda para cada tipo de AG com o intuito de atender as necessidades de cada problema.

Para melhor entendimento dos termos apresentados, segue a Figura 29, onde é mostrada uma população com seus respectivos cromossomos, alelos, valores das variáveis e a posição (*Locus*) de cada alelo em cada cromossomo.

Figura 29 - Estrutura de dados e terminologia de um AG (Cromossomo com 9 genes e alelos binários)



Fonte: Adaptado de Coello, Lamont e Veldhuizen (2007).

Existem diferentes variedades de Algoritmos Genéticos que podem ser encontradas na literatura. Estes se distinguem basicamente em função de variações em procedimentos executados nos operadores de recombinação e/ou mutação empregados. Além disso, tais operadores tendem a obter o equilíbrio entre dois objetivos teoricamente conflitantes verificados em outros métodos de otimização: aproveitar as melhores soluções e ao mesmo tempo efetuar uma ampla exploração do espaço de busca (MICHALEWICZ, 1994). Os AGs compõem uma categoria de algoritmos que possuem métodos de busca eficazes, explorando todo o espaço de busca e ao mesmo tempo um ótimo aproveitamento das melhores soluções (MICHALEWICZ, 1994).

Nos AGs, a cada geração, nas melhores soluções detectadas pelo algoritmo, são dadas a estas o direito de se reproduzirem. Por outro lado, as soluções consideradas “ruins” são descartadas. Para realizar tal procedimento, ou seja, distinguir entre soluções “boas” e “ruins” é utilizada uma função objetivo, cujo papel principal é o de simular a influência praticada pelo ambiente no indivíduo. Neste Trabalho, a função objetivo utilizada para o AG é definida na equação (174).

### 5.3.2 Mecanismos de seleção de indivíduos

Os mecanismos de seleção utilizados no AG são fundamentados nas teorias de Darwin, ou seja, “o mais apto sobrevive”. Em outras palavras, indivíduos que possuem os melhores indicadores no cálculo do *fitness* devem ser utilizados para se reproduzirem. Essencialmente, existem dois mecanismos de seleção de indivíduos utilizados nos AGs: os que são baseados na proporção e os que são fundamentados nos valores que são encontrados para o *fitness*.

Na literatura existem diversos mecanismos de seleção de indivíduos. Cada mecanismo, dependendo do caso, possui suas vantagens e desvantagens para serem utilizados nos AGs. Dentre eles, os mais utilizados na literatura para selecionar indivíduos para as próximas gerações são o Método da Roleta (GOLDBERG, 1989), a Seleção Elitista (FOGEL, 1994; MICHALEWICZ, 1994; JONH, 2006), o Rank (MICHALEWICZ, 1994) e a Seleção por Torneio (GOLDBERG, 1989). Nesse trabalho, a seleção de indivíduos se dá pelo mecanismo de seleção por torneio.

### 5.3.3 Algoritmo genético com elitismo

O método Elitismo é uma característica que pode ser incorporada ao AG com o objetivo de reter um determinado número dos melhores indivíduos a cada geração (MITCHELL, 1998). Consiste em selecionar um determinado número (*ni*) de melhores indivíduos de determinadas populações para serem utilizados posteriormente na reprodução. O objetivo é gerar novos indivíduos com características genéticas derivadas dos melhores indivíduos. Parte dos indivíduos selecionados é copiada para a nova população. O método caracteriza-se pela elevada pressão seletiva, isto é, pelo fato de selecionar apenas um grupo dos melhores indivíduos a cada geração. Isto pode levar à diminuição da diversidade da população, pois os novos indivíduos são sempre gerados a partir dos melhores indivíduos, que em sua maioria, podem ser os mesmos durante várias gerações.

No Algoritmo 2 são apresentados os principais passos de um AG com Elitismo que

foi utilizado neste trabalho. Inicialmente observa-se que todos os indivíduos contidos na população inicial ( $P$ ) são integralmente substituídos por seus sucessivos descendentes ( $P'$ ) os quais são gerados pelo processo de seleção e aplicação dos operadores genéticos de mutação e recombinação. Desta forma, é possível afirmar que toda a geração inicial formada pelos “pais” é completamente alterada pelos seus descendentes (“filhos”). Isto pode acarretar a eliminação de excelentes indivíduos durante a execução do AG.

---

**Algoritmo 2** Algoritmo Genético com Elitismo
 

---

- 1: **Especificar Parâmetros:** Número de indivíduos da população  $P$  ( $n_{pop}$ ), número máximo de gerações ( $ng$ ), tipo de codificação, taxas de recombinação e mutação,  $i \leftarrow 0$ ;
  - 2: Gerar uma população aleatória  $P$ ; avaliar cada indivíduo da população;
  - 3: Atualizar a incumbente;
  - 4: **while**  $i < ng$  **do**
  - 5:     Inicializar a nova população  $P'$  como vazia;
  - 6:     **while**  $P'$  não estiver completa **do**
  - 7:          $E_{pop} \leftarrow P$
  - 8:         Selecionar 2 indivíduos de  $P$  pelo método de seleção por torneio;
  - 9:         Aplicar o operador de recombinação para obter dois indivíduos novos;
  - 10:         Aplicar o operador de mutação;
  - 11:         Adicionar os dois novos indivíduos a  $P'$ ;
  - 12:     **end while**
  - 13:     Avaliar cada indivíduo da nova população  $P'$ ;
  - 14:     Atualizar a incumbente;
  - 15:      $P \leftarrow P'$ ;
  - 16:     Avaliar  $E_{pop}$ ;
  - 17:     Avaliar  $P'$ ;
  - 18:     Armazenar os  $n_{pop}$  melhores indivíduos encontrados em  $E_{pop}$  e  $P'$  em  $P_E$ ;
  - 19:      $P \leftarrow P_E$ ;
  - 20:      $i \leftarrow i + 1$ ;
  - 21: **end while**
- 

Após a etapa de recombinação e mutação uma nova população é formada, denominada  $P'$ . A adição do Elitismo no AG não exclui estas etapas e sim, avalia todos os  $n_{pop}$  indivíduos de  $P$  e  $P'$  separadamente e ordena os  $n_{pop}$  melhores indivíduos em uma população utilizada denominada  $P_E$ .

Neste trabalho, as variáveis utilizadas para representar os indivíduos são reais. De fato, no AG idealizado por Holland (1992), as populações iniciais são codificadas por meio de arranjos binários de tamanho fixo. Contudo, conforme argumenta Michalewicz (1994), verifica-se que em problemas de otimização numérica representados por parâmetros reais ou inteiros, os AGs tendem a apresentar uma performance bem melhor que os apresentados quando os parâmetros dos AGs são representados por codificação binária, já que parâmetros representados por codificação binária, em geral, tem desempenho insatisfatório quando é requerido destes alta

dimensionalidade ou precisão numérica (MICHALEWICZ, 1994).

Assim como no PSO, no AG com Elitismo o objetivo é resolver problema de satisfação de restrição (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003), em que os amortecimentos desejados são considerados restrições do problema e qualquer ajuste fornecido aos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD que forneçam os amortecimentos desejados são considerados uma solução. Os amortecimentos mínimos desejados e o número máximo de cálculos da função objetivo são prontamente apresentados no Capítulo 6.

Para as simulações realizadas no Capítulo 6 com AG, considerou-se uma população ( $n_{pop}$ ) de 20 indivíduos, seleção por torneio, taxa de mutação fixa de 5% e uma recombinação entre os indivíduos selecionados de apenas um ponto.

#### 5.4 ALGORITMO GENÉTICO DE CHU-BEASLEY (AGCB)

As técnicas encontradas na literatura que fornecem soluções para os mais diversos de problemas de otimização, tendem a encontrar uma solução “ótima” para o problema. Em geral, esses métodos são baseados em técnicas clássicas de otimização ou em métodos estocásticos (meta-heurísticas). As técnicas clássicas normalmente fazem uso do cálculo de derivadas e também são classificadas como métodos exatos (FLOUDAS, 2013). Contudo, algumas dificuldades numéricas e de robustez tais como aparecimento de funções não-convexas, multimodalidade (existência de vários pontos de máximos e pontos de mínimos locais) podem inviabilizar a sua utilização em diversos problemas de otimização encontrados na literatura. Em contrapartida, as meta-heurísticas, que são métodos estocásticos normalmente fundamentadas em busca randômica, podem ser utilizadas para fornecer soluções a problemas com características multimodais, isto é, problemas de otimização em que necessariamente apresentam diversas soluções de ótima qualidade (vários ótimos locais) (ZHIGLJAVSKY; ŽILINSKAS, 2007). Tais problemas possuem natureza altamente não linear e nestes casos, métodos baseados na teoria clássica de otimização não são aconselháveis. Uma alternativa para esses problemas é utilizar técnicas baseadas em meta-heurísticas. Estas técnicas podem fornecer soluções de ótima qualidade com custo computacional relativamente pequeno. Além disso, dependendo do ajuste adotado na meta-heurística utilizada, pode-se evitar os mínimos locais ou máximos locais e efetuar uma busca mais robusta no espaço de soluções proposto para o problema (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

O objetivo desta Seção e uma das contribuições desse trabalho, é descrever e apresentar uma técnica de otimização fundamentada no algoritmo Genético proposto por Chu-Beasley (AGCB)

(CHU; BEASLEY, 1997). Posteriormente, esta técnica é modificada e será utilizada para ajustar de forma coordenada os parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento (ESPs e o conjunto IPFC-POD) para fornecer amortecimento desejado ao sistema elétrico de potência.

#### 5.4.1 Aspectos gerais do algoritmo genético de Chu-Beasley

O AGCB faz parte do rol de AGs disponíveis na literatura e, portanto, apresenta estrutura similar aos AGs tradicionais. O AGCB é um AG modificado e foi proposto por Chu e Beasley (1997) para solucionar o problema de atribuição generalizada ou GAP (*Generalised Assignment Problem*). Este consiste em encontrar uma solução com custo mínimo para o caso em que  $n$  tarefas são delegadas a  $m$  agentes ( $n \gg m$ ), em que cada tarefa só pode ser atribuída a exatamente um agente, sempre respeitando a capacidade de cada agente (restrições).

Conforme descrito na Seção 5.3, em geral os AGs “imitam” o processo evolutivo. Este processo é realizado aplicando-se os operadores genéticos a cada indivíduo da população. A escolha de cada indivíduo é feita tomando-se como referência o *fitness* calculado a partir de cada indivíduo da população. À solução com melhor adaptação é dada a oportunidade de se reproduzir. A partir das melhores soluções, são obtidos novos descendentes e as soluções que não se adaptaram à população são modificadas. O AG tradicional substitui os elementos da população corrente pelos novos descendentes encontrados a partir dos operadores genéticos. Isso pode acarretar a eliminação da atual população corrente, das melhores soluções já detectadas ou ainda originar soluções repetidas. As iterações e/ou gerações no AG tradicional é processada até que uma solução razoável seja constatada ou satisfaça uma condição de parada (número de gerações, por exemplo). Por fim, conforme já destacado neste Capítulo, em geral, as variáveis do problema de otimização são representadas por meio de codificação binária (HOLLAND, 1992).

Tanto o AG tradicional quanto o AGCB propõe que a geração dos indivíduos que compõem a população inicial sejam realizadas de forma aleatória. Vale destacar que nesta etapa do algoritmo, a população basicamente será composta de indivíduos infactíveis (soluções que não atendem aos critérios de convergência) e em geral bem distantes de soluções factíveis (soluções pertencentes à região factível). Além disso, em ambos os casos, são selecionados inicialmente dois elementos da população para que sejam aplicados os operadores de recombinação e mutação.

A proposta de Chu e Beasley (1997), apresentada no Algoritmo 3 (Algoritmo 3) para o Algoritmo Genético, inclui a representação de uma proposta de solução de forma específica

para cada tipo de problema, avaliações de *fitness* (equação (172)) e *unfitness* (equação (173)) de forma separada e um procedimento de melhoria local. Além disto, propõe-se uma forma diferente de se substituir um indivíduo em uma população.

---

**Algoritmo 3** Algoritmo Genético de Chu-Beasley

---

- 1: **Especificar Parâmetros:** Número de indivíduos da população  $P$ , número máximo de iterações ( $nt$ ), tipo de codificação, manipulação das infactibilidades e taxas recombinação,  $i \leftarrow 0$ ;
  - 2: Gerar uma população inicial aleatória;
  - 3: Encontrar o *fitness* e *unfitness* de cada indivíduo da população corrente  $P$ ;
  - 4: Avaliar cada indivíduo da população;
  - 5: **while**  $i < nt$  **do**
  - 6:   Encontrar o *fitness* e *unfitness* da população corrente;
  - 7:   Implementar a seleção por torneio para escolher apenas duas soluções geradoras;
  - 8:   Implementar a recombinação de um ponto e preservar apenas um descendente;
  - 9:   Implementar a mutação do descendente preservado;
  - 10:   Implementar a fase de melhoria local no descendente;
  - 11:   Decidir se o descendente melhorado entra na população corrente;
  - 12:   Avaliar cada indivíduo da população corrente;
  - 13:    $i \leftarrow i + 1$ ;
  - 14: **end while**
  - 15: A solução do problema é a melhor solução da última população;
- 

Analisando o Algoritmo 3 e conforme são mostrados nos itens a seguir, pode-se detalhar de forma mais específica o AGCB. Tais especificidades estão elencadas de 1 – 10.

1. **Especificar Parâmetros:** Nesse passo, são discriminados pelo operador do programa, parâmetros de controle tais como tamanho da população, taxas de recombinação e mutação, etc.
2. **Características Genéticas:** Nesse passo é definido pelo operador o tipo de codificação, especificidades da formação da população inicial (restrições), tipo de seleção, manipulação das infactibilidades, etc.
3. **Gerar População Inicial:** Nesse passo são gerados os indivíduos que compõem a população inicial, respeitadas as devidas restrições impostas na formação desta população.
4. **Cálculo do *Fitness* e *unfitness*:** Nesse passo é realizado o cálculo da função de aptidão e armazenado em um vetor *fitness* bem como é realizado o cálculo das infactibilidades e seus dados armazenados no vetor *unfitness*.



5. **Seleção de dois Indivíduos:** No AGCB a escolha de dois indivíduos é realizada por Torneio.
6. **Recombinar e preservar um descendente:** Nesse passo, após a escolha de dois indivíduos, é realizada a recombinação e um descendente é mantido para o passo seguinte.
7. **Mutação:** Nesse passo, após a concepção de um descendente, é implementada a mutação.
8. **Melhoria local:** Nesse passo, após a mutação, é implementada a etapa de melhoria local até que uma melhora significativa no indivíduo seja alcançada.
9. **Substituir o Descendente Melhorado:** O algoritmo deve decidir se o descendente melhorado entrará na população. Caso isso ocorra, esse indivíduo melhorado substitui um elemento da população formada inicialmente no item 4.
10. **Critério de Parada:** Caso o critério de parada não seja satisfeito, retornar ao passo 4 ou encerrar o processo, caso contrário.

A seguir, são apresentados em detalhes algumas etapas do funcionamento do AGCB que se diferenciam dos AGs tradicionais.

#### 5.4.2 Manipulação das infactibilidades

No AGCB os valores obtidos para as infactibilidades (equação (173)) são armazenados em um vetor chamado *unfitness* enquanto que os valores encontrados para a função objetivo são preservadas em outro vetor denominado *fitness* (equação (172)). Pode-se definir o  $j$ -ésimo elemento do vetor *fitness* e *unfitness* conforme equações (172) e (173).

$$\text{fitness}_j = \min f(x_j) \quad (172)$$

$$\text{unfitness}_j = \sum_{i=1}^{nh} h_i(x_j) + \sum_{i=1}^{ng} \max(0, g_i(x_j)) \quad (173)$$

Nas equação (172)  $f$  é a função objetivo e é utilizada no processo de minimização de um problema de otimização. Seu propósito é encontrar uma solução “ótima” ( $x^*$ ) pertencente a uma região factível  $X \subset S$  ( $S \subset \mathbb{R}^n$  é espaço de busca), tal que  $f(x^*) \leq f(x), \forall x \in X$  e  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ , sendo esta sujeita as restrições de desigualdade  $g_i(x)$  e  $h_i(x)$ , equação (173), e limites das variáveis canalizadas  $l_j \leq x_j \leq u_j, j = 1, \dots, n$ .

No AGCB, *fitness* é utilizado exclusivamente no passo em que ocorre a seleção de dois indivíduos, enquanto que o *unfitness* somado ao valor do *fitness* são utilizados na etapa em que é realizada a atualização da população corrente.

### 5.4.3 Melhoria local e controle da diversidade na população

A atualização da população corrente também é um dos diferenciais do AGCB quando este é comparado ao AG tradicional. Após a recombinação em que são escolhidos dois indivíduos da população inicial e passar pelas etapas seguintes do algoritmo, este pode ser inserido na população corrente. A cada iteração, tal procedimento é realizado no AGCB para cada descendente. Esse procedimento permite incluir duas novas técnicas no funcionamento da meta-heurística: melhoria local no descendente gerado a partir da recombinação e o devido controle da diversidade.

A melhoria local sugerida para o AGCB no descendente gerado pode ser realizada por uma técnica sofisticada ou por uma busca local mais acessível. Tal escolha deve sempre estar respaldada na análise das características de cada problema a ser otimizado. Além disso, quando ocorre a substituição de um indivíduo da população corrente pelo descendente gerado, há um controle absoluto da diversidade, isto é, todos os indivíduos da população são diferentes. Em outras palavras, caso o descendente encontrado em uma determinada geração seja exatamente igual a um indivíduo pertencente à população inicial, este é imediatamente descartado. Caso ocorra o contrário, seguem os passos que o algoritmo deve executar (UZINSKI; POSSAGNOLO; ROMERO, 2015):

- Descendente gerado é infactível: Neste caso, avalia-se se a infactibilidade do descendente gerado é inferior a infactibilidade máxima encontrada na população. Caso isso ocorra, procede-se a substituição, de outro modo o descendente gerado é eliminado.
- Descendente gerado é factível: Nesse caso, deve-se proceder a substituição na população do indivíduo no qual ocorre a maior infactibilidade. Caso seja verificado que todos os elementos da população sejam factíveis, substitui-se na população o indivíduo com o pior *fitness*, caso o *fitness* do descendente seja melhor que o pior indivíduo da população.

Os itens elencados acima garantem o controle total da diversidade da população no AGCB sendo, portanto, uma das grandes vantagens desse algoritmo, o que nem sempre ocorre nos AGs tradicionais.

## 5.5 ALGORITMO GENÉTICO DE CHU-BEASLEY ESPECIALIZADO

A seguir, itens 1 – 5, são apresentadas as propostas de modificações sugeridas ao AGCB.

1. **Implementar um passo de melhoria da população inicial:** Espera-se com esta modificação reduzir consideravelmente o tempo computacional na resolução de um problema de otimização se aos indivíduos que compõem a população inicial forem submetidos um algoritmo de busca local;
2. **População com tamanho reduzido:** Espera-se que a melhoria local proposta na população inicial faça com que os indivíduos dessa população sejam mais adaptativos. Desta forma, espera-se que um número reduzido de indivíduos que compõem essa população seja suficiente para fornecer soluções de excelente qualidade.
3. **Operador de variação:** a recombinação do AGCB original é modificada para considerar variáveis contínuas. Considera-se a geração de dois descendentes fazendo-se a mistura de componentes das duas soluções escolhidas no processo de seleção. A proposta consiste em fazer a combinação elemento por elemento das soluções, em que cada componente do primeiro descendente é obtida como sendo a soma das componentes das duas soluções geradoras, multiplicadas cada uma por um fator de ponderação aleatório  $\beta$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$ , de forma que a soma dos dois fatores seja igual a um (utiliza-se  $\beta$  e  $(1 - \beta)$ );
4. **Perpetuar somente o descendente que possui o melhor valor de *fitness*:** Originalmente, no AGCB, a seleção do descendente que será melhorado pelos operadores genéticos é aleatória. Propõe-se nesta etapa que o descendente com o melhor valor encontrado na função de aptidão seja perpetuado. Espera-se nesse caso que soluções de melhor qualidade sejam obtidas com a implementação desta etapa. Selecionado o descendente, este é submetido a um teste de substituição para verificar se este entrará ou não na população corrente;
5. **Excluir a etapa de mutação:** A finalidade da mutação nos AGs tradicionais e no AGCB é fazer com que algumas características que não estão presentes originalmente na população gerada inicialmente possam eclodir quando estes são submetidos a alguma taxa de mutação nos indivíduos que compõem esta população. Contudo, com a implementação de uma busca local eficiente na população inicial e no descendente gerado, espera-se uma população mais diversificada e, portanto, sem necessidade de implementar o operador genético de mutação.

Para melhor entendimento dos itens elencados (1 a 5) é apresentada na Figura 4 o Algoritmo 4, onde é mostrado em detalhes o funcionamento do AGCBE.

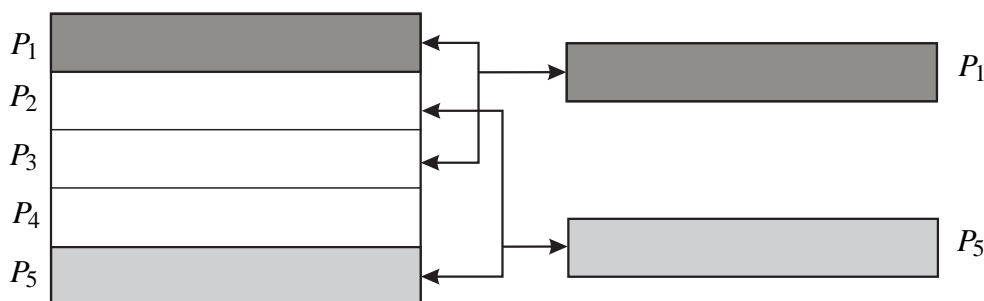
**Algoritmo 4** Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado

- 1: **Especificar Parâmetros:** Número de indivíduos ( $np$ ) da população  $P$ , número máximo de iterações ( $nt$ ), tipo de codificação, manipulação das infactibilidades e o operador de variação,  $i \leftarrow 0$ ;
- 2: Gerar uma população inicial aleatória  $P$ ;
- 3: Encontrar o *fitness* e *unfitness* de cada indivíduo da população corrente  $P$ ;
- 4: Implementar a fase de melhoria local na população corrente  $P$ ;
- 5: Avaliar cada indivíduo da população  $P$ ;
- 6: **while**  $i < nt$  **do**
- 7:   Selecionar 2 indivíduos pelo método de seleção por torneio e preservar o que possui o melhor *fitness*; Repetir;
- 8:   Implementar o operador de variação e preservar o descendente com o menor valor de *fitness*;
- 9:   Implementar a fase de melhoria local no descendente;
- 10:   Decidir se o descendente melhorado entra na população corrente  $P$  considerando o *fitness* e o *unfitness*;
- 11:   Avaliar o descendente melhorado;
- 12:    $i \leftarrow i + 1$ ;
- 13: **end while**
- 14: A solução do problema é a melhor solução da última população;

**5.5.1 Seleção de descendentes**

No AGCBE a seleção de indivíduos da população é realizada por torneio (GOLDBERG, 1989). Nessa etapa dois indivíduos são escolhidos casualmente da população (ver Figura 30). Seleciona-se o indivíduo da população melhor adaptado, isto é, como menor *fitness*. Repete-se o processo, e em seguida é selecionado o segundo indivíduo da população. Logo depois, os dois indivíduos escolhidos são submetidos ao operador de variação e logo depois, é gerado um descendente.

Figura 30 - Seleção por torneio no AGCBE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 30 é mostrada uma população de 5 indivíduos ( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ ). Inicialmente por torneio, dois indivíduos são selecionados. Neste caso, são selecionados os indivíduos  $P_1$  e  $P_3$ . Verifica-se em seguida qual destes possuem o menor *fitness* (nesse caso  $P_1$ ). Assim,  $P_1$  é

selecionado. Analogamente,  $P_2$  e  $P_5$  são escolhidos e observa-se por meio do menor *fitness* que  $P_5$  é candidato em potencial. Assim,  $P_1$  e  $P_5$  são escolhidos. Em seguida, a partir do operador de variação, são gerados dois novos descendentes e ao descendente com o melhor *fitness* é dada a chance de se reproduzir.

### 5.5.2 Busca local baseada em sensibilidades

A Busca Local é uma estratégia que consiste-se em discretizar o espaço de busca e realizar modificações aleatórias nas variáveis do problema.

Efetuada a operação de variação, considere que a solução  $x^r$  seja selecionada. Em seguida, define-se a função de avaliação de  $x^r$ ,  $F(x^r)$ , como representado em (175).

$$F(x^r) = f(x^r) + \rho h(x^r) \quad (174)$$

$$f(x^r) = \sum_{i=1}^n \left| \lambda_i^{calc} - \lambda_i^{des} \right| \quad (175)$$

$$h(x^r) = \sum_{i=1}^n \left| \xi_i^{calc} - \xi_i^{des} \right| \quad (176)$$

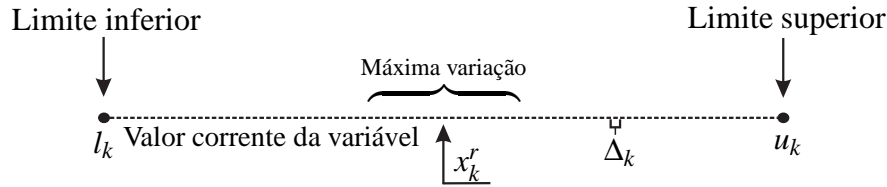
Em (174), a função de avaliação  $F(x^r)$  é composta pela função objetivo  $f(x^r)$  somada a uma infactibilidade  $h(x^r)$  em que  $\rho$  ( $\rho \gg 1$ ) é um parâmetro de penalização. Nas equações (175) e (176)  $n$  indica o número de autovalores de interesse. A função objetivo utilizada para o cálculo do amortecimento desejado para uma dada proposta de solução (autovalores de interesse), é definida tal como é mostrado em (174). Esta minimiza a distância entre os autovalores de interesse calculados ( $\lambda_i^{calc}$ ) e os autovalores de interesse desejados ( $\lambda_i^{des}$ ). Os autovalores desejados ( $\lambda_i^{des}$ ) são obtidos a partir da definição do amortecimento desejado ( $\xi_i^{des}$ ), enquanto que os amortecimentos calculados ( $\xi_i^{calc}$ ) e os autovalores de interesse calculados ( $\lambda_i^{calc}$ ) são determinados a cada iteração realizada pelo algoritmo representado na Figura 4, ajustando os parâmetros dos controladores PI, ESPs e IPFC-POD.

Para cada indivíduo da população é definido um vetor de sensibilidades,  $s = [s_1, s_2, \dots, s_{n_v}]$  ( $n_v$  é o número de variáveis do problema). Inicialmente  $s_i = 0$ , qualquer que seja  $i = 1, \dots, n_v$ . Em seguida, são determinados os valores de cada passo de discretização das variáveis ( $\Delta_i$ ) como mostrado em (177), onde  $u_i$  e  $l_i$  são, respectivamente, o limite superior e inferior da variável  $x_i^r$  e  $\Gamma$  é o número inteiro de discretizações.

$$\Delta_i = \frac{u_i - l_i}{\Gamma} \quad i = 1, \dots, n \quad (177)$$

Aleatoriamente, escolhe-se uma variável do problema e esta tem seu valor modificado. Suponha que  $x_k^r$  seja a variável escolhida. Em seguida,  $x_k^r$  é discretizada (ver Figura 31).

Figura 31 - Discretização de uma variável na melhoria local.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a discretização é determinado o valor da variação  $\delta_k$ , como mostrado na equação (178). Em (178),  $\varphi$  é um número aleatório ( $0 \leq \varphi \leq 1$ ),  $\gamma$  é um fator de escala e  $\lceil \cdot \rceil$  representa a função teto, que arredonda o valor de  $(\gamma\varphi)$  para o número inteiro imediatamente superior.

$$\delta_k = \lceil \gamma\varphi \rceil \Delta_k \quad (178)$$

Na equação (179) é mostrado o novo valor de  $x_k^r$ , após definição do valor de  $\delta_k$  na equação (178).

$$\tilde{x}_k^r = x_k^r \pm \delta_k \quad (179)$$

Em (179), inicialmente tem-se que o  $k$ -ésimo elemento do vetor de sensibilidades ( $s_k$ ) é zero. Com igual probabilidade, escolhe-se aumentar ou diminuir o valor da variável  $x_k^r$ . Dessa forma, é possível que  $\tilde{x}_k^r$  (ver equação (179)) possa violar o seus limites inferior  $l_k$  ou superior  $u_k$ . Por consequência, é necessário definir a correção (180) para a variável  $\tilde{x}_k^r$ .

$$\hat{x}_k^r = \begin{cases} \tilde{x}_k^r, & \text{se } l_k \leq \tilde{x}_k^r \leq u_k \\ l_k, & \text{se } \tilde{x}_k^r < l_k \\ u_k, & \text{se } \tilde{x}_k^r > u_k \end{cases} \quad (180)$$

Encontrada a nova solução ( $\hat{x}_k^r$ ), é calculada o valor da função de avaliação  $F(\hat{x}^r)$  para verificar a qualidade da nova proposta de solução, podendo ocorrer duas situações distintas:

- 1)  $F(\hat{x}^r) \leq F(x^r)$ : Caso  $x^r$  foi incrementada em (179), define-se  $s_k = 1$ . Caso contrário, se  $x_k^r$  foi decrementada em (179), define-se  $s_k = -1$ . Em qualquer caso, deve-se atualizar a solução corrente ( $x \leftarrow \hat{x}^r$ );
- 2)  $F(\hat{x}^r) > F(x^r)$ : Caso  $x_k^r$  foi incrementada em (179), define-se  $s_k = -1$ . Caso contrário, se  $x_k^r$  foi decrementada, define-se  $s_k = 1$ . Nesse caso, a solução corrente não é atualizada.

