



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Câmpus de Ilha Solteira

**LUIS GUSTAVO CORDERO BAUTISTA**

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO ADAPTATIVO COM  
HIPERMUTAÇÃO NO AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS  
CONTROLADORES SUPLEMENTARES E DISPOSITIVO FACTS IPFC**

**Ilha Solteira**

**2019**

**LUIS GUSTAVO CORDERO BAUTISTA**

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO ADAPTATIVO COM  
HIPERMUTAÇÃO NO AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS  
CONTROLADORES SUPLEMENTARES E DISPOSITIVO FACTS IPFC**

Dissertação do mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia - UNESP -  
Campus de Ilha Solteira para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia  
Elétrica.  
Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo  
Orientador

**Ilha Solteira**

**2019**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C794a Cordero Bautista, Luis Gustavo.  
Aplicação do algoritmo genético adaptativo com hipermutação no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares e dispositivo FACTS IPFC / Luis Gustavo Cordero Bautista. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019  
170 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: Percival Bueno de Araujo  
Inclui bibliografia

1. Estabilidade a pequenas perturbações. 2. Modelo de Sensibilidade de Corrente - MSC. 3. Integrador Proporcional - PI . 4. Estabilizadores de Sistema de Potência - ESP. 5. Interline Power Flow Controller - IPFC. 6. Power Oscillation Damping - POD.

*Raiane da Silva Santos*  
Raiane da Silva Santos

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Aplicação do algoritmo genético adaptativo com hipermutação no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares e dispositivo FACTS IPFC

**AUTOR:** LUIS GUSTAVO CORDERO BAUTISTA

**ORIENTADOR:** PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

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



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



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



Prof. Dr. ELENILSON DE VARGAS FORTES  
Áreas Acadêmicas / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Ilha Solteira, 25 de abril de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Grande Arquiteto do Universo por me guiar até aqui.

À minha mãe, Teodora Teófila Bautista Cabrera, pelo esforço e profundo empenho em minha educação, muitas vezes trocando seus projetos pelos meus.

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

Aos amigos que Deus me deu para me encorajar e continuar nesta etapa da minha vida.

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

*" Há tempo para todas as coisas debaixo do céu"*

**Eclesiastes 3:1**

## RESUMO

As perturbações ou variações de carga produzem oscilações eletromecânicas que devem ser amortecidas o mais rápido possível para garantir confiabilidade e estabilidade da rede. Neste trabalho apresenta-se uma análise do dispositivo FACTS Interline Power Flow Controller (IPFC) e o controlador Proporcional Integral (PI) no gerenciamento dos fluxos de potência e a influência dos Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP) e do IPFC Power Oscillation Damping (POD) sobre a estabilidade do sistema elétrico de potência. Neste trabalho enfoca-se nos estudos de estabilidade a pequenas perturbações usando um Algoritmo Genético Adaptativo com Hiper-mutação (AGAH) para ajustar os parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento, o Estabilizador de sistema de potência (ESPs) e o Power Oscillation Damping (POD) em forma coordenada. O AGAH tem como objetivo encontrar os parâmetros ótimos do controlador para melhorar o amortecimento fraco das oscilações de baixa frequência locais e inter-área. Neste trabalho representa-se o sistema de elétrico de potência com a inclusão do dispositivo Interline Power Flow Controller com o modelo de sensibilidade de corrente (MSC). Considera-se como sistema teste o sistema Simétrico de Duas Áreas e o sistema New England como o intuito de avaliar o algoritmo proposto. As simulações são feitas no ambiente do MatLab. Por fim, apresenta-se a comparação do algoritmo genético com o desempenho do algoritmo proposto.

**Palavras-chave:** Estabilidade a pequenas perturbações. Modelo de Sensibilidade de Corrente - MSC. PI Integrador Proporcional. Estabilizadores de sistema de potência - ESP. Interline Power Flow Controller - IPFC. Power Oscillation Damping - POD. Algoritmo Genético Adaptativo com Hiper-mutação.

## ABSTRACT

Small-magnitude disturbances happen to produce electro-mechanical oscillations which should be damped as quickly as possible to ensure reliability and stability of the network. This work presents an analysis of Interline Power Flow Controller (IPFC) FACTS device and PI controller to control and manage power flow and also how Power System Stabilizers and IPFC Power Oscillations Damping (POD) controller influence over an electric power system stability. This work focuses on small-signal stability studies using an Adaptive Genetic Algorithm with Hyper-mutation (AGAH) in order to tune controller parameters in a coordinated way ensuring proper damping. AGAH aims to find optimal controller parameters to enhance the poor damping of local and inter-area low frequency oscillations. This work represents the electric power system and Interline Power Flow Controller device by a current sensitivity model (CSM). This paper considers two areas 14 bus symmetrical power system and New England power system in order to assess proposed algorithm. Coding and Simulations take place in MatLab platform. AGAH and GA get compared by time convergence and performance. This paper shows AGAH is an interesting optimization technique which outweighs GA.

**Keywords:** Small-signal stability. Current Sensitivity Model. Power System Stabilizers. Interline Power Flow Controller. Proportional Integral. Power Oscillation Damping. Adaptive Genetic Algorithm with Hyper-mutation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Barra Genérica do Sistema Elétrico de Potência.....	31
Figura 2 Fluxo de corrente no sistema multimáquinas entre as barras k e j.....	36
Figura 3 Carga genérica conectada à barra k.....	37
Figura 4 Balanço nodal de corrente na barra k.....	40
Figura 5 Diagrama de blocos do Regulador Automático de Tensão.....	44
Figura 6 Representação de um IPFC com dois conversores série.....	57
Figura 7 Circuito equivalente de um IPFC com duas fontes de tensão série. ....	58
Figura 8 Diagrama fasorial de tensão série injetada ( $n=j,k$ ).....	60
Figura 9 Corrente que circula no ramo j-i .....	62
Figura 10 Balanço de potência na barra m em que o IPFC encontra-se instalado. ....	66
Figura 11 Controle dos fluxos de potência pelo IPFC.....	68
Figura 12 Estrutura de controle do IPFC.....	69
Figura 13 Sistema de controle para componente em quadratura para o primeiro conversor .....	70
Figura 14 Sistema de controle para componente em fase para o primeiro conversor....	71
Figura 15 Sistema de controle para componente em quadratura para o segundo conversor .....	72
Figura 16 Modelo de Injeções de corrente pelo IPFC .....	79
Figura 17 Balanço das correntes ao considerar o IPFC.....	80
Figura 18 Modelo Dinâmico para o ESP.....	86
Figura 19 Modelo Dinâmico para o ESP: Bloco Washout.....	86
Figura 20 Modelo Dinâmico para o ESP: Primeiro Bloco dos Compensadores.....	88
Figura 21 Modelo Dinâmico para o ESP: Segundo Bloco dos Compensadores.....	89
Figura 22 Malha de Controle do RAT com a sinal suplementar do ESP .....	90
Figura 23 Modelo Dinâmico do Dispositivo IPFC-POD .....	91
Figura 24 Divisão do Bloco Washout .....	92
Figura 25 Divisão do Primeiro Bloco de Avanço-Atraso de Fase .....	93
Figura 26 Divisão do Segundo bloco de Avanço-Atraso de Fase .....	94
Figura 27 Tensão em quadratura do Conversor Primário do IPFC .....	94
Figura 28 Diagrama de blocos do AGAH .....	109

Figura 29 Diagrama de blocos da Hipermutação .....	110
Figura 30 Indivíduo do AGAH.....	112
Figura 31 Região de localização dos autovalores desejados .....	113
Figura 32 Diagrama unifilar do Sistema Simétrico de Duas Áreas.....	116
Figura 33 Local de instalação do IPFC .....	116
Figura 34 Perfil de tensão de Sistema Simétrico de Duas Áreas.....	118
Figura 35 Factor de Participação no Sistema Simétrico de Duas Áreas .....	119
Figura 36 Perfil de tensão no sistema teste com atuação do IPFC-PI.....	121
Figura 37 Cromossomo do sistema Simétrico de Duas Áreas .....	122
Figura 38 Taxas de recombinação e mutação.....	123
Figura 39 Evolução dos amortecimentos ao longo das iterações .....	124
Figura 40 Autovalores do sistema com o correto ajuste do ESP e POD .....	124
Figura 41 Diagrama unifilar do Sistema New England.....	126
Figura 42 Local de instalação do IPFC no Sistema New England.....	127
Figura 43 Perfil de tensão para o sistema New England .....	128
Figura 44 Factor de Participação no Sistema New England .....	129
Figura 45 Perfil de tensão no sistema New England com a atuação do IPFC-PI.....	131
Figura 46 Cromossomo do sistema New England .....	132
Figura 47 Taxas de recombinação e mutação ao longo das gerações caso New England .....	134
Figura 48 Evolução dos amortecimento , amortecimento maior a 10 por cento.....	134
Figura 49 Autovalores do sistema New England com e sem os controladores suplementares de amortecimento.....	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Estrutura de dados e terminologia de um AG.....	106
Tabela 2 Parâmetros de IPFC sem atuação no controle de fluxo .....	117
Tabela 3 Autovalores do sistema sem atuação do IPFC.....	117
Tabela 4 Parâmetros do controlador IPFC-PI.....	120
Tabela 5 Parâmetros de IPFC com atuação no controle de fluxo.....	120
Tabela 6 Autovalores do sistema com atuação do IPFC sem os controladores suplementares EPSs e POD .....	121
Tabela 7 Comparação de desempenho do AG Adaptativo e o AG Clássico.....	123
Tabela 8 Autovalores do sistema com atuação do IPFC e o ajuste coordenado dos controladores suplementares EPSs e POD .....	125
Tabela 9 Ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares ESP e POD.....	125
Tabela 10 Variáveis de controle dos controladores de fonte de tensão no sistema New England.....	127
Tabela 11 Autovalores do Sistema sem atuação do IPFC no sistema New England ...	128
Tabela 12 Parâmetros do controlador IPFC-PI.....	130
Tabela 13 Parâmetros do IPFC-PI com atuação no controle de fluxo .....	131
Tabela 14 Autovalores do sistema com atuação do IPFC sem os controladores suplementares EPSs e POD .....	131
Tabela 15 Comparação de desempenho do AG Adaptativo e o AG Clássico.....	133
Tabela 16 Autovalores do sistema com atuação do IPFC e EPSs e POD .....	135
Tabela 17 Ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares ESP e POD.....	136
Tabela 18-Dados das linhas de transmissão do sistema Simétrico de Duas Áreas. ....	146
Tabela 19-Dados dos geradores síncronos do sistema Simétrico de Duas Áreas. ....	146
Tabela 20 -Dados dos RATs do sistema Simétrico de Duas Áreas.....	147
Tabela 21-Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema Simétrico de Duas Áreas. ....	147
Tabela 42 – Dados das linhas de transmissão do sistema <i>New England</i> .....	148
Tabela 43 – Dados dos geradores síncronos do sistema <i>New England</i> .....	149
Tabela 44 – Dados dos reguladores automáticos de tensão (Sistema de Duas Áreas). 149	
Tabela 45 – Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema <i>New England</i> . ....	149

## LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
AGAH	Algoritmo Genético Adaptativo com Hiper-mutação
CC	Corrente Contínua
ESP	Estabilizadores do Sistema de Potência
DMC	Controle de Modo Decentralizado
FACTS	Flexible AC Transmission System
GUPFC	Generalized Power Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller
MBI	Máquina Barra Infinita
MHP	Modelo de Heffron e Phillips
MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
MSC	Modelo de Sensibilidade de Corrente
POD	Power Oscillation Damping
PI	Proportional Integral Control
PQ	Barra de carga de Potência Ativa e Reativa
RAT	Regulador Automático de Tensão
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STATCOM	Static Synchronous Shunt Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
TCSC	Thyristor Controlled Series Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Conversor Fonte de Tensão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}$	Coeficientes da variável $\dot{Y}_1$
$C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}$	Coeficientes da variável $\dot{Y}_2$
$C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}, C_{36}, C_{37}$	Coeficientes da variável $\dot{Y}_3$
$C_{41}, C_{42}, C_{43}, C_{44}, C_{45}, C_{46}, C_{47}$	Coeficientes da variável $\dot{V}_{pj}$
Ceq	Número máximo calculado dos melhores indivíduos
$D_k$	Coeficiente de amortecimento do k-ésimo gerador síncrono
Div(q)	Taxa de diversificação calculada (percentual)
DFD	Desvio padrão em relação ao mínimo fitness da população
$\tilde{E}_{ak}$	Fasor tensão em fase com o eixo de quadratura do k-ésimo gerador síncrono
$E_{ak}$	Magnitude do fasor tensão em fase com o eixo de quadratura do k-ésimo gerador síncrono
$\tilde{E}'_k$	Fasor tensão interna da k-ésima máquina síncrona
$E'_{rk}$	Componente de eixo real do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
$E'_{mk}$	Componente de eixo imaginário do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
$E'_{dk}$	Componente de eixo direto do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
$E'_{qk}$	Componente de eixo de quadratura do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
$E_{fd}$	Magnitude da tensão de enrolamento de campo do k-ésimo gerador síncrono
$F(x^r)$	Função objetivo a minimizar
$G_k$	k-ésimo gerador síncrono
$\tilde{I}_{ij}$	Fasor corrente que circula entre as barras $i$ e $j$
$\tilde{I}_{ik}$	Fasor corrente que circula entre as barras $i$ e $k$
$\tilde{I}_{ji}$	Fasor corrente que circula entre as barras $j$ e $i$

$\tilde{I}_{ki}$	Fasor corrente que circula entre as barras $k$ e $i$
$\tilde{I}_{gk}$	Fasor corrente terminal do $k$ -ésimo gerador síncrono
$I_{rgk}$	Componente de eixo real do fasor corrente terminal do $k$ -ésimo gerador síncrono
$I_{mgk}$	Componente de eixo imaginário do fasor corrente terminal do $k$ -ésimo gerador síncrono
$I_{dgk}$	Componente de eixo direto do fasor corrente terminal do $k$ -ésimo gerador síncrono
$I_{qgk}$	Componente de eixo de quadratura do fasor corrente terminal do $k$ -ésimo gerador síncrono
$\tilde{I}_{km}$	Fasor corrente que circula através da linha de transmissão entre as barras $k$ e $m$
$I_{rkj}$	Componente de eixo real do fasor corrente que circula através da linha de transmissão entre as barras $k$ e $j$
$I_{mkj}$	Componente de eixo imaginário do fasor corrente que circula através da linha de transmissão entre as barras $k$ e $j$
$\tilde{I}_{Lk}$	Fasor corrente drenada pela carga conectada à barra $k$
$I_{rLk}$	Componente de eixo real do fasor corrente drenada pela carga conectada à barra $k$
$I_{mLk}$	Componente de eixo imaginário do fasor corrente drenada pela carga conectada à barra $k$
$I_{injir}$	Componente no eixo real da injeção de corrente na barra $i$ pelo IPFC
$I_{injim}$	Componente no eixo imaginário da injeção de corrente na barra $i$ pelo IPFC
$I_{injnr}$	Componente no eixo real da injeção de corrente na barra $n$ ( $n=j, k$ ) pelo IPFC
$I_{injnm}$	Componente no eixo imaginário da injeção de corrente na barra $n$ ( $n=j, k$ ) pelo IPFC
$K_{1k}, K_{2k}, K_{3k}, K_{4k}$	Coeficientes do MSC associados à potência elétrica do $k$ -ésimo gerador síncrono

$K_{5k}, K_{6k}, K_{7k}, K_{8k}$	Coeficientes do MSC associados à equação diferencial da tensão do enrolamento de campo do k-ésimo gerador síncrono
$K_{rk}$	Ganho do regulador de tensão acoplado ao k-ésimo gerador síncrono
$K_1$	Ganho do primeiro controlador PI
$K_2$	Ganho do segundo controlador PI
$K_3$	Ganho do terceiro controlador PI
$K_{ESP}$	Ganho do Estabilizador do Sistema de Potência
$K_{POD}$	Ganho do Power Oscillation Damping
$M_{1gk}, M_{2gk}, M_{3gk}, M_{4gk}$	Coeficientes de sensibilidade de corrente imaginários do corrente terminal do k-ésimo gerador síncrono
$M_{1km}, M_{2km}, M_{3km}, M_{4km}$	Coeficientes de sensibilidade de corrente imaginários da corrente que circula pela linha de transmissão que interliga as barras k e m
$M_{1Lk}, M_{2Lk}, M_{3Lk}, M_{4Lk}$	Coeficientes de sensibilidade de corrente imaginários da corrente drenada pela carga conectada à barra k
$M_k = 2 H_k$	Constante de inércia do k-ésimo gerador síncrono
$n_{pop}$	Número de indivíduos na população
$P$	População inicial utilizada no algoritmo genético com elitismo
$P'$	População formada a partir da aplicação dos operadores genéticos
$P_E$	População Etilizada
$P_i$	Potência ativa injetada na barra $i$
$P_{ji}$	Fluxo de potência ativa entre as barras $j$ e $i$
$P_{ki}$	Fluxo de potência ativa entre as barras $k$ e $i$
$P_{Lk}$	Potência ativa drenada pela carga conectada à barra k
$P_{gk}$	Potência elétrica gerada pelo k-ésimo gerador síncrono

- $P_{meck}$  Potência mecânica entregue á máquina primária do k-ésimo gerador síncrono.
- $P_{kj}$  Fluxo de potência ativa entre as barras  $k$  e  $j$
- $P_{ni}$  Fluxo de potência ativa entre as barras  $n-i$
- $P_{inj_i}$  Potência ativa injetada pelo IPFC na barra  $i$
- $P_{inj_n}$  Potência ativa injetada pelo IPFC na barra  $n$
- $P_{g_m}$  Potência ativa gerada injetada na barra  $m$
- $P_{l_m}$  Potência ativa drenada por eventuais cargas conectada a barra  $m$
- $P_{mk}$  Fluxo de potência ativa 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  $i-k$
- $P_{ref_j}$  Fluxo especificado de potência ativa no ramo  $i-j$
- $P_{ref_k}$  Fluxo especificado de potência ativa no ramo  $i-k$
- $Q_i$  Potência reativa injetada na barra  $i$
- $Q_{ji}$  Fluxo de potência reativa entre as barras  $j$  e  $i$
- $Q_{ki}$  Fluxo de potência reativa entre as barras  $k$  e  $i$
- $Q_{Lk}$  Potência reativa drenada pela carga conectada à barra  $k$
- $Q_{ni}$  Fluxo de potência reativa entre as barras  $n-i$
- $Q_{inj_i}$  Potência reativa injetada pelo IPFC na barra  $i$
- $Q_{inj_n}$  Potência reativa injetada pelo IPFC na barra  $n$
- $Q_{g_m}$  Potência reativa gerada injetada na barra  $m$
- $Q_{l_m}$  Potência reativa drenada por eventuais cargas conectada a barra  $m$
- $Q_{mk}$  Fluxo de potência reativa entre as barras  $m$  e  $k$
- $Q_{l_j}$  Fluxo controlado de potência reativa no ramo  $i-j$



$Q_{refj}$	Fluxo especificado de potência reativa no ramo $i-j$
$R_{1gk}, R_{2gk}, R_{3gk}, R_{4gk}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente reais do corrente terminal do $k$ -ésimo gerador síncrono
$R_{1kj}, R_{2kj}, R_{3kj}, R_{4kj}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente reais da corrente que circula pela linha de transmissão que interliga as barras $k$ e $j$
$R_{1Lk}, R_{2Lk}, R_{3Lk}, R_{4Lk}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente reais da corrente drenada pela carga conectada à barra $k$
$r_{kj}$	Resistência da linha de transmissão que interliga as barras $k$ e $j$
$\tilde{S}_i$	Potência complexa injetada na barra $i$
$\tilde{S}_{ji}$	Fluxo de potência complexa no ramo $j-i$
$S_{ck}$	Potência aparente drenada pela carga conectada à barra $k$
$S_{ck}$	Potência aparente drenada pela carga conectada à barra $k$
$T$	Matriz de transformação de coordenadas $(r,m)$ para coordenadas $(d,q)$
$T^{-1}$	Matriz inversa de transformação de coordenadas $(r,m)$ para coordenadas $(d,q)$
$T'_{d0k}$	Constante de tempo transitória de circuito de eixo direto do $k$ -ésimo gerador síncrono
$T_{rk}$	Constante de tempo do regulador automático de tensão
$T_{1i}$	Constante de tempo do primeiro controlador PI
$T_{2i}$	Constante de tempo do segundo controlador PI
$T_{3i}$	Constante de tempo do terceiro controlador PI
$T_\omega$	Constante de tempo no bloco Washout do ESP
$T_1, T_2, T_3$	Constantes de tempo na dinâmica do bloco de controle do ESP
$T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}$	Constantes de tempo na dinâmica do bloco de controle do POD
$tr(q)$	Taxa de recombinação variável

$tm(q)$	Taxa de mutação variavel
$U$	Vetor de variáveis de entrada do MSC
$\tilde{V}_i$	Fasor tensão da barra i
$\tilde{V}_j$	Fasor tensão da barra j
$\tilde{V}_k$	Fasor tensão da barra k
$\tilde{V}_{pqn}$	Tensão controlável em série do VSC
$\tilde{V}'_i$	Fasor tensão da barra fictícia $j'$
$\tilde{V}'_j$	Fasor tensão da barra fictícia $k'$
$V_i$	Magnitude de fasor tensão da barra i
$V_j$	Magnitude de fasor tensão da barra j
$V_k$	Magnitude de fasor tensão da barra k
$V_{pqn}$	Magnitude da tensão controlável em série do VSC
$V_{pn}$	Magnitude da componente em quadratura da tensão controlável em série do VSC
$V_{qn}$	Magnitude da componente em fase da tensão controlável em série do VSC
$V'_j$	Magnitude de fasor tensão da barra fictícia $j'$
$V'_k$	Magnitude de fasor tensão da barra fictícia $k'$
$V_{rk}$	Componente de eixo real do fasor tensão da barra k
$V_{mk}$	Componente de eixo imaginário do fasor tensão da barra k
$V_{dk}$	Componente de eixo direto do fasor tensão da barra k
$V_{qk}$	Componente de eixo de quadratura do fasor tensão da barra k
$V_{refk}$	Tensão de referência na barra k
$V_{sup}$	Sinal de saída suplementar do controle POD
$V_{pj}$	Componente em quadratura para o primeiro conversor

$V_{qj}$	Componente em fase para o primeiro conversor
$V_{pk}$	Componente em quadratura para o segundo conversor
$V_{qk}$	Componente em fase para o segundo conversor
$x_{in}$	Reatância de Acoplamento do VSC
$x'_{dk}$	Reatância transitória de eixo direto do k-ésimo gerador síncrono
$x_{qk}$	Reatância síncrona de eixo de quadratura do k-ésimo gerador síncrono
$Z$	Vetor de variáveis algébricas do MSC
$X$	Vetor de variáveis de estado do MSC
$x_{kj}$	Reatância da linha de transmissão que interliga as barras k e j
$Z_{kj}$	Impedância da linha de transmissão que interliga as barras k e j
$ Z_{kj} $	Módulo da impedância da linha de transmissão que interliga as barras k e j
$Z_{11k}, Z_{12k}, Z_{13k}, Z_{14k}, Z_{15k}, Z_{16k}, Z_{17k}$	Coefficientes da variável $\dot{V}_{1k}$
$Z_{21k}, Z_{22k}, Z_{23k}, Z_{24k}, Z_{25k}, Z_{26k}, Z_{27k}, Z_{28k}$	Coefficientes da variável $\dot{V}_{2k}$
$Z_{31k}, Z_{32k}, Z_{33k}, Z_{34k}, Z_{35k}, Z_{36k}, Z_{37k}, Z_{38k}, Z_{39k}$	Coefficientes da variável $\dot{V}_{sk}$
$Z_{41k}, Z_{42k}, Z_{43k}, Z_{44k}$	Coefficientes da variável $\Delta \dot{E}_{fak}$
$\Delta \dot{V}_{1k}, \Delta \dot{V}_{2k}, \Delta \dot{V}_{sk}$	Variações das Variáveis de estado do bloco de controle pelo ESP
$\Delta \dot{Y}_1, \Delta \dot{Y}_2, \Delta \dot{Y}_3$	Variações das Variáveis de estado do bloco de controle pelo POD
$\Delta P_{km}$	Variação do fluxo da potência ativa entre as barras k e m
$\delta_k$	Ângulo interno do k-ésimo gerador síncrono
$\theta_k$	Ângulo do fasor tensão da barra k
$\omega_0$	Velocidade síncrona da rede elétrica
$\omega_k$	Velocidade angular do rotor do k-ésimo gerador síncrono
$\omega_{ni}$	Frequência natural não amortecida

$\gamma_n$	Ângulo da tensão série injetada pelo VSC
$r_n$	Magnitude da tensão série injetada pelo VSC
$\Omega_k$	Conjunto de todas as barras conectadas na barra k
$\lambda$	Autovalores de interesse
$\lambda_i^{des}$	Autovalores de interesse desejados
$\lambda_i^{cal}$	Autovalores de interesse calculados
$\xi$	Amortecimentos
$\xi_i^{des}$	Amortecimentos desejados
$\xi_i^{cal}$	Amortecimentos calculados

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	27
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	27
<b>2</b>	<b>MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....</b>	<b>30</b>
2.1	MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS.....	30
2.1.1	Equações básicas do Modelo de Sensibilidade de Corrente.....	31
2.1.2	Correntes circulantes no sistema elétrico multimáquinas.....	34
2.1.3	Corrente terminal do Gerador Síncrono.....	35
2.1.4	Corrente nas linhas de Transmissão.....	36
2.1.5	Corrente Drenada pela Carga.....	37
2.1.6	Linearização das equações.....	38
2.1.7	Coefficientes de Sensibilidade do Gerador Síncrono .....	38
2.1.8	Coefficientes das linhas de transmissão .....	38
2.1.9	Coefficientes de Carga.....	39
2.1.10	Equações algébricas no balanço nodal de correntes do MSC .....	39
2.2	EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE.....	41
2.2.1	Equações de movimento da máquina síncrona.....	41
2.2.2	Dinâmica do Circuito de Campo da Máquina Síncrona .....	42
2.2.3	Equação da excitatriz estática .....	43
2.3	REPRESENTAÇÕES DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE .....	44
2.4	CONCLUSÕES.....	54
<b>3</b>	<b>O DISPOSITIVO INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER (IPFC) .</b>	<b>55</b>
3.1	ASPECTOS GERAIS DO INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER ...	56

3.2	MODELO MATEMÁTICO DO INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER .....	58
3.3	MODELO DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA PARA O IPFC.....	64
3.4	INCLUSÃO DO BALANÇO DE POTÊNCIA DO IPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA .....	65
3.5	CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA PELO IPFC .....	67
3.6	ESTRUTURA DE CONTROLE DO IPFC.....	69
3.7	INCLUSÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO IPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA .....	73
3.8	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	76
<b>4</b>	<b>INCLUSÃO DO IPFC E DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES ESP E POD NO MSC.....</b>	<b>77</b>
4.1	MODELO DE INJEÇÃO DE CORRENTE PARA O IPFC .....	78
4.2	BALANÇO NODAL DE CORRENTES CONSIDERANDO A ATUAÇÃO DO IPFC.....	80
4.3	INCLUSÃO DO IPFC NO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE .....	81
4.4	CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO.....	85
<b>4.4.1</b>	<b>Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP).....</b>	<b>85</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Power Oscillation Damping.....</b>	<b>91</b>
4.5	INCLUSÃO DOS CONTROLADORES ESPs E IPFC-POD NO MSC .....	97
4.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	102
<b>5</b>	<b>TÉCNICAS DE AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES .....</b>	<b>103</b>
5.1	ALGORITMO GENÉTICO .....	104
<b>5.1.1</b>	<b>Terminologia básica e operadores de reprodução.....</b>	<b>105</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Mecanismos de seleção de indivíduos .....</b>	<b>106</b>
5.2	ALGORITMO GENÉTICO COM ELITISMO .....	107
5.3	ALGORITMO GENÉTICO ADAPTATIVO .....	107

5.4	FUNÇÃO OBJETIVO .....	110
5.5	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO SUJEITAS ÀS CONDIÇÕES DE RESTRIÇÃO.....	111
5.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	113
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÃO E RESULTADOS .....</b>	<b>115</b>
6.1	SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS .....	115
<b>6.1.1</b>	<b>Localização dos dispositivos de controle (ESPs e IPFC-POD).....</b>	<b>118</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Influência do IPFC no controle de tensão no sistema Simétrico de Duas Áreas .....</b>	<b>120</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Restrições dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESP e POD.....</b>	<b>122</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Performance dos algoritmos AGAH e AG Clássico no sistema Simétrico de Duas Áreas .....</b>	<b>122</b>
6.2	SISTEMA NEW ENGLAND .....	125
<b>6.2.1</b>	<b>Localização dos dispositivos de controle ESP e IPFC-POD .....</b>	<b>129</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Influência do IPFC no controle da tensão no sistema New England.....</b>	<b>130</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Restrições dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESP e POD.....</b>	<b>132</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Performance dos algoritmos AGAH e AG no sistema New England .....</b>	<b>133</b>
6.3	CONCLUSOES DO CAPITULO .....	136
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>137</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>140</b>
	ANEXO A – DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS .....	146
	ANEXO B – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND .....	148
	APÊNDICE A – TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS .....	151
	APÊNDICE B – COEFICIENTES DO MSC .....	152
	B.1 COEFICIENTES DOS GERADORES .....	152