O procedimento descrito é então repetido e uma outra variável é escolhida para ter seu valor modificado. Repetem-se os procedimentos descritos em (177)–(180). Todavia, no passo (179)

deve ser verificado o valor armazenado para a variável  $s_k$ . Se  $l_k \leq x_k^r \leq u_k$  e  $s_k = 1$ , escolhe-se incrementar o valor de  $x_k^r$ ; se  $s_k = -1$  decrementa-se o valor de  $x_k^r$ . Se  $s_k = 0$  escolhe-se aleatoriamente entre incrementar ou decrementar  $x_k^r$ . Na ocasião em  $x_k^r = l_k$  ou  $x_k^r = u_k$ , deve-se considerar incrementar  $x_k^r$ , se  $x_k^r = l_k$ , ou decrementar  $x_k^r$ , se  $x_k^r = u_k$ , independente do valor armazenado em  $s_k$ .

Repete-se este procedimento (busca local) até que nenhuma melhoria seja obtida para o indivíduo ou define-se um número máximo de iterações sem a ocorrência de alguma melhoria ( $Y$ ). O fator  $\gamma$  definido na equação (178) é ajustado dinamicamente durante a busca local, isto é, a partir de  $\tau$  iterações,  $\tau < Y$ , sem ocorrência de melhoria da função de avaliação (equação (174)), atualiza-se  $\gamma$  em (178) ( $\gamma \leftarrow \frac{\gamma}{2}$ ).

O procedimento de busca local é utilizado tanto nos indivíduos da população inicial quanto na busca local no indivíduo recombinação (operador de variação). São utilizados nesse trabalho  $\rho = 10^3$ ,  $\Gamma = 100$  e  $\gamma = 20$ , encontrados a partir de experimentos realizados no AGCBE. Além disso, considerou-se uma população com 5 indivíduos nas simulações realizadas com o AGCBE. Para melhor entendimento do algoritmo de busca local proposta neste trabalho, é apresentado no Algoritmo 5 o pseudocódigo da metodologia utilizada.

## 5.6 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO SUJEITAS AS CONDIÇÕES DE RESTRIÇÃO

Partindo-se do pressuposto de o SEP possa ser modelado conforme foi mostrado no Capítulo 3, é possível determinar sua estabilidade ou não analisando os autovalores da matriz de estado  $A$  (equação (126)). Verificada esta importante característica dos SEPs, pode-se utilizar os modelos dinâmicos do ESP e do conjunto IPFC-POD, descritos no Capítulo 4, para fornecer amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas de baixa frequência (modos locais e modos interáreas). Assim, é extremamente importante que se faça o correto ajuste dos parâmetros dos controladores (constantes de tempo e ganhos) PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD para que estes, em conjunto, possam atuar inserindo amortecimento desejado (especificado em projeto) às oscilações eletromecânicas de baixa frequência presentes no SEP.

Analisando as Figuras 18 e 23 (Capítulo 4) observa-se que os modelos dinâmicos para os controladores ESP e o IPFC-POD são equivalentes. Estes controladores são representados por um ganho ( $K_{ESP}$  para os ESPs e  $K_{POD}$  para o conjunto IPFC-POD), um bloco de *washout* (filtro) representado por uma constante de tempo  $T_\omega$  e dois blocos de avanço e atraso de fase, representados por quatro constantes de tempo. Nesse trabalho é adotado para ambos os controladores  $T_1(T_{p1}) = T_3(T_{p3})$ ,  $T_2(T_{p2}) = T_4(T_{p4})$  (KUNDUR, 1994). As constantes de tempo

$T_\omega$  nos ESPs e  $T_{\omega_p}$  para o conjunto IPFC-POD são consideradas fixas, sendo apresentadas e identificadas no Capítulo 6 nos seus respectivos sistemas testes utilizados nas simulações.

Para a formulação da técnica de ajuste, considere um SEP em que encontram-se instalados  $n$  controladores ESPs em  $n$  máquinas síncronas e equipado com um conjunto IPFC-POD. Na Figura 32 é mostrada a representação de uma proposta de solução para o AGCBE (indivíduo), utilizada na formulação da população no AGCBE.

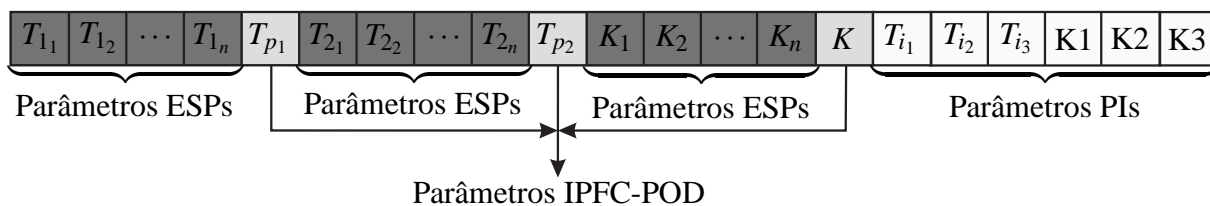


Figura 32 - Representação de um indivíduo utilizado nos algoritmos AGCBE, AG e PSO.

Observe que as primeiras  $n$  posições do indivíduo representado na Fig. 32 destinam-se às  $n$  constantes de tempo  $T_{1j}$  de  $n$  controladores PSSs instalados em  $n$  geradores síncronos. A posição  $n + 1$  refere-se à constante de tempo  $T_{p1}$  do conjunto IPFC-POD. Mantendo essa mesma ordem são representadas as  $n$  constantes de tempo  $T_{2i}$  e em seguida,  $T_{p2}$ ,  $n$  ganhos  $K_{ESP}$  ( $K_1, \dots, K_n$ ) e o ganho  $K_{POD}$  ( $K$ ). As últimas seis posições do indivíduo são reservadas aos parâmetros dos controladores PIs ( $T_{ij}$  e  $K_j$ ,  $j = 1, 2, 3$ ).

Os indivíduos pertencentes a uma população inicial ou melhorada pelo AGCBE tal como representado na Figura 32, devem estar sujeitos às restrições impostas pelo conjunto de inequações (181) e (182).

$$T_{1_n}^{\min} \leq T_{1_n} \leq T_{1_n}^{\max}, T_{2_n}^{\min} \leq T_{2_n} \leq T_{2_n}^{\max}, K_{ESP}^{\min} \leq K_{ESP} \leq K_{ESP}^{\max} \quad (181)$$

$$T_{p1}^{\min} \leq T_{p1} \leq T_{p1}^{\max}, T_{p2}^{\min} \leq T_{p2} \leq T_{p2}^{\max}, K_{POD}^{\min} \leq K_{POD} \leq K_{POD}^{\max} \quad (182)$$

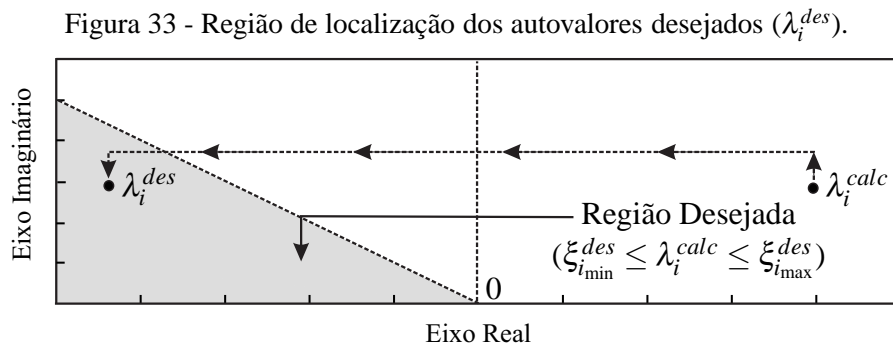
$$T_{ij}^{\min} \leq T_{ij} \leq T_{ij}^{\max}, K_j^{\min} \leq K_j \leq K_j^{\max} \quad (183)$$

Nas equações (181) a (183), todos os parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento (ESPs e do conjunto IPFC-POD) devem obedecer a certas restrições máximas e mínimas definidas pelo operador do programa. Estas limitações são baseadas em experimentos e dados disponíveis na literatura específica e podem variar de acordo com o sistema teste.

A função objetivo usada para obter o amortecimento desejado para uma proposta de solução foi definida na equação (175). Esta é especificamente utilizada no AG com Elitismo e no PSO. Por outro lado, as equações (174) a (176) são empregadas no cálculo do *fitness* e *unfitness* para o AGCBE. O deslocamento dos autovalores calculados, a cada iteração, para a região de



amortecimento desejado é apresentado na Fig. 33.



Nesse trabalho serão especificados duas faixas de amortecimentos desejados para todos aos autovalores de interesses calculados ( $\lambda_i^{calc}$ ). Os algoritmos serão avaliados (deve-se realizar os ajustes coordenados dos parâmetros dos controladores PIs, ESPs e IPFC-POD), em duas situações distintas: Num primeiro caso, os algoritmos deverão ser capazes de realizar os ajustes coordenados dos parâmetros e inserir um amortecimento mínimo desejado de 10% ( $\xi_{i_{\min}}^{des} \geq 10\%$ ) e, num segundo caso, inserir um amortecimento mínimo desejado de 15% ( $\xi_{i_{\min}}^{des} \geq 15\%$ ) tanto para os modos locais de oscilação quanto para o modo interárea.

## 5.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O foco principal deste Capítulo foi a apresentação de uma técnica de otimização (AGCBE) baseada nos AG. Posteriormente (Capítulo 6), esta técnica será utilizada para realizar os ajustes dos parâmetros (constantes de tempo e ganhos) dos controladores PI e suplementares de amortecimento (ESPs e do conjunto IPFC-POD), sendo seu desempenho comparado a outros dois algoritmos clássicos de otimização disponíveis na literatura (AG com Elitismo e o PSO).

Inicialmente foi apresentado o *Particle Swarm Optimization* e Algoritmo Genético com Elitismo. Foram enunciados os conceitos básicos e algumas definições sobre estes algoritmos. Em seguida, baseado nos AGs, foi apresentado o AGCB. Este algoritmo possui algumas características (manipulação das infactibilidades, melhoria local e o controle total da diversidade na população) que o diferenciam dos AGs tradicionais e o credencia a fornecer melhores respostas ao problema a ser resolvido neste trabalho.

Por fim, foi apresentado o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado baseado em uma busca local eficiente. Foram propostas modificações no AGCB (passo de melhoria da população inicial, operador de variação, manutenção do descendente com o melhor valor de *fitness*) com o propósito de que estas modificações tornem o algoritmo mais eficiente, ou seja, seja capaz de realizar os ajustes dos parâmetros dos controladores suplementares de

amortecimento e fornecer amortecimento desejado ao SEP. A eficácia do AGCBE será avaliada no Capítulo 6, testado em três sistemas testes: *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001), Simétrico de Duas Áreas (KUNDUR, 1994) e Sul Brasileiro (VALLE, 2014).

**Algoritmo 5** Busca Local

---

```

1: Especificar Parâmetros:  $\rho, \Gamma, \gamma, \tau, \Upsilon$ ; Inicializar o vetor de sensibilidade,  $\mathbf{s}$ , com todas
   posições iguais a zero; Calcular o passo de discretização de cada variável;  $\Delta_i \leftarrow (u_i - l_i)/\Gamma, i = 1, \dots, n_v; t \leftarrow 0; m \leftarrow 0$ ;
2: while  $t \leq \Upsilon$  do
3:   Escolher aleatoriamente uma variável  $k$  que terá o valor modificado,  $x_k^r$ , na solução
   inicial da busca local  $x^r$ ;
4:   Calcular o valor da variação  $\delta_k \leftarrow \lceil \gamma \phi \rceil \Delta_k$ ;
5:   Calcular o valor de  $\tilde{x}_k^r$ ;
6:   if  $l_k < x_k^r < u_k$  then
7:     if  $s_k = 0$  then
8:       Escolher incrementar ou decrementar o valor de  $x_k^r$ :  $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r \pm \delta_k$ , com igual
       probabilidade;
9:     else if  $s_k = 1$  then
10:       $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r + \delta_k$ ;
11:    else
12:       $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r - \delta_k$ ;
13:    end if
14:  else if  $x_k^r = l_k$  then
15:     $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r + \delta_k$ ;
16:  else
17:     $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r - \delta_k$ ;
18:  end if
19:  Verificar se a variável  $\tilde{x}_k^r$  pertence ao intervalo  $[l_k, u_k]$ ;
20:  if  $l_k < \tilde{x}_k^r < u_k$  then
21:     $\hat{x}_k^r \leftarrow \tilde{x}_k^r$ ;
22:  else if  $\tilde{x}_k^r < l_k$  then
23:     $\hat{x}_k^r \leftarrow l_k$ ;
24:  else
25:     $\hat{x}_k^r \leftarrow u_k$ ;
26:  end if
27:  Montar uma nova solução  $\hat{x}^r$ , copiando  $x^r$  com o valor de  $\hat{x}_k^r$  na posição  $k$ ;
28:  Calcular a função de avaliação da nova solução,  $F(\hat{x}^r)$ ;
29:  Atualizar a solução corrente e a posição  $k$  do vetor  $\mathbf{s}$ ;
30:  if  $F(\hat{x}^r) < F(x^r)$  then
31:     $x_k^r \leftarrow \hat{x}_k^r; F(x^r) \leftarrow F(\hat{x}^r); s_k \leftarrow 1$  if  $x_k^r$  foi incrementado;  $s_k \leftarrow -1$  caso
    contrário;  $m \leftarrow 0$ ;
32:  else
33:     $s_k \leftarrow -1$  if  $x_k^r$  foi incrementado;  $s_k \leftarrow 1$  caso contrário;  $m \leftarrow m + 1; t \leftarrow t + 1$ ;
34:  end if
35:  if  $m > \tau$  then
36:     $\gamma \leftarrow \gamma/2; m \leftarrow 0$ ;
37:  end if
38: end while

```

---



## 6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são apresentados os resultados de simulações realizadas em três sistemas testes: *New England*, Simétrico de Duas Áreas e Sul Brasileiro. O objetivo é avaliar a eficácia do algoritmo proposto (AGCBE) no ajuste dos parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento (ESPs e o conjunto IPFC-POD) frente a outros dois algoritmos clássicos de otimização disponíveis na literatura (AG e o PSO) e validar o modelo de injeção de potência e corrente proposto para o IPFC. As simulações serão divididas em duas etapas: uma análise estática e outra dinâmica.

No que se refere a análise estática, serão identificadas quais barras do sistema possuem perfil de tensão abaixo de 0,95 pu (ou acima de 1,05 pu). Em seguida, o IPFC é instalado nas imediações dessas barras e por meio do controle de fluxos de potências ativa e reativa nas linhas em que o dispositivo encontra-se instalado espera-se o melhoramento do perfil de tensão nessas respectivas barras.

Em relação a parte dinâmica, a metodologia proposta é comparada frente aos demais algoritmos descritos no Capítulo 5 (AGCBE, AG com Elitismo, e o PSO). Todos os algoritmos serão submetidos a realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento considerando dois cenários distintos: 1) Inserir, no mínimo, 10% de amortecimento desejado aos modos locais e interárea verificados em ambos os sistemas testes ( $\xi_{i_{\min}}^{des} \geq 10\%$ ); 2) Inserir, no mínimo, 15% de amortecimento desejado aos modos locais e interárea verificados em ambos os sistemas testes ( $\xi_{i_{\min}}^{des} \geq 15\%$ ).

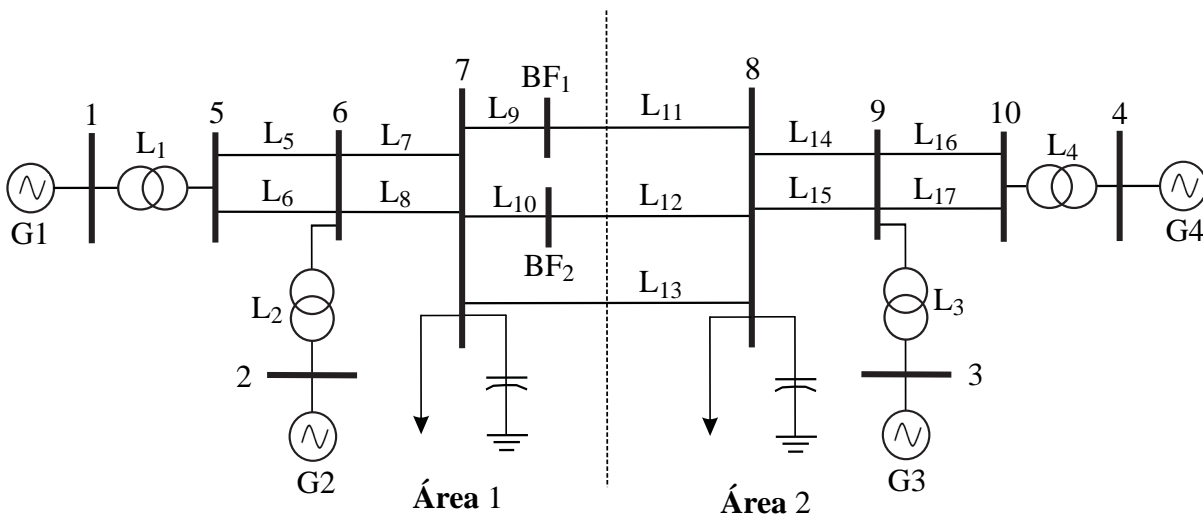
Todas as simulações efetuadas neste Capítulo foram realizadas no ambiente Matlab<sup>®</sup>, sem o auxílio de qualquer *toolbox*, por meio de implementação dos algoritmos AGCBE, AG e o PSO (Capítulo 5) e das equações apresentadas neste trabalho nos Capítulos 2, 3, 4. Os resultados foram simulados em um computador com as seguintes configurações: Intel Core i5-3230M, 64-bit, 2,60 GHz, 12 GB de RAM com 4 núcleos de processamento. Os dados de geração, das linhas de transmissão e carregamentos do sistema Simétrico de Duas Áreas, *New England* e Sul Brasileiro podem ser encontrados no Anexo A, B e C.

### 6.2 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

O sistema Simétrico de Duas Áreas (ver Figura 34), possui 2 áreas, 4 geradores, 17 ramos e 12 barras, já incluídas duas novas barras (barras BF<sub>1</sub> e BF<sub>2</sub>) e duas novas linhas de

transmissão (linhas  $L_9$  e  $L_{10}$ ) (estas barras e linhas foram incluídas exclusivamente para se realizar simulações com o IPFC). Além disso, este sistema é caracterizado por possuir longas linhas de transmissão entre as barras 7 e 8 de natureza altamente indutivas. Este fato, conforme já mencionado, contribui para o aparecimento de modos oscilatórios (modo interárea), o que pode fazer com que o sistema se torne instável. O leitor pode averiguar os dados das barras, carregamentos do sistema, dados dos geradores e do sistema de transmissão para o caso base no Anexo A.

Figura 34 - Diagrama unifilar do sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Adaptado de Kundur (1994).

Na Figura 35 é mostrado em detalhes o local de instalação do IPFC entre as barras 7 e 8. Conforme já explicitado no Capítulo 2, neste trabalho este dispositivo será representado por dois conversores, um primário (VSC1) e outro secundário (VSC2), em série, já inclusas suas respectivas reatâncias de acoplamento com as linhas  $L_9$  e  $L_{10}$ .

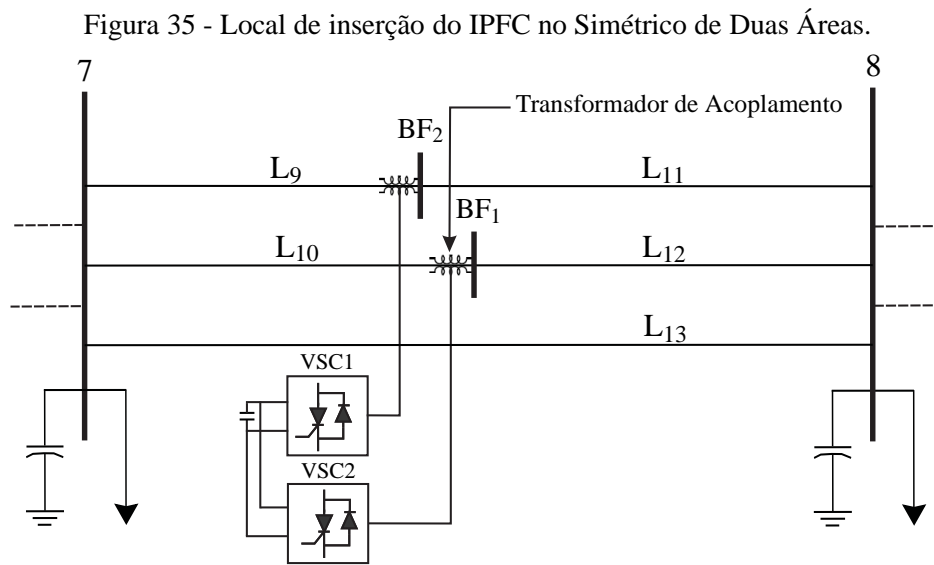
O caso base a que se refere considera já inclusas no sistema duas barras fictícias  $BF_1$  e  $BF_2$  entre as barras 7 e 8 bem como as respectivas reatâncias de acoplamento dos transformadores  $(x_{in}, n = j, k)$  com valores estipuladas em 0,01 pu. Considera-se ainda que o IPFC está incluído no sistema, contudo não exerce qualquer controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa do sistema Simétrico de Duas Áreas (sem atuação). Para esta situação, as variáveis de inicialização do IPFC são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis da estrutura de controle do IPFC para o caso base - Simétrico de Duas Áreas.

$V_{p_j}$	$V_{p_k}$	$V_{q_j}$	$V_{q_k}$
$7,2235e-006$	$3,6717e-005$	$4,8724e-005$	$-6,5298e-005$

Fonte: Dados Oriundos da Pesquisa.

Ao analisar a Tabela 1 pode-se observar que as variáveis que são utilizadas para representar os conversores ( $V_{p_j}$ ,  $V_{p_k}$ ,  $V_{q_j}$  e  $V_{q_k}$ ) são extremamente pequenas. Desta forma, é possível afirmar



Fonte: Elaborado pelo autor.

que estas não exercem qualquer controle nos fluxos de potências ativa e reativa do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Considerando a condição de operação do caso base são calculados todos os autovalores do sistema Simétrico de Duas Áreas, sendo que os modos oscilatórios de interesse ( $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ ) são mostrados na Tabela 2. A frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni} = \frac{|\lambda_i|}{2\pi}$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $\xi_i = -\frac{\sigma}{|\lambda_i|}$ ) associados a cada modo também são mostrados.

Tabela 2 - Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) do sistema Simétrico de Duas Áreas - caso base.

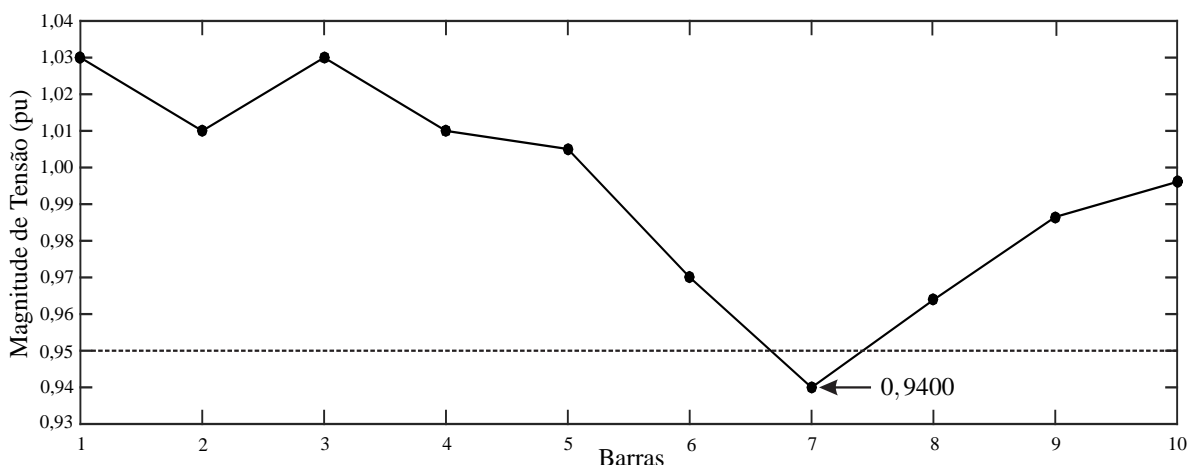
Sem Atuação do IPFC			
Modo	$\sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0,3427 \pm j6,2961$	0,0544	1,0035
$\lambda_2$	$-0,2788 \pm j5,9056$	0,0472	0,9409
$\lambda_3$	$0,0495 \pm j4,4374$	-0,0112	0,7063

Fonte: Dados Oriundos da Pesquisa.

Na Tabela 2 os autovalores de interesse são identificados como  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$ , sendo dois modos locais ( $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ) e um interárea ( $\lambda_3$ ). Esta classificação se dá por meio da análise das respectivas frequência natural não amortecida de cada modo de interesse. Para este ponto de operação, e após a análise dos modos oscilatórios (também mostrados na Tabela 2), pode-se afirmar que o sistema Simétrico de Duas Áreas é instável, visto que o modo interárea possui parte real positiva (caracterizado com amortecimento negativo). Além disso, este sistema é caracterizado pelo baixo amortecimento dos modos locais de oscilação.

Na Figura 36 são apresentados o perfil de tensão do sistema simétrico de duas áreas para o caso base.

Figura 36 - Perfil de tensão para o caso base no sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao efetuar uma análise os dados apresentados na Tabela 2 e na Figura 36 percebe-se que o sistema simétrico de duas áreas possui dois problemas a serem solucionados. O primeiro problema está relacionado com a instabilidade do sistema, verificado na Tabela 2 para o modo interárea. Segundo, e não menos importante, refere-se à subtensão identificada na barra 7 (0,9400 pu). Para resolver esses dois problemas diagnosticados para o sistema simétrico de duas áreas, foi proposto nesse trabalho a instalação de um IPFC equipado com um controlador POD e controladores ESPs. Espera-se com estas ações resolver o problema da instabilidade verificada para o modo interárea, inserir amortecimento adicional aos modos locais de oscilação e ao efetuar o correto controle de fluxos de potências de ativa e reativa entre as barras 7 e 8 espera-se corrigir o problema de tensão para a barra 7.

### 6.2.1 Localização dos dispositivos de controles (ESPs e IPFC-POD)

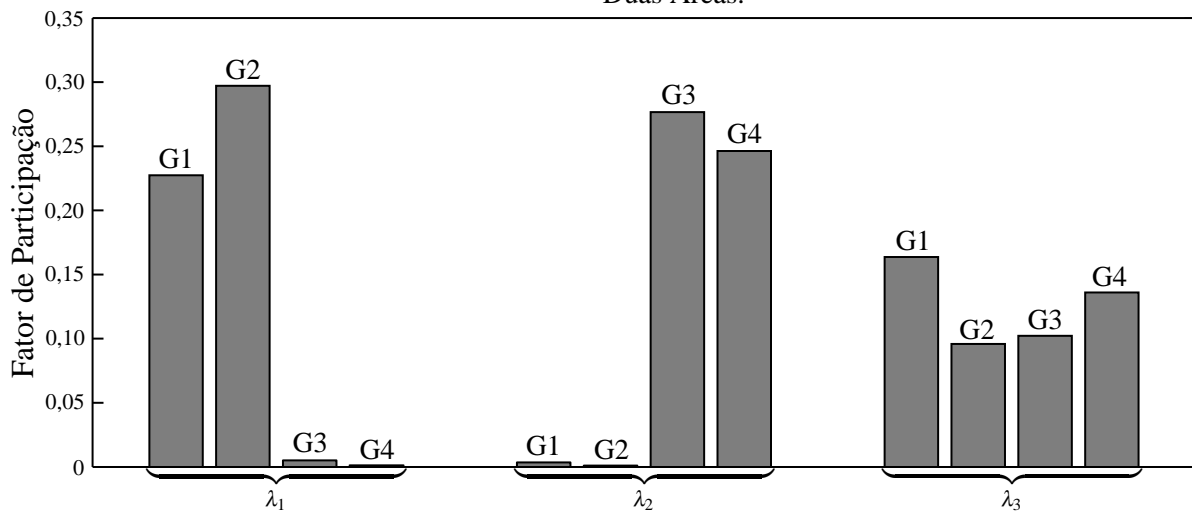
Analisando a Figura 35 verifica-se que o conjunto IPFC-POD foi instalado entre as barras 7 e 8. Esta escolha é baseada nos dados mostrados na Figura 36, de onde é possível inferir que a barra 7 possui, dentre todas as barras do sistema simétrico de duas áreas, o pior perfil de tensão (0,9400 pu), ou seja, fora da margem de segurança para os níveis de tensão aceitáveis que é entre 0,95 e 1,05 pu. A escolha do local de instalação do IPFC baseia-se justamente nesta tese, ou seja, o dispositivo deverá efetuar o correto controle nos fluxos de potências ativa e reativa nas linhas em que encontra-se instalado (entre as barras 7 e 8) e, conseqüentemente, melhorar o perfil de tensão na barra 7. Outro fato a ser observado na Figura 35 é que há três linhas entre as barras 7 e 8. Duas delas terão seus fluxos controlados pelo IPFC ( $L_{11}$  e  $L_{12}$ ) e os fluxos da outra linha,  $L_{13}$ , não serão controlados pelo dispositivo. Este fato possibilita ter uma linha de folga, tendo liberdade no controle de ativos e reativos pelo dispositivo IPFC. Por fim,



conforme os dados da linha de transmissão que se encontram no Anexo A (Tabela 29), as linhas de transmissão que interligam as barras 7 e 8 são longas linhas em paralelo com altas reatâncias indutivas (maiores sistema), o que favorece o aparecimento de um modo interárea de oscilação.