<b>B.1.1 Coeficientes reais .....</b>	<b>152</b>
<b>B.1.2 Coeficientes imaginários .....</b>	<b>152</b>
B.2 COEFICIENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	153
<b>B.2.1 Coeficientes reais .....</b>	<b>153</b>
<b>B.2.2 Coeficientes imaginários .....</b>	<b>153</b>
B.3 COEFICIENTES DAS CARGAS .....	154
<b>B.3.1 Coeficientes reais .....</b>	<b>154</b>
<b>B.3.2 Coeficientes imaginários .....</b>	<b>154</b>
B.4 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO DO ROTOR .....	155
B.5 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DA TENSÃO INTERNA DA MÁQUINA SÍNCRONA .....	155
APÊNDICE C – DERIVADAS DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS COMUNS NAS BARRAS DE INSTALAÇÃO DO IPFC.....	156
APÊNDICE D – DERIVADAS DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO IPFC.. .....	163
APÊNDICE E– DERIVADAS DAS INJEÇÕES DE CORRENTES DO DISPOSITIVO IPFC .....	167
APÊNDICE F– VARIAÇÃO DA POTENCIA ATIVA NUM PONTO DE OPERAÇÃO .....	169
APÊNDICE G– TRABALHO APRESENTADO NA UNB-BRASILIA 2018 WORKSHOP ON COMMUNICATION NETWORKS AND POWER SYSTEMS (WCNPS).....	170



## 1 INTRODUÇÃO

Um dos índices que mensuram o desenvolvimento de um país é o aumento e à demanda do consumo de energia. A energia elétrica tornou-se parte integrante e presente para o bem-estar da população. A utilização ótima e racional da energia elétrica no sistema elétrico de potência (SEP) é essencial, portanto, os SEP's são interligados e tornam-se cada vez mais complexos. As cargas mudam de forma aleatória o tempo todo, sendo assim necessário fazer o ajuste da geração. Este período de transição pode causar a perda do sincronismo e o aumento das oscilações no SEP (ANDERSON; FOUAD, 2003). Faz-se necessário o conhecimento das margens de estabilidade para se controlar e evitar as instabilidades nos sistemas de potência.

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

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

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

Em estudos de estabilidade a pequenas perturbações ou variações normais da carga nos barramentos do SEP, tem-se desenvolvido diferentes estudos ao longo do tempo, por exemplo, sistemas do tipo máquina síncrona conectada a um barramento infinito (MBI), o modelo linear de Heffron e Phillips (MHP) sendo uma ferramenta largamente empregada(DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003). Este modelo foi expandido para

sistemas multimáquinas e fornece resultados confiáveis (MOUSSA; YU, 1974; MACLEOD, 1992).

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

As limitações impostas pelo MHP motivaram o uso de novas modelagens lineares como o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) (DECKMANN; DA COSTA, 1994) e o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (FORTES; ARAUJO; MACEDO, 2016; PÁDUA JÚNIOR *et al.*, 2013; TAKAHASHI, FORTES, ARAUJO, MIOTTO, MARTINS, 2018). A grande vantagem destes modelos é a manutenção da integridade do SEP, pois não há a redução às barras internas dos geradores.

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

A importância de um modelo baseado no balanço nodal de correntes pode ser compreendida observando-se que muitos dispositivos do SEP são modelados como injeções de corrente. Por exemplo, para alguns dispositivos FACTS verifica-se que o uso de um modelo baseado em injeções de correntes pode apresentar uma série de vantagens em relação aos modelos baseados em injeções de potência, sobretudo no que diz respeito à velocidade de convergência dos problemas de fluxo de potência (FREITAS; MORELATO, 2001; SON; LASSETER, 2004; VINKOVIC; MIHALIC, 2009; ADEPOJU; KOMOLAFE, 2011).

Atualmente os SEPs são interligados e caracterizados por longas linhas de transmissão. Este fato, aliado ao alto carregamento e à atuação de reguladores automáticos de tensão (RATs) de ação contínua, faz com que surjam oscilações de baixa frequência, fracamente amortecidas ou até mesmo instáveis. Em geral, o trabalho foca-se nas oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Em particular, as oscilações existentes em uma mesma área (locais – 0,8 a 1,8 Hz) e entre diferentes áreas (interárea

– 0,2 a 0,8 Hz) (LARSEN; SWANN, 1981) podem comprometer a estabilidade do SEP devendo, portanto, se buscar formas de amortecê-las.

O conceito de Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) é apresentado por Demello e Concordia (1969). O bloco de controle pelo ESP inseri um sinal suplementar à malha de controle do Regulador Automático de tensão (RAT), sendo assim, atuando sobre o controle da tensão terminal de saída das máquinas síncronas (DEMELLO; CONCORDIA 1969, ANDERSON; FOUAD, 1993; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWANN, 1981). Segundo Larsen e Swann, quando se realizar o ajuste adequado dos parâmetros (constantes de tempo e ganhos), o ESP introduz amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência classificadas como modo local.

O fato de ter se tornado o SEP complexo, além das interligações por longas linhas de transmissão, faz que surjam as oscilações eletromecânicas de baixa frequência classificadas como inter-área. Felizmente, o advento de novas tecnologias no campo da eletrônica de potência permitiu o melhor controle, gerenciamento da energia e até flexibilidade dos SEP. Quanto à transmissão da energia elétrica os *Flexible AC transmission System (FACTS)* tem um papel fundamental ao compensar, controlar e gerenciar os fluxos de potência para aliviar o sobre carregamento no SEP. (HINGORANI; GYUGYI, 1999).

No trabalho utiliza-se o FACTS que realiza compensação série em linhas de transmissão distintas. Tal dispositivo é o Interline Power Flow Controller (IPFC) (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999; VALLE, 2010), sendo representado pela combinação de dois *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)* conectados por um elo comum de corrente contínua.

Portanto, o FACTS tem atuação direta quanto à melhora nos níveis de tensão nas proximidades de sua instalação (VALLE, 2014). Porém, o dispositivo não tem a capacidade de inserir amortecimento as oscilações de baixa frequência.

Estudos em relação ao controlador Power Oscillation Damping adicionado à malha do controle de fluxos de potência pelo dispositivo FACTS (por exemplo, Proportional Integral (PI)), o conjunto FACTS-POD tem a capacidade de inserir um sinal suplementar, cuja atuação insere amortecimento adicional ao modo inter-area. (MENEZES; ARAUJO; FORTES, 2014; FURINI; ARAUJO, 2008; PUPIN, 2009; NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994).

Neste trabalho será analisada a atuação do dispositivo FACTS IPFC no que se refere ao amortecimento das oscilações inter-área. Representa-se o comportamento do IPFC com a modelagem das variáveis algébrica e diferenciais no SEP, sendo possível, a partir desse modelo, realizar o fluxo expandido (considera-se as injeções de potência do IPFC nas barras de instalação no SEP e o controlador PI). Quanto ao bloco de controle do POD na malha do PI, inserindo um sinal suplementar. Se analisará a influência do IPFC-POD no que se refere à estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

Quanto a localizar os controladores suplementares de amortecimento no SEP, tanto os ESP nas máquinas síncronas como o conjunto IPFC-POD nas linhas de transmissão. A primeira se determina pelos fatores de participação (KUNDUR, 1994). A segunda se determina o local de instalação do conjunto IPFC-POD com a avaliação do fluxo de potência, sendo assim, inicialmente é possível verificar quais as barras no sistema possuem queda de tensão (abaixo de 0,95 pu do valor nominal, por exemplo).

Uma vez feita a análise do melhor local de instalação dos controladores suplementares e, em seguida, efetua-se a instalação do IPFC-POD. Espera-se, desta forma, que os controladores suplementares e o conjunto IPFC-POD forneçam amortecimento positivo ao sistema (com o devido ajuste dos seus parâmetros), além das melhoras no nível de tensão no sistema.

Finalmente, o trabalho apresenta o algoritmo genético adaptativo com hipermutação. Tal técnica de otimização realiza o ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (ESP e o POD). Para validar a técnica proposta AGAH e credenciá-la como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações, o AGAH foi comparado ao AG. Utiliza-se o sistema teste Simétrico de Duas Áreas e o sistema New England com o intuito de verificar os algoritmos propostos.

Os resultados apresentados nesse trabalho foram obtidos pela implementação computacional utilizando-se o software Matlab, sem o auxílio de qualquer toolbox. Foi realizada a implementação das equações algébricas e diferenciais do MSC expandido ao considerar o controlador PI no controle de fluxo de potência e os controladores suplementares de amortecimento (ESP e POD), assim como as técnicas de otimização AGAH e o AG. As simulações foram realizadas em um computador com a seguinte configuração: Intel Core i5-6200U, 64-bit, 2.40 Ghz, 6 GB de RAM com 4 núcleos de processamento.

## 1.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições desse trabalho são:

1. Utilizou-se o MSC para representar os componentes do SEP como injeções de corrente, e assim gerar a matriz de espaço de estados com as variáveis algébricas e diferenciais do sistema.
2. Implementou-se à análise do fluxo de potência com a atuação do dispositivo FACTS IPFC como injeção de potência no análise de fluxo de potência. Utilizou-se o controlador integral proporcional (PI) no controle do fluxo de potência ativa e reativa, e assim o equacionamento do dispositivo IPFC-PI é inserido na matriz Jacobiana.
3. Utilizou-se a modelagem matemática do IPFC como injeção de corrente, as equações diferenciais do PI, o equacionamento que governa os controladores ESP e o conjunto IPFC-POD é inserido no MSC para sistemas multimáquinas, portanto, obtém-se o MSC expandido para a análise da estabilidade a pequenas perturbações;
4. Implementar computacionalmente a modelagem MSC, o fluxo de potência com a consideração do IPFC e controlador PI, a inserção dos ESPs e POD na modelagem MSC expandida. A implementação do Algoritmo Genético Adaptativo com Hiper-mutação (AGAH) e o AG de modo que estes algoritmos possam realizar, de forma coordenada e simultânea, o ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares, ESPs do conjunto IPFC-POD;
5. Validar o AGAH como ferramenta no estudo da análise da estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

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

No Capítulo 1 se apresenta à introdução referente ao MSC e a análise da estabilidade a pequenas perturbações.

No Capítulo 2 desenvolve-se o Modelo de Sensibilidade de Corrente para sistemas multimáquinas. Suas equações algébricas, fundamentadas no balanço nodal de correntes,

e as equações diferenciais são linearizadas num ponto de operação do SEP. À linearização é realizada pela Expansão em Série de Taylor, desprezando-se os termos maiores da segunda ordem. Finalmente, escreve-se as equações algébricas e dinâmicas em forma matricial para a representação no espaço de estados, obtendo-se o Modelo de Sensibilidade de Corrente no sistema multimáquinas.

No Capítulo 3 é apresentado, em detalhes, o dispositivo FACTS IPFC. As principais contribuições desse Capítulo consistem em apresentar um modelo de injeção de potência e a proposta da modelagem para a estrutura do sistema de controle para o IPFC e implementá-lo em programas de fluxo de potência, a estrutura do sistema de controle do IPFC, baseia-se nos controladores Proporcional Integral (PI), obtém-se as equações diferenciais que permitem modelar o IPFC em programas de análise de estabilidade a pequenas perturbações.

No Capítulo 4 é 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 apresentadas duas técnicas de otimização (Algoritmo Genético e Algoritmo Genético Adaptativo) que serão utilizadas para ajustar os parâmetros dos controladores suplementares ESPs e do conjunto IPFC-POD.

No Capítulo 6 são apresentadas as simulações e discussões sobre os resultados obtidos no sistema teste Simétrico de Duas Áreas (todos os modelos matemáticos foram implementados computacionalmente utilizando-se o software *MATLAB*<sup>®</sup>). Estas simulações tiveram o propósito de validar o algoritmo proposto (AG Adaptativo) como ferramenta para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações de um SEP.

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

Por fim, seguem os Anexos e os Apêndices. No Anexo A, apresenta-se os dados dos sistemas teste Simétrico de Duas Áreas e New England. No Apêndice A, apresenta-se à matriz de transformação de coordenadas. No Apêndice B, apresenta-se os coeficientes de sensibilidade do modelo MSC. No Apêndice C, apresenta-se as derivadas das componentes da potência ativa e reativa de injeção no barramento de instalação do IPFC. No Apêndice D, apresenta-se as equações diferenciais do bloco de controle de fluxo

de potência pelo IPFC-PI. No Apêndice E, apresenta-se as derivadas das injeções de corrente pelo IPFC nas barras respectivas onde o dispositivo tem atuação. Finalmente, no Apêndice F, apresenta-se as componentes da variação da potência ativa num ponto de operação.

## 2 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

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

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

São desenvolvidos os modelos matemáticos dos componentes (gerador, linhas de transmissão e cargas), que serão utilizados para definir o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (PÁDUA JÚNIOR *et al.*, 2013) para sistemas multimáquinas, cuja formulação parte da premissa de que o balanço nodal de correntes em cada barra de um SEP deve ser satisfeito em qualquer instante de tempo considerado.

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

O Modelo de Sensibilidade de Corrente se baseia no balanço nodal de correntes de um SEP multimáquinas, às quais são descritas por equações algébricas não lineares. Estas equações serão linearizadas para um ponto de operação no MSC multimáquinas.

O Modelo de Sensibilidade de Corrente preserva o sistema de transmissão, desta forma, as variáveis algébricas do sistema são preservadas.

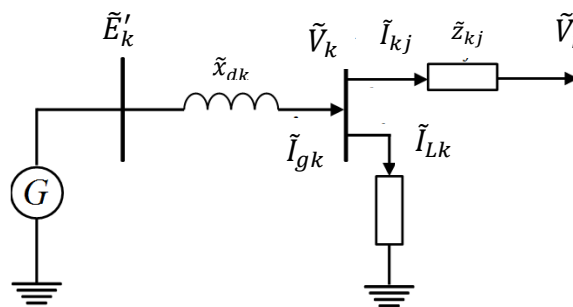
As equações que regem o modelo (equações diferenciais e algébricas), serão representadas nos domínios do tempo.



### 2.1.1 Equações básicas do Modelo de Sensibilidade de Corrente

Para à dedução do Modelo de Sensibilidade de Corrente, assumem-se condições de operação simétricas e equilibradas. Igualmente, para a determinação das equações básicas do MSC, considere-se o diagrama unifilar apresentado na Figura 1 representado uma barra genérica k, na qual se encontram conectados um gerador  $G_k$ , representado por sua tensão interna  $\tilde{E}'_k$ , em série com a sua reatância transitória de eixo direto  $x'_{dk}$ , a linha de transmissão responsável pela interligação entre as barras k e j, sendo j uma variável geral. Desta forma a impedância da linha é  $Z_{kj}$ .

**Figura 1 - Barra Genérica do Sistema Elétrico de Potência**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Também na Figura 1 são apresentadas a corrente entregue pelo gerador síncrono k ao SEP,  $\tilde{I}_{gk}$ , à corrente que circula através da linha de transmissão conectando as barras k com a barra j,  $\tilde{I}_{kj}$ . Por fim,  $\tilde{I}_{Lk}$  é a corrente drenada pela carga conectada à barra k. As tensões nas barras são representados pelas variáveis  $\tilde{V}_k, \tilde{V}_j$ .

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes nos nós à barra k, tem-se a expressão (1)

$$\tilde{I}_{gk} - \sum_{j \in \Omega_k} \tilde{I}_{kj} - \tilde{I}_{Lk} = 0 \quad (1)$$

Para escrever as equações de balanço de correntes, serão analisadas separadamente as correntes envolvidas em (1). Iniciando a análise pela tensão na barra k, temos que esta é expressa por (2)

$$\tilde{V}_k = \tilde{E}'_k - \tilde{I}_{gk} (jx'_{dk}) \quad (2)$$

Sejam as tensões  $\tilde{V}_k$ ,  $\tilde{E}_k$  e a corrente  $\tilde{I}_{gk}$  representadas pelas expressões (3), (4) e (5):

$$\tilde{V}_k = V_{rk} + jV_{mk} \quad (3)$$

$$\tilde{E}'_k = E'_{rk} + jE'_{mk} \quad (4)$$

$$\tilde{I}_{gk} = I_{grk} + jI_{gmk} \quad (5)$$

Nas equações (3), (4) e (5), os índices r e m se referem às componentes de eixo real e de eixo imaginário da tensão na barra k, da tensão interna do gerador e da corrente fornecida pelo gerador, respectivamente.

Combinando as equações (2), (3), (4) e (5) e, com as devidas manipulações algébricas, obtêm-se a equação matricial apresentada em (6).

$$\begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{rk} \\ E'_{mk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{dk} \\ -x'_{dk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{grk} \\ I_{gmk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em estudos envolvendo a dinâmica de máquinas síncronas, é comum a representação da tensão de campo (ou qualquer outra grandeza ligada ao rotor do gerador síncrono) em um sistema de referência rotativo denominado sistema de coordenadas (d,q), ou seja, eixo direto e eixo em quadratura.

Para obter a representação da equação (6) em termos das coordenadas (d,q), aplica-se uma transformação de coordenadas, representada pela matriz de Hermite, a qual é apresentada, em conjunto com sua inversa, nas equações (7) e (8), respectivamente.

$$T_k = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & -\cos \delta_k \\ \cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_k^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & \cos \delta_k \\ -\cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em (7) e (8),  $\delta_k$  corresponde ao ângulo interno do k-ésimo gerador síncrono

Pré-multiplicando (6) pela matriz de Hermite  $T_k$  obtém-se:

$$T_k \begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = T_k \begin{bmatrix} E'_{rk} \\ E'_{mk} \end{bmatrix} + T_k \begin{bmatrix} 0 & x'_{dk} \\ -x'_{dk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rgk} \\ I_{mgk} \end{bmatrix} \quad (9a)$$

$$T_k \begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} \quad (9b)$$

$$T_k \begin{bmatrix} E'_{rk} \\ E'_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{dk} \\ E'_{qk} \end{bmatrix} \quad (9c)$$

$$\begin{bmatrix} I_{rgk} \\ I_{mgk} \end{bmatrix} = T_k^{-1} \begin{bmatrix} I_{dgk} \\ I_{qgk} \end{bmatrix} \quad (9d)$$

Substituindo as equações obtidas em (9), escreve-se:

$$\begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{dk} \\ E'_{qk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{dk} \\ -x'_{dk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dgk} \\ I_{qgk} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Em Kundur (1994), Anderson e Fouad (2003) é definida uma tensão em fase com o eixo em quadratura da máquina síncrona ( $\tilde{E}_{ak}$ ), que determina a posição do sistema de coordenadas rotativo (d, q) em relação ao sistema de coordenadas fixo (r, m). Além disso, o ângulo entre os eixos (q) e (r) é denotado como  $\delta_k$ .

Representa-se, esta tensão pela equação (11).

$$\tilde{E}_{ak} = \tilde{V}_k + \tilde{I}_{gk}(jx_{qk}) = E_{ak}(\cos \delta_k + j\sin \delta_k) \quad (11a)$$

$$\tilde{V}_k = \tilde{E}_{ak} - \tilde{I}_{gk}(jx_{qk}) \quad (11b)$$

Em (11)  $x_{qk}$  é a reatância síncrona de eixo em quadratura da máquina síncrona. Esta equação pode ser reescrita, assumindo a forma na equação em (12).

$$\begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ak}(\cos \delta_k) \\ E_{ak}(\sin \delta_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x_{qk} \\ -x_{qk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rgk} \\ I_{mgk} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Aplicando a matriz de Hermite de maneira a expressar as variáveis de (12) em coordenadas (d, q) obtém-se, com a devida manipulação algébrica, a equação (13).

$$\begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ak} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x_{qk} \\ -x_{qk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dgk} \\ I_{qgk} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Em (10) e (13) obtém-se as relações (14) e (15), respetivamente.

$$V_{qk} = E'_{qk} - x'_{dk}I_{dgk} \quad (14)$$

$$V_{dk} = x_{qk} I_{qgk} \quad (15)$$

Reescrevendo (14) e (15) obtêm-se as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente fornecida pelo gerador síncrono apresentadas nas equações (16) e (17).

$$I_{dgk} = \frac{(E'_{qk} - V_{qk})}{x'_{dk}} \quad (16)$$

$$I_{qgk} = \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \quad (17)$$

Obtêm-se, os componentes do fasor tensão terminal de eixo direto e eixo em quadratura pelas equações (18f) e (18g).

$$\tilde{V}_k = V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k \quad (18a)$$

$$V_{rk} = V_k \cos \theta_k \quad (18b)$$

$$V_{mk} = V_k \sin \theta_k \quad (18c)$$

$$T_k \begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = T_k \begin{bmatrix} V_k \cos \theta_k \\ V_k \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (18d)$$

$$\begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & -\cos \delta_k \\ \cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \cos \theta_k \\ V_k \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (18e)$$

$$V_{dk} = V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (18f)$$

$$V_{qk} = V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (18g)$$

### 2.1.2 Correntes circulantes no sistema elétrico multimáquinas

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

### 2.1.3 Corrente terminal do Gerador Síncrono

Por facilidade, para esta modelagem será adotado o sistema de coordenadas fixo, ou (r, m), visto que será necessário realizar a conversão apenas das componentes de eixo direto e em quadratura da corrente terminal dos geradores, representadas por (16) e (17).

Efetuada a multiplicação da matriz de transformação inversa  $T_k^{-1}$  apresentada em (8) nestas componentes, chega-se à sua representação no sistema (r, m) como segue em (20) e (21).

$$\begin{bmatrix} I_{rgk} \\ I_{mgk} \end{bmatrix} = T_k^{-1} \begin{bmatrix} I_{dgtk} \\ I_{qgtk} \end{bmatrix}$$

Efetuada a multiplicação da matriz inversa  $T_k^{-1}$

$$T_k^{-1} \begin{bmatrix} I_{dgtk} \\ I_{qgtk} \end{bmatrix} = T_k^{-1} \begin{bmatrix} \frac{(E'_{qk} - V_{qk})}{x'_{dk}} \\ \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \end{bmatrix} \quad (19a)$$

$$\begin{bmatrix} I_{rgk} \\ I_{mgk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & \cos \delta_k \\ -\cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{(E'_{qk} - V_{qk})}{x'_{dk}} \\ \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \end{bmatrix} \quad (19b)$$

$$I_{rgk} = \frac{(E'_{qk} - V_{qk})}{x'_{dk}} \sin \delta_k + \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \cos \delta_k \quad (19c)$$

$$I_{mgk} = \frac{(E'_{qk} - V_{qk})}{x'_{dk}} (-\cos \delta_k) + \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \sin \delta_k \quad (19d)$$

Substituindo (18f) e (18g) nas equações de corrente, obtêm-se as componentes de eixo real e imaginário (r, m) da corrente fornecido pelo gerador síncrono no sistema elétrico multimáquinas apresentadas nas equações (20) e (21).

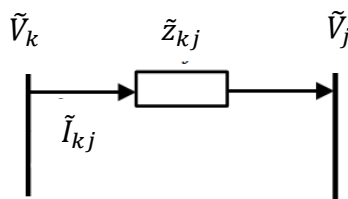
$$I_{rgk} = \frac{(E'_{qk} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k))}{x'_{dk}} \sin \delta_k + \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \cos \delta_k \quad (20)$$

$$I_{mgk} = \frac{(E'_{qk} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k))}{x'_{dk}} (-\cos \delta_k) + \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \sin \delta_k \quad (21)$$

#### 2.1.4 Corrente nas linhas de Transmissão

O fluxo de corrente  $\tilde{I}_{kj}$  em uma linha de transmissão entre uma barra k e uma barra j apresentado na Figura 2 é dado pela equação (24).

**Figura 2 - Fluxo de corrente no sistema multimáquinas entre as barras k e j**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A tensão na barra k e j pode-se escrever em termos da sua componente real e imaginária, representa-se pelas equações (22) e (23)

$$\tilde{V}_k = V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k \quad (22)$$

$$\tilde{V}_j = V_j \cos \theta_j + jV_j \sin \theta_j \quad (23)$$

$$\tilde{I}_{kj} = \frac{\tilde{V}_k - \tilde{V}_j}{Z_{kj}} \quad (24a)$$

A corrente que circula entre as barras k e j, pode ser escrita em termos da sua componente real e imaginária, representa-se pelas equações (24b).

$$\tilde{I}_{kj} = I_{rkj} + jI_{mkj} \quad (24b)$$

Substituindo (22), (23) e (24b) em (24a), fica a equação (24c) expandida.

$$I_{rkj} + jI_{mkj} = \frac{(V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k) - (V_j \cos \theta_j + jV_j \sin \theta_j)}{r_{kj} + jx_{kj}} \begin{bmatrix} r_{kj} - jx_{kj} \\ r_{kj} - jx_{kj} \end{bmatrix} \quad (24c)$$

Desenvolvendo (24c) e separando sua parte real da imaginária obtêm-se as componentes da corrente  $I_{rkj}$  e  $I_{mkj}$  no sistema de coordenadas fixo representadas por (24d) e (24e).

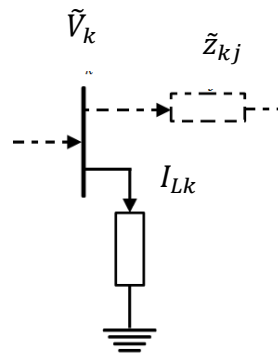
$$I_{rkj} = \frac{r_{kj}(V_k \cos \theta_k - V_j \cos \theta_j) + x_{kj}(V_k \sin \theta_k - V_j \sin \theta_j)}{|Z_{kj}|^2} \quad (24d)$$

$$I_{mkj} = \frac{j(V_k \sin \theta_k - V_j \sin \theta_j) - x_{kj}(V_k \cos \theta_k - V_j \cos \theta_j)}{|Z_{kj}|^2} \quad (24e)$$

### 2.1.5 Corrente Drenada pela Carga

Considerem-se as cargas modeladas como sendo de potência constante.

**Figura 3 - Carga genérica conectada à barra k.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A corrente circulante pode ser calculada por (25a)

$$\tilde{I}_{Lk} = \left( \frac{\tilde{S}_{Lk}}{\tilde{V}_k} \right)^* = \frac{P_{Lk} - jQ_{Lk}}{(\tilde{V}_k)^*} \quad (25a)$$

$$\tilde{I}_{Lk} = I_{rLk} + jI_{mLk} \quad (25b)$$

As componentes, real e imaginária, da corrente consumida pela carga, representadas respectivamente por  $I_{rLk}$  e  $I_{mLk}$  em (25b) e (25c).

$$I_{rLk} = \frac{P_{Lk} \cos \theta_k + Q_{Lk} \sin \theta_k}{V_k} \quad (25c)$$

$$I_{mLk} = \frac{P_{Lk} \sin \theta_k - Q_{Lk} \cos \theta_k}{V_k} \quad (25d)$$

### 2.1.6 Linearização das equações

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

### 2.1.7 Coeficientes de Sensibilidade do Gerador Síncrono

Os coeficientes de sensibilidade de corrente fornecido pelo gerador síncrono, tanto a componente real e quanto a imaginária do fasor  $\tilde{I}_{gk}$  são obtidos através da linearização das equações (20) e (21). Com isso, tem-se que:

$$\Delta I_{rgk} = R1_{gk}\Delta\delta_k + R2_{gk}\Delta E'_{qk} + R3_{gk}\Delta\theta_k + R4_{gk}\Delta V_k \quad (26)$$

$$\Delta I_{mgk} = M1_{gk}\Delta\delta_k + M2_{gk}\Delta E'_{qk} + M3_{gk}\Delta\theta_k + M4_{gk}\Delta V_k \quad (27)$$

$R1_{gk}, R2_{gk}, R3_{gk}$  e  $R4_{gk}$  são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real enquanto que  $M1_{gk}, M2_{gk}, M3_{gk}$  e  $M4_{gk}$  são os coeficientes de sensibilidade da componente imaginária do fasor corrente terminal do gerador síncrono. As expressões detalhadas de cada um desses componentes são apresentadas no Apêndice B deste trabalho.

### 2.1.8 Coeficientes das linhas de transmissão

Aplicando a expansão em série de Taylor às equações das componentes (r, m) das correntes nas linhas de transmissão nas equações (24d) e (24e), obtém-se (28) e (29)

$$\Delta I_{rkj} = R1_{kj}\Delta\theta_k + R2_{kj}\Delta\theta_j + R3_{kj}\Delta V_k + R4_{kj}\Delta V_j \quad (28)$$

$$\Delta I_{mkj} = M1_{kj}\Delta\theta_k + M2_{kj}\Delta\theta_j + M3_{kj}\Delta V_k + M4_{kj}\Delta V_j \quad (29)$$

$R1_{kj}, R2_{kj}, R3_{kj}$  e  $R4_{kj}$  são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real enquanto que  $M1_{kj}, M2_{kj}, M3_{kj}$  e  $M4_{kj}$  são os coeficientes de



sensibilidade de corrente da componente imaginária do fasor corrente que circula através da linha de transmissão que conecta as barras k e j.