Em relação aos ESPs é necessário determinar em quais geradores do sistema Simétrico de Duas Áreas serão alocados esses dispositivos. Para isto foram utilizados os Fatores de Participação (KUNDUR, 1994), conforme mostrados na Figura 37.

Figura 37 - Fatores de participação de cada gerador em cada modo oscilatório do sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Analisando a Figura 37 conclui-se que o gerador 2 (G2) é que possui maior participação no modo local 1 ( $\lambda_1$ ), enquanto que o gerador 3 (G3) é o mais participativo no modo local 2 ( $\lambda_2$ ). Como era de se esperar, verifica-se que todos os geradores (G1, G2, G3 e G4) possuem participação no modo oscilatório  $\lambda_3$ , característica comum de um modo interárea.

Desta forma, com o objetivo de garantir que os modos locais  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  atinjam amortecimentos desejados, os geradores G2 e G3 serão equipados com controladores ESPs.

### 6.2.2 Influência do IPFC no controle de tensão e nos fluxos de potência no sistema Simétrico de Duas Áreas

Nesse trabalho, conforme explicitado no Capítulo 2, o IPFC efetuará o controle de dois fluxos de potências ativas ( $P_{ref_j}$  e  $P_{ref_k}$ ) e de um fluxo de potência reativa ( $Q_{ref_j}$ ). Em particular, no sistema mostrado na Figura 34, o IPFC controlará os fluxos de ativos nas linhas indicadas por  $L_{11}$  e  $L_{12}$ , enquanto que o controle do fluxo de reativo ( $Q_{ref_j}$ ) é executado somente na linha  $L_{11}$ .

Para esta simulação (ajuste dos fluxos de potência ativa e reativa), os valores de ganhos (pu)

e constantes de tempo (segundos) utilizados nos controles do IPFC (controladores PI) foram considerados fixos, sendo estes encontrados empiricamente, os quais podem ser analisados na Tabela 3.

Tabela 3 - Ganhos e constantes de tempos dos controladores PIs no sistema Simétrico de Duas Áreas.

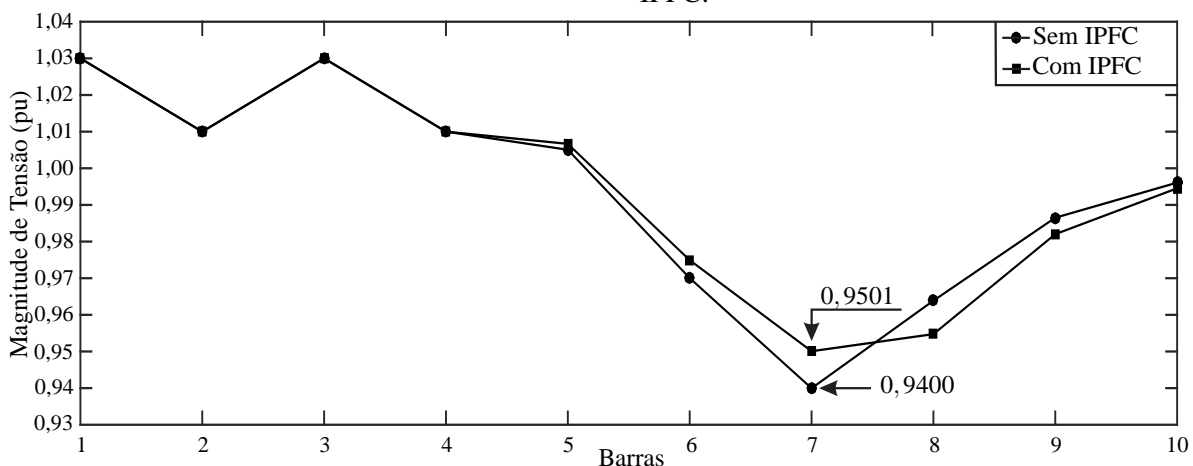
Ganhos (pu)			Tempos (s)		
$K_{p1}$	$K_{p2}$	$K_{p3}$	$T_{1i}$	$T_{2i}$	$T_{3i}$
3,3492	2,6010	1,2761	0,0872	0,0450	0,1000

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Determinados os parâmetros dos controladores PIs, mostrados na Tabela 3, é necessário encontrar um ajuste para o controle de fluxo de potência ativa e reativa ( $P_{refj}$ ,  $P_{refk}$  e  $Q_{refj}$ ) e, portanto, tentar solucionar primeiramente o problema de afundamento de tensão verificado na barra 7 (Figura 36).

Para corrigir o problema de afundamento de tensão, foi proposto um incremento de 11,02 MW no fluxo de potência ativa na linha L<sub>11</sub> e 11,02 MW para a linha L<sub>12</sub>, sendo especificados  $P_{refj} = 75,83$  MW e  $P_{refk} = 75,83$  MW. Em relação ao fluxo de potência reativa, foi feita uma injeção de 54,91 MVar pelo conversor primário VSC1 na linha L<sub>11</sub>, sendo especificado para este caso  $Q_{refj} = -79,87$  MVar. Os resultados desses ajustes nos fluxos podem ser analisados na Figura 38. Vale destacar que o modelo proposto para o IPFC neste trabalho não fornece ativos ao sistema. Executa sim uma transferência no fluxo de potência ativa entre as linhas do SEP em que se encontra instalado, por meio dos conversores séries (VSC1 e VSC2) e o restante do sistema. Dependendo da ocasião, pode aumentar ou diminuir a troca de potencia ativa entre os dois conversores.

Figura 38 - Perfil de tensão das barras do sistema Simétrico de Duas Áreas: sem e com a atuação do IPFC.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Analisando os dados mostrados na Figura 38 é possível verificar que o problema de

afundamento de tensão na barra 7 (0,9400 pu) foi solucionado (se tornou 0,9501 pu) pela atuação do IPFC quando efetuou o correto controle de fluxos de potências ativa e reativa entre as barras 7 e 8.

Na Tabela 4 são apresentados os valores das variáveis da estrutura de controle do IPFC, após o dispositivo efetuar o controle dos fluxos de potências ativa e reativa nas linhas especificadas.

Tabela 4 - Variáveis da estrutura de controle do IPFC após o controle dos fluxos nas linhas  $L_{11}$  e  $L_{12}$ .

$V_{p_j}$	$V_{p_k}$	$V_{q_j}$	$V_{q_k}$
0,1187	0,0545	-0,2406	0,0964

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Diferentemente dos dados apresentados na Tabela 1, os resultados da Tabela 4 comprovam que o IPFC passou a exercer o controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão do SEP, modulando as componentes do eixo direto e em quadratura das fontes de tensão série.

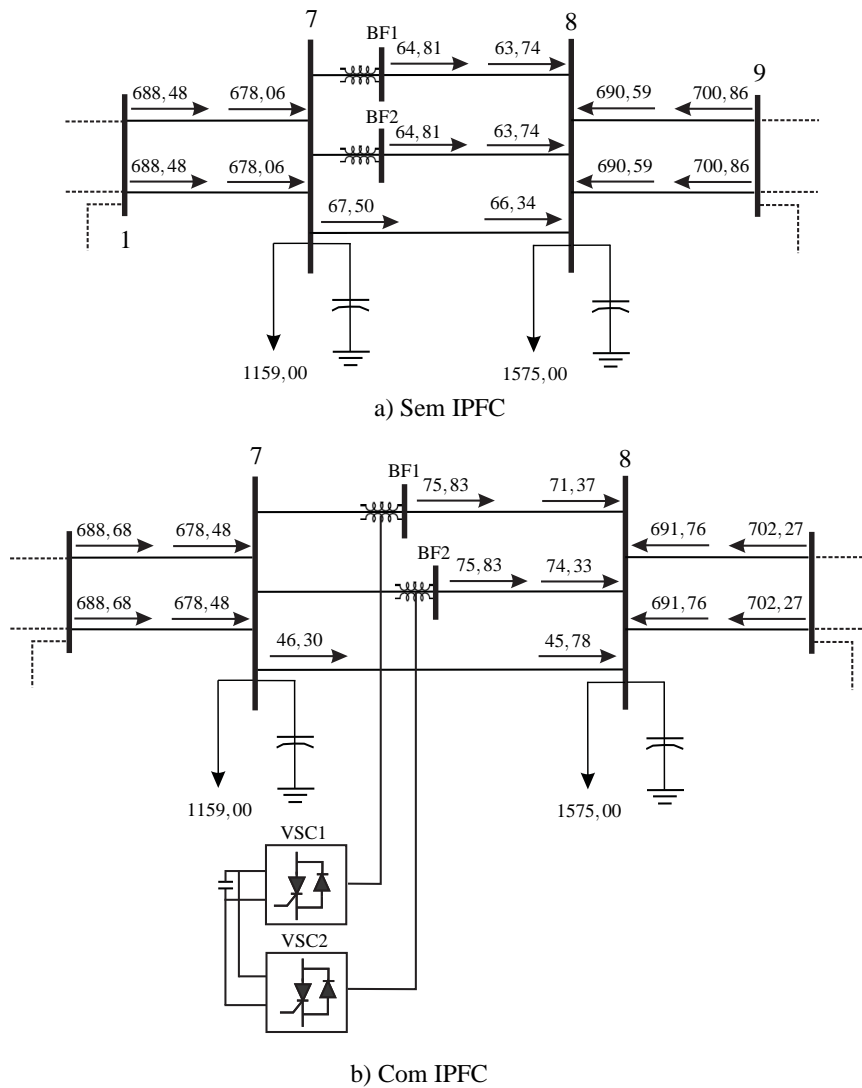
Na Figura 39 são apresentados os fluxos de potência ativa no sistema Simétrico de Duas Áreas sem a atuação do IPFC (a) e após a atuação do IPFC (b)). Analisando os fluxos após a inclusão do IPFC, é possível verificar que o dispositivo não fornece potência ativa ao SEP (restrição de invariância de potência ativa do IPFC), mas transfere (ou retira), através dos conversores série, parcela da potência ativa para as linhas nas quais os fluxos são controlados. Com os dados apresentados na Figura 39 é possível realizar o balanço nodal de potência ativa nas barras de instalação do IPFC e, desta forma, validar o controle dos fluxos realizado pelo dispositivo.

### 6.2.3 Ajustes dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e IPFC-POD no sistema Simétrico de Duas Áreas

Solucionado o primeiro problema (afundamento de tensão na barra 7) será avaliado a capacidade do dispositivo IPFC no que se refere ao amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência no sistema Simétrico de Duas Áreas. Para o caso base, os autovalores de interesse, frequências e seus respectivos coeficientes de amortecimento foram apresentados na Tabela 2. Considerando o novo carregamento do sistema, conforme mostrado nas Figuras 38 e 39, é calculada a nova matriz de estado e os resultados encontrados para os autovalores de interesse são listados na Tabela 5.

Analisando a frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) dos autovalores mostrados nas Tabelas 2 e 5, verifica-se a existência de dois modos locais ( $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ) e um modo interárea ( $\lambda_3$ ) com parte real positiva, o que caracteriza o sistema como instável. Além disso, comparando

Figura 39 - Controle dos fluxos de potência ativa realizado pelo IPFC no sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 5 - Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) do sistema Simétrico de Duas Áreas - com atuação do IPFC.

Com Atuação do IPFC			
Modo	$\lambda_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0,3648 \pm j6,2987$	0,0578	1,0041
$\lambda_2$	$-0,2621 \pm j5,9123$	0,0443	0,9419
$\lambda_3$	$0,0526 \pm j4,4684$	-0,0118	0,7112

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

os coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) associados aos três modos oscilatórios antes (Tabela 2) e após (Tabela 5) a atuação do IPFC verifica-se uma ligeira melhora do amortecimento associado ao modo local  $\lambda_1$ . Entretanto, a atuação do dispositivo influenciou negativamente no amortecimento dos outros dois modos ( $\lambda_2$  e  $\lambda_3$ ).

Conclui-se então que a atuação do IPFC resolveu o problema de afundamento de tensão na barra 7 (Figura 38), mas não foi eficiente em resolver o problema da instabilidade verificado no sistema Simétrico de Duas Áreas para o modo interárea. Para sanar este problema, deve-se utilizar uma técnica de otimização para ajustar de forma coordenada os parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento (ESPs e IPFC-POD) e, portanto, inserir amortecimento desejado ao sistema Simétrico de Duas Áreas.

Em todas as simulações realizadas com sistema Simétrico de Duas Áreas, deve destacar que o sinal de entrada escolhido para o controlador POD foi a variação da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) entre as barras 6 e 7 (ver Figura 34), cujo sinal pode ser obtido localmente. Os ESPs utilizam como sinal de entrada as variações da velocidade angular do rotor do gerador ( $\Delta\omega$ ) e são acoplados nas malhas de controles dos RATs dos geradores síncronos. Em todas as simulações foram adotados que  $T_\omega = T_{\omega_p} = 1$  segundo e considerou-se o carregamento do sistema após o controle dos fluxos de potência ativa e reativa realizados pelo IPFC (Figuras 38 e 39) e, conseqüentemente, os modos oscilatórios descritos na Tabela 5. Além disso, cada grandeza da proposta de solução (variáveis do problema de otimização) está sujeita à sua respectiva restrição, indicadas nas equações (184) a (186).

$$0,05 \leq T_{1_n} \leq 1,0; \quad 0,05 \leq T_{2_n} \leq 1,0 \quad 1,0 \leq K_{ESP_n} \leq 4,0 \quad (184)$$

$$0,05 \leq T_{p_1} \leq 1,0; \quad 0,05 \leq T_{p_2} \leq 1,0; \quad 0,05 \leq K_{POD} \leq 0,5 \quad (185)$$

$$0,001 \leq T_{i_j} \leq 0,10; \quad 0,1 \leq K_j \leq 5,0 \quad (186)$$

Nas equações (184) a (186),  $1 \leq j \leq 3$ ,  $n$  indica o número geradores síncronos equipados com ESPs,  $T_{1_n}$ ,  $T_{2_n}$  e  $K_{ESP_n}$ ,  $T_{p_1}$ ,  $T_{p_2}$  e  $K_{POD}$  são, respectivamente, as constantes de tempo (em segundos) e ganhos (em pu) dos controladores ESPs e POD, enquanto que  $T_{i_j}$  e  $K_j$  representam as constantes de tempo (em segundos) e ganhos (em pu) dos controlares PI.

### 6.2.3.1 Performance dos algoritmos AGCBE, PSO e AG no Simétrico de Duas Áreas

Nesta subseção é apresentado uma comparação entre os três métodos de otimização propostos neste trabalho: AGCBE, AG e o PSO. Conforme já exposto, objetiva-se realizar com os algoritmos propostos os ajustes coordenados dos parâmetros dos controladores ESPs, POD e PIs, e desta forma inserir amortecimento desejado ao sistema teste. As simulações foram realizadas considerando dois cenários distintos: No primeiro, inserir amortecimento desejado a todos os modos oscilatórios com no mínimo 10% de amortecimento ( $\xi_{i_{\min}}^{des1} \geq 10\%$ ) e no segundo, inserir amortecimento desejado a todos os modos oscilatórios com no mínimo 15% de amortecimento ( $\xi_{i_{\min}}^{des2} \geq 15\%$ ).

Em cada um dos algoritmos propostos foram realizados 100 testes, sendo que cada teste foi limitado a um número máximo de 2000 cálculos da função objetivo para cada algoritmo. No AGCBE são utilizadas as funções de avaliação mostradas em (174) a (176), enquanto que para o AG e o PSO foi utilizada a função objetivo descrita em (175). Em todas as simulações exibidas a seguir (Tabela 6), considera-se que os parâmetros dos controladores devem satisfazer as restrições (184) a (186).

Tabela 6 - Comparação de desempenho do AGCBE, PSO e AG no sistema Simétrico de Duas Áreas.

Algoritmo	Faixa de amortecimento (%)	Número de Soluções encontradas a cada 10 testes										Tempo de Convergência (s)			
		Médio	Mínimo	Máximo											
AGCBE	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	1,83	0,43	9,22
	$\geq 15$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	7,34	0,47	11,96
PSO	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	1,00	0,40	4,23
	$\geq 15$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	8,17	0,60	21,87
AG	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	1,03	0,43	5,63
	$\geq 15$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	28,87	0,48	105,32

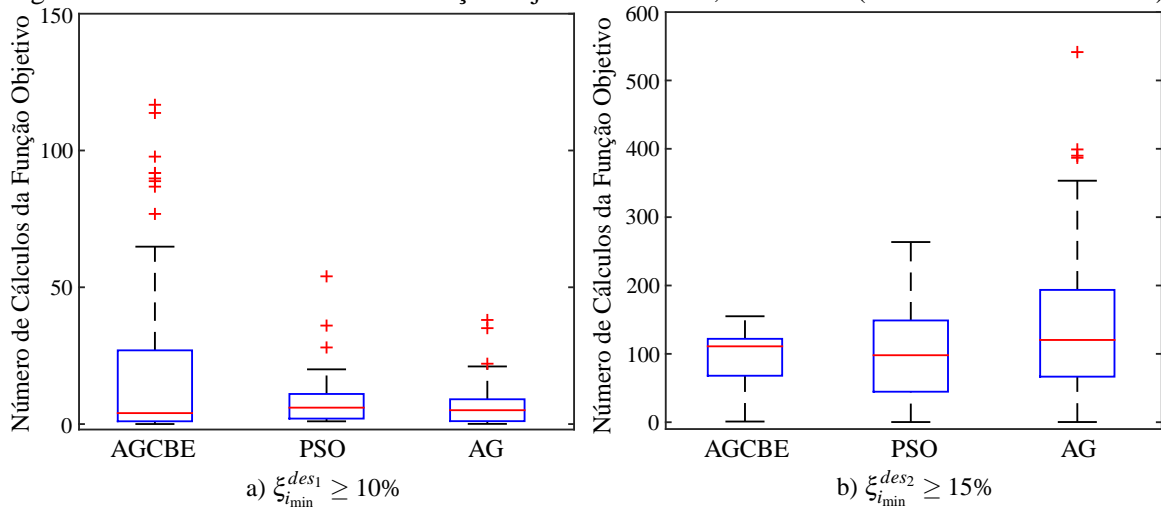
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A análise da Tabela 6 pode ser realizada em duas etapas. Num primeiro momento, verifica-se que todos os algoritmos propostos neste trabalho tiveram ótimo desempenho, obtendo convergência em 100% dos testes realizados, não restando dúvidas que até o presente momento todos os algoritmos podem ser credenciados como ferramentas na análise da estabilidade a pequenas perturbações. Num segundo momento, é analisado o desempenho de ambos os algoritmos com relação aos tempos computacionais obtidos nas simulações realizadas. Verifica-se que o PSO tem ligeira vantagem neste quesito quando a faixa de amortecimento desejada é de 10% ( $\xi_{i_{\min}}^{des_1} \geq 10\%$ ). Quando se aumenta a faixa de amortecimento ( $\xi_{i_{\min}}^{des_2} \geq 15\%$ ), o quadro se inverte e o AGCBE passa a ter melhor desempenho computacional quando os tempos são comparados.

Na Figura 40 é apresentado um gráfico de *Box Plot*. Um *Box Plot* pode ser representado por um retângulo (alinhado verticalmente ou horizontalmente). Na extremidade do retângulo existem duas semirretas (uma em cada um dos lados opostos do retângulo). Por definição, as extremidades dos retângulos são o primeiro quartis ( $Q1$ ) e o terceiro quartis ( $Q3$ ). A linha que secciona o retângulo é o segundo quartis ( $Q2$ ) ou também conhecida como mediana. Os valores que se posicionam fora da cauda de distribuição são chamados de *outside*.

Na Figura 40 caso a) o *Box Plot* do AGCBE apresenta uma mediana próxima de  $Q1$ , o que determina que a distribuição dos dados é positivamente assimétrica. Em contrapartida, o PSO e o AG estão com a mediana mais centralizada no retângulo o que indica que os dados possuem uma distribuição simétrica. Também é possível afirmar que para este caso o PSO e AG realizaram menos cálculos de sua função objetivo até a sua convergência quando os

Figura 40 - Número de cálculos da função objetivo: AGCBE, PSO e AG (Simétrico de Duas Áreas).



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

resultados são comparados com o AGCBE, pois o tanto o PSO quanto o AG são caracterizados por possuírem um intervalo mais compacto quando este é comparado ao AGCBE.

No caso b) o AGCBE possui uma mediana mais próxima de  $Q_3$ , o que indica que a distribuição dos dados é negativamente assimétrica. Por outro lado, tanto o PSO quanto o AG possuem uma distribuição simétrica dos dados. Ao contrário do que foi apresentado para o caso a), o AGCBE realiza menos cálculos de sua função objetivo até a alcançar sua convergência quando este dado é comparado ao PSO e o AG, pois é fácil de observar que o AGCBE possui um intervalo mais compacto para este caso.

Por fim, é fácil observar na Figura 40 que o AGCBE realiza em torno de 100 cálculos da função objetivo para encontrar uma resposta para ambas as faixas de amortecimentos propostos para o sistema Simétrico de Duas Áreas. Isso não ocorre com os demais algoritmos, já que tanto o PSO quanto o AG possuem uma distribuição mais variável dos dados. Em contrapartida, pode-se afirmar que o AGCBE possui uma distribuição mais uniforme e homogênea quando são comparados os cálculos da função objetivo em ambos os casos, enquanto que os outros algoritmos apresentados, PSO e AG, não possuem esta mesma eficiência.

Diante do exposto, é perceptível que ao aumentar o grau de complexidade das simulações, isto é, aumentar o amortecimento desejado, o AGCBE tem atuação destacada quando os resultados são comparados com o PSO e ao AG no ajuste dos parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimentos (ESPs e IPFC-POD), sendo portanto mais eficiente que dos demais algoritmos propostos neste trabalho quando os resultados são comparados para este sistema teste.

### 6.2.3.2 Análise da estabilidade a pequenas perturbações no sistema Simétrico de Duas Áreas

Conforme mostrado na Subseção 6.2.2, serão instalados dois ESPs nos geradores G2 e G3 e um conjunto IPFC-POD entre as barras 7 e 8. No que tange a análise da estabilidade à pequenas perturbações o objetivo é inserir amortecimento desejado aos modos oscilatórios do tipo local e interárea presentes no sistema Simétrico de Duas Áreas. Conforme analisado na Subseção 6.2.3, este sistema possui dois modos locais fracamente amortecidos e um modo interárea com parte real positiva o que leva o sistema a instabilidade.

Em relação a escolha do algoritmo que será utilizado para realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores PIs e suplementares de amortecimento ESPs e o conjunto IPFC-POD, é escolhido o AGCBE. Esta escolha é determinada a partir da análise apresentada na Tabela 6 e na Figura 40 da Subseção 6.2.3.1 e os comentários que ali sucederam. Nesse sentido, com o auxílio do AGCBE, um teste que fornece amortecimento de no mínimo 10% e outro que fornece no mínimo 15% de amortecimento ao sistema Simétrico de Duas Áreas são selecionados aleatoriamente, sendo que os resultados desses ajustes são apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Simétrico de Duas Áreas).

Parâmetros ESPs	$\xi_{i_{\min}}^{des1} \geq 10\%$		$\xi_{i_{\min}}^{des2} \geq 15\%$	
	ESP G2	ESP G3	ESP G2	ESP G3
$T_1 = T_3$ (s)	0,9000	0,8400	0,9196	1,0000
$T_2 = T_4$ (s)	0,6600	0,5600	0,5803	0,6477
$K_{ESP}$ (pu)	2,6000	2,6000	3,4530	4,6000

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 8 - Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Simétrico de Duas Áreas).

Parâmetros IPFC-POD	$\xi_{i_{\min}}^{des1} \geq 10\%$	$\xi_{i_{\min}}^{des2} \geq 15\%$
	$T_{p1} = T_{p3}$ (s)	0,8000
$T_{p2} = T_{p4}$ (s)	0,7000	0,5883
$K_{POD}$ (pu)	0,9100	0,9828

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Com os ajustes obtidos pelo AGCBE mostrados nas Tabelas 7, 8 e 9 o sistema Simétrico de Duas Áreas é novamente simulado. Assim, tem-se uma nova matriz de estado o qual são obtidos novos autovalores de interesse para este sistema teste. Estes podem ser analisados na Tabela 10.

Ao analisar autovalores apresentados na Tabela 10 é possível concluir que o AGCBE funcionou a contento, fornecendo o amortecimento especificado em projeto ( $\xi_i^{des1} \geq 10\%$  e



Tabela 9 - Ganhos, constantes e tempos dos controladores PIs ajustados pelo AGCBE (Simétrico de Duas Áreas).

Parâmetros PIs	$\xi_{l_{\min}}^{des1} \geq 10\%$	$\xi_{l_{\min}}^{des2} \geq 15\%$
$T_{1i}$ (s)	0,1500	0,1237
$T_{2i}$ (s)	0,0400	0,0203
$T_{3i}$ (s)	0,0760	0,1000
$K1$ (pu)	0,3800	2,6569
$K2$ (pu)	1,5000	2,4607
$K3$ (pu)	0,9400	0,8874

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 10 - Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) ajustados pelo AGCBE: Simétrico de Duas Áreas

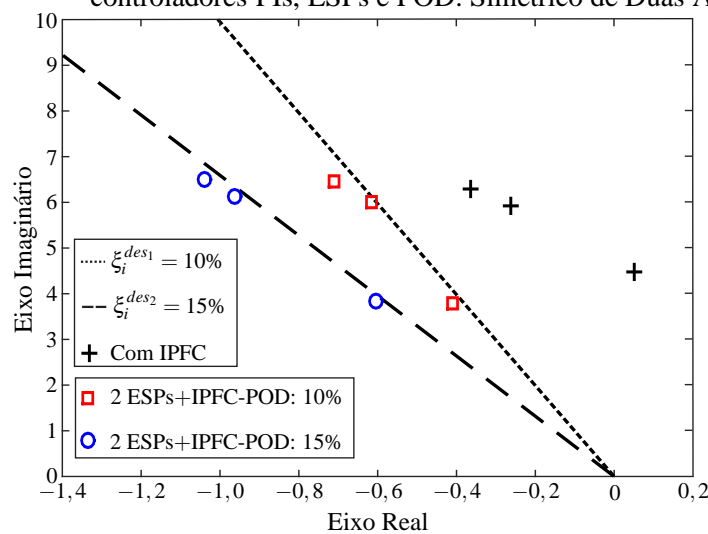
Modos	$\xi_i^{des1} \geq 10\%$			$\xi_i^{des2} \geq 15\%$		
	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0,7105 \pm j6,4643$	0,1093	1,0350	$-1,0423 \pm j6,4927$	0,1585	1,0466
$\lambda_2$	$-0,6155 \pm j6,0248$	0,1016	0,9639	$-0,9639 \pm j6,1455$	0,1550	0,9900
$\lambda_3$	$-0,4104 \pm j3,7868$	0,1077	0,6062	$-0,6056 \pm j3,8218$	0,1565	0,6158

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

$\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ), ou seja, amortecimento maior ou igual a 10% (primeiro caso) e amortecimento maior ou igual 15% (segundo caso) para ambos os modos de oscilações presentes no sistema teste.

A partir das Tabelas 5 e 10 é possível obter uma representação gráfica dos autovalores de interesse no plano complexo (Figura 41).

Figura 41 - Posicionamento dos autovalores de interesse após o ajuste dos parâmetros dos controladores PIs, ESPs e POD: Simétrico de Duas Áreas.

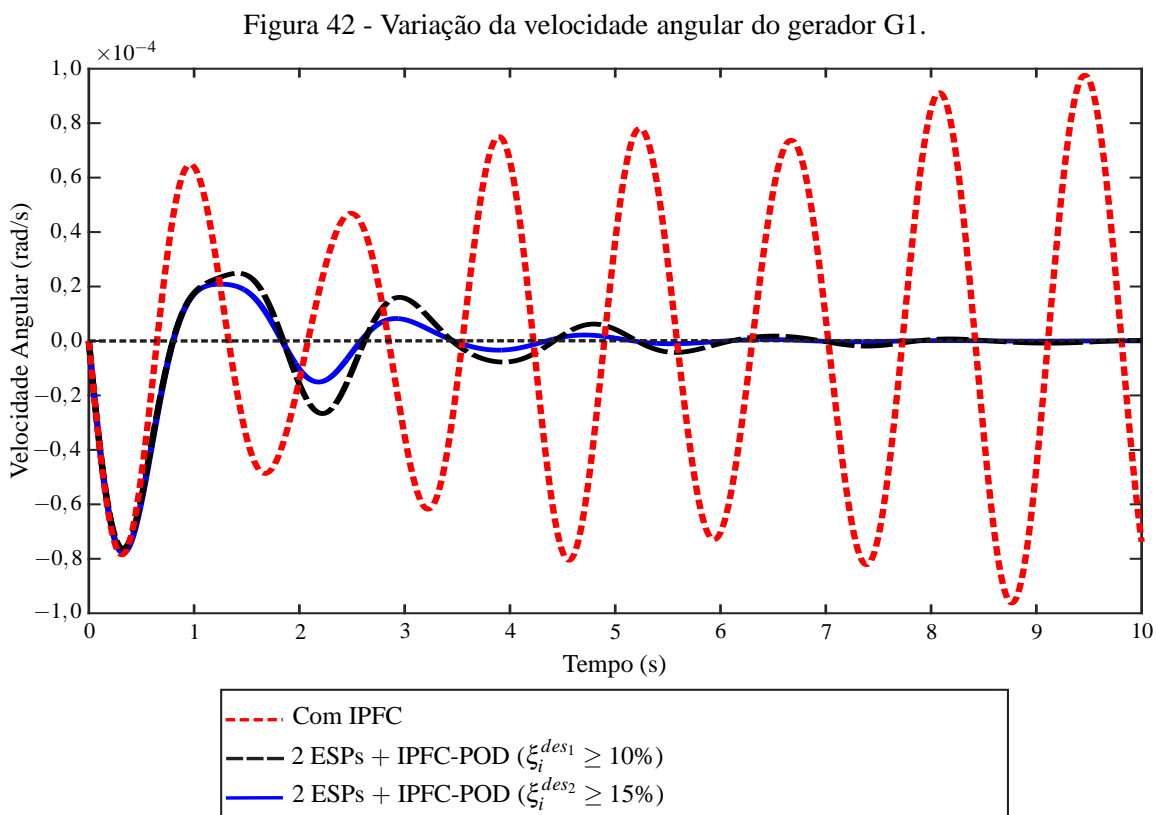


Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na Figura 41 é ilustrado o deslocamento de todos os autovalores de interesse do sistema Simétrico de Duas Áreas, a partir do momento em que estes estavam instáveis (Tabela 5), para

uma região do plano complexo com coeficiente de amortecimento mínimo de 10% ( $\xi_i^{des1} = 10\%$ ) e uma região com coeficiente de amortecimento mínimo de 15% ( $\xi_i^{des2} = 15\%$ ) conforme foi mostrado na Tabela 10.

Constantemente os SEPs estão sujeitos a pequenas variações de cargas e, portanto, consequentes ajustes na geração. É mostrado na Figura 42 as variações das velocidade angular do Gerador G1 do sistema Simétrico de Duas Áreas em relação à variação da velocidade angular do gerador 4 (G4), referência do sistema, onde se aplicou um degrau de 0,05 pu em sua potência mecânica.

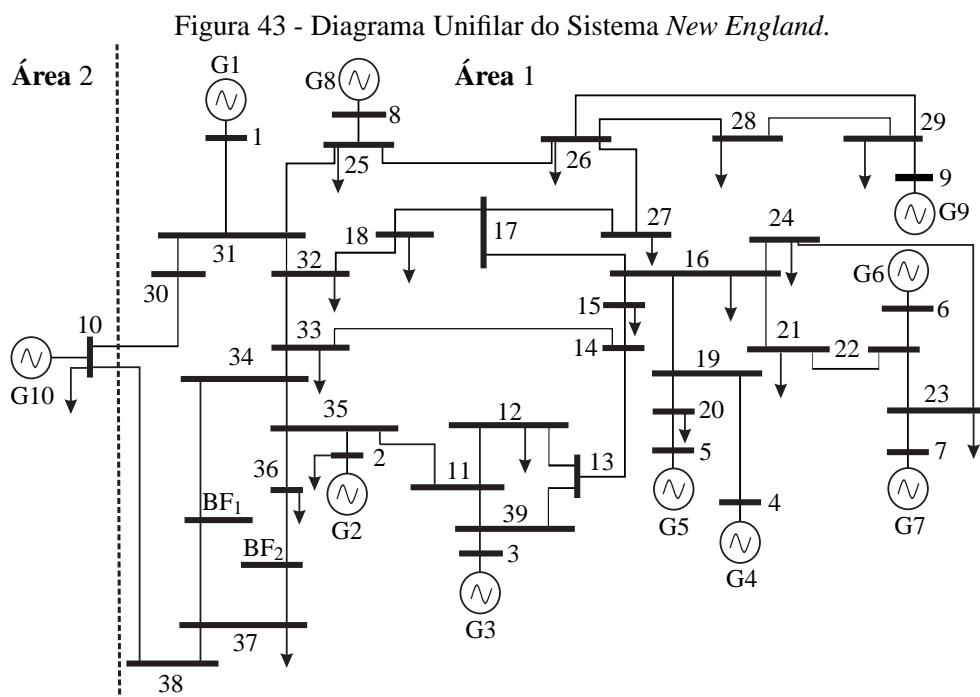


Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A perturbação na potência mecânica no gerador 1 é similar a um pequeno ajuste na geração, que pode ser ocasionado por um pequeno aumento no carregamento do sistema. No caso em que sistema opera apenas com o IPFC verificam-se curvas de amplitudes crescentes após a perturbação. Isto já era esperado já que neste caso o sistema era instável. Além disso, mesmo após a perturbação, nos casos em que sistema opera com amortecimento mínimo 10% e 15%, verifica-se após análise das curvas obtidas que o sistema se apresenta bem amortecido, evidenciando graficamente sua alta margem de estabilidade a pequenas perturbações para estes casos simulados.

## 6.3 SISTEMA NEW ENGLAND

O sistema *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001) é composto por 10 geradores, 41 barras e 48 linhas de transmissão e seu diagrama unifilar é mostrado na Figura 43. Neste diagrama já estão incluídas duas barras fictícias BF<sub>1</sub> e BF<sub>2</sub>, duas linhas 37–BF<sub>1</sub> e 37–BF<sub>2</sub> e as reatâncias de acoplamentos dos transformadores ( $x_{in}, n = j, k$ ) com valores estipuladas em 0,01 pu, sendo este referenciado como caso base.



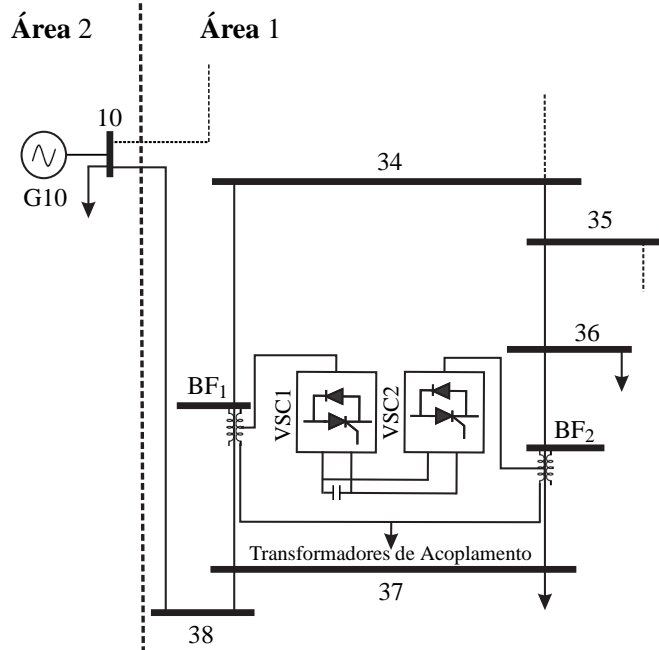
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se na Figura 43 a existência de duas áreas distintas neste sistema (área 1 e 2). A área 1 é conhecida como sistema *New York* e é representada por um barramento infinito, caracterizada pelo gerador 10. A área 2 é o que se conhece como sistema *New England*.

Na Figura 44 é ilustrado o local de instalação do IPFC no *New England*. Percebe-se a partir da análise das Figuras 43 e 44 que o local designado para instalação do IPFC foi entre as barras 38 – 34 e 37 – 36. Esta escolha foi motivada por fatores técnicos, os quais serão apresentadas na Subseção 6.3.1.

Assim como mostrado nas simulações realizadas com o sistema Simétrico de Duas Áreas (Seção 6.2), as simulações efetuadas com o IPFC no sistema *New England* são auferidas a partir de um IPFC dotado de dois conversores (VSC1 e VSC2) em série com as linhas 37–BF<sub>1</sub> e 37–BF<sub>2</sub> (ver Figura 44).

Para o caso base, é considerado o IPFC incluso no sistema, porém sem exercer o controle dos fluxos de potências ativa e reativa. Nesta situação as variáveis de inicialização do IPFC são

Figura 44 - Local de inserção do IPFC no *New England*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Variáveis da estrutura de controle do IPFC para o caso base - *New England*.

$V_{pj}$	$V_{pk}$	$V_{qj}$	$V_{qk}$
$-8,63e-7$	$-2,47e-6$	$4,69e7$	$-7,52e-7$

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Ao analisar a Tabela 11, verifica-se que os valores das variáveis dos conversores séries são próximas de zero e, portanto, não exercem qualquer controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa do sistema *New England*. Considera-se que nessa condição o IPFC está incluso no sistema, contudo sem atuação no controle de fluxos.

Ao considerar a condição de operação como sendo o caso base são calculados os autovalores de interesse do sistema *New England* ( $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ ). A frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni} = \frac{|\lambda_i|}{2\pi}$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $\xi_i = -\frac{\sigma}{|\lambda_i|}$ ) associados a cada modo também podem ser observados na Tabela 12.

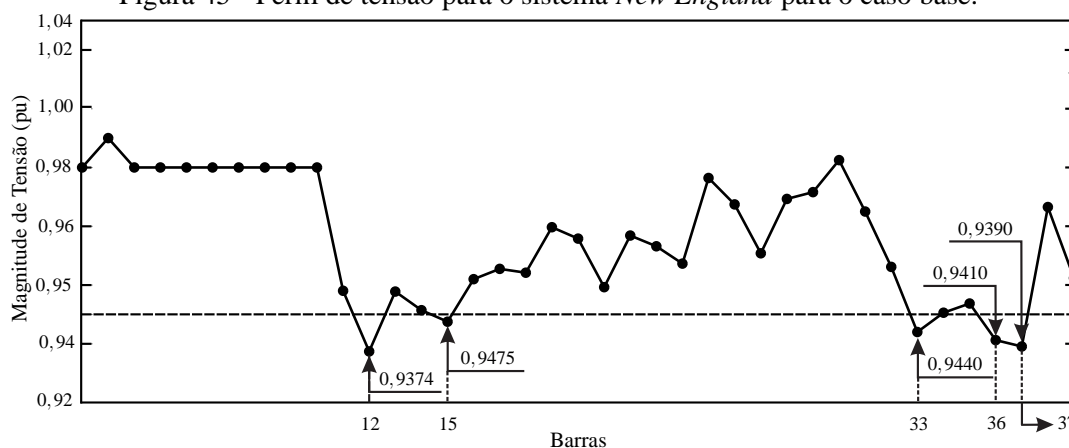
Analisando as frequências ( $\omega_{ni}$ ) dos modos de interesse na Tabela 12 observa-se que oito são modos locais ( $\lambda_1$  a  $\lambda_8$ ) e apenas um é modo interárea ( $\lambda_9$ ). Destes, quatro ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_4$ ,  $\lambda_8$  e  $\lambda_9$ ) possuem parte real positiva, caracterizando o sistema como instável para este ponto de operação (Ver Anexo C).

Na Figura 45 são mostrados os perfis de tensão para o sistema *New England*, sem atuação do IPFC (caso base).

Tabela 12 - Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) do sistema *New England*- Caso base.

Modos	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$0,0683 \pm j6,8594$	-0,0100	1,0918
$\lambda_2$	$-0,2056 \pm j7,2910$	0,0282	1,1609
$\lambda_3$	$-0,1947 \pm j8,2659$	0,0235	1,3159
$\lambda_4$	$0,1499 \pm j5,9611$	-0,0251	0,9490
$\lambda_5$	$-0,1192 \pm j6,4894$	0,0184	1,0330
$\lambda_6$	$-0,2694 \pm j8,1016$	0,0332	1,2901
$\lambda_7$	$-0,2433 \pm j8,3178$	0,0292	1,3244
$\lambda_8$	$0,1440 \pm j6,3765$	-0,0226	1,0151
$\lambda_9$	$0,0327 \pm j3,8653$	-0,0085	0,6152

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Figura 45 - Perfil de tensão para o sistema *New England* para o caso base.

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Verifica-se a partir dos dados apresentados na Tabela 12 e na Figura 45 que o sistema *New England* possui dois problemas para serem resolvidos: o problema da instabilidade do sistema ocasionados por três modos locais ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_4$  e  $\lambda_8$ ) e um modo interárea ( $\lambda_9$ ) e os problemas de subtensão verificados para as barras 12, 15, 33, 36 e 37, isto é, perfil de tensão fora dos limites de valores aceitáveis ( $\pm 5\%$  valor nominal).

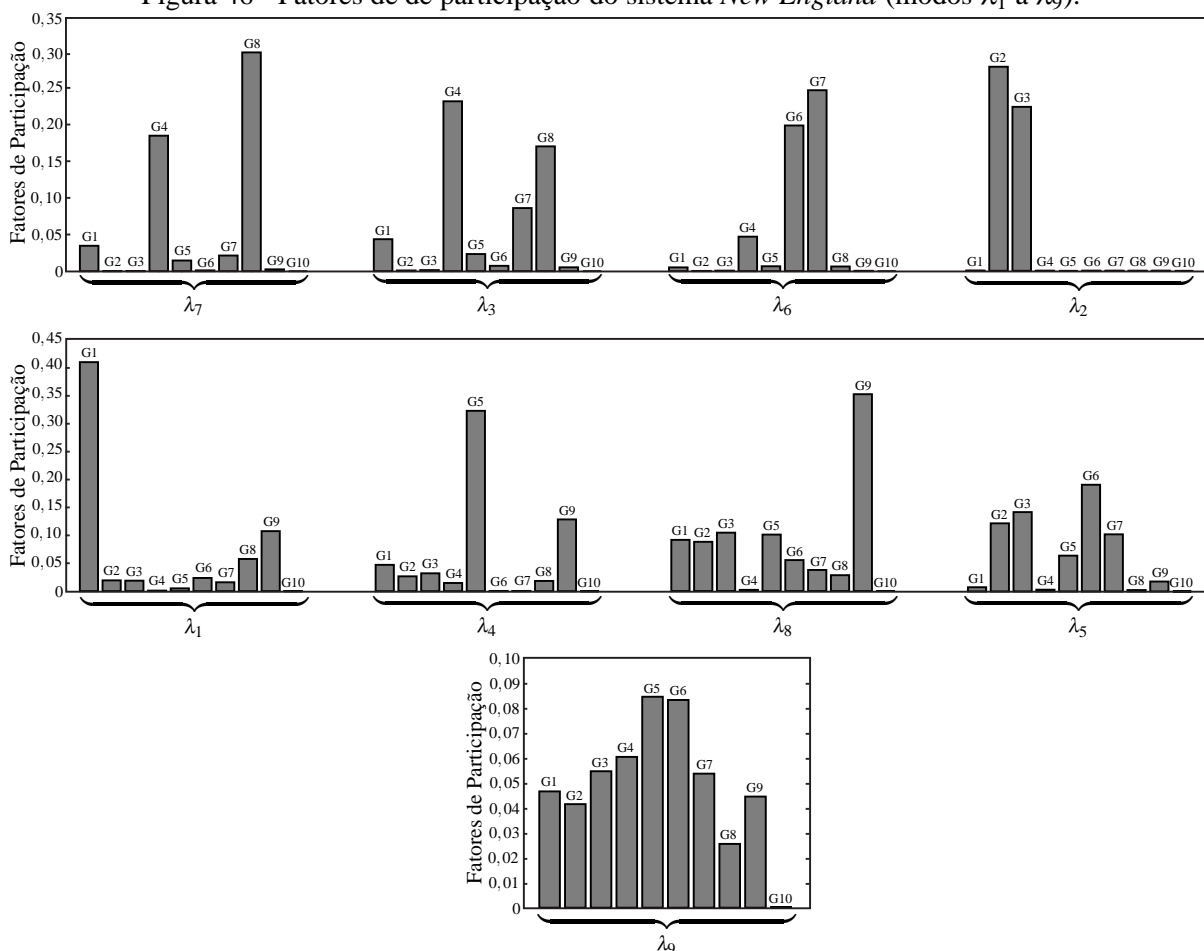
### 6.3.1 Localização dos dispositivos de controles (ESPs e IPFC-POD)

A escolha da localização do conjunto IPFC-POD é determinada por fatores técnicos. Conforme já frisado, o IPFC usado neste trabalho é dotado de dois conversores séries. Este será responsável por controlar dois fluxos de potência ativa e um fluxo de potência reativa em duas linhas distintas do sistema (neste caso o *New England*). Outra situação que deve ser considerada foi apresentada na Figura 45 e está relacionada ao fato de que o sistema *New England* possui problemas de tensão nas barras 12, 15, 33, 36 e 37 (abaixo de 0,95 pu). Além disso, a Figura 45 indica que a barra 37 possui o segundo pior perfil de tensão do sistema e encontra-se um uma

região próxima das barras 12, 15, 33, 36 e 37 que possuem tensão abaixo de 0,95 pu. Desta forma, baseado no fato de que se precisa pelo menos duas linhas disponíveis para incluir o IPFC no sistema e ao mesmo tempo se pretende-se melhorar o perfil de tensão nas barras 12, 15, 33, 36 e 37, o local de instalação escolhido para o IPFC no sistema *New England* é entre as barras 37 – 34 e 37 – 36 conforme foi mostrado na Figura 44.

A localização dos geradores do sistema *New England* que deverão ser equipados com os ESPs foi realizada utilizando os fatores de participação (KUNDUR, 1994). Na Figura 46, são mostrados os fatores de participação dos modos oscilatórios do sistema *New England*.

Figura 46 - Fatores de de participação do sistema *New England* (modos  $\lambda_1$  a  $\lambda_9$ ).



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na Figura 46 os geradores 1, 2, 4, 5, 6, 7 e 8 são os mais participativos, respectivamente, nos modos locais  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$ ,  $\lambda_5$ ,  $\lambda_6$ ,  $\lambda_7$  e  $\lambda_8$ . Desta forma, com o objetivo de garantir que estes modos locais atinjam amortecimentos desejados, os geradores G1, G2, G4, G5, G6, G7, G8 e G9 deveriam ser equipados com controladores ESPs. Entretanto, ajustes preliminares indicam que para o modo oscilação  $\lambda_5$  o gerador mais participativo (G6) não é o mais indicado para instalação do ESP. Optou-se, portanto, pela instalação de um ESP no gerador 3, segundo mais participativo para este modo de oscilação.

Ainda na Figura 46, verifica-se que os geradores G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 e G9 possuem participação distribuída no modo oscilatório  $\lambda_9$ , com baixa influência neste modo, característica comum de um modo interárea.

Desta forma, para inserir amortecimento desejado ao sistema *New England* aos modos locais e interárea de oscilação, serão instalados 8 ESPs nos geradores G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9 e um conjunto IPFC-POD entre as barras 37 – 34 e 37 – 36.

### 6.3.2 Influência do IPFC no controle de tensão e nos fluxos de potência no sistema *New England*

No sistema apresentado nas Figuras 43 e 44, o IPFC será responsável por efetuar o controle dos fluxos de ativos nas linhas BF<sub>1</sub> – 34 ( $P_{ref_j}$  e  $P_{ref_k}$ ), enquanto que o controle do fluxo de reativo ( $Q_{ref_j}$ ) é executado somente na linha BF<sub>2</sub> – 36.

O objetivo principal nesta Subseção, é encontrar um ajuste para os fluxos controlados pelo IPFC ( $P_{ref_j}$ ,  $P_{ref_k}$  e  $Q_{ref_j}$ ) com o propósito de melhorar o perfil de tensão nas barras 12, 15, 33, 36 e 37 apresentados na Figura 45.

Inicialmente, para efetuar o ajuste os valores dos ganhos (pu) e constantes de tempo (segundos) utilizados nos controles do IPFC (controladores PI) foram considerados fixos, encontrados experimentalmente, os quais podem ser analisados na Tabela 13.

Tabela 13 - Ganhos e constantes de tempos dos controladores PIs no sistema *New England*.

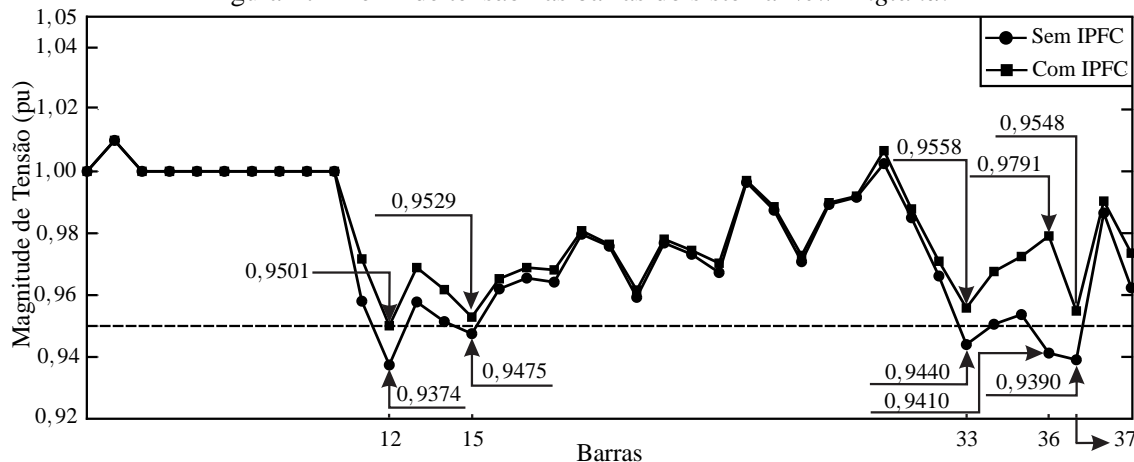
Ganhos (pu)			Tempos (s)		
$K_{p1}$	$K_{p2}$	$K_{p3}$	$T_{1i}$	$T_{2i}$	$T_{3i}$
0,8357	0,7555	0,9880	0,0074	0,0052	0,0056

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Os problemas nas tensões verificadas nas barras 12, 15, 33, 36 e 37 no sistema *New England* foram corrigidos executando o controle dos fluxos nas linhas FB<sub>1</sub> – 34 e FB<sub>2</sub> – 36, sendo feito:  $P_{ref_j} = -410.51$  MW (caso base  $-310.98$  MW),  $Q_{ref_j} = -55.81$  MVar (caso base  $-42.28$  MVar) e  $P_{ref_k} = -316,71$  MW (caso base  $-241.76$  MW). Os resultados desses ajustes foram obtidos experimentalmente e podem ser analisados na Figura 47.

Após a atuação do IPFC no controle dos fluxos de potências ativa e reativa, um novo perfil de tensão para o sistema *New England* é encontrado e prontamente apresentado na Figura 47. É possível, por meio de análise do gráfico com o perfil de tensões obtidos, que a atuação do IPFC melhorou o perfil de tensão nas barras 12, 15, 33, 36 e 37, ficando todas dentro dos limites de valores aceitáveis ( $\pm 5\%$  valor nominal). Mais informações sobre o fluxo expandido convergido para esta condição operacional pode ser averiguado no Anexo B.

Figura 47 - Perfil de tensão nas barras do sistema *New England*.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Com a atuação do IPFC no controle dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas especificadas, um novo perfil para os valores das variáveis da estrutura de controle do IPFC são apresentados e podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14 - Variáveis da estrutura de controle com atuação IPFC - *New England*.

$V_{pj}$	$V_{pk}$	$V_{qj}$	$V_{qk}$
-0,2938	-0,3049	-0,0485	0,0048

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Diferentemente dos dados apresentados na Tabela 11, os resultados da Tabela 14 indicam que o IPFC passou a exercer o controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão do SEP, modulando as componentes do eixo direto e em quadratura das fontes de tensão série.

Na Figura 48 são apresentados os fluxos de potência ativa no sistema *New England* sem e com atuação do IPFC. Ao analisar os fluxos após a inclusão do IPFC, é possível verificar que o dispositivo não fornece potência ativa ao SEP (restrição de invariância de potência ativa do IPFC), mas transfere (ou retira), através dos conversores série, parcela da potência ativa para as linhas nas quais os fluxos são controlados. Com os dados apresentados na Figura 39 é possível realizar o balanço nodal de potência ativa nas barras de instalação do IPFC e, desta forma, validar o controle dos fluxos realizado pelo dispositivo.

### 6.3.3 Ajustes dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e IPFC-POD no sistema *New England*

Considerando a condição de operação com IPFC atuando no controle dos fluxos de potência ativa e reativa, novamente são calculados os autovalores de interesse do sistema *New England*





Tabela 15 - Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) do sistema *New England* - Com IPFC em operação.

Modos	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$0,0484 \pm j6,8621$	-0,0070	1,0922
$\lambda_2$	$-0,2198 \pm j7,3085$	0,0301	1,1637
$\lambda_3$	$-0,2013 \pm j8,2718$	0,0243	1,3169
$\lambda_4$	$0,1508 \pm j5,9601$	-0,0253	0,9489
$\lambda_5$	$-0,1351 \pm j6,5134$	0,0184	1,0369
$\lambda_6$	$-0,2706 \pm j8,1099$	0,0207	1,2914
$\lambda_7$	$-0,2408 \pm j8,3226$	0,0289	1,3251
$\lambda_8$	$0,1814 \pm j6,3875$	-0,0284	1,0170
$\lambda_9$	$0,0290 \pm j3,8641$	-0,0075	0,6150

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

oscilações eletromecânicas de baixa frequência presentes no sistema *New England*. Percebe-se melhoras nos amortecimentos dos modos locais  $\lambda_1$ ,  $\lambda_4$ ,  $\lambda_6$ ,  $\lambda_7$  e  $\lambda_8$  com destaque para para o modo  $\lambda_6$  que no caso base possuía amortecimento de 0,0207 e após a atuação do IPFC passou a ter amortecimento de 0,0332. O destaque negativo no amortecimento ficou por conta dos modos locais  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  e para o modo interárea  $\lambda_9$ . O modo local  $\lambda_5$  se manteve com o mesmo amortecimento antes e depois da inclusão e atuação do IPFC no controle dos fluxos de potência ativa e reativa no sistema *New England*.

Para resolver o problema da instabilidade presente do sistema *New England* e ao mesmo tempo inserir amortecimento desejado a este sistema, é necessário não só a instalação de controladores suplementares de amortecimento (ESPs e POD) no sistema, mas também o correto ajuste de seus parâmetros. Assim, deve-se utilizar uma técnica de otimização para ajustar, de forma coordenada, os parâmetros dos controladores presentes no sistema e, portanto, inserir amortecimento desejado ao sistema *New England*.

Assim como no Simétrico de Duas Áreas, nas simulações realizadas no sistema *New England* o sinal de entrada escolhido para o controlador POD é obtido localmente entre as barras 38 e 37 (variação da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ )). No caso dos ESPs o sinal de entrada são as variações da velocidade angular do rotor do gerador ( $\Delta\omega$ ). Em todas as simulações foram adotados que  $T_{\omega_p} = 1$  segundo,  $T_{\omega} = 10$  segundos. Além disso, considerou-se o carregamento do sistema (ver Anexo B) após o controle dos fluxos de potência ativa e reativa realizados pelo IPFC (Figuras 47 e 48) e, conseqüentemente, os modos oscilatórios descritos na Tabela 15.

Cada variável do problema de otimização utilizada nas simulações escutadas no presente sistema, está sujeita à sua respectiva restrição, indicadas nas equações (187) a (189).

$$0,1 \leq T_{1_n} \leq 1,5; \quad 0,01 \leq T_{2_n} \leq 0,1 \quad 1,0 \leq K_{ESP_n} \leq 10,0 \quad (187)$$

$$0,1 \leq T_{p1} \leq 0,4; \quad 0,1 \leq T_{p2} \leq 0,4; \quad 1,0 \leq K_{POD} \leq 0,4 \quad (188)$$

$$0,001 \leq T_{ij} \leq 0,01; \quad 0,1 \leq K_j \leq 1,5 \quad (189)$$

Nas equações (187) a (189),  $1 \leq j \leq 3$ ,  $n$  indica o número geradores síncronos equipados com ESPs,  $T_{1n}$ ,  $T_{2n}$  e  $K_{ESPn}$ ,  $T_{p1}$ ,  $T_{p1}$  e  $K_{POD}$  são, respectivamente, as constantes de tempo (em segundos) e ganhos (em pu) dos controladores ESPs e POD, enquanto que  $T_{ij}$  e  $K_j$  representam as constantes de tempo (em segundos) e ganhos (em pu) dos controlares PI.

### 6.3.3.1 Performance dos algoritmos AGCBE, PSO e AG no New England

O propósito desta Subseção é avaliar o desempenho dos três métodos de otimização propostos neste trabalho: SCBGA, PSO e o GA. Cada algoritmo deverá realizar os ajustes coordenados dos parâmetros dos controladores ESPs, POD e PIs, e desta forma inserir amortecimento desejado ao sistema *New England*. Nas simulações realizadas, considerou-se os mesmos cenários propostos para o sistema Simétrico de Duas Áreas na Subseção 6.2.3.1, sendo:  $\xi_{i_{\min}}^{des1} = 10\%$ ;  $\xi_{i_{\min}}^{des2} = 15\%$ ; 100 testes para cada algoritmo, limitados a um número máximo de 2000 cálculos da função objetivo;

Vale destacar que no AGCBE são utilizadas as funções de avaliação mostradas em (174) a (176), enquanto que para o AG e o PSO foi utilizada a função objetivo descrita em (175). Considerou-se em cada teste que cada variável do problema (parâmetros dos controladores) deve satisfazer as restrições (187) a (189). Na Tabela 16 são mostrados os desempenhos de cada algoritmo no sistema *New England*.