### 2.1.9 Coeficientes de Carga

Efetua-se a linearização da corrente de carga apresentada pelas equações (25c) e (25d). Os coeficientes de sensibilidade de corrente das componentes real e imaginária do fasor corrente drenada pela carga conectada à barra k.

$$\Delta I_{rLk} = R1_{Lk}\Delta\theta_k + R2_{Lk}\Delta V_k + R3_{Lk}\Delta P_{Lk} + R4_{Lk}\Delta Q_{Lk} \quad (30)$$

$$\Delta I_{mLk} = M1_{Lk}\Delta\theta_k + M2_{Lk}\Delta V_k + M3_{Lk}\Delta P_{Lk} + M4_{Lk}\Delta Q_{Lk} \quad (31)$$

$R1_{Lk}, R2_{Lk}, R3_{Lk}$  e  $R4_{Lk}$  são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real enquanto que  $M1_{Lk}, M2_{Lk}, M3_{Lk}$  e  $M4_{Lk}$  são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente imaginária do fasor corrente drenada pela carga conectada à barra k.  $\Delta P_{Lk}$  e  $\Delta Q_{Lk}$  representam a variação das potências ativa e reativa nas barras de carga (barras PQ) do sistema.

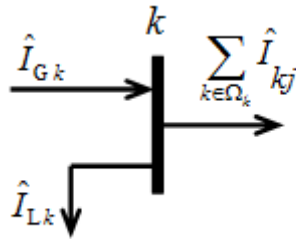
O conjunto formado pelas equações (26), (27), (28), (29), (30) e (31) representam as equações algébricas do MSC. Para completar a formulação do MSC, além das equações algébricas é necessário considerar as equações que representam a dinâmica da máquina síncrona.

### 2.1.10 Equações algébricas no balaço nodal de correntes do MSC

O conceito fundamental do MSC é o atendimento instantâneo do equilíbrio nodal de correntes em cada barra do SEP, ou seja, mesmo quando perturbado a lei de *Kirchhoff* das correntes deve ser satisfeita em todas as barras do SEP.

Realizando o balanço incremental das correntes, real e imaginária, em uma barra k do SEP apresentada na Figura 4 é possível obter o conjunto de expressões (32b) e (32c), com  $\Omega_k$  representando o conjunto de todas as linhas de transmissão ligadas à barra k.

**Figura 4 - Balanço nodal de corrente na barra k.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

$$\tilde{I}_{gk} - \sum_{k \in \Omega_k} \tilde{I}_{kj} - \tilde{I}_{Lk} = 0 \quad (32a)$$

$$I_{rgk} - \sum_{k \in \Omega_k} I_{rkj} - I_{rLk} = 0 \quad (32b)$$

$$I_{mgk} - \sum_{k \in \Omega_k} I_{mkj} - I_{mLk} = 0 \quad (32c)$$

Considerando a ocorrência de pequenas variações em torno do ponto de operação do sistema elétrico de potência, assumem a forma de:

$$\Delta I_{rgk} - \sum_{k \in \Omega_k} \Delta I_{rkj} - \Delta I_{rLk} = 0 \quad (33)$$

$$\Delta I_{mgk} - \sum_{k \in \Omega_k} \Delta I_{mkj} - \Delta I_{mLk} = 0 \quad (34)$$

O balanço incremental de corrente na barra  $k$  pode ser representado pelas equações (33) e (34), sendo que  $\Delta I_{rgk}$  e  $\Delta I_{mgk}$  são as variações das correntes, real e imaginária, injetadas no nó  $k$ ;  $\Delta I_{rkj}$  e  $\Delta I_{mkj}$  são as variações das correntes, real e imaginária, na linha de transmissão  $k-j$ ;  $\Delta I_{rLk}$  e  $\Delta I_{mLk}$  são as variações das correntes, real e imaginária, de uma possível carga instalada na barra  $k$ .

Substituindo o equacionamento (26) a (31) nas equações (33) e (34) obtêm-se (35) e (36).

$$\begin{aligned} 0 = & R1_{gk} \Delta \delta_k + R2_{gk} \Delta E'_{qk} + (R3_{gk} - \sum R1_{kj} - R1_{Lk}) \Delta \theta_k + (R4_{gk} - \\ & \sum R3_{kj} - R2_{Lk}) \Delta V_k - \sum R2_{kj} \Delta \theta_j - \sum R4_{kj} \Delta V_j - \sum R3_{Lk} \Delta P_{Lk} - \\ & \sum R4_{Lk} \Delta Q_{Lk} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
0 = & M1_{gk}\Delta\delta_k + M2_{gk}\Delta E'_{qk} + (M3_{gk} - \sum M1_{kj} - M1_{Lk})\Delta\theta_k + (M4_{gk} - \\
& \sum M3_{kj} - M2_{Lk})\Delta V_k - \sum M2_{kj}\Delta\theta_j - \sum M4_{kj}\Delta V_j - \sum M3_{Lk}\Delta P_{Lk} - \\
& \sum M4_{Lk}\Delta Q_{Lk}
\end{aligned} \tag{36}$$

As equações em (35) e (36) representam o balanço nodal linearizado de correntes, real e imaginária, em uma barra  $k$ , que relaciona as variáveis algébricas e variáveis de estado do SEP.

## 2.2 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

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

### 2.2.1 Equações de movimento da máquina síncrona

De acordo com (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003), a equação de balanço (*swing*) de um gerador síncrono pode ser separada em duas equações diferenciais de primeira ordem que exibem o comportamento dinâmico das suas variáveis mecânicas (velocidade angular  $\omega_k$  e o deslocamento angular  $\delta_k$  do rotor). As formas linearizadas destas equações são dadas nas equações (37) e (38).

$$\Delta\dot{\omega}_k = \left(\frac{1}{M_k}\right)\Delta P_{meck} - \left(\frac{1}{M_k}\right)\Delta P_{ek} - \left(\frac{D_k}{M_k}\right)\Delta\omega_k \tag{37}$$

$$\Delta\dot{\delta}_k = w_0\Delta\omega_k \tag{38}$$

Em (37) e (38),  $w_0$  é a velocidade síncrona,  $M_k$  é a constante de inércia e  $D_k$  se refere ao amortecimento inerente ao SEP. A potência mecânica de entrada do gerador  $k$  é representada por  $P_{meck}$ .

A potência ativa disponível na barra  $k$  pode ser calculada em função da tensão e corrente terminal ( $\tilde{V}_k$  e  $\tilde{I}_{gk}$ ) do gerador no regime permanente como em (39a).

$$P_{ek} = V_{dk}I_{dgk} + V_{qk}I_{qgk} \quad (39a)$$

Com isso, a equação (39a) representa o fluxo de potência ativa em função das tensões e correntes “referidas” ao sistema de coordenadas (d, q).

Substituindo as equações (16), (17), (18f) e (18g) na equação (39a), obtém-se (39b), cuja forma linearizada é dada em (40b).

$$P_{ek} = V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \frac{(E'_{qk} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k))}{x'_{dk}} + V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (39b)$$

$$\Delta P_{ek} = f(\Delta\delta_k, \Delta E'_{qk}, \Delta\theta_k, \Delta V_k) \quad (40a)$$

$$\Delta P_{ek} = K1_k \Delta\delta_k + K2_k \Delta E'_{qk} + K3_k \Delta\theta_k + K4_k \Delta V_k \quad (40b)$$

A substituição da equação (40b) em (37) resulta nas variações incrementais da velocidade angular do rotor, de acordo com (41).

$$\Delta\dot{\omega}_k = -\left(\frac{D_k}{M_k}\right)\Delta\omega_k + \left(-\frac{K1_k}{M_k}\right)\Delta\delta_k + \left(-\frac{K2_k}{M_k}\right)\Delta E'_{qk} + \left(-\frac{K3_k}{M_k}\right)\Delta\theta_k + \left(-\frac{K4_k}{M_k}\right)\Delta V_k + \left(\frac{1}{M_k}\right)\Delta P_{meck} \quad (41)$$

### 2.2.2 Dinâmica do Circuito de Campo da Máquina Síncrona

Considerando os efeitos da dinâmica do circuito de campo do gerador, a variação da tensão interna no eixo em quadratura do gerador pode ser expressa de acordo com a equação (42) (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003).

$$T'_{dok}\Delta\dot{E}'_{qk} = \Delta E_{fdk} - \Delta E'_{qk} - (x_{dk} - x'_{dk})\Delta I_{dgk} \quad (42)$$

Na equação (42), a grandeza  $T'_{dok}$  é a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto,  $\Delta E_{fdk}$  representa a tensão aplicada ao circuito de campo do gerador síncrono e  $x_{dk}$  é a reatância síncrona de eixo direto.

Substituindo a tensão  $V_{qk}$  de (18f) na corrente  $I_{dgk}$  de (16), a linearização da  $I_{dgk}$  fica expressa em (43), substitui-se (43) em (42), determina-se (44).

$$\Delta I_{dgk} = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \Delta \delta_k + \frac{1}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} - \frac{\cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \Delta V_k - \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \Delta \theta_k \quad (43)$$

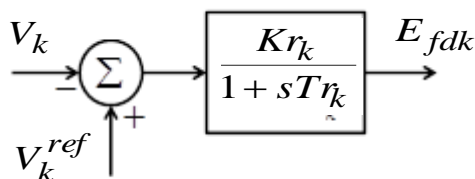
$$\Delta \dot{E}'_{qk} = \left( \frac{K5_k}{T'_{dok}} \right) \Delta \delta_k + \left( \frac{K6_k}{T'_{dok}} \right) \Delta E'_{qk} + \left( \frac{K7_k}{T'_{dok}} \right) \Delta \theta_k + \left( \frac{K8_k}{T'_{dok}} \right) \Delta V_k + \left( \frac{1}{T'_{dok}} \right) \Delta E_{fdk} \quad (44)$$

### 2.2.3 Equação da excitatriz estática

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

Dentre os vários modelos existentes para o RAT, nos estudos da estabilidade a pequenas perturbações é usual a utilização de uma representação formada por um bloco de primeira ordem com ganho  $Kr_k$  e constante de tempo  $Tr_k$ , conforme o diagrama de blocos apresentados na Figura 5 (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; DECKMANN; DA COSTA, 1994; KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003).

**Figura 5 - Diagrama de blocos do Regulador Automático de Tensão.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir do diagrama de blocos na Figura 5 pode-se escrever a equação (45a), que representa a dinâmica da tensão de campo do gerador  $k$  no domínio da frequência, enquanto que a equação (45b) representa esta mesma tensão no domínio do tempo.

$$E_{fdk} = \frac{Kr_k}{1+sTr_k} (V_k^{ref} - V_k) \quad (45a)$$

$$\dot{E}_{fdk} = \left(-\frac{1}{Tr_k}\right) E_{fdk} + \left(-\frac{Kr_k}{Tr_k}\right) V_k + \left(\frac{Kr_k}{Tr_k}\right) V_k^{ref} \quad (45b)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, a forma linearizada da tensão de campo do gerador  $k$  é dada pela equação (46).

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = \left(-\frac{1}{Tr_k}\right) \Delta E_{fdk} + \left(-\frac{Kr_k}{Tr_k}\right) \Delta V_k + \left(\frac{Kr_k}{Tr_k}\right) \Delta V_k^{ref} \quad (46)$$

### 2.3 REPRESENTAÇÕES DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

O conjunto de equações formado pelas equações algébricas do balanço nodal de correntes no sistema multimáquinas (35) e (36) e pelas equações diferenciais (38), (41), (44) e (46) constituem a representação do MSC no domínio do tempo, cuja forma matricial é representada pela equação (47a).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta U] \quad (47a)$$

Em (47a),  $\Delta X$  representa o vetor das variáveis de estado,  $\Delta Z$  o vetor das variáveis algébricas e  $\Delta U$  o vetor das variáveis de entrada do sistema. Cada um desses vetores é definido na sequência:

$$\Delta X = [\Delta\omega \ \Delta\delta \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd}] \quad (47b)$$

$$\Delta Z = [\Delta V \ \Delta\theta] \quad (47c)$$

$$\Delta U = [\Delta P_m \ \Delta V_{ref} \ \Delta P_L \ \Delta Q_L] \quad (47d)$$

Analisando o conjunto de expressões (47) conclui-se que, considerando a inclusão de reguladores automáticos de tensão de 1ª ordem em todos os geradores do SEP, o número de variáveis de estado é igual a quatro vezes o número de geradores e que a quantidade de variáveis algébricas é o dobro do número de barras do sistema de transmissão (não considerando as barras internas dos geradores). O número de entradas do sistema equivale a duas vezes o número de geradores acrescido de duas vezes o número de barras do tipo PQ (barras de carga). As submatrizes apresentadas em (47e) são formadas de acordo com as equações (48) a (53).

A representação completa do MSC para sistemas multimáquinas no domínio do tempo de forma matricial compacta, representa-se conforme (47e).

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{E}'_q \\ \Delta\dot{E}_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{\begin{matrix} J1_{\omega\omega} & J1_{\omega\delta} & J1_{\omega E'_q} & J1_{\omega E_{fd}} \\ J1_{\delta\omega} & J1_{\delta\delta} & J1_{\delta E'_q} & J1_{\delta E_{fd}} \\ J1_{E'_q\omega} & J1_{E'_q\delta} & J1_{E'_q E'_q} & J1_{E'_q E_{fd}} \\ J1_{E_{fd}\omega} & J1_{E_{fd}\delta} & J1_{E_{fd} E'_q} & J1_{E_{fd} E_{fd}} \end{matrix}} & \boxed{\begin{matrix} J2_{\omega\theta} & J2_{\omega v} \\ J2_{\delta\theta} & J2_{\delta v} \\ J2_{E'_q\theta} & J2_{E'_q v} \\ J2_{E_{fd}\theta} & J2_{E_{fd} v} \end{matrix}} \\ \boxed{\begin{matrix} J3_{r\omega} & J3_{r\delta} & J3_{r E'_q} & J3_{r E_{fd}} \\ J3_{m\omega} & J3_{m\delta} & J3_{m E'_q} & J3_{m E_{fd}} \end{matrix}} & \boxed{\begin{matrix} J4_{r\theta} & J4_{rv} \\ J4_{m\theta} & J4_{mv} \end{matrix}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{\omega P_m} & B1_{\omega V_{ref}} & B1_{\omega P_L} & B1_{\omega Q_L} \\ B1_{\delta P_m} & B1_{\delta V_{ref}} & B1_{\delta P_L} & B1_{\delta Q_L} \\ B1_{E'_q P_m} & B1_{E'_q V_{ref}} & B1_{E'_q P_L} & B1_{E'_q Q_L} \\ B1_{E_{fd} P_m} & B1_{E_{fd} V_{ref}} & B1_{E_{fd} P_L} & B1_{E_{fd} Q_L} \\ \boxed{\begin{matrix} B2_{r P_m} & B2_{r V_{ref}} & B2_{r P_L} & B2_{r Q_L} \\ B2_{m P_m} & B2_{m V_{ref}} & B2_{m P_L} & B2_{m Q_L} \end{matrix}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} \quad (47e)$$

$$J1 = \begin{bmatrix} J1_{\omega\omega} & J1_{\omega\delta} & J1_{\omega E'_q} & J1_{\omega E_{fd}} \\ J1_{\delta\omega} & J1_{\delta\delta} & J1_{\delta E'_q} & J1_{\delta E_{fd}} \\ J1_{E'_q\omega} & J1_{E'_q\delta} & J1_{E'_q E'_q} & J1_{E'_q E_{fd}} \\ J1_{E_{fd}\omega} & J1_{E_{fd}\delta} & J1_{E_{fd} E'_q} & J1_{E_{fd} E_{fd}} \end{bmatrix}_{4ng_x 4ng} \quad (48a)$$

$$J1_{\omega\omega} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{D_k}{M_k} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48b)$$

$$J1_{\omega\delta} = \begin{bmatrix} -\frac{K1_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{K1_k}{M_k} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48c)$$

$$J1_{\omega E'_q} = \begin{bmatrix} -\frac{K2_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{K2_k}{M_k} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48d)$$

$$J1_{\omega E_{fd}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48e)$$

$$J1_{\delta\omega} = \begin{bmatrix} \omega_{01} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \omega_{0k} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48f)$$

$$J1_{\delta\delta} = J1_{\delta E'_q} = J1_{\delta E_{fd}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48g)$$



$$J1_{E'_q\omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48h)$$

$$J1_{E'_q\delta} = \begin{bmatrix} \frac{K5_1}{T'_{do1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{K5_k}{T'_{dok}} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48i)$$

$$J1_{E'_qE'_q} = \begin{bmatrix} \frac{K6_1}{T'_{do1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{K6_k}{T'_{dok}} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48j)$$

$$J1_{E'_qE_{fd}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{do1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{T'_{dok}} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48k)$$

$$J1_{E_{fd}\omega} = J1_{E_{fd}\delta} = J1_{E_{fd}E'_q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48l)$$

$$J1_{E_{fd}E_{fd}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Tr_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{1}{Tr_k} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (48m)$$

$$J2 = \begin{bmatrix} J1_{\omega\theta} & J1_{\omega v} \\ J2_{\delta\theta} & J2_{\delta v} \\ J2_{E'_q\theta} & J2_{E'_qv} \\ J2_{E_{fd}\theta} & J2_{E_{fd}v} \end{bmatrix}_{4ng_x 2nb} \quad (49a)$$

$$J2_{\omega\theta} = \begin{bmatrix} -\frac{K3_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{K3_k}{M_k} \end{bmatrix}_{ng_xnb} \quad (49b)$$

$$J2_{\omega v} = \begin{bmatrix} -\frac{K4_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{K4_k}{M_k} \end{bmatrix}_{ng_xnb} \quad (49c)$$

$$J2_{\delta\theta} = J2_{\delta v} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_xnb} \quad (49d)$$

$$J2_{E'_q\theta} = \begin{bmatrix} -\frac{K7_1}{T'_{do1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{K7_k}{T'_{dok}} \end{bmatrix}_{ng_xnb} \quad (49e)$$

$$J2_{E'_qv} = \begin{bmatrix} -\frac{K8_1}{T'_{do1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{K8_k}{T'_{dok}} \end{bmatrix}_{ng_xnb} \quad (49f)$$

$$J2_{E_{fd}\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_xnb} \quad (49g)$$

$$J2_{E_{fd}v} = \begin{bmatrix} -\frac{Kr_1}{Tr_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{Kr_k}{Tr_k} \end{bmatrix}_{ng_xnb} \quad (49h)$$

$$J3 = \begin{bmatrix} J3_{r\omega} & J3_{r\delta} & J3_{rE'_q} & J3_{rE_{fd}} \\ J3_{m\omega} & J3_{m\delta} & J3_{mE'_q} & J3_{mE_{fd}} \end{bmatrix}_{2nb_x 4ng} \quad (50a)$$

$$J3_{r\omega} = J3_{rE_{fd}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{nb_x ng} \quad (50b)$$

$$J3_{r\delta} = \begin{bmatrix} R1_{g1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & R1_{gk} \end{bmatrix}_{nb_x ng} \quad (50c)$$

$$J3_{rE'_q} = \begin{bmatrix} R2_{g1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & R2_{gk} \end{bmatrix}_{nb_x ng} \quad (50d)$$

$$J3_{m\omega} = J3_{mE_{fd}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{nb_x ng} \quad (50e)$$

$$J3_{m\delta} = \begin{bmatrix} M1_{g1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & M1_{gk} \end{bmatrix}_{nb_x ng} \quad (50f)$$

$$J3_{rm} = \begin{bmatrix} M2_{g1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & M2_{gk} \end{bmatrix}_{nb_x ng} \quad (50g)$$

$$J4 = \begin{bmatrix} J4_{r\theta} & J4_{rv} \\ J4_{m\theta} & J4_{mv} \end{bmatrix}_{2nb_x 2nb} \quad (51a)$$

$$J4_{r\theta} = \begin{bmatrix} (R3_{g1} - \sum R1_{1j} - R1_{L1}) & -R2_{12} & \dots & -R2_{1nb} \\ -R2_{21} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ -R2_{nb1} & \dots & \dots & (R3_{gnb} - \sum R1_{nbj} - R1_{Lnb}) \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (51b)$$

$$J4_{rV} = \begin{bmatrix} (R4_{g1} - \sum R3_{1j} - R2_{L1}) & -R4_{12} & \dots & -R4_{1nb} \\ -R4_{21} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ -R4_{nb1} & \dots & \dots & (R4_{gnb} - \sum R3_{nbj} - R2_{Lnb}) \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (51c)$$

$$J4_{m\theta} = \begin{bmatrix} (M3_{g1} - \sum M1_{1j} - M1_{L1}) & -M2_{12} & \dots & -M2_{1nb} \\ -M2_{21} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ -M2_{nb1} & \dots & \dots & (M3_{gnb} - \sum M1_{nbj} - M1_{Lnb}) \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (51d)$$

$$J4_{mV} = \begin{bmatrix} (M4_{g1} - \sum M3_{1j} - M2_{L1}) & -M4_{12} & \dots & -M4_{1nb} \\ -M4_{21} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ -M4_{nb1} & \dots & \dots & (M4_{gnb} - \sum M3_{nbj} - M2_{Lnb}) \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (51e)$$

Á submatriz  $J_4$  corresponde a uma matriz quadrada de orden  $2nb$ .

Em geral, as submatrizes que compõem  $J_1, J_2, J_3$  e  $J_4$  serão matrizes *esparsas*, tal como a própria matriz de admitância do sistema.

Seja  $J$  a matriz formada pelo agrupamento das submatrizes  $J_1, J_2, J_3$  e  $J_4$ , teremos então que  $J$  terá  $4ng + 2nb$  linhas e colunas.

$$B1 = \begin{bmatrix} B1_{\omega P_m} & B1_{\omega V_{ref}} & B1_{\omega P_L} & B1_{\omega Q_L} \\ B1_{\delta P_m} & B1_{\delta V_{ref}} & B1_{\delta P_L} & B1_{\delta Q_L} \\ B1_{E'_q P_m} & B1_{E'_q V_{ref}} & B1_{E'_q P_L} & B1_{E'_q Q_L} \\ B1_{E_{fd} P_m} & B1_{E_{fd} V_{ref}} & B1_{E_{fd} P_L} & B1_{E_{fd} Q_L} \end{bmatrix}_{4ng_x(2ng+2nb)} \quad (52a)$$

$$B1_{\omega P_m} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ M_1 & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{M_{ng}} \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (52b)$$

$$B1_{\omega V_{ref}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (52c)$$

$$B1_{\omega P_L} = B1_{\omega Q_L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x nb} \quad (52d)$$

$$B1_{\delta P_m} = B1_{\delta V_{ref}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (52e)$$

$$B1_{\delta P_L} = B1_{\delta Q_L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x nb} \quad (52f)$$

$$B1_{E'_q P_m} = B1_{E'_q V_{ref}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x ng} \quad (52g)$$

$$B1_{E'_q P_L} = B1_{E'_q Q_L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng_x nb} \quad (52h)$$

$$B1_{EfdP_m} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng \times ng} \quad (52i)$$

$$B1_{EfdV_{ref}} = \begin{bmatrix} \frac{Kr_1}{Tr_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{Kr_{ng}}{Tr_{ng}} \end{bmatrix}_{ng \times ng} \quad (52j)$$

$$B1_{EfdP_L} = B1_{EfdQ_L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{ng \times nb} \quad (52k)$$

As submatrizes de  $B1$  relacionadas com a potência mecânica de entrada  $P_m$  e a tensão de referência da barra terminal  $V_{ref}$  são matrizes quadradas de ordem  $ng$ . Já as matrizes relacionadas com a potência das cargas  $P_L$  e  $Q_L$  possuem  $ng$  linhas e  $nb$  colunas. Dessa forma, a submatriz  $B1$  apresenta  $4ng$  linhas e  $2ng + 2nb$  colunas.

$$B2 = \begin{bmatrix} B2_{rP_m} & B2_{rV_{ref}} & B2_{rP_L} & B2_{rQ_L} \\ B2_{mP_m} & B2_{mV_{ref}} & B2_{mP_L} & B2_{mQ_L} \end{bmatrix}_{2nb \times (2ng + 2nb)} \quad (53a)$$

$$B2_{rP_m} = B2_{rV_{ref}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{nb \times ng} \quad (53b)$$

$$B2_{rP_L} = \begin{bmatrix} -R3_{L1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -R3_{Lnb} \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (53c)$$

$$B2_{rQ_L} = \begin{bmatrix} -R4_{L1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -R4_{Lnb} \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (53d)$$

$$B2_{mP_m} = B2_{mV_{ref}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{nb \times ng} \quad (53e)$$

$$B2_{mP_L} = \begin{bmatrix} -M3_{L1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -M3_{Lnb} \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (53f)$$

$$B2_{mQ_L} = \begin{bmatrix} -M4_{L1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -M4_{Lnb} \end{bmatrix}_{nb \times nb} \quad (53g)$$

As submatrizes  $B2$  relacionadas com a potência das cargas  $P_L$  e  $Q_L$  são do tipo quadradas, possuindo  $nb$  linhas e  $nb$  colunas. Já as submatrizes relacionadas com a potência mecânica de entrada  $P_m$  e a tensão de referência da barra terminal  $V_{Ref}$  são matrizes possuem  $nb$  linhas e  $ng$  colunas. Dessa forma,  $B2$  possui  $2nb$  linhas e  $2nb + 2ng$  colunas.

Em uma forma mais compacta, as expressões ficam como a representação matricial (47a)

Para análise da estabilidade a pequenas perturbações, faz-se a representação do sistema no espaço de estados, através da obtenção da matriz de estados  $A$ . A obtenção da matriz de estados é feita através da eliminação do vetor de variáveis algébricas. O primeiro passo é reescrever a equação (47a) da seguinte forma:

$$\Delta \dot{X} = J1[\Delta X] + J2[\Delta Z] + B1[\Delta U] \quad (54a)$$

$$0 = J3[\Delta X] + J4[\Delta Z] + B2[\Delta U] \quad (54b)$$

Da equação (54a e 54b) se obtém a expressão para o vetor de variáveis algébricas. Isolando-o do lado esquerdo da igualdade, tem-se:

$$[\Delta Z] = (-J4^{-1})J3[\Delta X] + (-J4^{-1})B2[\Delta U] \quad (55a)$$

Substituindo (55a) em (54a):

$$\Delta \dot{X} = J1[\Delta X] + J2[(-J4^{-1})J3[\Delta X] + (-J4^{-1})B2[\Delta U] ] + B1[\Delta U] \quad (55b)$$

Reescrevendo (54b):

$$\Delta \dot{X} = A[\Delta X] + B[\Delta U] \quad (55c)$$

$$A = J1 - J2(J4^{-1})J3 \quad (55d)$$

$$B = B1 - J2(J4^{-1})B2 \quad (55e)$$

A equação (55c) é chamada de representação no espaço de estados do SEP representado através do MSC. A matriz A é comumente chamada de matriz de estados e B de matriz de entradas.

## 2.4 CONCLUSÕES

Neste Capítulo foi apresentada a modelagem matemática dos componentes do SEP utilizados neste trabalho e sua inclusão no Modelo de Sensibilidade de Corrente, considerando um sistema multimáquinas. Este modelo é linear e fundamenta-se no balanço nodal de correntes. A partir de uma análise do MSC, é possível ter acesso às variáveis algébricas ( $\Delta V$  e  $\Delta \theta$ ), em todas as barras do SEP. Portanto, pode-se concluir que o MSC preserva o sistema externo de transmissão.

Além disto, possui características que tornam possível a inclusão de modelos de novos dispositivos sem que a modelagem anterior seja desprezada; ou seja, a cada novo dispositivo representado, ocorre um aumento de elementos e/ou submatrizes em relação à modelagem inicial. Ao final, o SEP fica representado por um conjunto de variáveis de estado e de variáveis algébricas.



### 3 O DISPOSITIVO INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER (IPFC)

No começo do desenvolvimento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), os sistemas eram de pequeno porte. Em vista disso, a complexidade era menor pelas poucas interconexões. Atualmente o cenário tem mudado pelo advento de novas tecnologias e a otimização dos recursos, acrescentando a complexidade do SEP para atender o contínuo aumento da demanda por eletricidade.

A solução paliativa foi construir novas unidades geradoras que provocou altos custos de investimentos envolvidos na expansão do SEP, tais como construção de novas usinas e linhas de transmissão, além das restrições ambientais, tornando-se impraticável a estratégia do superdimensionamento.