Tabela 16 - Comparação de desempenho do AGCBE, PSO e AG no sistema *New England*.

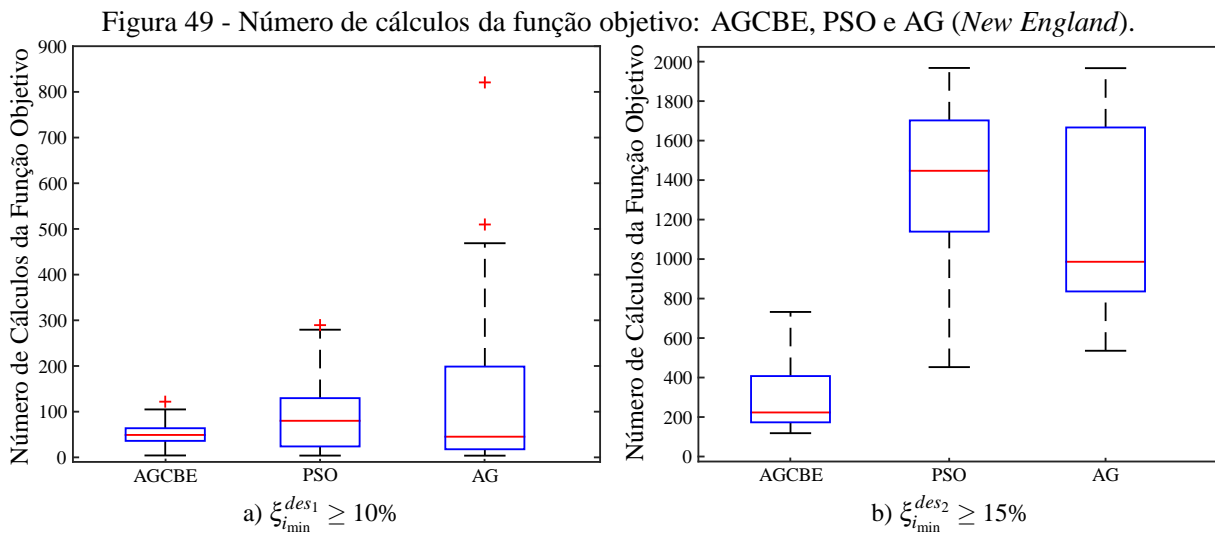
Algoritmo	Faixa de amortecimento (%)	Número de soluções encontradas a cada 10 Testes										Tempo de convergência (s)		
		Méio	Mín.	Máx.										
AGCBE	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	28,83	1,29	57,02
	$\geq 15$	10	10	10	10	10	9	10	10	10	10	90,61	43,78	222,49
PSO	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	23,45	1,00	344,88
	$\geq 15$	1	1	1	1	1	0	2	1	1	1	351,12	148,92	805,09
AG	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	30,59	1,35	126,92
	$\geq 15$	4	6	5	7	6	6	6	4	7	7	754,66	234,83	1056,80

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na Tabela 16 as soluções encontradas para cada algoritmo estão reunidas em grupos de dez tentativas, sendo exibidas apenas o número de vezes que cada algoritmo alcançou a convergência. O tempo de convergência exibido na Tabela 16 (tempo médio, mínimo e máximo dos testes) também refere-se aos tempos em que cada algoritmo obteve sua convergência, excluindo, portanto, o tempo gasto nas tentativas em que os algoritmos não obtiveram sucesso, isto é, não convergiram (limitados a 2000 cálculos da função objetivo).

A análise dos dados apresentados na Tabela 16 pode ser realizada em duas etapas: Na primeira faixa ( $\xi_{i_{\min}}^{des1} \geq 10\%$ ), o AGCBE e AG convergiram em 100% dos casos analisados com tempo médio de 28,83 e 30,59 segundos, respectivamente. Já o PSO obteve sua convergência em 99% dos testes realizados com tempo médio de convergência computado em 23,43 segundos; Na segunda faixa de convergência ( $\xi_{i_{\min}}^{des2} \geq 15\%$ ) o AGCBE convergiu em 99% dos testes realizados com tempo médio de 90,61 segundos, o GA convergiu em 58% dos testes realizados com tempo médio de 754,66 segundos e o PSO que convergiu em apenas 10% das simulações realizadas com tempo médio de 351,12 segundos.

Na Figura 49 são apresentados dois gráficos do tipo *Box Plot*. O número de cálculos que cada função objetivo realizou nos algoritmos pospostos neste trabalho (AGCBE, PSO e AG) no ajuste dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e o no conjunto IPFC-POD, tratados na Tabela 16, são apresentados na Figura 49.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A Figura 49 é separada em dois casos: a)  $\xi_{i_{\min}}^{des1} \geq 10\%$  e b)  $\xi_{i_{\min}}^{des2} \geq 15\%$ . Note que caso a) a mediana do AGCBE e do PSO encontram-se centralizadas nos retângulos o que indica que os dados (número de cálculos da função objetivo para ambos os algoritmos) possuem uma distribuição simétrica. No caso do AG, este apresenta uma mediana próxima de  $Q_1$ , o que determina que a distribuição dos dados é positivamente assimétrica. No caso b) o AGCBE e o AG possuem mediana mais próxima de  $Q_1$ , indicando que a distribuição dos dados é positivamente assimétrica. Já o PSO é caracterizado por distribuição simétrica dos dados, pois sua mediana encontra-se mais ao centro do retângulo.

A superioridade do AGCBE frente ao PSO e o AG já foi comprovada após análise da tabela 16. Tal superioridade no desempenho do AGCBE frente aos demais algoritmos é mais uma vez confirmada após análise da Figura 49. Tanto no caso a) quanto no caso b) o AGCBE apresenta

um retângulo mais compacto para os cálculos da função objetivo, indicando que na maioria dos testes realizados, o AGCBE encontra uma solução mais rápida que os demais algoritmos, demonstrando mais uma vez sua eficiência no ajuste dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD.

Simulações apresentadas na Tabela 6 e na Figura 40 referentes ao sistema Simétrico de Duas Áreas, já indicavam que ao aumentar a complexidade dos testes realizados (aumentou-se o amortecimento desejado de 10% para 15%), o AGCBE já se destacava frente ao PSO e o AG. No caso do sistema *New England*, além de aumentar o amortecimento desejado de 10% para 15%, a complexidade neste caso também é mensurada quando os tamanhos de ambos os sistemas testes são comparados. Mais uma vez, independente da faixa de amortecimento escolhida ou do tamanho do sistema teste simulado, verificou-se que AGCBE teve melhor desempenho frente ao PSO e o AG quando o assunto é ajuste dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD.

### 6.3.3.2 Análise da estabilidade a pequenas perturbações no sistema *New England*

A partir dos dados apresentados na Tabela 16 e na Figura 49 é possível concluir mais uma vez que o AGCBE é mais eficiente que demais algoritmos apresentados neste trabalho (PSO e o AG) quando o assunto é o ajuste dos parâmetros dos controladores PIs, ESPs e IPFC-POD. Nesse sentido, um dos testes executados pelo AGCBE, para cada faixa de amortecimento, é selecionado aleatoriamente e os resultados desses ajustes obtidos pelo AGCBE são apresentados nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

Tabela 17 - Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (*New England*).

Parâmetros ESPs	$\xi_{i_{\min}}^{des_1} \geq 10\%$							
	ESP G1	ESP G2	ESP G3	ESP G4	ESP G5	ESP G7	ESP G8	ESP G9
$T_1 = T_3$ (s)	1,0887	0,5158	0,5577	0,5938	0,6747	0,5815	0,7832	0,3000
$T_2 = T_4$ (s)	0,0668	0,0384	0,0783	0,0294	0,0641	0,0740	0,0237	0,0944
$K_{ESP}$ (pu)	8,0000	5,5239	5,2167	5,6944	4,1400	1,8100	4,8300	4,2642

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 18 - Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (*New England*).

Parâmetros ESPs	$\xi_{i_{\min}}^{des_2} \geq 15\%$							
	ESP G1	ESP G2	ESP G3	ESP G4	ESP G5	ESP G7	ESP G8	ESP G9
$T_1 = T_3$ (s)	1,1000	0,6532	0,6916	0,5940	0,5218	0,3520	0,7314	0,3464
$T_2 = T_4$ (s)	0,0617	0,0682	0,0629	0,0715	0,0769	0,0751	0,0362	0,0983
$K_{ESP}$ (pu)	10,000	6,2716	5,6000	5,5000	6,1367	3,4820	7,5000	6,2951

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 19 - Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (*New England*).

Parâmetros IPFC-POD	<i>England</i> .	
	$\xi_{l_{min}}^{des1} \geq 10\%$	$\xi_{l_{min}}^{des2} \geq 15\%$
$T_{p1} = T_{p3}$ (s)	0,4079	0,3865
$T_{p2} = T_{p4}$ (s)	0,5000	0,2616
$K_{POD}$ (pu)	0,3138	0,4000

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 20 - Ganhos, constantes de tempos dos controladores PIs ajustados pelo AGCBE (*New England*).

Parâmetros PIs	<i>England</i> .	
	$\xi_{l_{min}}^{des1} \geq 10\%$	$\xi_{l_{min}}^{des2} \geq 15\%$
$T_{1i}$ (s)	0,0090	0,0090
$T_{2i}$ (s)	0,0036	0,0062
$T_{3i}$ (s)	0,0079	0,0065
$K1$ (pu)	0,6553	0,3452
$K2$ (pu)	0,6218	0,6373
$K3$ (pu)	0,7020	1,0068

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Os ajustes obtidos pelo AGCBE mostrados nas Tabelas 17, 18, 19 e 20 são determinados com a atuação de oito ESPs e um conjunto IPFC-POD. Com estes ajustes, o sistema *New England* é novamente simulado e uma nova matriz de estado é obtida para este sistema teste. Desta forma, novos autovalores de interesse ( $\lambda_i$ ), coeficiente de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) para este sistema são obtidos e podem ser observados na Tabela 21.

Tabela 21 - Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) ajustados pelo AGCBE: *New England*.

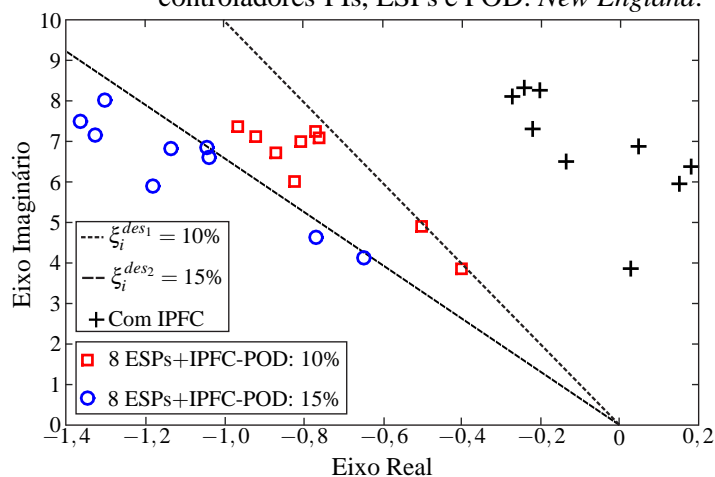
Modos	$\xi_i^{des1} \geq 10\%$			$\xi_i^{des2} \geq 15\%$		
	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0,8061 \pm j6,9915$	0,1145	1,1201	$-1,0435 \pm j6,8556$	0,1505	1,1037
$\lambda_2$	$-0,7693 \pm j7,2379$	0,1057	1,1584	$-1,3263 \pm j7,1624$	0,1821	1,1593
$\lambda_3$	$-0,9653 \pm j7,3807$	0,1297	1,1847	$-1,1342 \pm j6,8101$	0,1643	1,0988
$\lambda_4$	$-0,9195 \pm j7,1275$	0,1280	1,1438	$-1,3016 \pm j8,0157$	0,1603	1,2925
$\lambda_5$	$-0,5007 \pm j4,9139$	0,1014	0,7861	$-0,7675 \pm j4,6343$	0,1634	0,7476
$\lambda_6$	$-0,7595 \pm j7,1067$	0,1063	1,1375	$-1,3635 \pm j7,5024$	0,1788	1,2136
$\lambda_7$	$-0,8679 \pm j6,7182$	0,1281	1,0781	$-1,0377 \pm j6,6031$	0,1552	1,0638
$\lambda_8$	$-0,8211 \pm j6,0114$	0,1353	0,9656	$-1,1806 \pm j5,8805$	0,1968	0,9546
$\lambda_9$	$-0,3999 \pm j3,8724$	0,1027	0,6196	$-0,6459 \pm j4,1381$	0,1542	0,6666

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Ao se analisar os coeficientes de amortecimentos ( $\xi_i$ ) mostrados na Tabela 21, é possível concluir que todos os modos de interesse apresentam coeficientes de amortecimentos dentro das faixas especificadas em projeto, tanto no primeiro caso ( $\xi_i^{des1} \geq 10\%$ ) quando no segundo caso analisado ( $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ), o que reforça que o AGCBE realizou com êxito o ajuste dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD.

As Tabelas 15 e 21 permitem obter uma representação gráfica dos autovalores de interesse do sistema *New England* no plano complexo. Esta representação pode prontamente ser analisada na Figura 50.

Figura 50 - Posicionamento dos autovalores de interesse após o ajuste dos parâmetros dos controladores PIs, ESPs e POD: *New England*.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

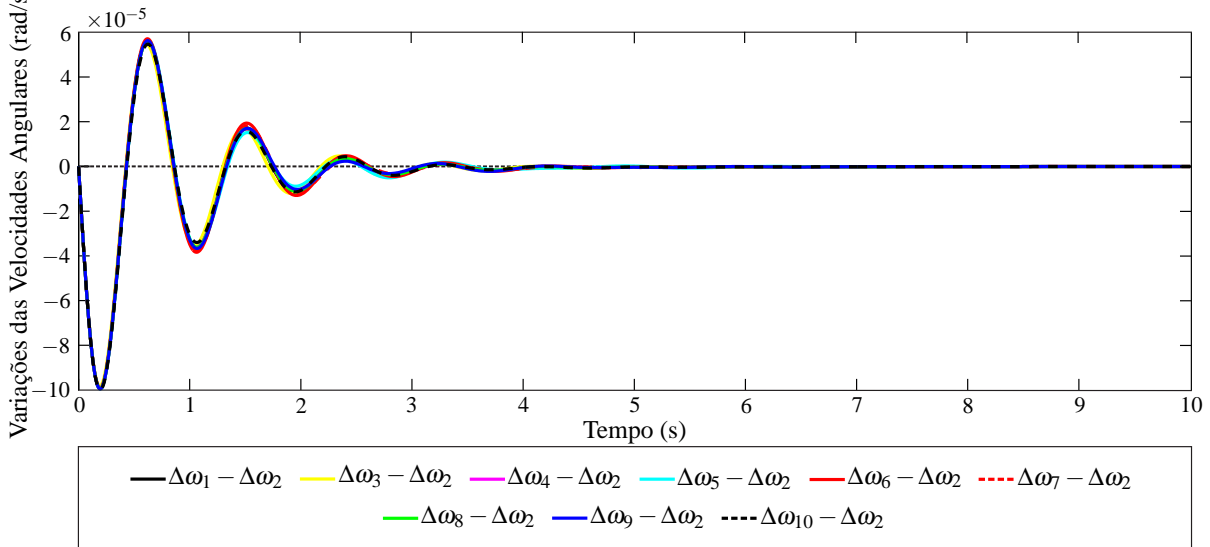
A Figura 50 corrobora os dados apresentados na Tabela 21. A partir dos ajustes coordenados dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD realizados pelo AGCBE é possível verificar claramente o deslocamento de todos os autovalores de interesse do sistema *New England*, antes instáveis mostrados na Tabela 15, para uma região do plano complexo com coeficiente de amortecimento mínimo de 10% ( $\xi_i^{des1} \geq 10\%$ ) e 15% ( $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ) apresentados na tabela 21.

Constantemente os SEPs estão sujeitos a pequenas variações de cargas e, portanto, consequentes ajustes na geração. É mostrado na Figura 51 as variações das velocidades angulares de todas as unidades geradoras do sistema *New England* (caso  $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ) em relação à variação da velocidade angular do gerador 2 (G2), referência do sistema, onde se aplicou um degrau de 0,05 pu em sua potência mecânica.

A perturbação na potência mecânica no gerador 2 é similar a um pequeno ajuste na geração, que pode ser ocasionado por um pequeno aumento no carregamento do sistema. Verifica-se na Figura 51 que mesmo após a perturbação, o sistema se apresenta bem amortecido, evidenciando graficamente sua alta margem de estabilidade a pequenas perturbações.

Para verificar o comportamento do sistema *New England* para possíveis alterações de carregamento, foram considerados os seguintes casos:

- Com IPFC: Ponto de operação referente às condições dos autovalores da Tabela 15;

Figura 51 - Variações das velocidades angulares das máquinas G1, G3 a G10 do sistema *New England*.

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

- Caso  $(P+, Q+)$ : Aumento de 5% tanto no carregamento de ativos quanto de reativos;
- Caso  $(P, Q+)$ : São mantidos inalterados o carregamento de ativos e é simulado uma diminuição de 5% nos reativos;
- Caso  $(P+, Q)$ : Aumento de 5% no carregamento de ativos e permanecem inalterados o carregamento de reativos;
- Caso  $(P-, Q-)$ : Diminuição de 5% tanto no carregamento de ativos quanto de reativos;
- Caso  $(P+, Q+)$ : Aumento de 5% tanto no carregamento de ativos quanto de reativos;
- Case  $(P+, Q-)$ : Aumento de 5% no carregamento de ativos e diminuição de 5% no carregamento de reativos;

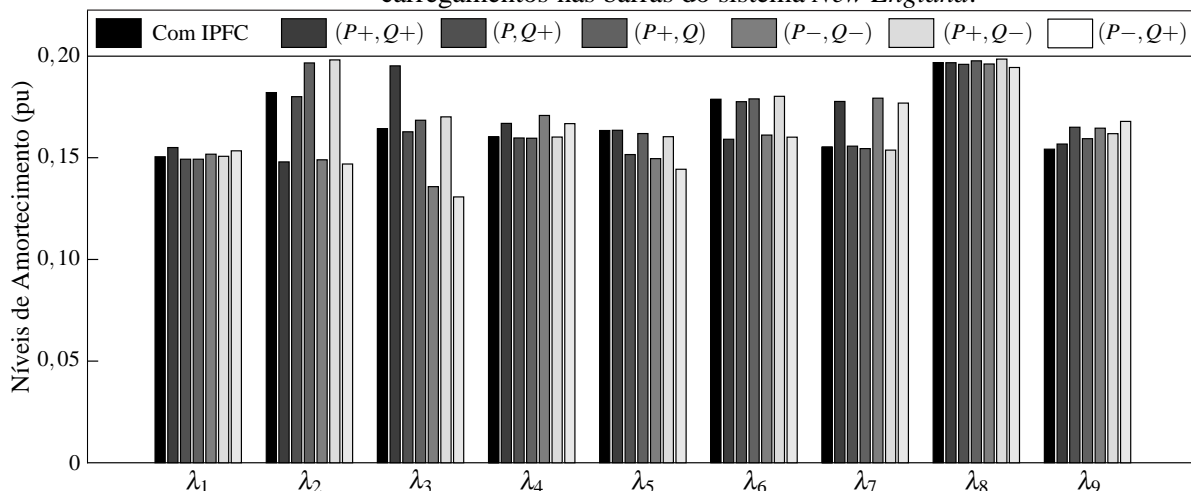
As variações no carregamento do sistema *New England* não foram definidas no algoritmo AGCBE quando da realização do ajuste dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e IPFC-POD. Assim, espera-se que ocorram níveis de amortecimento abaixo do especificado em projeto ( $\xi_i^{des2} \leq 15\%$ ) quando ocorrerem as variações no carregamento.

Na Figura 52 são mostrados os diferentes níveis de amortecimentos dos modos oscilatórios de interesse após as alterações nos carregamentos nas barras PQ do sistema *New England*.

Analisando a Figura 52 é possível concluir que o amortecimento de alguns modos de interesse se mantiveram praticamente inalterados como é o caso de  $\lambda_1$ ,  $\lambda_8$  e  $\lambda_9$ , quando estes foram comparados com os amortecimentos mostrados na Tabela 21. Entretanto, e em alguns



Figura 52 - Comparação entre os amortecimentos dos autovalores de interesse para diferentes níveis de carregamentos nas barras do sistema *New England*.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

casos, é possível afirmar que houve acréscimo e em outros, decréscimo no amortecimento como é caso de  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_6$  e  $\lambda_7$ . Contudo, observa-se que no geral, o sistema *New England* opera com alto nível de amortecimento em todos os casos analisados, evidenciando ainda sim, alta margem de estabilidade a pequenas perturbações mesmo após as variações nos carregamentos do sistema *New England*.

#### 6.4 SISTEMA SUL BRASILEIRO

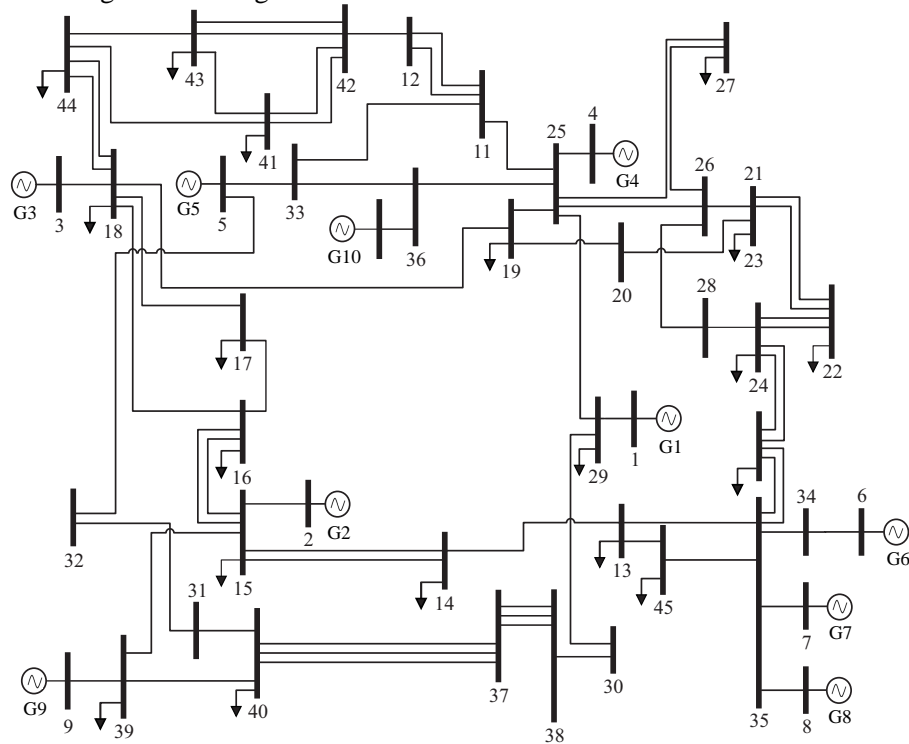
Na Figura 53 é mostrado o sistema Sul Brasileiro Reduzido. Trata-se de um sistema real, baseado na região sul do Brasil e é composto por 10 geradores, 45 barras e 73 linhas de transmissão. Os dados sistema Sul Brasileiro foram adaptados de Valle (2014) e podem ser analisados no Anexo C.

É possível verificar, ao analisar os dados apresentados no Anexo C deste trabalho, que o sistema Sul Brasileiro possui um perfil de tensão dentro das faixas aceitáveis de operação, ou seja,  $\pm 5\%$  do valor nominal. Isto evidencia que este sistema possui boas condições de operação no que se refere a parte estática.

Na Tabela 22 são mostrados os autovalores de interesse ( $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ ), os coeficientes de amortecimento ( $\xi_i = -\frac{\sigma_i}{|\lambda_i|}$ ) e a frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni} = \frac{|\lambda_i|}{2\pi}$ ) do sistema Sul Brasileiro.

A Tabela 22 indica a presença de nove modos oscilatórios no sistema Sul Brasileiro. A presença de cinco modos com parte real positiva classifica o sistema como instável para o ponto de operação considerado (ver Anexo C). Além disso, após a análise da frequência natural não

Figura 53 - Diagrama unifilar do sistema Sul Brasileiro Reduzido.



Fonte: Adaptado de Valle (2014).

Tabela 22 - Autovalores de interesse ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) do sistema Sul Brasileiro.

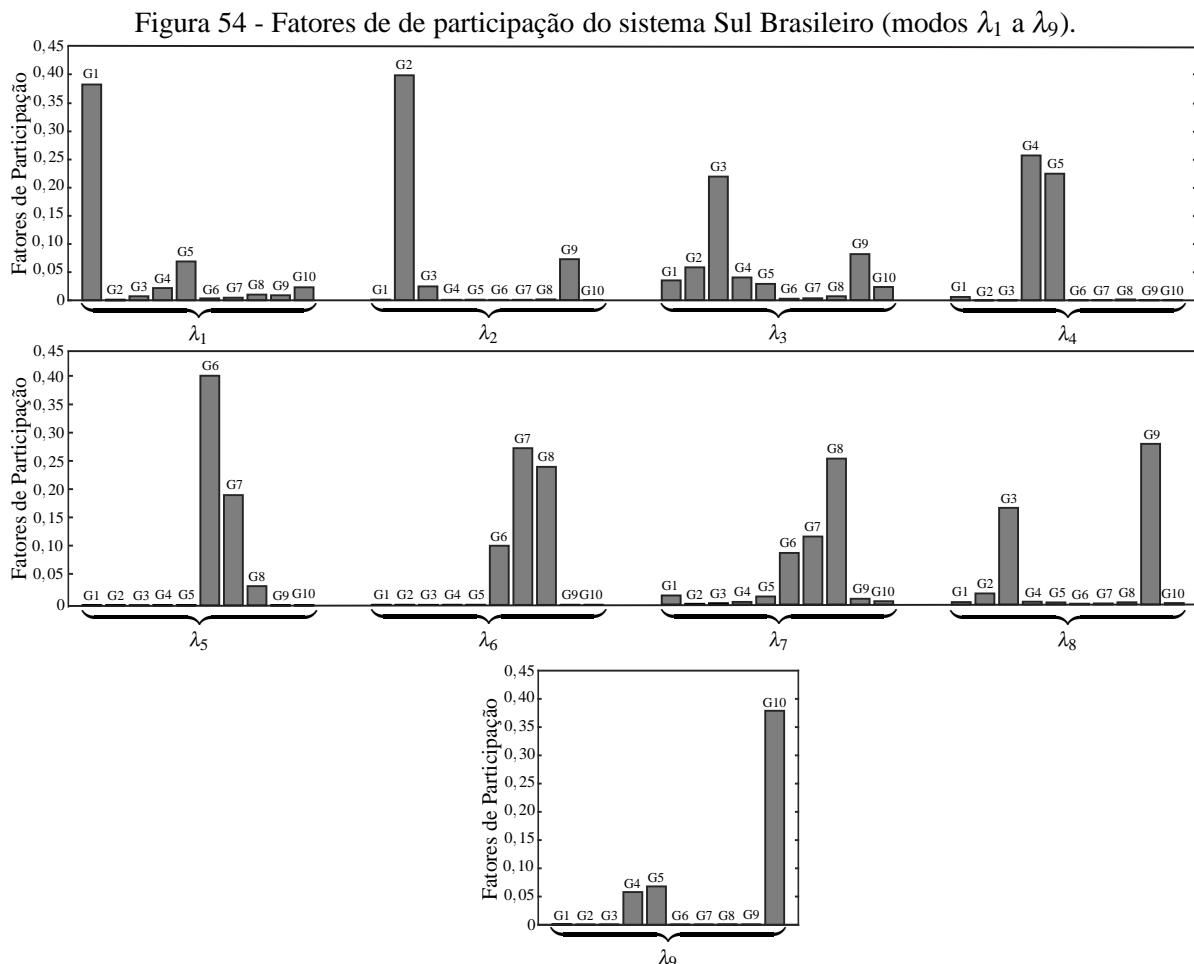
Modo	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$0,1057 \pm j7,3355$	-0,0144	1,1676
$\lambda_2$	$-0,0198 \pm j7,8735$	0,0025	1,2531
$\lambda_3$	$0,0907 \pm j6,4558$	-0,0140	1,0276
$\lambda_4$	$0,1506 \pm j8,1420$	-0,0185	1,2961
$\lambda_5$	$-0,2892 \pm j9,8105$	0,0295	1,5621
$\lambda_6$	$-0,1373 \pm j9,7449$	0,0141	1,5511
$\lambda_7$	$0,0191 \pm j7,2037$	-0,0027	1,1465
$\lambda_8$	$0,0825 \pm j6,8709$	-0,0120	1,0936
$\lambda_9$	$-0,0526 \pm j8,7498$	0,0060	1,3926

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

amortecida de cada modo de interesse, é possível classificar cada modo como sendo do tipo local.

A ausência de pelo menos um modo interárea no sistema Sul Brasileiro e conforme argumentos supracitados no Capítulo 4, conclui-se que não há necessidade da instalação de um conjunto IPFC-POD neste sistema para inserir amortecimento adicional aos modos locais mostrados na Tabela 22. Entretanto, há sim a necessidade de instalar controladores ESPs de maneira que se possa fornecer amortecimento adicional aos modos instáveis e estáveis presentes neste sistema.

De forma análoga ao que foi discutido nas Seções 6.2 e 6.3, o local de instalação dos controladores ESPs em seus respectivos geradores é determinado pelos fatores de participação (KUNDUR, 1994), sendo estes apresentados na Figura 54.



Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Ao analisar a Figura 54 é possível concluir que os geradores 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 são, respectivamente, os mais participativos nos modos  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$ ,  $\lambda_5$ ,  $\lambda_6$ ,  $\lambda_7$ ,  $\lambda_8$  e  $\lambda_9$ . Assim, com o objetivo de garantir que os modos locais  $\lambda_1$  a  $\lambda_9$  atinjam amortecimentos desejados, os geradores G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 e G9 serão equipados com controladores ESPs, sendo desnecessário, portanto, a instalação de controladores POD no sistema Sul Brasileiro, já que não há incidência de modo interárea no sistema.

#### 6.4.1 Ajustes dos parâmetros dos controladores ESPs

De forma análoga ao que foi discutido na Subseções 6.2.3 e 6.3.3, o sinal de entrada que serão utilizados para os ESPs são variações da velocidade angular do rotor do gerador ( $\Delta\omega$ ) e são acoplados nas malhas de controles dos RATs dos geradores síncronos. Em todas as simulações foram adotados que  $T_\omega = 10$  segundos e considerou-se o carregamento do sistema

conforme é destacado no Anexo C e, conseqüentemente, os modos oscilatórios descritos na Tabela 22. Além disso, cada grandeza da proposta de solução (variáveis do problema de otimização) está sujeita à sua respectiva restrição, indicadas nas restrições (190).

$$0,01 \leq T_{1n} \leq 0,2; \quad 0,01 \leq T_{2n} \leq 0,1 \quad 1,0 \leq K_{ESP_n} \leq 10,0 \quad (190)$$

Nas equação (190),  $n$  indica o número geradores síncronos equipados com ESPs,  $T_{1n}$ ,  $T_{2n}$  e  $K_{ESP_n}$ , são, respectivamente, as constantes de tempo (em segundos) e ganhos (em pu) dos controladores ESPs.

#### 6.4.1.1 Performance dos algoritmos AGCBE, PSO e AG no Sul Brasileiro

De forma análoga ao que foi descrito nas Subseções 6.2.3.1 e 6.3.3.1, é avaliado nesta Subseção o desempenho dos três métodos de otimização propostos neste trabalho: SCBGA, PSO e o GA. A diferença entre os testes que foram realizados com este sistema teste e os demais testes realizados com os sistemas Simétrico de Duas Áreas e com o *New England* é que o sistema Sul Brasileiro não está equipado com o IPFC, sendo assim, não há controladores PI e POD e, portanto, não há necessidade de efetuar os ajustes dos parâmetros desses controladores neste sistema teste.

O objetivo é avaliar o desempenho de cada algoritmo quando este é acionado a realizar os ajustes coordenados dos parâmetros dos controladores ESPs, e desta forma inserir amortecimento desejado ao sistema Sul Brasileiro. São considerados os mesmos cenários propostos nas simulações realizadas com o Simétrico de Duas Áreas e com o *New England* nas Subseções 6.2.3.1 e 6.3.3.1:  $\xi_{i_{\min}}^{des1} = 10\%$ ;  $\xi_{i_{\min}}^{des2} = 15\%$ ; 100 testes para cada algoritmo, limitados a um número máximo de 2000 cálculos da função objetivo;

Vale destacar que no AGCBE são utilizadas as funções de avaliação mostradas em (174) a (176), enquanto que para o AG e o PSO foi utilizada a função objetivo descrita em (175). Considerou-se em cada teste que cada variável do problema (parâmetros dos controladores) deve satisfazer as restrições (190). Na Tabela 23 são mostrados os desempenhos de cada algoritmo no sistema Sul Brasileiro.

As soluções apresentadas na Tabela 23 estão limitadas a 2000 cálculos da função objetivo, reunidas em grupos de dez tentativas, sendo exibidas apenas o número de vezes que cada algoritmo alcançou a convergência. O tempo de convergência exibido na Tabela 23 é especificado em tempo médio, mínimo e máximo. Estes referem-se apenas aos tempos em que cada algoritmo obteve sua convergência, excluindo, portanto, o tempo gasto nas tentativas em que os algoritmos não obtiveram convergência.

Tabela 23 - Comparação de desempenho do AGCBE, PSO e AG no sistema Sul Brasileiro

Algoritmo	Faixa de amortecimento (%)	Número de soluções encontradas a cada 10 Testes										Tempo de convergência (s)		
		Médio	Mín.	Máx.										
AGCBE	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	13,94	1,04	74,95
	$\geq 15$	10	10	8	9	8	9	10	10	8	6	127,56	15,30	545,19
PSO	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10,15	1,00	222,43
	$\geq 15$	–	1	1	1	–	–	1	–	–	–	251,15	140,10	400,42
AG	$\geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	81,75	1,04	365,63
	$\geq 15$	9	8	7	6	8	9	8	8	7	9	916,67	309,74	1474,46

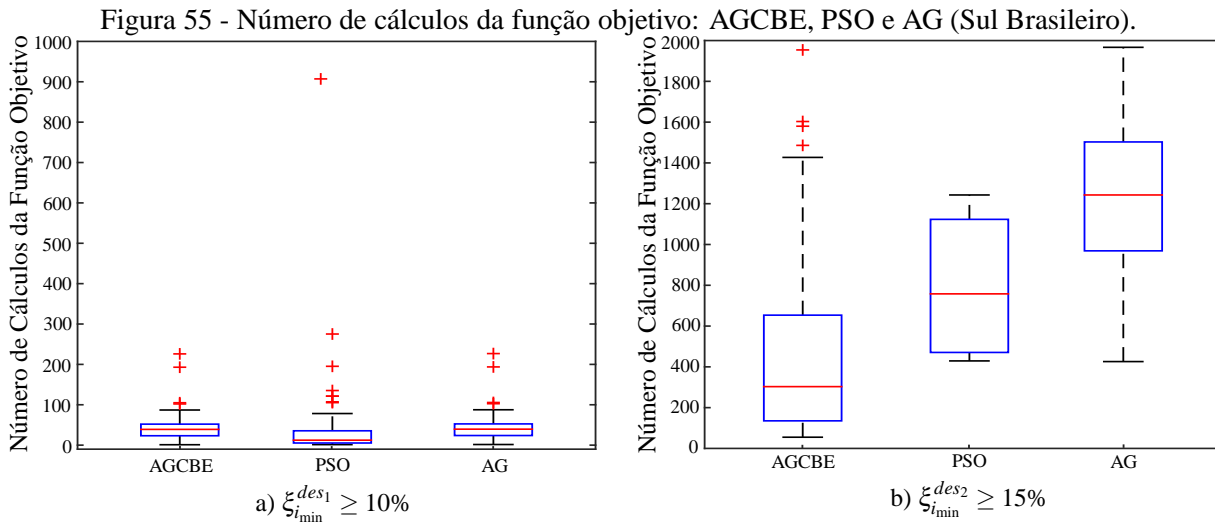
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Na primeira faixa de amortecimento mostrada na Tabela 23 ( $\xi_{i_{\min}}^{des_1} \geq 10\%$ ) é possível verificar que todos os algoritmos propostos neste trabalho (AGCBE, PSO e AG) convergiram em 100% dos testes realizados. Basicamente, nesta faixa de amortecimento, o que determina qual algoritmo teve melhor desempenho é tempo mínimo e máximo relativos ao tempo de convergência. Verifica-se que ambos os algoritmos possuem tempos mínimos bem próximos (em torno de um segundo). Por outro lado, o tempo médio do AG (81,75 segundos) é bem distinto do AGCBE (13,94 segundos) que é semelhante ao tempo obtido pelo PSO (10,15 segundos). Em relação ao tempo máximo utilizado para alcançar a convergência, o AGCBE é superior neste quesito convergindo em 74,95 segundos contra 222,43 segundos do PSO e 365,63 segundos do AG.

Em relação a segunda faixa de amortecimento mostrada na Tabela 23 ( $\xi_{i_{\min}}^{des_2} \geq 15\%$ ), é possível notar que nenhum dos algoritmos propostos neste trabalho obtiveram 100% de convergência nos testes realizados. Entretanto, o AGCBE convergiu em 87%, contra 78% do AG e apenas 4% do PSO. Portanto, fica determinado que nesta faixa de amortecimento o AGCBE é também mais eficiente que o PSO e o AG.

Na Figura 55 são apresentados dois gráficos do tipo *Box Plot*. Estes representam o número de cálculos que cada função objetivo realizou nos algoritmos propostos neste trabalho (AGCBE, PSO e AG) no ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs, tratados na Tabela 23.

A Figura 55 é separada em dois casos distintos: a)  $\xi_{i_{\min}}^{des_1} \geq 10\%$  e b)  $\xi_{i_{\min}}^{des_2} \geq 15\%$ . Note que caso a) a mediana do AGCBE e do AG encontram-se centralizadas nos retângulos o que indica que os dados (número de cálculos da função objetivo para ambos os algoritmos) possuem uma distribuição simétrica. No caso do PSO, este apresenta uma mediana próxima de  $Q_1$ , o que determina que a distribuição dos dados é positivamente assimétrica. No caso b) o AGCBE mediana mais próxima de  $Q_1$  indicando que a distribuição dos dados é positivamente assimétrica. Já o PSO e AG são caracterizados por distribuição simétrica dos dados, pois a mediana de ambos encontram-se mais ao centro do retângulo.



Conforme já analisado na Tabela 23 e confirmado na Figura 55 ambos os algoritmos (AGCBE, PSO e AG) possuem desempenho semelhantes para o caso a). Entretanto, no caso b) verifica-se que além de obter maior taxa de convergência neste caso (confirmado na Tabela 23), o AGCBE possui um retângulo mais compacto e uma mediana bem menor que os demais algoritmos (PSO e AG), demonstrando sua eficiência no ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs.

As simulações realizadas pelos algoritmos propostos neste trabalho no sistema Sul Brasileiro acabam por corroborar o que foi demonstrado na Tabela 16 e na Figura 49 da Seção 6.3. Foi verificado no sistema *New England* que o AGCBE teve melhor desempenho frente ao PSO e o AG (ajuste dos parâmetros dos controladores PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD). Analogamente, verificou-se que que ao aumentar o amortecimento desejado de 10% para 15%, o AGCBE teve atuação destacada no ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs.

#### 6.4.1.2 Análise da estabilidade a pequenas perturbações no sistema Sul Brasileiro

A partir de análises proferidas nas Seções 6.2 e 6.3, foi possível concluir pela eficiência e superioridade do AGCBE quando o assunto é o ajuste dos parâmetros dos controladores PIs e suplementares de amortecimento (ESP e o conjunto IPFC-POD), sendo, portanto, credenciado como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações. Nesta Seção, foi possível, por meio dos dados mostrados Tabela 23 e na Figura 55, concluir que mesmo não tendo IPFC e controladores PI adicionados no sistema Sul Brasileiro, o AGCBE ainda sim, foi mais eficiente que os demais algoritmos propostos neste trabalho (PSO e o AG). Sendo assim, um dos testes executados pelo AGCBE, para cada faixa de amortecimento, é selecionado aleatoriamente e os resultados desses ajustes obtidos pelo AGCBE são apresentados nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 - Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Sul Brasileiro).

Parâmetros ESPs	$\xi_{i_{\min}}^{des1} \geq 10\%$								
	ESP G1	ESP G2	ESP G3	ESP G4	ESP G6	ESP G7	ESP G8	ESP G9	ESP G10
$T_1 = T_3$ (s)	0,1545	0,1694	0,1592	0,1554	0,0843	0,1123	0,1907	0,1259	0,0753
$T_2 = T_4$ (s)	0,0460	0,1000	0,0724	0,0984	0,1000	0,1000	0,0624	0,0651	0,0985
$K_{ESP}$ (pu)	7,6191	3,9000	9,1503	9,6470	3,3317	5,6500	4,1400	7,1592	7,1260

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Tabela 25 - Ganhos, constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo AGCBE (Sul Brasileiro).

Parâmetros ESPs	$\xi_{i_{\min}}^{des2} \geq 15\%$								
	ESP G1	ESP G2	ESP G3	ESP G4	ESP G6	ESP G7	ESP G8	ESP G9	ESP G10
$T_1 = T_3$ (s)	0,1658	0,1676	0,1759	0,1910	0,1618	0,1508	0,2000	0,1622	0,1290
$T_2 = T_4$ (s)	0,0347	0,0708	0,0832	0,0883	0,0829	0,0558	0,1000	0,1000	0,0978
$K_{ESP}$ (pu)	8,4581	8,2693	9,0833	9,7570	2,8000	5,7632	4,1400	8,6582	5,6369

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Vale destacar que os ajustes obtidos pelo AGCBE mostrados nas Tabelas 24 e 25 são determinados com a atuação de nove ESPs no sistema Sul Brasileiro. A partir desses ajustes, este sistema é novamente simulado e uma nova matriz de estado é obtida para o sistema Sul Brasileiro. Sendo assim, novos autovalores de interesse ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{ni}$ ) são calculados para este sistema, os quais podem ser averiguados na Tabela 26.

Tabela 26 - Autovalores dominantes ( $\lambda_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i$ ) e frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{ni}$ ) ajustados pelo AGCBE: Sul Brasileiro.

Modos	$\xi_i^{des1} \geq 10\%$			$\xi_i^{des2} \geq 15\%$		
	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)	$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-1,1779 \pm j6,6081$	0,1755	1,0683	$-0,9577 \pm j5,7475$	0,1644	0,9274
$\lambda_2$	$-1,1449 \pm j7,5339$	0,1502	1,2128	$-1,0621 \pm j6,8602$	0,1530	1,1048
$\lambda_3$	$-0,9482 \pm j5,9805$	0,1566	0,9637	$-1,8414 \pm j6,9187$	0,2572	1,1395
$\lambda_4$	$-0,9733 \pm j8,2963$	0,1165	1,3295	$-1,4435 \pm j6,4912$	0,2171	1,0583
$\lambda_5$	$-1,6042 \pm j10,3505$	0,1532	1,6670	$-2,1695 \pm j8,9683$	0,2351	1,4685
$\lambda_6$	$-1,8782 \pm j9,5396$	0,1932	1,5474	$-2,9502 \pm j7,8567$	0,3515	1,3357
$\lambda_7$	$-0,7272 \pm j7,1692$	0,1009	1,1469	$-1,1630 \pm j6,4085$	0,1786	1,0366
$\lambda_8$	$-0,7060 \pm j6,5583$	0,1070	1,0498	$-1,2570 \pm j7,9322$	0,1565	1,2782
$\lambda_9$	$-1,1896 \pm j9,3296$	0,1265	1,4969	$-1,1624 \pm j7,6065$	0,1511	1,2247

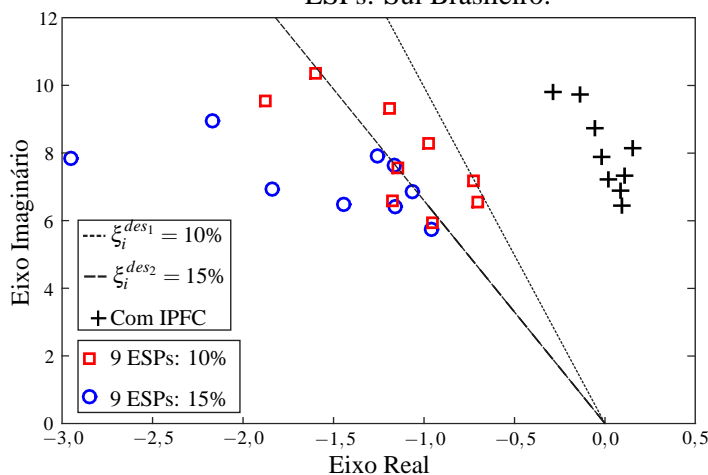
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

Ao analisar os coeficientes de amortecimentos ( $\xi_i$ ) mostrados na Tabela 26, é possível concluir que todos os modos de interesse apresentam coeficientes de amortecimentos dentro do esperado para cada faixa especificada em projeto:  $\xi_i^{des1} \geq 10\%$  e  $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ . Em tese, isto reforça que o AGCBE realizou com êxito o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs no sistema Sul Brasileiro.

O deslocamento dos autovalores de interesse do sistema Sul Brasileiro, antes instável

(Tabela 22) para estável (Tabela 26), considerando as duas faixas de amortecimentos estabelecidas em projeto ( $\xi_i^{des1} \geq 10\%$  e  $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ) podem ser averiguadas na Figura 56, permitindo obter uma representação gráfica dos autovalores de interesse do sistema Sul Brasileiro no plano complexo.

Figura 56 - Posicionamento dos autovalores de interesse após o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs: Sul Brasileiro.



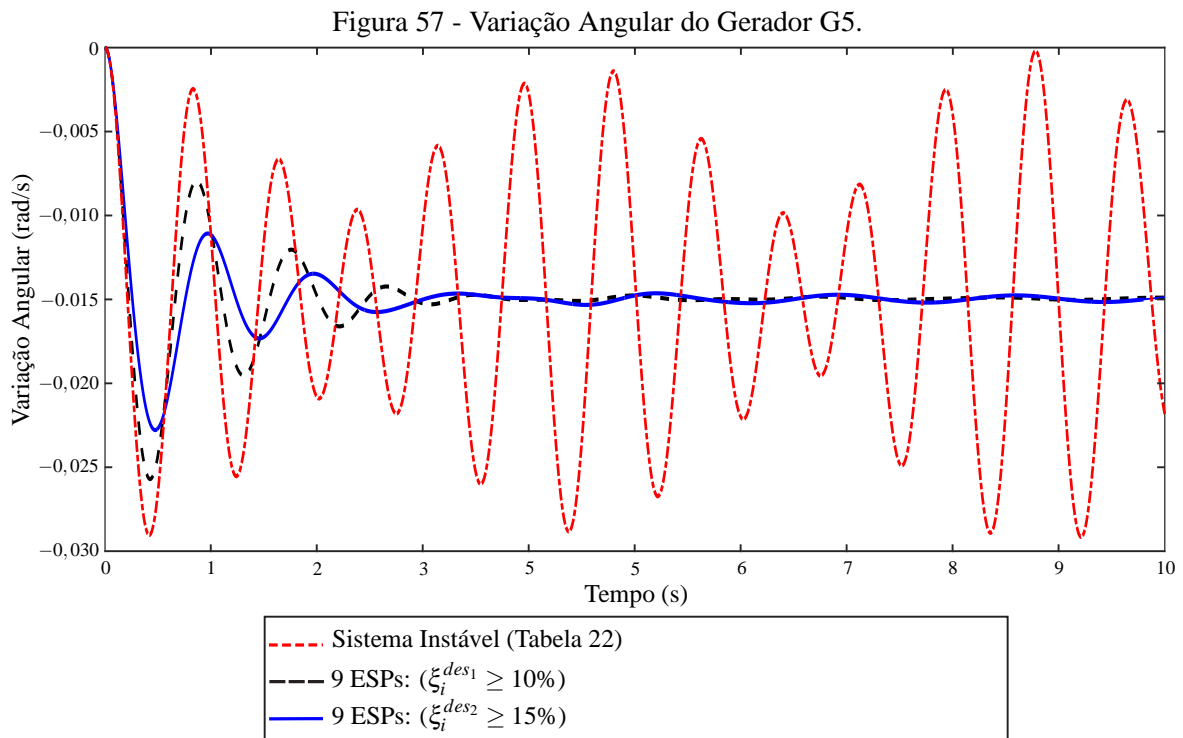
Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

O deslocamento dos autovalores de interesse do sistema Sul Brasileiro mostrados na Figura 56 corroboram os dados apresentados na Tabela 26. Vale destacar que esta representação exibida na Figura 56 só foi possível por meio do correto ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (oito ESPs) inseridos no sistema Sul Brasileiro realizados pelo AGCBE.

Na Figura 57 é apresentada a variação angular do Gerador 5 (tomando como referência o gerador 2, após este ter sofrido uma perturbação de 5% em sua potência mecânica). Os três casos mostrados na Figura 57 se referem ao caso em que sistema Sul Brasileiro era instável (Tabela 22), ao caso em que foi considerada a atuação de nove ESPs cujos parâmetros foram ajustados pelo AGCBE para fornecer no mínimo amortecimento de 10% ( $\xi_i^{des1} \geq 10\%$ ) e 15% ( $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ) aos modos de interesse do sistema Sul Brasileiro.

Analisando a Figura 57 observa-se que a curva referente ao caso em que o sistema estava instável possui oscilações de amplitudes crescentes. Este fato já era esperado pois este caso possui cinco modos oscilatórios representado por autovalores com parte real positiva. Os outros dois casos mostrados possuem perfis de curvas caracterizadas com amplitudes decrescentes, típicas de um sistema estável. Pode-se observar também que o caso em que foi considerado um ajuste para fornecer amortecimento maior ou igual a 15% ( $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ) a todos os modos oscilatórios possui um perfil de curva mais amortecida em comparação com o outro caso ( $\xi_i^{des1} \geq 10\%$ ), eliminando-se as oscilações do sistema teste em aproximadamente 5 segundos.





Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

## 6.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foram aplicadas as três técnicas de otimização apresentadas no Capítulo 5 no ajuste dos parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento ESPs e IPFC-POD: *Particle Swarm Optimization*, Algoritmo Genético com Elitismo e o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado. Foram utilizados três sistemas testes para aplicar as técnicas propostas: Simétrico de Duas Áreas, *New England* e o Sul Brasileiro.

Conforme apresentado no Capítulo 5, o *Particle Swarm Optimization* e o Algoritmo Genético são técnicas de otimização amplamente difundidas na literatura, sendo aplicadas na resolução dos mais diversos tipos de problemas, inclusive, em particular, no problema da estabilidade pequenas perturbações (HASANVAND et al., 2016; SHAYEGHI; SAFARI; SHAYANFAR, 2010; MENEZES, 2014; VALLE, 2014; HASSAN et al., 2014).

O foco principal deste Capítulo, foi validar a técnica apresentada no Capítulo 5, denominada Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado, a partir da comparação do seu desempenho com outras técnicas de otimização disponíveis na literatura afim (*Particle Swarm Optimization* e o Algoritmo Genético com Elitismo). Vale destacar que os algoritmos comparados possuem atuação destacada tanto no tipo de problema apresentado neste trabalho, quanto nos mais variados tipos de problemas encontrados em literaturas especializadas.

Para validar a técnica proposta neste trabalho (Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado), foram realizadas simulações nos três sistemas testes mostrados neste Capítulo (Simétrico de Duas Áreas, *New England* e o Sul Brasileiro), sendo efetuadas da seguinte forma: 100 testes limitadas a 2000 mil cálculos da função objetivo considerando duas faixas de amortecimento distintas -  $\xi_i^{des1} \geq 10\%$  e  $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ . Foi possível verificar a partir dos resultados auferidos que o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado teve melhor desempenho frente aos demais algoritmos. Esta superioridade pôde ser verificada basicamente em duas situações: primeiro, quando aumentou-se complexidade do sistema teste (dimensão do sistema) e segundo, quando a eficiência de ambos os algoritmos foi testada para o caso em que foi exigido um nível maior de amortecimento ( $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ) nos testes realizados.

Desta forma, o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado tem sua atuação validada no ajuste dos parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento (ESPs e IPFc-POD) e conseqüentemente pode ser utilizada como ferramenta no estudo da análise da estabilidade a pequenas perturbações.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste trabalho foram apresentados estudos relacionados com a estabilidade a pequenas perturbações do SEP. Foram abordadas a atuação dos controladores PI e de dois controladores suplementares de amortecimento, o ESP e o conjunto IPFC-POD. Foi mostrado que quando os parâmetros desses controladores são bem ajustados, se consegue inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas de baixa frequência (modos locais e modos interárea).

Para a representação do sistema elétrico de potência e uns dos diferenciais deste trabalho é utilizado o Modelo de Sensibilidade de Corrente, cujo equacionamento foi apresentado no Capítulo 3. Este modelo está baseado no balanço nodal de correntes, balanço este que deve ser satisfeito a cada instante no sistema elétrico de potência. Deve-se salientar que o Modelo de Sensibilidade de Corrente apresentado neste trabalho difere do proposto por Sauer e Pai (1998), onde os pesquisadores aplicam o balanço de potência e em seguida, divide-se este balanço pela tensão elétrica. Desta forma o balanço nodal de corrente foi obtido indiretamente. No caso do modelo aqui utilizado, todas as correntes calculadas a partir das tensões nos nós e das impedâncias existentes no sistema elétrico.

Foi proposto, e esta é mais uma contribuição deste trabalho, um modelo de injeção de corrente para o *Interline Power Flow Controller* (ver Capítulo 4) em que foi possível explicitar uma estrutura para o seu sistema de controle (ver Capítulo 2). Isto possibilitou sua representação no sistema elétrico de potência, representado pelo Modelo de Sensibilidade de corrente, o que permitiu realizar tanto uma análise estática, quanto dinâmica do dispositivo. No que se refere à análise estática, foi mostrado no Capítulo 6 que o *Interline Power Flow Controller* efetuou o controle da tensão nos barramentos comuns de sua instalação, gerenciando de forma efetiva o correto controle de dois fluxos de potências ativa e uma reativa nas linhas em que foi instalado. Deste fato conclui-se que o *Interline Power Flow Controller* é um poderoso dispositivo quando o assunto é controle de fluxos de potência.

No Capítulo 5 foram descritas três técnicas de otimização, cujo objetivo era realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores PI e suplementares de amortecimento (ESPs do conjunto IPFC-POD), são elas: *Particle Swarm Optimization*, Algoritmo Genético com Elitismo e o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado. Esta última, e uma das principais contribuições deste trabalho, é resultante da combinação de duas técnicas: o Algoritmo Genético com Elitismo e o Algoritmo Genético de Chu-Beasley, cujos detalhes

foram apresentados no Capítulo 5.

Ainda no Capítulo 6, foram apresentadas simulações envolvendo as técnicas de otimização mostradas e detalhadas no Capítulo 5. Tais estudos estão relacionados a parte dinâmica deste trabalho e foram realizados em três sistemas testes: Simétrico de Duas Áreas, *New England* e no Sul Brasileiro. Em todas as simulações realizadas com estes sistemas testes, foram adotadas duas faixas de amortecimentos ( $\xi_i^{des1} \geq 10\%$  e  $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ ), sendo realizados 100 testes para cada algoritmo proposto, limitados a 2000 mil cálculos da função objetivo. Dos resultados obtidos no Capítulo 6 foi possível concluir pela hegemonia do Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado frente aos demais algoritmos apresentados no Capítulo 5 (*Particle Swarm Optimization* e o Algoritmo Genético com Elitismo) e conseqüentemente uma melhora substancial na estabilidade nos sistemas testados.

As análises dos resultados simulados no Capítulo 6 foram realizados em duas etapas: primeiro, no sistema Simétrico de Duas Áreas e no *New England*. Neste caso foi possível verificar o desempenho dos ESPs no amortecimento das oscilações electromecânicas de baixa frequência identificadas como de modo local e do conjunto IPFC-POD nas classificadas como interárea. Desta forma, foi necessário realizar os ajustes simultâneos e coordenados dos parâmetros dos controladores PI, quanto dos suplementares de amortecimento ESPs e do conjunto IPFC-POD. Segundo, em um sistema que não possui modo interárea, o Sul Brasileiro. A ausência do modo interárea neste sistema possibilitou inserir amortecimentos desejados aos modos presentes neste sistema (modos locais) apenas com a instalação de controladores ESPs nos Reguladores Automáticos de Tensão dos geradores síncronos. Assim, foi possível analisar o desempenho do Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado em sistemas que possuam tanto modos locais e interárea de oscilação, quanto em sistemas que possuem apenas modos locais de oscilação.

Diante do exposto neste trabalho e após as considerações aqui apresentadas, pode-se concluir que o modelo de injeção de corrente do dispositivo, assim como sua estrutura do sistema de controle baseadas nos controladores PI, apresentaram resultados satisfatórios na representação do *Interline Power Flow Controller* no sistema elétrico de potência. Além disso, foi possível verificar que conjunto IPFC-POD melhorou tanto os desempenhos estáticos quanto dinâmicos do sistema, isto é, melhorou os perfis de tensão dos sistemas e aumentou consideravelmente a estabilidade a pequenas perturbações dos sistemas Simétrico de Duas Áreas e no *New England*. Vale ressaltar que tais melhorias destacadas podem ser de vital importância para a correta e segura operação dos sistemas elétricos atuais, em que as margens de segurança operativas destes sistemas estão, a cada dia, mais próximas de seus limites máximos

de operação.

Por fim, vale mais uma vez destacar os excelentes resultados obtidos com o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado no ajuste dos parâmetros dos controlares PI, ESPs e do conjunto IPFC-POD, fato este que o credencia como poderosa ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

## 7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi mostrado neste trabalho, a partir dos resultados auferidos, que o Modelo de Sensibilidade de Corrente pode ser utilizado para representar os sistemas elétricos de potências, sendo portanto, muito útil na análise da estabilidade à pequenas perturbações.

O *Interline Power Flow Controller*, modelado por injeção de corrente, teve desempenho satisfatório, tanto ao analisar seu desempenho na parte estática quanto na parte dinâmica nos sistemas testes utilizados neste trabalho nos quais foi possível sua instalação.

O Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado se mostrou eficiente, sendo portanto credenciado como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Dos fatos apresentados, como sugestão de trabalhos futuros, é possível propor:

- Modelar novos dispositivos FACTS tais como *Static Synchronous Series Compensator*, *Unified Power Flow Controller* e o *Static Synchronous Compensator* e incluí-los no Modelo de Sensibilidade de Corrente e, portanto, realizar análises estáticas e dinâmicas nos sistemas elétricos de potência;
- Propor e simular novas metaheurísticas e utilizá-las no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e POD (e em alguns casos também os PI) e comparar os resultados obtidos com outras técnicas de otimização, como por exemplo o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado;
- A estrutura do sistema de controle do *Interline Power Flow Controller* foi representada pelos controladores PI, sendo utilizadas para se obter as equações dinâmicas deste dispositivo. Uma alternativa, seria, por exemplo, verificar a possibilidade de se utilizar outros controladores tais como o controlador Proporcional-Integral-Derivativo para obter as equações dinâmicas não só do dispositivo FACTS estudado neste trabalho, mas de outros FACTS aqui mencionados;

- O modelo de fluxo de potência proposto neste trabalho é baseado no método de Newton-Raphson. Uma alternativa interessante, seria implementar um modelo completo de fluxo de potência ótimo, considerando a inclusão do *Interline Power Flow Controller*, para ser resolvido utilizando-se *solvers* de otimização e verificar a partir de então como modelos de fluxos de potências ótimos podem atuar na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

## REFERÊNCIAS

- ABD-ELAZIM, S.; ALI, E. Coordinated design of PSSs and SVC via bacteria foraging optimization algorithm in a multimachine power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 41, n. 1, p. 44 – 53, 2012.
- ACHA, E.; AGELLIDIS, V. G.; ANAYA-LARA, O.; MILLE, T. J. *Power electronic control in electrical systems*. Sri Lanka: Newnes, 2002. 443 p.
- AKAGI, H.; WATANABE, E.; AREDES, M. *Combined series and shunt power conditioners*. New Jersey: IEEE Press-John Wiley, 2007. 109 p.
- AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. *Curso básico de biologia*. São Paulo: Moderna, 1985.
- ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. New York: Wiley-IEEE Press, 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.
- BRATTON, D.; KENNEDY, J. Defining a standard for particle swarm optimization. In: IEEE SWARM INTELLIGENCE SYMPOSIUM, 2007, Honolulu. *Proceedings...* Honolulu: IEEE, 2007. p. 120–127.
- CASTRO, R. E. *Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos de pareto*. 2001. 149 f. Tese (Doutorado) — Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Rio de Janeiro, 2001.
- 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, PER-7, n. 8, p. 32–33, Aug 1987.
- CHU, P. C.; BEASLEY, J. E. A genetic algorithm for the generalised assignment problem. *Computers & Operations Research*, Kidlington, v. 24, n. 1, p. 17 – 23, 1997.
- COELLO, C. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. van. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. 2. ed. New York: Springer, 2007. 800 p. (Genetic Algorithms and Evolutionary Computation).
- CORNE, D.; DORIGO, M.; GLOVER, F. *New Ideas in Optimization*. London: McGraw-Hill, 1999. 493 p. (Advanced topics in computer science series).
- DA COSTA, V. F. *Modelo de Sensibilidade de potência para análise de oscilações de bixa frequência em sistemas de energia elétrica*. 1992. 186 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.
- DE MELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS-88, n. 4, p. 316–329, April 1969.

- DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 965–971, 1994.
- FLOUDAS, C. *Deterministic global optimization: theory, methods and applications*. [S.l.]: Springer, 2013. 742 p. (Nonconvex Optimization and Its Applications).
- FOGEL, D. An introduction to simulated evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Piscataway, v. 5, n. 1, p. 3–14, Jan 1994.
- FORTES, E. V.; MIOTTO, E.; ARAUJO, P. B.; PUPIN, C.; MENEZES, M. M. Ajuste dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento utilizando o algoritmo bacterial foraging optimization. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA - CBQEE, 11., 2015, Campina Grande. *Anais...* Campina Grande: [s.n.], 2015. p. 1–6.
- FURINI, M.; PEREIRA, A.; ARAUJO, P. 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. *Perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC*: 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, 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, 4., 2008, Bogotá. *Proceedings...* Bogotá: IEEE, 2008. p. 1–6.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2003. 557 p. (International Series in Operations Research & Management Science, v. 57).
- GOLDBERG, D. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. 412 p. (Artificial Intelligence).
- GOLDBERG, D. E. *The design of innovation*. Boston: Kluwer, 2002. 231 p.
- GYUGYI, L.; SEN, K.; SCHAUDERR, C. D. The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1115–1123, Jul 1999.
- HASANVAND, H.; ARVAN, M. R.; MOZAFARI, B.; AMRAEE, T. Coordinated design of PSS and TCSC to mitigate interarea oscillations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, United Kingdom, v. 78, p. 194 – 206, 2016. ISSN 0142-0615.
- HASSAN, L. H.; MOGHAVVEMI, M.; ALMURIB, H. A. F.; MUTTAQI, K. M. A coordinated design of pss and upfc-based stabilizer using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 50, n. 5, p. 2957–2966, Sept 2014.
- HAYKIN, S. S. *Redes Neurais*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Ed, 2001. 900 p.
- HEFFRON, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of a modern amplidyne voltage regulator on



- underexcited operation of large turbine generators [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, Piscataway, v. 71, n. 1, p. 692–697, Jan 1952.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission system*. New York: IEEE, 1999. 452 p.
- 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).
- JONH, K. A. *Evolutionary computation: a unified approach*. Cambridge: MIT Press, 2006. 256 p.
- 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.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R.; SHI, Y. *Swarm intelligence*. New York: Academic Press, 2001. 512 p.
- KOPCAK, I. *Uma plataforma unificada para análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência: 2007*. 153 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2007.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: MacGraw-Hill, 1994. 1176 p.
- KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; CUTSEM, T. V.; VITTALI, V. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, Aug 2004.
- LARSEN, E.; SWANN, D. Applying power system stabilizers Part II: Performance objectives and tuning concepts. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, PAS-100, n. 6, p. 3025–3033, June 1981.
- LINDEN, R. *Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional*. Rio de Janeiro: Brasport, 2006. 399 p.
- MAC-LEOD, H. E. P. *Controle ótimo descentralizado para o projeto e coordenação de sinais estabilizadores em sistemas elétricos de potência: 1992*. 217 f. Tese (Doutorado) — Faculdade em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 1992.
- MARTINS, N.; LIMA, L. 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*, Piscataway, v. 5, n. 4, p. 1455–1469, Nov 1990.
- MATHUR, R.; VARMA, R. *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. United States: Wiley, 2002. 495 p. (IEEE Press Series on Power Engineering).
- MENEZES, M. M. *Ajuste de parâmetros de controladores suplementares (POD) através*

- de redes neurais artificiais em dispositivos FACTS TCSC e SSSC*: 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.
- MENEZES, M. M. *Métodos de otimização aplicados no ajuste de ESPs e controladores de amortecimento inseridos no FACTS TCSC em Sistemas elétricos de potência*: 2014. 114 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- MENEZES, M. M.; ARAUJO, P.; FORTES, E. V. Bacterial foraging optimization algorithm used to adjust the parameters of power system stabilizers and thyristor controlled series capacitor-power oscillation damping controller. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 11., Juíz de Fora, *Proceedings...* Juíz de Fora: IEEE, 2014. p. 1–6.
- MICHALEWICZ, Z. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. 2nd. ed. Berlin: Springer, 1994. 321 p.
- 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, China, *Proceedings...* Wuhan: 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, Nov 2002.
- MITCHELL, M. *An Introduction to Genetic Algorithms: complex adaptive systems*. Cambridge: Bradford Books, 1998. (A Bradford book).
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. 164 p.
- MOTA, W. S.; NASCIMENTO, J. A. Projeto de estabilizadores de sistemas de potência por controle clássico e algoritmos genéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14., 2002, Natal. *Anais...* Natal: SBA, 2008. p. 1–6.
- 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*, Scielo, Heidelberg, v. 23, n. 2, p. 190–201, 2012.
- MOUSSA, H.; YU, Y.-n. Dynamic interaction of multi-machine power system and excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS-93, n. 4, p. 1150–1158, July 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, May 2008.
- NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. Damping of power system oscillations by use of controllable components. *IEEE Transactions Power Delivery*, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 2046–2054, 1994.

- NOROOZIAN, M.; GHANDHARI, M.; ANDERSSON, G.; GRONQUIST, J.; HISKENS, I. A robust control strategy for shunt and series reactive compensators to damp electromechanical oscillations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 16, n. 4, p. 812–817, Oct 2001.
- PÁDUA JÚNIOR, C. R. *Modelos lineares de sistemas elétricos de potência: um estudo comparativo*: 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- PASSINO, K. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE Control Systems*, Piscataway, v. 22, n. 3, p. 52 – 67, 2002.
- PEREIRA, A. L. S. *Utilização de redes neurais artificiais no ajuste de controladores suplementares e dispositivo FACTS STATCOM para a melhoria da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência*: 2009. 110 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2009.
- POMILIO, J. A.; PAREDES, H. K. M.; DECKMANN, S. M. *Eletrônica de potência no sistema de transmissão: dispositivos FACTS*. Campinas: [s.n.], 2013. 46 p.
- 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. 144 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2009.
- REZAEI, N.; KALANTAR, M.; SHAYANFAR, A. H.; ALIPOURI, Y.; SAFARI, A. Optimal IPFC signal selection and damping controller design using a novel current injection model in a multi-machine power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 44, n. 1, p. 461–470, 2013.
- ROGERS, G. J. *Power system oscillation*. London: Kluwer Academic Publishers, 2000. 3328 p.
- SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357 p.
- SEN, K.; SEN, M. *Introduction to FACTS Controllers: theory, modeling, and applications*. New Jersey: Wiley, 2009. 408 p. (IEEE Press Series on Power Engineering, v. 54).
- SHAYEGHI, H.; SAFARI, A.; SHAYANFAR, H. A. PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system. *Energy Conversion and Management*, London, v. 51, n. 12, p. 2930 – 2937, 2010.
- SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 1998, Anchorage. *Proceedings...* Anchorage: IEEE, 1998. p. 69–73.
- SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible Ac transmission systems (FACTS)*. Londres: IET, 1999. 592 p.
- TAKAHASHI, A. L. M. *Análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema*

- elétrico de potência considerando a atuação do TCSC e controladores suplementares de amortecimento*: representação pelo modelo de sensibilidade de corrente: 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2013.
- TECRATHANA, S.; YOKOYAMA, A.; NAKACHI, Y.; YASUMATSU, M. An optimal power flow control method of power system by interline power flow controller (IPFC). In: INTERNATIONAL POWER ENGINEERING CONFERENCE - IPEC, 7., 2005, Marina Mandarin. *Proceedings...* Marina Mandarin: IEEE, 2005. v. 2, p. 1075–1080.
- UZINSKI, H.; POSSAGNOLO, L. H. F. M.; ROMERO, R. A. Resolução de problemas multimodais usando um algoritmo genético de chu-beasley modificado com uma busca local eficiente. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL - SBPO, 47., 2015, Porto de Galinhas. *Anais...* Porto de Galinhas: [s.n.], 2015. p. 1–11.
- VALLE, D.; ARAUJO, P. Comparação das estruturas de controle do IPFC e de técnicas de ajuste dos parâmetros do controlador POD. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA - CBQEE, 10., 2013, Araxá. *Anais...* Araxá: [s.n.], 2013. p. 1–6.
- VALLE, D.; ARAUJO, P. The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 65, p. 299–306, February 2015.
- 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. *A Influência do controlador GUPFC no sistema elétrico de potência visando a estabilidade a pequenas perturbações*: 2014. 187 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- 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., 2010, Belém. *Anais...* Belém: [s.n.], 2010. p. 1–6.
- VINKOVIC, A.; MIHALIC, R. A current-based model of an IPFC for newton-raphson power flow. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 79, n. 8, p. 1247 – 1254, 2009.
- 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.
- YANG, N.; LIU, Q.; MCCLELLY, J. D. TCSC controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power System*, Piscataway, 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.

- YOSHIDA, H.; KAWATA, K.; FUKUYAMA, Y.; TAKAYAMA, S.; NAKANISHI, Y. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 15, n. 4, p. 1232–1239, Nov 2000.
- ZADEH, L. Fuzzy sets. *Information and Control*, Maryland Heights, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.
- ZHANG, J. Optimal power flow control for congestion management by interline power flow controller (IPFC). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2006, 5., Chongqing. *Proceedings...* Chongqing: IEEE, 2006. p. 1–6.
- ZHANG, J.; YOKOYAMA, A. Power system transient stability improvement by the interline power flow controller (IPFC). *IEEJ Transactions Power & Energy*, Tokyo, v. 128, n. 1, p. 208–215, 2008.
- ZHANG, J.; YOKOYAMA, A.; IDE, T. Application of interline power flow controller IPFC to power oscillation damping. *IEEJ Transactions Power & Energy*, Tokyo, v. 128, n. 10, p. 1252–1258, 2008.
- ZHANG, J.; YOKOYAMA, A.; IDE, T. Use of IPFC detailed dynamic model for analysis of power flow control and small-signal stability enhancement. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Hoboken, v. 4, n. 5, p. 654–662, 2009.
- ZHANG, X. P. Modelling of the interline power flow controller and the generalised unified power flow controller in newton power flow. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Stevenage, v. 150, n. 3, p. 268–274, May 2003.
- ZHANG, X.-P.; HANDSCHIN, E.; YAO, M. Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 16, n. 3, p. 367–373, Aug 2001.
- ZHANG X.-P, R. C.; PAL, B. *Flexible AC transmission systems: modelling and control*. New York: Springer, 2006. 240 p.
- ZHIGLJAVSKY, A.; ŽILINSKAS, A. *Stochastic global optimization*. New York: Springer, 2007. 262 p. (Springer Optimization and Its Applications).
- ZINI, E. O. C. *Algoritmo genético especializado na resolução de problemas com variáveis contínuas e altamente eestritos*: 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2009.



## ANEXO A - DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

Apresenta-se neste Anexo os dados necessários para efetuar as simulações apresentadas no Capítulo 6 para o sistema Simétrico de Duas Áreas. Estão dispostos, respectivamente, nas Tabelas 27, 28, 29 e 30 dados dos geradores, reguladores automáticos de tensão, linhas de transmissão, barras e carregamentos do sistema simétrico de duas áreas.

Tabela 27 - Dados dos geradores síncronos - Simétrico de Duas Áreas.

Gerador	$x'_d$ (pu)	$x_q$ (pu)	$x_d$ (pu)	$T'_{d0}$ (pu)	$H$ (s)	$D$ (pu)
$G_1$	0,033	0,190	0,20	8,0	54,0	0,01
$G_2$	0,033	0,190	0,20	8,0	54,0	0,01
$G_3$	0,033	0,190	0,20	8,0	63,0	0,01
$G_4$	0,033	0,190	0,20	8,0	63,0	0,01

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 28 - Dados dos reguladores automáticos de tensão - Simétrico de Duas Áreas.

Gerador	G1	G2	G3	G4
$K_r$ (pu)	200	200	200	200
$T_r$ (s)	0,001	0,001	0,001	0,001

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 29 - Dados das linhas de transmissão - Simétrico de Duas Áreas.

Barra Inicial	Barra Final	$r$ (pu)	$x$ (pu)	$b$ (pu)
1	5	0,001	0,012	0,00
2	6	0,001	0,012	0,00
7	BF <sub>1</sub>	0,000	0,010	0,00
7	BF <sub>2</sub>	0,000	0,010	0,00
7	8	0,0219	0,220	0,33
BF <sub>1</sub>	8	0,0219	0,220	0,33
BF <sub>2</sub>	8	0,0219	0,220	0,33
6	7	0,002	0,02	0,03
6	7	0,002	0,02	0,03
4	10	0,001	0,012	0,00
3	9	0,001	0,012	0,00
9	8	0,002	0,02	0,03
9	8	0,002	0,02	0,03
5	6	0,005	0,05	0,075
5	6	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 30 - Dados das barras e carregamentos - Simétrico de Duas Áreas.

Barra	Mag (pu)	Fase (°)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_c$ (MW)	$Q_c$ (MVar)	$B_{sh}$ (pu)
1	1,03	8,94	700,00	183,02	0,00	0,00	0,00
2	1,01	-0,94	700,00	306,02	0,00	0,00	0,00
3	1,03	-10,88	700,00	341,59	0,00	0,00	0,00
4	1,01	0,00	725,76	87,50	0,00	0,00	0,00
5	1,00	4,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,97	-5,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,93	-14,20	0,00	0,00	1159,00	212,00	1,00
8	0,96	-23,79	0,00	0,00	1575,00	288,00	3,50
9	0,98	-15,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,99	-4,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BF <sub>1</sub>	—	—	—	—	—	—	—
BF <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).



## ANEXO B - DADOS DO SISTEMA *NEW ENGLAND*

Apresenta-se neste Anexo os dados necessários para efetuar as simulações apresentadas no Capítulo 6 com o sistema *New England*. Estão dispostos, respectivamente, nas Tabelas 31, 32, 33 e 34 dados dos geradores, reguladores automáticos de tensão, linhas de transmissão, barras e carregamentos do sistema simétrico de duas áreas.

Tabela 31 - Dados dos geradores síncronos - *New England*.

<b>Gerador</b>	$x'_d$ (pu)	$x_d$ (pu)	$x_q$ (pu)	$H$ (s)	$D$ (pu)	$T'_{d0}$ (s)
1	0,0310	0,1000	0,0609	42,00	4,00	10,20
2	0,0697	0,2950	0,2820	30,30	9,75	6,56
3	0,0531	0,2495	0,2370	35,80	10,00	5,70
4	0,0436	0,2620	0,2580	28,60	10,00	6,56
5	0,1320	0,6700	0,6200	26,00	3,00	5,40
6	0,0500	0,2540	0,2410	34,80	10,00	7,30
7	0,0490	0,2950	0,2920	26,40	8,00	5,66
8	0,0570	0,2900	0,2800	24,30	9,00	6,70
9	0,0570	0,2106	0,2050	34,50	14,00	4,79
10	0,0001	1 e -10	1 e -10	1 e 9	10,00	7,00

**Fonte:** Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 32 - Dados dos reguladores automáticos de tensão - *New England*.

<b>Gerador</b>	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
$K_r$ (pu)	5,00	6,20	5,00	5,00	40,00	5,00	40,00	5,00	40,00	0,001
$T_r$ (s)	0,06	0,05	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	9999

**Fonte:** Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 33 - Dados das linhas de transmissão - New England.

Barra Inicial	Barra Final	$r$ (pu)	$x$ (pu)	$b$ (pu)
30	31	0,0035	0,0411	0,6987
30	10	0,0010	0,0250	0,7500
31	32	0,0013	0,0151	0,2572
31	25	0,0070	0,0086	0,1406
32	33	0,0013	0,0213	0,2214
32	18	0,0011	0,0133	0,2138
33	34	0,0008	0,0128	0,1342
33	14	0,0008	0,0129	0,1382
34	35	0,0002	0,0026	0,0434
BF1	34	0,0008	0,0112	0,1476
BF2	36	0,0004	0,0046	0,0780
37	BF1	0,0000	0,0100	0,0000
34	BF2	0,0000	0,0100	0,0000
35	36	0,0006	0,0092	0,1130
35	11	0,0007	0,0082	0,1389
36	37	0,0004	0,0046	0,0780
37	38	0,0023	0,0363	0,3804
38	10	0,0010	0,0250	1,2000
39	11	0,0004	0,0043	0,0729
39	13	0,0004	0,0043	0,0729
13	14	0,0009	0,0101	0,1723
14	15	0,0018	0,0217	0,3660
15	16	0,0009	0,0094	0,1710
16	17	0,0007	0,0089	0,1342
16	19	0,0016	0,0195	0,3040
16	21	0,0008	0,0135	0,2548
16	24	0,0003	0,0059	0,0680
17	18	0,0007	0,0082	0,1319
17	27	0,0013	0,0173	0,3216
21	22	0,0008	0,0140	0,2565
22	23	0,0006	0,0096	0,1846
23	24	0,0022	0,0350	0,3610
25	26	0,0032	0,0323	0,5130
26	27	0,0014	0,0147	0,2396
26	28	0,0043	0,0474	0,7802
26	29	0,0057	0,0625	1,0290
28	29	0,0014	0,0151	0,2490
12	11	0,0016	0,0435	0,0000
12	13	0,0016	0,0435	0,0000
35	2	0,0000	0,0250	0,0000
39	3	0,0000	0,0200	0,0000
19	4	0,0007	0,0142	0,0000
20	5	0,0009	0,0180	0,0000
22	6	0,0000	0,0143	0,0000
23	7	0,0005	0,0272	0,0000
25	8	0,0006	0,0232	0,0000
31	1	0,0000	0,0181	0,0000
29	9	0,0008	0,0156	0,0000
19	20	0,0007	0,0138	0,0000

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 34 - Dados das barras e carregamentos - *New England*.

Barra	Mag (pu)	Fase (°)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_c$ (MW)	$Q_c$ (MVar)
1	1,0000	-2,3023	250,00	72,97	0,00	0,00
2	1,0100	0,0000	665,82	211,98	9,00	5,00
3	1,0000	1,0064	650,00	175,91	0,00	0,00
4	1,0000	4,3677	632,00	132,73	0,00	0,00
5	1,0000	3,4759	508,00	128,92	0,00	0,00
6	1,0000	6,3492	650,00	184,49	0,00	0,00
7	1,0000	9,5297	560,00	127,42	0,00	0,00
8	1,0000	3,6522	540,00	32,98	0,00	0,00
9	1,0000	9,1688	830,00	62,95	0,00	0,00
10	1,0000	-5,4225	1000,00	178,39	1214,40	250,00
11	0,9717	-7,6744	-0,00	-0,00	0,00	0,00
12	0,9501	-7,5684	-0,00	-0,00	8,00	88,00
13	0,9689	-7,3331	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,9618	-8,8708	-0,00	-0,00	0,00	0,00
15	0,9529	-8,6543	0,00	-0,00	320,00	153,00
16	0,9653	-6,7557	0,00	0,00	329,00	32,00
17	0,9688	-7,7760	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,9681	-8,7130	-0,00	-0,00	158,00	30,00
19	0,9808	-0,8279	-0,00	-0,00	0,00	0,00
20	0,9764	-1,8294	0,00	-0,00	628,00	103,00
21	0,9616	-4,1096	0,00	0,00	274,00	115,00
22	0,9780	0,8958	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,9744	0,5744	0,00	0,00	275,00	85,00
24	0,9703	-6,6644	-0,00	0,00	309,00	-92,00
25	0,9970	-3,5551	0,00	0,00	224,00	48,00
26	0,9885	-5,3178	-0,00	0,00	139,00	17,00
27	0,9728	-7,7534	-0,00	-0,00	281,00	76,00
28	0,9898	-1,3848	-0,00	-0,00	206,00	28,00
29	0,9920	1,6979	0,00	-0,00	284,00	27,00
30	1,0066	-5,2818	-0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,9878	-4,9278	-0,00	-0,00	0,00	0,00
32	0,9709	-8,9577	0,00	0,00	322,00	2,00
33	0,9558	-10,9772	-0,00	-0,00	500,00	184,00
34	0,9676	-10,3859	-0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,9725	-9,6241	0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,9791	-12,7161	-0,00	0,00	233,00	84,00
37	0,9548	2,2068	0,00	0,00	522,00	176,00
38	0,9904	-2,4483	0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,9735	-6,6675	0,00	0,00	0,00	0,00
BF1	-	-	-	-	-	-
BF2	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).



### ANEXO C - DADOS DO SISTEMA SUL BRASILEIRO

Apresenta-se neste Anexo os dados necessários para efetuar as simulações apresentadas no Capítulo 6 com o sistema Sul Brasileiro. Estão dispostos, respectivamente, nas Tabelas 35, 36, 37 e 38 dados dos geradores, reguladores automáticos de tensão, linhas de transmissão, barras e carregamentos do sistema simétrico de duas áreas.

Tabela 35 - Dados dos geradores síncronos - Sul Brasileiro.

Gerador	$x'_d$ (pu)	$x_d$ (pu)	$x_q$ (pu)	$H$ (s)	$D$ (pu)	$T'_{d0}$ (s)
1	0,0457	0,1460	0,1050	37,32	0,00	6,90
2	0,0985	0,4015	0,2979	11,30	0,00	4,90
3	0,0300	0,0973	0,0700	39,46	0,00	8,27
4	0,0180	0,0561	0,0400	74,40	0,00	7,92
5	0,0215	0,0679	0,0500	57,28	0,00	10,00
6	0,1350	1,0150	0,7700	3,56	0,00	5,00
7	0,1535	0,9130	0,5304	5,06	0,00	4,89
8	0,1007	0,4000	0,2987	9,68	0,00	6,66
9	0,0550	0,2211	0,1235	20,34	0,00	9,55
10	0,0184	0,0730	0,0525	51,63	0,00	7,59

Fonte: Adaptado de Valle (2014).

Tabela 36 - Dados dos reguladores automáticos de tensão - Sul Brasileiro.

Gerador	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
$K_r$ (pu)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$T_r$ (s)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Fonte: Adaptado de Valle (2014).

Tabela 37 - Dados das linhas de transmissão - Sul Brasileiro.

Barra Inicial	Barra Final	$r$ (pu)	$x$ (pu)	$b$ (pu)
11	12	0,0007	0,0145	1,5672
11	12	0,0007	0,0145	1,5672
11	25	0,0018	0,0227	2,1230
11	33	0,0014	0,0204	2,2869
12	42	0,0000	0,0063	0,0000
1	29	0,0000	0,0135	0,0000
13	14	0,0386	0,1985	0,3425
13	35	0,0096	0,0491	0,0861
13	45	0,0033	0,0167	0,3019
14	15	0,0463	0,3378	0,3917
14	15	0,0463	0,3378	0,3917
14	37	0,0177	0,0910	0,1510
14	37	0,0177	0,0910	0,1510
14	37	0,0177	0,0910	0,1510
2	15	0,0000	0,0460	0,0000
15	16	0,0163	0,0835	0,1411
15	16	0,0163	0,0835	0,1411
15	39	0,0250	0,1648	0,4581
16	17	0,0163	0,0835	0,1445
16	18	0,0316	0,1621	0,2746
17	18	0,0153	0,0861	0,1328
3	18	0,0000	0,0114	0,0000
18	19	0,0306	0,1523	0,2620
18	44	0,0344	0,1760	0,3061
18	44	0,0344	0,1760	0,3061
19	20	0,0245	0,1256	0,1981
19	25	0,0000	0,0300	0,0000
20	21	0,0088	0,0415	0,5009
21	22	0,0182	0,0935	0,1602
21	22	0,0182	0,0935	0,1602
21	26	0,0000	0,0062	0,0000
22	23	0,0154	0,0776	0,1386
22	23	0,0154	0,0776	0,1386
23	24	0,0216	0,1105	0,1872
23	24	0,0216	0,1105	0,1872
23	28	0,0000	0,0062	0,0000
24	35	0,0180	0,0920	0,1556
24	35	0,0180	0,0920	0,1556
4	25	0,0000	0,0067	0,0000
25	26	0,0019	0,0280	3,1526
25	27	0,0019	0,0274	3,0741
25	29	0,0014	0,0195	2,2505
25	36	0,0005	0,0070	0,7857
26	27	0,0005	0,0069	0,7728
26	28	0,0012	0,0175	2,0160
29	30	0,0021	0,0300	3,5289
30	38	0,0000	0,0062	0,0000
31	32	0,0022	0,0300	3,6137
31	40	0,0000	0,0062	0,0000

Continuação dos dados de linha do sistema Sul Brasileiro (Tabela 37).

Barra Inicial	Barra Final	$r$ (pu)	$x$ (pu)	$b$ (pu)
32	33	0,0014	0,0195	2,2441
5	33	0,0000	0,0114	0,0000
33	36	0,0005	0,0070	0,7856
6	34	0,0000	0,0871	0,0000
34	35	0,0000	0,0590	0,0000
7	35	0,0000	0,0701	0,0000
8	35	0,0000	0,0450	0,0000
35	45	0,0129	0,0657	0,1155
10	36	0,0000	0,0068	0,0000
37	38	0,0021	0,0107	0,0208
37	38	0,0021	0,0107	0,0208
37	38	0,0021	0,0107	0,0208
37	40	0,0184	0,0949	0,0000
37	40	0,0184	0,0949	0,0000
37	40	0,0184	0,0949	0,0000
9	39	0,0000	0,0236	0,0000
39	40	0,0202	0,1129	0,1993
41	42	0,0106	0,0596	0,0951
41	42	0,0106	0,0596	0,0951
41	43	0,0110	0,1184	0,2081
41	44	0,0229	0,1174	0,2087
42	43	0,0172	0,0884	0,1446
42	43	0,0172	0,0884	0,1446
43	44	0,0181	0,0929	0,1671

Fonte: Adaptado de Valle (2014).

Tabela 38 - Dados das barras e carregamentos - Sul Brasileiro.