Com isto as linhas de transmissão operam perto dos limites térmicos ou de estabilidade, como resultado, limitando consideravelmente o nível de potência que pode ser transmitida, dentro de certa margem, com segurança (WATANABE; BARBOSA; ALMEIDA, 1998)

Os limites térmicos são limites físicos inerentes aos equipamentos dos sistemas de transmissão. Normalmente os sistemas de potência operam muito abaixo dos seus limites térmicos por questões de segurança no caso de contingências. Os dispositivos FACTS irão afetar a operação do sistema, usualmente em respostas a perturbações críticas, permitindo uma melhor utilização da sua capacidade térmica. (WATANABE; BARBOSA; ALMEIDA, 1998)

Com tais restrições, tornou-se imperativo o desenvolvimento de dispositivos que pudessem controlar diretamente os fluxos de potência em determinadas linhas de um sistema elétrico. Neste contexto, isto é, sistemas com fluxos de potências controláveis, surgiram, os FACTS.

Contudo, os FACTS devem ser tratados sempre como alternativa na tentativa de suprir o aumento da demanda de energia elétrica, otimizando o potencial elétrico já instalado, controlando o fluxo de potência já existente. (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999, HINGORANI; GYUGYI, 1999)

Além de realizar o controle dos fluxos de potência, é fundamental destacar outras características que estes dispositivos possuem. Dentre elas, pode-se citar; melhoramento

na eficiência da transmissão das linhas já existentes no SEP; realocamento e controle do 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)

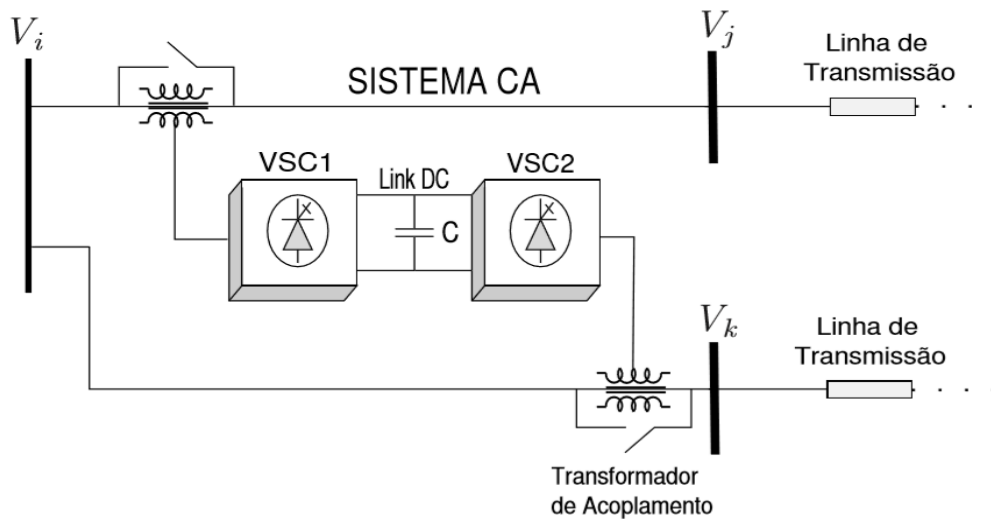
Dentre os diversos FACTS existentes, neste trabalho o interesse é o IPFC. Dentre as características deste dispositivo, destaca-se o fato de poder gerenciar os fluxos de potência (ativa e reativa) em distintas linhas de transmissão do SEP.

### 3.1 ASPECTOS GERAIS DO INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER

O IPFC foi proposto por GYUGYI com SEN e SCHAUDERR em 1998. Este dispositivo aborda o problema de compensar as linhas de transmissão em uma determinada subestação. Em outras palavras, o IPFC pode fornecer um esquema altamente eficaz para o gerenciamento de transmissão de energia em uma subestação multilinha. (HINGORANI; GYUGYI, 1999).

Sua capacidade única de compensar simultaneamente várias linhas de transmissão em uma determinada subestação tem despertado, desde então, grande interesse de pesquisadores e indústrias de energia em todo o mundo, especialmente quando a fabricação de VSCs está se tornando cada vez mais econômica. (ZHANG; YOKOYAMA; IDE, 2009). Portanto, o IPFC pode gerenciar e controlar fluxos de potências na subestação onde encontra-se instalado e, assim, por meio do controle dos fluxos, o dispositivo pode reduzir as sobrecargas de transmissão e compensar as quedas de tensão, e por essa flexibilidade, o IPFC é muito versátil quanto ao controle e gerenciamento do sistema elétrico de potência, se for comparado a outros FACTS existentes. (GYUGYI; SEM; SCHAUDERR, 1999; VALLE, 2010).

**Figura 6 - Representação de um IPFC com dois conversores série**



Fonte: (VALLE, 2010)

Além disso o IPFC utiliza a 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 potência ativa e reativa, bem como realizar compensação série nas linhas onde se encontra acoplado.

Para melhor entendimento sobre o dispositivo IPFC, observe a Figura 6. Em que há apenas dois conversores compensando 2 linhas de transmissão entre as barras i-j e i-k. Contudo, este conceito pode ser generalizado com  $n$  conversores compensando  $n$  linhas em cada subestação onde o dispositivo encontra-se instalado.

Na estrutura IPFC, vários inversores são conectados em conjunto no seu terminal DC. Os inversores podem transferir potência real entre eles através do seu terminal DC comum. Essa capacidade permite que o IPFC forneça compensação real e reativa para algumas linhas e, assim, otimize a utilização do sistema de transmissão geral. Em particular, o IPFC pode equalizar o fluxo de energia real e reativo nas linhas, aliviar as linhas sobrecarregadas da carga de fluxo de energia reativa. (GUYGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999)

### 3.2 MODELO MATEMÁTICO DO INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER

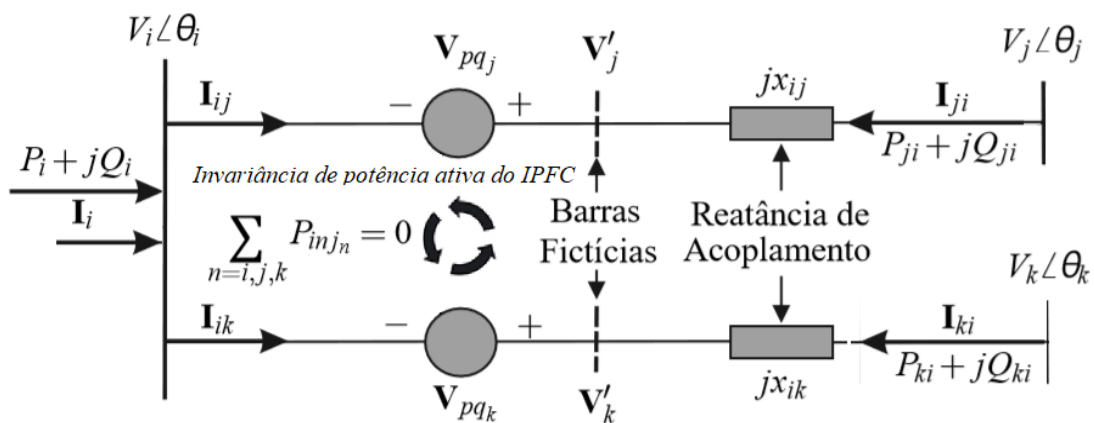
Como discutido na seção anterior, o IPFC é projetado como o modelo mais simples que compõe dois compensadores de série síncronos estáticos controláveis independentemente (SSSC) que são conversores de fonte de tensão de estado sólido (VSCs) que injetam uma tensão quase senoidal em magnitude variável e são conectados através de um capacitor CC comum. (TECRATHANA *et al.*, 2005)

Portanto, o IPFC fica representado por meio de uma combinação de dois conversores séries que trabalham juntos e que são conectados por um elo CC comum.

Apresenta-se na Figura 7 que o IPFC pode de forma efetiva controlar três fluxos de potência independentes nas duas linhas de transmissão onde encontra-se instalado. (ZHANG, 2006)

Sendo o interesse formular a modelagem matemática que represente o IPFC, considere a Figura 7 onde é apresentado o circuito equivalente do IPFC.

**Figura 7 - Circuito equivalente de um IPFC com duas fontes de tensão série.**



Fonte: Adaptado (FORTES, 2016).

Na figura 7 tem-se as três barras onde atuará o IPFC designadas por  $i$ ,  $j$  e  $k$  e representadas respectivamente, por suas tensões fasoriais  $V_i$ ,  $V_j$  e  $V_k$ . Observe-se que o IPFC possui duas fontes de tensão síncronas que injeta uma tensão controlável série denotada por  $V_{pq_n}$  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,  $V'_j$  e  $V'_k$  de duas barras fictícias indicadas por  $j'$  e  $k'$ .

Ainda analisando a Figura 7, pode-se observar que  $P_i$  e  $Q_i$  representam as injeções de potência ativa e reativa na barra  $i$ . As grandezas  $P_{ji}$ ,  $P_{ki}$  e  $Q_{ji}$  e  $Q_{ki}$  indicam os fluxos de potência ativa e reativa, do ramo em que se encontra instalado o IPFC, deixando a barra  $j$  e  $k$ , respectivamente. De forma análoga,  $I_{ij}$  e  $I_{ik}$  designam as correntes que deixam a barra  $i$ , enquanto que  $I_{ji}$  e  $I_{ki}$  representam as correntes entrando nas barras  $j$  e  $k$ , respectivamente. Por fim, a estrutura básica do IPFC exige potência líquida zero nos terminais comuns de CC com a suposição de que no sistema geral há capacidade disponível nas linhas fortes e subcarregadas para fornecer compensação de energia real apropriada para a linha fraca e sobrecarregada, portanto, as perdas ativas são nulas no sistema ideal. (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999)

Na operação em regime permanente, a tensão do capacitor de CC é mantida constante, portanto, não há energia ativa gerada ou absorvida pelos VSCs se as válvulas do conversor forem consideradas sem perda. Isso é chamado de invariância de energia ativa do IPFC. Assim, uma das variáveis do IPFC torna-se incontrolável, tornando o grau de liberdade de controle do IPFC  $2n-1$ . (ZHANG; YOKOYAMA e IDE, 2009)

Logo assume-se que  $\sum_{n=i,j,k} P_{inj_n} = 0$ . Essa restrição também é conhecida como “Invariância de Potência Ativa do IPFC”. (VALLE, 2010)

Segundo Zhang, Yokoyama e Ide (2009) e Valle (2010), tanto na análise em estado estacionário como na análise da estabilidade do ângulo do rotor, o VSC do IPFC pode ser modelado como fonte de tensão em série injetando uma tensão quase senoidal com magnitude e ângulo controláveis. Portanto, o controle do fluxo de potência na linha de transmissão no qual o IPFC encontra-se instalado poderá ser realizado por meio da magnitude e do ângulo da tensão série injetada  $V_{pq_n}$  e pode ser expresso conforme a equação (56a).

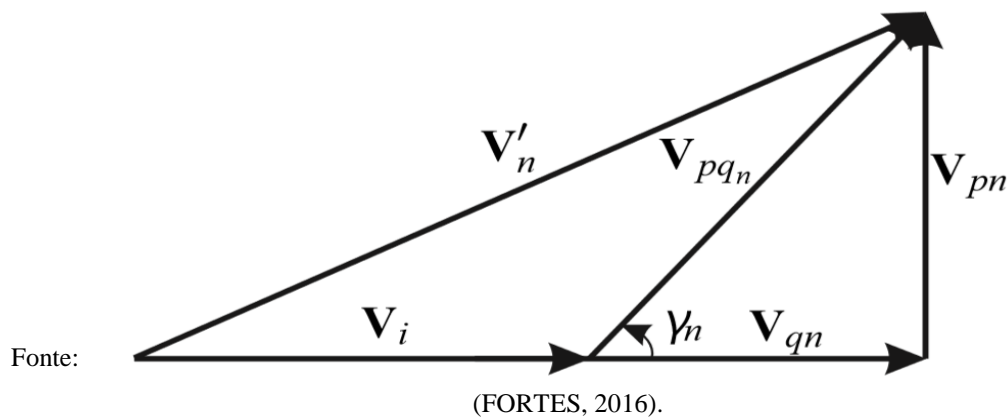
$$V_{pq_n} = r_n e^{j\gamma_n} V_i \quad (56a)$$

Na equação (56a)  $V_{pq_n}$  ( $n = j, k$ ) representa os fasores das tensões série injetadas tal como se apresenta na Figura 7. O modelo do IPFC é analisado com seus parâmetros

de controle  $\gamma_n$  ( $0 < \gamma_n < 2\pi$ ) e  $r_n$  ( $0 < r_n < r_n^{max}$ ), segundo Suresh, Sivanagaraju e Ravindrababu (2014) o valor máximo do parâmetro  $r_n^{max}$  é igual a 0.9 . Além disso,  $r_n$  e  $\gamma_n$  são parâmetros das tensões séries injetadas em que  $r_n = \frac{V_{pqn}}{V_i}$  e  $\gamma_n$  é o ângulo de  $V_{pqn}$  em relação à tensão da barra  $V_i$  (VALLE, 2010).

A figura 8 descreve o diagrama fasorial das tensões série.