Barra	Mag (pu)	Fase (°)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_c$ (MW)	$Q_c$ (MVar)
1	1,0200	-6,8869	650,00	4,92	0,00	0,00
2	1,0400	-14,1160	215,00	64,24	0,00	0,00
3	1,0200	2,9779	895,00	102,90	0,00	0,00
4	1,0220	0,0000	1531,60	-39,49	0,00	0,00
5	1,0180	7,0320	1325,00	-4,78	0,00	0,00
6	1,0300	-24,5660	90,00	41,09	0,00	0,00
7	1,0300	-23,0820	120,00	45,51	0,00	0,00
8	1,0300	-21,7260	241,00	75,96	0,00	0,00
9	1,0000	-14,1550	460,00	98,12	0,00	0,00
10	1,0200	2,76070	1100,00	-80,83	0,00	0,00
11	1,0240	-6,92750	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,0146	-9,37400	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,9700	-32,3160	0,00	0,00	177,00	68,00
14	1,0084	-33,9740	0,00	0,00	191,00	42,00
15	1,0160	-19,4860	0,00	0,00	171,00	18,50
16	0,9939	-16,2260	0,00	0,00	126,00	47,00
17	0,9933	-10,6110	0,00	0,00	46,00	14,70
18	1,0134	-2,68650	0,00	0,00	281,00	56,50
19	1,0097	-10,9650	0,00	0,00	279,00	60,70
20	1,0024	-20,8970	0,00	0,00	130,00	29,40
21	1,0131	-21,0920	0,00	0,00	427,00	-25,00
22	0,9587	-27,5830	0,00	0,00	310,00	141,00
23	0,9896	-26,3460	0,00	0,00	424,00	90,60
24	0,9852	-28,7770	0,00	0,00	117,00	53,10
25	1,0295	-5,59700	0,00	0,00	0,00	0,00
26	1,0165	-18,7620	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,0209	-17,2500	0,00	0,00	368,00	59,60
28	0,9978	-24,3180	0,00	0,00	0,00	0,00
29	1,0230	-11,7110	0,00	0,00	174,00	-8,00
30	1,0138	-29,2240	0,00	0,00	0,00	0,00
31	1,0116	-22,7860	0,00	0,00	0,00	0,00
32	1,0202	-9,68310	0,00	0,00	0,00	0,00
33	1,0293	-1,25640	0,00	0,00	0,00	0,00
34	0,9981	-28,9380	0,00	0,00	125,00	39,80
35	1,0024	-27,7560	0,00	0,00	0,00	0,00
36	1,0280	-1,33000	0,00	0,00	0,00	0,00
37	1,0159	-33,4580	0,00	0,00	813,00	110,00
38	1,0263	-32,7300	0,00	0,00	612,00	-455,00
39	0,9828	-20,4970	0,00	0,00	404,00	135,00
40	1,0180	-25,4470	0,00	0,00	393,00	-111,00
41	0,9825	-15,5590	0,00	0,00	262,00	13,20
42	0,9999	-11,5660	0,00	0,00	229,00	183,00
43	0,9719	-15,3610	0,00	0,00	184,00	60,20
44	0,9719	-13,3020	0,00	0,00	139,00	53,70
45	0,9686	-32,0380	0,00	0,00	90,10	55,30

Fonte: Adaptado de Valle (2014).



**APÊNDICE A - ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS**

1. MENEZES, M. M.; ARAUJO, P.; FORTES, E. V. Bacterial foraging optimization algorithm used to adjust the parameters of power system stabilizers and thyristor controlled series capacitor-power oscillation damping controller. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 11., Juíz de Fora, *Proceedings...* Juíz de Fora: IEEE, 2014. p. 1 – 6.
2. 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: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA - CBQEE. 11., 2015, Campina Grande. *Anais...*, Campina Grande: [s.n.], 2015. p. 1 – 6.
3. 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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI. 12., 2015, Natal. *Anais...* Natal: [s.n.], 2015. p. 1 – 6.
4. PUPIN, C. E.; ARAUJO, P. B.; MENEZES, M. M.; FORTES, E. V. Ajuste de controladores ESP e POD de sistemas de potência pela técnica particle swarm optimization. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CLAGTEE, 11., 2015, São José dos Campos. *Anais...* São José dos Campos: [s.n.], 2015. p. 1 – 10.
5. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; MARTINS, L. F. B. Modelo matemático para fluxo de potência ótimo considerando o FACTS interline power flow controller. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE. 9., 2016, Natal. *Anais...* Natal: [s.n.], 2016. p. 1 – 6.
6. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H. GAMINO, B. R.; MARTINS, L. F. B. Ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESP e IPFC-POD usando um algoritmo multi-start. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 21., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 1 – 6.
7. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; GAMINO, B. R.; MIOTTO, E. L. Ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores power system stabilizers via algoritmo genético de chu-beasley especializado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL - SBPO, 48., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 1 – 12.

8. MARTINS, L. F. B.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; GAMINO, B. R. Atuação do FACTS SSSC modelado por injeções de corrente no sistema elétrico de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE. 9., 2016, Natal. *Anais...* Natal: [s.n.], 2016. p. 1 – 6.
9. MIOTTO, E. L.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B. Ajuste coordenado dos controladores ESP e GUPFC-POD através do particle swarm optimization. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE. 9., 2016, Natal. *Anais...* Natal: [s.n.], 2016. p. 1 – 6.
10. GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B. Meta-heurísticas bio-inspiradas aplicadas ao problema de fluxo de potência ótimo reativo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL - SBPO, 48., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 1 – 12.
11. GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MIOTTO E. L.; MARTINS, L. F. B. Ajuste dos parâmetros de controladores ESP e conjunto TCSC-POD utilizando o algoritmo particle swarm optimization. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 21., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 1 – 6.
12. FORTES, E. V.; ARAUJO, P.; MACEDO, L. H. A Modified simulated annealing algorithm for tuning the parameters of PSS and IPFC-POD controllers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 12., Curitiba, *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1 – 8.
13. MARTINS, L. F. B.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; GAMINO, B. R.; MIOTTO, E. L. Comparison between Artificial Bee Colony and Particle Swarm Optimization Algorithms in the tuning of PSS and UPFC-POD Controllers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 12., Curitiba, *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1 – 8.
14. GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B. Coordinated tuning of PSS and TCSC-POD controller using an Elite Genetic Algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 12., Curitiba, *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1 – 8.
15. MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; GAMINO, B. R. Ajuste coordenado dos parâmetros de controladores suplementares pelo algoritmo particle swarm optimization. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 21., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 1 – 6.

16. MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B. Coordinated Tuning of the Parameters of Supplementary Controllers Damping Using Bio-inspired Algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 12., Curitiba, *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1 – 8.
17. 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*, Netherlands, v. 140, p. 708 – 721, 2016.
18. FORTES, E. V., MACEDO, L. H.; ARAUJO, P. B.; ROMERO, R. Evaluation of the influence of supplementary damping controllers in small-signal stability of multimachine systems using a variable neighbourhood search algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution* , United Kingdom, v. XXX, n. X, p. XXX-XXX, 2016. (Submetido)



## APÊNDICE B - DERIVADAS DA MATRIZ JACOBIANA

$$P_{l_j} = -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial V_{p_j}} = -V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (191a)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial V_{q_j}} = -V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (191b)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial V_{p_k}} = 0 \quad (191c)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial \theta_i} = -V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij}) \quad (191d)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial \theta_j} = V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_j b_{ij} (-V_{q_j} \cos \theta_{ij} + V_{p_j} \sin \theta_{ij}) \quad (191e)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial \theta_k} = 0 \quad (191f)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial V_i} = -V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (191g)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial V_j} = -V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij}) \quad (191h)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial V_k} = 0 \quad (191i)$$

$$\frac{\partial P_{l_j}}{\partial V_{q_k}} = 0 \quad (191j)$$

$$Q_{l_j} = V_j^2 b_{ij} - V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial V_{p_j}} = -V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (192a)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial V_{q_j}} = -V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (192b)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial V_{p_k}} = 0 \quad (192c)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial \theta_i} = V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} (-V_{q_j} \sin \theta_{ij} - V_{p_j} \cos \theta_{ij}) \quad (192d)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial \theta_j} = -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij}) \quad (192e)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial \theta_k} = 0 \quad (192f)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial V_i} = -V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (192g)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial V_j} = 2V_j b_{ij} - V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij}(V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij}) \quad (192h)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial V_k} = 0 \quad (192i)$$

$$\frac{\partial Q_{l_j}}{\partial V_{q_k}} = 0 \quad (192j)$$

$$P_{l_k} = -V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k b_{ik} [V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik}]$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial V_{p_j}} = 0 \quad (193a)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial V_{q_j}} = 0 \quad (193b)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial V_{p_k}} = -V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (193c)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial \theta_i} = -V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_k b_{ik} (V_{q_k} \cos \theta_{ik} - V_{p_k} \sin \theta_{ik}) \quad (193d)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial \theta_j} = 0 \quad (193e)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial \theta_k} = V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_j b_{ik} (-V_{q_k} \cos \theta_{ik} + V_{p_k} \sin \theta_{ik}) \quad (193f)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial V_i} = -V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (193g)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial V_j} = 0 \quad (193h)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial V_k} = -V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} - b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik}) \quad (193i)$$

$$\frac{\partial P_{l_k}}{\partial V_{q_k}} = -V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (193j)$$

$$P_i = -V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} - V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_i b_{ij} V_{p_j} - V_i b_{ik} V_{p_k}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{p_j}} = -V_i b_{ij} \quad (194a)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{q_j}} = 0 \quad (194b)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{p_k}} = -V_i b_{ik} \quad (194c)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (194d)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (194e)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (194f)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = -V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} - V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - \underbrace{b_{ij} V_{p_j} - b_{ik} V_{p_k}}_{IPFC} \quad (194g)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (194h)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_k} = -V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (194i)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{qk}} = 0 \quad (194j)$$

$$P_j = V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{p_j}} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (195a)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{q_j}} = V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (195b)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{p_k}} = 0 \quad (195c)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} = V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + \underbrace{V_j b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij})}_{IPFC} \quad (195d)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} = V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + \underbrace{V_j b_{ij} (-V_{q_j} \cos \theta_{ij} + V_{p_j} \sin \theta_{ij})}_{IPFC} \quad (195e)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_k} = 0 \quad (195f)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_i} = V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (195g)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_j} = V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} + \underbrace{b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij})}_{IPFC} \quad (195h)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_k} = 0 \quad (195i)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{qk}} = 0 \quad (195j)$$

$$P_k = V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_j b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{p_j}} = 0 \quad (196a)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{qj}} = 0 \quad (196b)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{pk}} = -V_i b_{ik} + V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (196c)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} = V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + \underbrace{V_k b_{ik} (V_{qk} \cos \theta_{ik} - V_{pk} \sin \theta_{ik})}_{IPFC} \quad (196d)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_j} = 0 \quad (196e)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + \underbrace{V_k b_{ik} (-V_{qk} \cos \theta_{ik} + V_{pk} \sin \theta_{ik})}_{IPFC} \quad (196f)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_i} = V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (196g)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_j} = 0 \quad (196h)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} + \underbrace{b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik})}_{IPFC} \quad (196i)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{qk}} = V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (196j)$$

$$Q_i = -V_i^2 b_{ii} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_i b_{ij} V_{qj}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{pj}} = 0 \quad (197a)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{qj}} = -V_i b_{ij} \quad (197b)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{pk}} = 0 \quad (197c)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (197d)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (197e)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (197f)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_i b_{ii} + V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - \underbrace{b_{ij} V_{qj} - b_{ik} V_{qk}}_{IPFC} \quad (197g)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (197h)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_k} = V_i b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (197i)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{qk}} = -V_i b_{ik} \quad (197j)$$



$$Q_j = -V_j^2 b_{ij} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{p_j}} = -V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (198a)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{q_j}} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (198b)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{p_k}} = 0 \quad (198c)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} = -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + \underbrace{V_j b_{ij} (-V_{q_j} \sin \theta_{ij} - V_{p_j} \cos \theta_{ij})}_{IPFC} \quad (198d)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} = V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + \underbrace{V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij})}_{IPFC} \quad (198e)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_k} = 0 \quad (198f)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_i} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (198g)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_j} = -2V_j b_{ij} + V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} + \underbrace{b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij})}_{IPFC} \quad (198h)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_k} = 0 \quad (198i)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{q_k}} = 0 \quad (198j)$$

$$Q_k = -V_k^2 b_{ik} + V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_j b_{ik} (V_{q_k} \cos \theta_{ik} - V_{p_k} \sin \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{p_j}} = 0 \quad (199a)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{q_j}} = 0 \quad (199b)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{p_k}} = -V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (199c)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} = -V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + \underbrace{V_k b_{ik} (-V_{q_k} \sin \theta_{ik} - V_{p_k} \cos \theta_{ik})}_{IPFC} \quad (199d)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_j} = 0 \quad (199e)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + \underbrace{V_k b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik})}_{IPFC} \quad (199f)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_i} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (199g)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_j} = 0 \quad (199h)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_i b_{ik} \cos \theta_{ik} + \underbrace{b_{ik}(V_{q_k} \cos \theta_{ik} - V_{p_k} \sin \theta_{ik})}_{IPFC} \quad (199i)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{q_k}} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (199j)$$

$$PE = -V_i b_{ij} V_{p_j} - V_i b_{ik} V_{p_k} + V_j b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij}) + V_k b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{p_j}} = -V_i b_{ij} + V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (200a)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{q_j}} = V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (200b)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{p_k}} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_i b_{ik} \quad (200c)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial \theta_i} = V_j b_{ij} (V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} \sin \theta_{ij}) + V_k b_{ik} (V_{q_k} \cos \theta_{ik} - V_{p_k} \sin \theta_{ik}) \quad (200d)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial \theta_j} = V_j b_{ij} (-V_{q_j} \cos \theta_{ij} + V_{p_j} \sin \theta_{ij}) \quad (200e)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial \theta_k} = V_k b_{ik} (-V_{q_k} \cos \theta_{ik} + V_{p_k} \sin \theta_{ik}) \quad (200f)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_i} = -b_{ij} V_{p_j} - b_{ik} V_{p_k} \quad (200g)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_j} = b_{ij} (V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} \cos \theta_{ij}) \quad (200h)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_k} = b_{ik} (V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} \cos \theta_{ik}) \quad (200i)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{q_k}} = V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (200j)$$

**APÊNDICE C - DERIVADAS DA MATRIZ QUE COMPÕE O FLUXO DE CARGA EXPANDIDO**

$$\Delta \dot{V}_{p_j} = \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_j} \Delta V_j + \frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_{q_j}} \Delta V_{q_j} + \frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_{p_j}} \Delta V_{p_j} + \frac{\partial V_{p_j}}{\partial X_1} \Delta X_1$$

$$\frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_i} = \frac{K_1}{T_{m_p}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (201a)$$

$$\frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_j} = \frac{K_1}{T_{m_p}} (V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_{q_j} b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (201b)$$

$$\frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_i} = \frac{K_1}{T_{m_p}} (V_i b_{ij} V_j \cos \theta_{ij} + V_j V_{q_j} b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_j V_{p_j} b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (201c)$$

$$\frac{\partial V_{p_j}}{\partial \theta_j} = \frac{K_1}{T_{m_p}} (-V_i b_{ij} V_j \cos \theta_{ij} - V_j V_{q_j} b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j V_{p_j} b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (201d)$$

$$\frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_{q_j}} = \frac{K_1}{T_{m_p}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (201e)$$

$$\frac{\partial V_{p_j}}{\partial V_{p_j}} = \frac{K_1}{T_{m_p}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - \frac{1}{T_{m_p}} \quad (201f)$$

$$\frac{\partial V_{p_j}}{\partial X_1} = \frac{1}{T_{m_p}} \quad (201g)$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \frac{\partial X_1}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial X_1}{\partial V_j} \Delta V_j + \frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial X_1}{\partial V_{q_j}} \Delta V_{q_j} + \frac{\partial X_1}{\partial V_{p_j}} \Delta V_{p_j}$$

$$\frac{\partial X_1}{\partial V_i} = \frac{1}{T_{1_i}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (202a)$$

$$\frac{\partial X_1}{\partial V_j} = \frac{1}{T_{1_i}} (V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_{q_j} b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_{p_j} b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (202b)$$

$$\frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} = \frac{1}{T_{1_i}} (V_i b_{ij} V_j \cos \theta_{ij} + V_j V_{q_j} b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_j V_{p_j} b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (202c)$$

$$\frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} = \frac{1}{T_{1_i}} (-V_i b_{ij} V_j \cos \theta_{ij} - V_j V_{q_j} b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j V_{p_j} b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (202d)$$

$$\frac{\partial X_1}{\partial V_{q_j}} = \frac{1}{T_{1_i}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (202e)$$

$$\frac{\partial X_1}{\partial V_{p_j}} = \frac{1}{T_{1_i}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (202f)$$

$$\Delta \dot{V}_{q_j} = \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_j} \Delta V_j + \frac{\partial V_{q_j}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial V_{q_j}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_{q_j}} \Delta V_{q_j} + \frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_{p_j}} \Delta V_{p_j} + \frac{\partial V_{q_j}}{\partial X_2} \Delta X_2$$

$$\frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_i} = \frac{K_2}{T_{m_p}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (203a)$$

$$\frac{\partial V_{q_j}}{\partial V_j} = \frac{K_2}{T_{m_p}} (-2V_i b_{ij} + V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_{q_j} b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_{p_j} b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (203b)$$

$$\frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i} = \frac{K_2}{T_{m_p}} (-V_i b_{ij} V_j \sin \theta_{ij} - V_j V_{qj} b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j V_{pj} b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (203c)$$

$$\frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j} = \frac{K_2}{T_{m_p}} (V_i b_{ij} V_j \sin \theta_{ij} + V_j V_{qj} b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j V_{pj} b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (203d)$$

$$\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{qj}} = \frac{K_2}{T_{m_p}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - \frac{1}{T_{m_p}} \quad (203e)$$

$$\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{pj}} = -\frac{K_2}{T_{m_p}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (203f)$$

$$\frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2} = \frac{1}{T_{m_p}} \quad (203g)$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{\partial X_2}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial X_2}{\partial V_j} \Delta V_j + \frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial X_2}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial X_2}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj}$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial V_i} = \frac{1}{T_{2_i}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (204a)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial V_j} = \frac{1}{T_{2_i}} (-2V_j b_{ij} + V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} V_{qj} \cos \theta_{ij} - b_{ij} V_{pj} \sin \theta_{ij}) \quad (204b)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} = \frac{1}{T_{2_i}} (-V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{qj} \sin \theta_{ij} - b_{ij} V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (204c)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} = \frac{1}{T_{2_i}} (V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{qj} \sin \theta_{ij} + b_{ij} V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (204d)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial V_{qj}} = \frac{1}{T_{2_i}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (204e)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial V_{pj}} = -\frac{1}{T_{2_i}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (204f)$$

$$\Delta \dot{V}_{pk} = \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{qk}} \Delta V_{qk} + \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}} \Delta V_{pk} + \frac{\partial V_{pk}}{\partial X_1} \Delta X_3$$

$$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_i} = \frac{K_3}{T_{m_p}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (205a)$$

$$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_k} = \frac{K_3}{T_{m_p}} (V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_{qk} b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_{pk} b_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (205b)$$

$$\frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} = \frac{K_3}{T_{m_p}} (V_i b_{ik} V_k \cos \theta_{ik} + V_k V_{qk} b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_k V_{pk} b_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (205c)$$

$$\frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} = \frac{K_3}{T_{m_p}} (-V_i b_{ik} V_k \cos \theta_{ik} - V_k V_{qk} b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k V_{pk} b_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (205d)$$

$$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{qk}} = \frac{K_3}{T_{m_p}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (205e)$$

$$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}} = \frac{K_3}{T_{m_p}} V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - \frac{1}{T_{m_p}} \quad (205f)$$

$$\frac{\partial V_{pk}}{\partial X_3} = \frac{1}{T_{m_p}} \quad (205g)$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{\partial X_3}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial X_3}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial X_3}{\partial V_{q_k}} \Delta V_{q_k} + \frac{\partial X_3}{\partial V_{p_k}} \Delta V_{p_k}$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial V_i} = \frac{1}{T_{3_i}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (206a)$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial V_k} = \frac{1}{T_{3_i}} (V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_{q_k} b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_{p_k} b_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (206b)$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} = \frac{1}{T_{3_i}} (V_i b_{ik} V_k \cos \theta_{ik} + V_k V_{q_k} b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_k V_{p_k} b_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (206c)$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} = \frac{1}{T_{3_i}} (-V_i b_{ik} V_k \cos \theta_{ik} - V_k V_{q_k} b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k V_{p_k} b_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (206d)$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial V_{q_k}} = \frac{1}{T_{3_i}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (206e)$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial V_{p_k}} = \frac{1}{T_{3_i}} V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (206f)$$

$$P_{inj_i} = -V_i b_{ij} V_{p_j} - V_i b_{ik} V_{p_k}$$

$$\frac{\partial P_{inj_i}}{\partial V_i} = -b_{ij} V_{p_j} - b_{ik} V_{p_k} \quad (207a)$$

$$\frac{\partial P_{inj_i}}{\partial V_{p_j}} = -V_i b_{ij} \quad (207b)$$

$$\frac{\partial P_{inj_i}}{\partial V_{p_k}} = -V_i b_{ik} \quad (207c)$$

$$Q_{inj_i} = -V_i b_{ij} V_{q_j} - V_i b_{ik} V_{q_k}$$

$$\frac{\partial Q_{inj_i}}{\partial V_i} = -b_{ij} V_{q_j} - b_{ik} V_{q_k} \quad (208a)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_i}}{\partial V_{q_j}} = -V_i b_{ij} \quad (208b)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_i}}{\partial V_{q_k}} = -V_i b_{ik} \quad (208c)$$

$$P_{inj_j} = V_j b_{ij} V_{q_j} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{p_j} \cos \theta_{ij}$$

$$\frac{\partial P_{inj_j}}{\partial V_j} = b_{ij} V_{q_j} \sin \theta_{ij} + b_{ij} V_{p_j} \cos \theta_{ij} \quad (209a)$$

$$\frac{\partial P_{inj_j}}{\partial V_{q_j}} = V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (209b)$$

$$\frac{\partial P_{inj_j}}{\partial V_{p_j}} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (209c)$$

$$\frac{\partial P_{inj_j}}{\partial \theta_i} = V_j b_{ij} V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{p_j} \sin \theta_{ij} \quad (209d)$$

$$\frac{\partial P_{inj_j}}{\partial \theta_j} = -V_j b_{ij} V_{q_j} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{p_j} \sin \theta_{ij} \quad (209e)$$

$$Q_{inj_j} = V_j b_{ij} V_{q_j} \cos \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{p_j} \sin \theta_{ij}$$

$$\frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial V_j} = b_{ij} V_{q_j} \cos \theta_{ij} - b_{ij} V_{p_j} \sin \theta_{ij} \quad (210a)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial V_{q_j}} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (210b)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial V_{p_j}} = -V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (210c)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial \theta_i} = -b_{ij} V_j V_{q_j} \sin \theta_{ij} - b_{ij} V_j V_{p_j} \cos \theta_{ij} \quad (210d)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial \theta_j} = b_{ij} V_j V_{q_j} \sin \theta_{ij} + b_{ij} V_j V_{p_j} \cos \theta_{ij} \quad (210e)$$

$$P_{inj_k} = V_k b_{ik} V_{q_k} \sin \theta_{ik} + V_k b_{ik} V_{p_k} \cos \theta_{ik}$$

$$\frac{\partial P_{inj_k}}{\partial V_k} = b_{ik} V_{q_k} \sin \theta_{ik} + b_{ik} V_{p_k} \cos \theta_{ik} \quad (211a)$$

$$\frac{\partial P_{inj_k}}{\partial V_{q_k}} = V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (211b)$$

$$\frac{\partial P_{inj_k}}{\partial V_{p_k}} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (211c)$$

$$\frac{\partial P_{inj_k}}{\partial \theta_i} = V_k b_{ik} V_{q_k} \cos \theta_{ik} - V_k b_{ik} V_{p_k} \sin \theta_{ik} \quad (211d)$$

$$\frac{\partial P_{inj_k}}{\partial \theta_k} = -V_k b_{ik} V_{q_k} \cos \theta_{ik} + V_k b_{ik} V_{p_k} \sin \theta_{ik} \quad (211e)$$

$$Q_{inj_k} = V_k b_{ik} V_{q_k} \cos \theta_{ik} - V_k b_{ik} V_{p_k} \sin \theta_{ik}$$

$$\frac{\partial Q_{inj_k}}{\partial V_k} = b_{ik} V_{q_k} \cos \theta_{ik} - b_{ik} V_{p_k} \sin \theta_{ik} \quad (212a)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_k}}{\partial V_{q_k}} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (212b)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_k}}{\partial V_{p_k}} = -V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (212c)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_k}}{\partial \theta_i} = -b_{ik}V_kV_{q_k} \sin \theta_{ik} - b_{ik}V_kV_{p_k} \cos \theta_{ik} \quad (212d)$$

$$\frac{\partial Q_{inj_k}}{\partial \theta_k} = b_{ik}V_kV_{q_k} \sin \theta_{ik} + b_{ik}V_kV_{p_k} \cos \theta_{ik} \quad (212e)$$





**APÊNDICE D - LINEARIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE  
AS BARRAS  $k$  E  $m$**

$$P_{km} = \frac{V_k r_{km}}{|\tilde{Z}_{km}|^2} (V_k - V_m \cos \theta_{km}) + \frac{V_k V_m x_{km}}{|\tilde{Z}_{km}|^2} \sin \theta_{km} \quad (213)$$

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta \theta_m + A3_{km} \Delta V_k + A4_{km} \Delta V_m \quad (214)$$

$$\begin{aligned} A1_{km} &= \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \\ &= V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} \end{aligned} \quad (215a)$$

$$\begin{aligned} A2_{km} &= \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \\ &= -(V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (215b)$$

$$\begin{aligned} A3_{km} &= \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \\ &= 2g_{km} V_k - V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_m b_{km} \sin \theta_{km} \end{aligned} \quad (215c)$$

$$\begin{aligned} A4_{km} &= \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \\ &= -g_{km} V_k \cos \theta_{km} - V_k b_{km} \sin \theta_{km} \end{aligned} \quad (215d)$$

Os coeficientes  $A1_{km}$ ,  $A2_{km}$ ,  $A3_{km}$  e  $A4_{km}$  são denominados “Coeficientes de Sensibilidade de Potência ativa da Linha de Transmissão” entre as barras  $k$  e  $m$  (DECKMANN; DA COSTA, 1994).



**APÊNDICE E - DERIVADAS DAS CORRENTES INJETADAS PELO IPFC**  
( $J3_{IPFC}$  E  $J4_{IPFC}$ )

**1. Derivadas das correntes injetadas na barra  $i$ .**

$$\Delta I_{inj_{ir}} = \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{p_j}} \Delta V_{p_j} + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{q_j}} \Delta V_{q_j} + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{p_k}} \Delta V_{p_k} + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{q_k}} \Delta V_{q_k}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial \theta_i} = -b_{ij}(-V_{p_j} \sin \theta_i + V_{q_j} \cos \theta_i) - b_{ik}(-V_{p_k} \sin \theta_i + V_{q_k} \cos \theta_i) \quad (216a)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{p_j}} = -b_{ij} \cos \theta_i \quad (216b)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{q_j}} = -b_{ij} \sin \theta_i \quad (216c)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{p_k}} = -b_{ik} \cos \theta_i \quad (216d)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{q_k}} = -b_{ik} \sin \theta_i \quad (216e)$$

$$\Delta I_{inj_{im}} = \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{p_j}} \Delta V_{p_j} + \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{q_j}} \Delta V_{q_j} + \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{p_k}} \Delta V_{p_k} + \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{q_k}} \Delta V_{q_k}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial \theta_i} = b_{ij}(-V_{q_j} \sin \theta_i - V_{p_j} \cos \theta_i) + b_{ik}(-V_{q_k} \sin \theta_i - V_{p_k} \cos \theta_i) \quad (217a)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{p_j}} = -b_{ij} \sin \theta_i \quad (217b)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{q_j}} = b_{ij} \cos \theta_i \quad (217c)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{p_k}} = -b_{ik} \sin \theta_i \quad (217d)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{q_k}} = b_{ik} \cos \theta_i \quad (217e)$$

**2. Derivadas das correntes injetadas na barra  $j$ .**

$$\Delta I_{inj_{jr}} = \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_j}} \Delta V_{p_j} + \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{q_j}} \Delta V_{q_j}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial \theta_i} = b_{ij}(-V_{p_j} \sin \theta_i + V_{q_j} \cos \theta_i) \quad (218a)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{p_j}} = b_{ij} \cos \theta_i \quad (218b)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{q_j}} = b_{ij} \sin \theta_i \quad (218c)$$

$$\Delta I_{inj_{jm}} = \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_j}} \Delta V_{p_j} + \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{q_j}} \Delta V_{q_j}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial \theta_i} = b_{ij}(V_{p_j} \cos \theta_i + V_{q_j} \sin \theta_i) \quad (219a)$$

$$\frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{p_j}} = b_{ij} \sin \theta_i \tag{219b}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{q_j}} = -b_{ij} \cos \theta_i \tag{219c}$$

**3. Derivadas das correntes injetadas na barra *k*.**

$$\Delta I_{inj_{kr}} = \frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{p_k}} \Delta V_{p_k} + \frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{q_k}} \Delta V_{q_k}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial \theta_i} = b_{ik} (-V_{p_k} \sin \theta_i + V_{q_k} \cos \theta_i) \tag{220a}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{p_k}} = -b_{ik} \sin \theta_i \tag{220b}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{q_k}} = b_{ik} \cos \theta_i \tag{220c}$$

$$\Delta I_{inj_{km}} = \frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{p_k}} \Delta V_{p_k} + \frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{q_k}} \Delta V_{q_k}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial \theta_i} = b_{ik} (V_{p_k} \cos \theta_i + V_{q_k} \sin \theta_i) \tag{221a}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{p_k}} = b_{ik} \sin \theta_i \tag{221b}$$

$$\frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{q_k}} = -b_{ik} \cos \theta_i \tag{221c}$$