**Figura 8 - Diagrama fasorial de tensão série injetada (n=j,k)**



Conforme o diagrama fasorial apresentado na Figura 8, este vetor de tensão complexo também pode ser decomposto em dois componentes controláveis perpendiculares um aos outros (ZHANG; YOKOYAMA; IDE, 2009) e, assim, observa-se que a tensão controlável  $V_{pqn}$ , pode ser expressa em duas parcelas, em fase ( $V_{qn}$ ) e outra em quadratura ( $V_{pn}$ ), conforme está descrito em (56b).

$$V_{pqn} = V_{qn} + jV_{pn} \quad (56b)$$

Por outro lado, à equação (56a) pode ser reescrita em (56c)

$$V_{pqn} = r_n V_i \cos \gamma_n + jr_n V_i \sin \gamma_n \quad (56c)$$

Comparando (56c) com a equação (56b), define-se  $V_{qn}$  e  $V_{pn}$ .

$$V_{qn} = r_n V_i \cos \gamma_n \quad (57)$$

$$V_{pn} = r_n V_i \sin \gamma_n \quad (58)$$

Baseado no circuito equivalente do IPFC apresentado na Figura 8 são obtidas as equações (59) e (60).

$$V'_j = V_i + V_{pqj} \quad (59)$$

$$V'_k = V_i + V_{pqk} \quad (60)$$

Substituindo (56a) em (59) e (60), em que  $n = j, k$  obtêm-se (61) e (62)

$$V'_j = V_i + r_j e^{j\gamma_j} V_i \quad (61)$$

$$V'_k = V_i + r_k e^{j\gamma_k} V_i \quad (62)$$

Analisando a Figura 8, a corrente injetada na barra  $i$  pelo IPFC pode ser expressa pela equação (63).

$$I_i = I_{ij} + I_{ik} = \frac{V'_j - V_j}{jX_{ij}} + \frac{V'_k - V_k}{jX_{ik}} \quad (63)$$

Considerando que  $V_i = V_i \angle \theta_i$ ,  $V_j = V_j \angle \theta_j$ ,  $V_k = V_k \angle \theta_k$  e substituindo as expressões obtidas para  $V'_j$  e  $V'_k$  em (59) e (60) na equação (63), respectivamente, tem-se (64a) e (64b)

$$I_i = \frac{V_i + V_{pqj} - V_j}{jX_{ij}} + \frac{V_i + V_{pqk} - V_k}{jX_{ik}} \quad (64a)$$

$$I_i = \frac{V_i \angle \theta_i + r_j e^{j\gamma_j} V_i - V_j \angle \theta_j}{jX_{ij}} + \frac{V_i \angle \theta_i + r_k e^{j\gamma_k} V_i - V_k \angle \theta_k}{jX_{ik}} \quad (64b)$$

Após algumas manipulações algébricas na equação (64b), obtêm-se à expressão (65a), (65b) e (65c) na sua parte real e imaginária.

$$I_i = RE(I_i) + j IM(I_i) \quad (65a)$$

$$RE(I_i) = \left[ V_i \sin \theta_i \left( \frac{1}{x_{ij}} + \frac{1}{x_{ik}} \right) + V_i \left( \frac{r_j \sin(\gamma_j + \theta_i)}{x_{ij}} + \frac{r_k \sin(\gamma_k + \theta_i)}{x_{ik}} \right) - \frac{V_j \sin \theta_j}{x_{ij}} - \frac{V_k \sin \theta_k}{x_{ik}} \right] \quad (65b)$$

$$IM(I_i) = \left[ -V_i \cos \theta_i \left( \frac{1}{x_{ij}} + \frac{1}{x_{ik}} \right) - V_i \left( \frac{r_j \cos(\gamma_j + \theta_i)}{x_{ij}} + \frac{r_k \cos(\gamma_k + \theta_i)}{x_{ik}} \right) + \frac{V_j \cos \theta_j}{x_{ij}} + \frac{V_k \cos \theta_k}{x_{ik}} \right] \quad (65c)$$

A equação (65a) 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 (65) na equação (66)

$$S_i = V_i I_i^* = (V_i \cos \theta_i + j V_i \sin \theta_i) (RE(I_i) - j IM(I_i)) \quad (66)$$

Após a devida manipulação matemática em (66) e separando a parte real ( $P_i$ ) da parte imaginária ( $Q_i$ ) da potência complexa  $S_i$ , obtêm-se as equações (67) e (68), respectivamente.

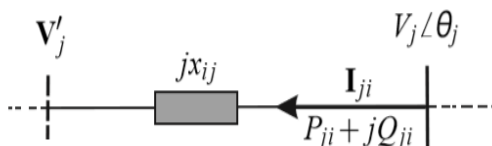
Estas representam as injeções de potências ativa e reativa na barra  $i$  comum ao IPFC.

$$P_i = \sum_{n=j,k} \frac{V_i V_n \sin(\theta_i - \theta_n)}{x_{in}} + V_i^2 \sum_{n=j,k} \frac{r_n \sin(\gamma_n)}{x_{in}} \quad (67)$$

$$Q_i = V_i^2 \left( \frac{1}{x_{ij}} + \frac{1}{x_{ik}} \right) - \sum_{n=j,k} \frac{V_i V_n \cos(\theta_i - \theta_n)}{x_{in}} + V_i^2 \sum_{n=j,k} \frac{r_n \cos \gamma_n}{x_{in}} \quad (68)$$

Calculada a potência  $S_i$  injetada na barra  $i$  e analisando novamente a Figura 7, é possível obter a potência  $S_{ij}$  que circula pelo ramo  $j-i$  comum ao IPFC. Portanto, a equação (69a) e (69b) fornece o fluxo de corrente que circula no ramo  $j-i$ , conforme a Figura 9.

**Figura 9 - Corrente que circula no ramo j-i**



Fonte: Adaptado (FORTES, 2016).

$$I_{ji} = \frac{V_j - V'_j}{jx_{ij}} = \frac{V_j \angle \theta_j - V_i \angle \theta_i - r_j e^{j\gamma_j} V_i}{jx_{ij}} \quad (69a)$$

Após alguns cálculos matemáticos na equação (69a) obtêm-se a equação (69b), que representa o fluxo de corrente que circula pelo ramo  $j-i$  comum ao IPFC.

$$I_{ji} = \left[ \frac{V_j \sin \theta_j - V_i \sin \theta_i - r_j V_i \sin(\gamma_j + \theta_i)}{x_{ij}} \right] + j \left[ \frac{r_j V_i \cos(\gamma_j + \theta_i) + V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j}{x_{ij}} \right] \quad (69b)$$



Do mesmo modo, é possível encontrar a corrente que circula pelo ramo  $k-i$  comum ao IPFC, observe-se na equação (70).

$$I_{ki} = \left[ \frac{V_k \sin \theta_k - V_i \sin \theta_i - r_k V_i \sin(\gamma_k + \theta_i)}{x_{ik}} \right] + j \left[ \frac{r_k V_i \cos(\gamma_k + \theta_i) + V_i \cos \theta_i - V_k \cos \theta_k}{x_{ik}} \right] \quad (70)$$

Para o cálculo do fluxo de potência no ramo  $j-i$  ( $S_{ij}$ ) comum ao IPFC, segue a equação (71).

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (71)$$

Substituindo (69b) em (71), com a devida manipulação matemática. Obtêm-se as equações (72) e (73), respectivamente, os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $j-i$  comum ao IPFC.

$$P_{ji} = -\frac{V_i V_j \sin \theta_{ij}}{x_{ij}} - \frac{r_j V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_j)}{x_{ij}} \quad (72)$$

$$Q_{ji} = \frac{V_j^2}{x_{ij}} - \frac{V_i V_j \cos \theta_{ij}}{x_{ij}} - \frac{r_j V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma_j)}{x_{ij}} \quad (73)$$

Semelhantemente, os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $k-i$  comum ao IPFC nas equações (74) e (75).

$$P_{ki} = -\frac{V_i V_k \sin \theta_{ik}}{x_{ik}} - \frac{r_k V_i V_k \sin(\theta_{ik} + \gamma_k)}{x_{ik}} \quad (74)$$

$$Q_{ki} = \frac{V_k^2}{x_{ik}} - \frac{V_i V_k \cos \theta_{ik}}{x_{ik}} - \frac{r_k V_i V_k \cos(\theta_{ik} + \gamma_k)}{x_{ik}} \quad (75)$$

Nas equações (72), (73), (74) e (75)  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  e  $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$

As expressões dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos  $j-i$  e  $j-i$  (72), (73), (74) e (75), podem ser reescritas conforme (76) e (77).

$$P_{ni} = -\frac{V_i V_n \sin \theta_{in}}{x_{in}} - \frac{r_n V_i V_n \sin(\theta_{in} + \gamma_n)}{x_{in}} \quad (76)$$

$$Q_{ni} = \frac{V_n^2}{x_{in}} - \frac{V_i V_n \cos \theta_{in}}{x_{in}} - \frac{r_n V_i V_n \cos(\theta_{in} + \gamma_n)}{x_{in}} \quad (77)$$

Nas equações (76) e (77)  $n = j, k$  e  $\theta_{in} = \theta_i - \theta_n$

Por fim, os valores absolutos das expressões descritas em (57) e (58), ficam expressas em (78) e (79).

$$|V_{qn}| = V_{qn} = r_n V_i \cos \gamma_n \quad (78)$$

$$|V_{pn}| = V_{pn} = r_n V_i \sin \gamma_n \quad (79)$$

Substituindo-as nas equações que representam os fluxos de potências ativa e reativa encontradas em (67), (68), (76) e (77) é possível deduzir as expressões (80), (81), (82) e (83).

$$P_i = -\sum_{n=j,k} V_i V_n b_{in} \sin(\theta_{in}) + \boxed{-V_i \sum_{n=j,k} b_{in} V_{pn}} \quad (80)$$

$$Q_i = -V_i^2 b_{ii} + \sum_{n=j,k} V_i V_n b_{in} \cos(\theta_{in}) + \boxed{-V_i \sum_{n=j,k} b_{in} V_{qn}} \quad (81)$$

$$P_{ni} = V_i V_n b_{in} \sin \theta_{in} + \boxed{V_n b_{in} (V_{qn} \sin(\theta_{in}) + V_{pn} \cos(\theta_{in}))} \quad (82)$$

$$Q_{ni} = -V_n^2 b_{in} + V_i V_n b_{in} \cos \theta_{in} + \boxed{V_n b_{in} (V_{qn} \cos(\theta_{in}) - V_{pn} \sin(\theta_{in}))} \quad (83)$$

Nas equações (80), (81), (82) e (83)  $\theta_{in} = \theta_i - \theta_n$ ,  $b_{in} = -\frac{1}{x_{in}}$ ,  $b_{ii} = -\sum_{n=j,k} \frac{1}{x_{in}}$  e a parte destacada se refere à contribuição do dispositivo IPFC no fluxo de potência comum no ramo em que o IPFC encontra-se instalado.

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

O modelo de injeção de Potência do IPFC pode ser obtido analisando o conjunto de equações em (80), (81), (82) e (83). Além disso, 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 (84) e (85).

$$P_{ni} = V_i^2 g_{in} - V_i V_n g_{in} \cos \theta_{in} + V_i V_n b_{in} \sin \theta_{in} \quad (84)$$

$$Q_{ni} = -V_i^2 (b_{in} + b_{in}^{sh}) + V_i V_n b_{in} \cos \theta_{in} + V_i V_n g_{in} \sin \theta_{in} \quad (85)$$

Observe-se que desprezando as resistências série e shunt de linha nas equações descritas em (84) e (85), estas são exatamente iguais às expressões deduzidas em (82) e (83), 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 fica instalado ( $P_{inj_i}, Q_{inj_i}, P_{inj_n}, Q_{inj_n}$ ) são dadas pelas equações (86), (87), (88) e (89), em que  $n = j, k$ .

Representa-se o modelo de injeção de Potência nas barras comuns ao IPFC conforme a Figura 10.

$$P_{inj_i} = -V_i \sum_{n=j,k} b_{in} V_{pn} \quad (86)$$

$$Q_{inj_i} = -V_i \sum_{n=j,k} b_{in} V_{qn} \quad (87)$$

$$P_{inj_n} = V_n b_{in} (V_{qn} \sin(\theta_{in}) + V_{pn} \cos(\theta_{in})) \quad (88)$$

$$Q_{inj_n} = V_n b_{in} (V_{qn} \cos(\theta_{in}) - V_{pn} \sin(\theta_{in})) \quad (89)$$

Essas injeções de energia podem ser expressas explicitamente pelas variáveis do sistema e pelas variáveis IPFC mencionadas acima.

Note que a modelagem deduzida para o IPFC (equações (86) - (89)) 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.

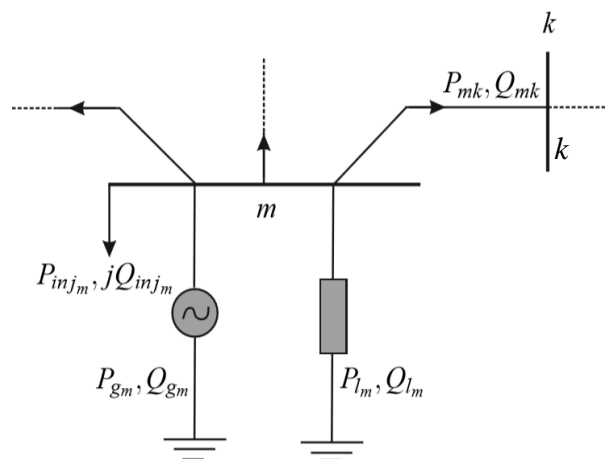
### 3.4 INCLUSÃO DO BALANÇO DE POTÊNCIA DO IPFC NO FLUXO DE POTÊNCIA

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; VALLE, 2010).

O objetivo principal da inclusão do IPFC no Fluxo de Potência é fazer com que todos os *mismatches* de potência 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-se uma barra genérica de geração  $m$ . Define-se  $P_{gm}$  e  $Q_{gm}$  como a geração das potências ativa e reativa, respectivamente. Considere-se uma carga eventual conectada na barra  $m$ . A potência drenada pela carga eventual são representadas por  $P_{lm}$  e  $Q_{lm}$ . Considere-se à interligação entre a barra  $m$  e a barra  $k$ , o IPFC não encontra-se instalado na barra  $k$ . Sejam  $P_{mk}$  e  $Q_{mk}$  os fluxos de potência ativa e reativa que é transmitido da barra  $m$  em direção à barra  $k$ . Por fim, o IPFC encontra-se instalado na barra  $m$ , as injeções de potências ativa e reativa inseridas pelo dispositivo podem ser representadas por  $P_{inj_m}$  e  $Q_{inj_m}$ . Apresenta-se a figura 10 o balanço de potência na barra  $m$ , onde o IPFC encontra-se instalado.

**Figura 10 - Balanço de potência na barra m em que o IPFC encontra-se instalado.**



Fonte: (FORTES, 2016).

Conclui-se que o balanço de potências ativa e reativa pode ficar representado pelas equações (86) e (87), respectivamente. Contudo, nas barras em que o IPFC não está instalado, o balanço de potência ativa e reativa não difere do Fluxo de Potência convencional.

$$P_{gm} - P_{inj_m} - P_{lm} - P_{mk} = 0 \quad (86)$$

$$Q_{gm} - Q_{inj_m} - Q_{lm} - Q_{mk} = 0 \quad (87)$$

Quanto à implementação no fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson, os mismatches de potência ativa e reativa relacionados nas barras do SEP ficam representados na equação (88).

$$DP = P_{esp} - P_{cal} \quad (88a)$$

$$DQ = Q_{esp} - Q_{cal} \quad (88b)$$

Considere-se O IPFC instalado na subestação da barra  $i$ , ligada nas barras  $j$  e  $k$ . Por fim, o balanço de potência nessas barras fica expressa na equação (89), em que  $n = j, k$ .

$$DP_n = P_{esp_n} - P_{cal_n} - P_{inj_n} \quad (89a)$$

$$DQ_n = Q_{esp_n} - Q_{cal_n} - Q_{inj_n} \quad (89a)$$

Observe-se que o balanço nessas barras considera a injeção de potência ativa e reativa feita pelo controle do dispositivo IPFC.

### 3.5 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA PELO IPFC

Devido à sua capacidade de compensar várias linhas de transmissão em uma determinada subestação, o IPFC é uma ferramenta poderosa para o gerenciamento de congestionamentos. (ZHANG J.; YOKOYAMA A., 2006). 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  $k$ ).

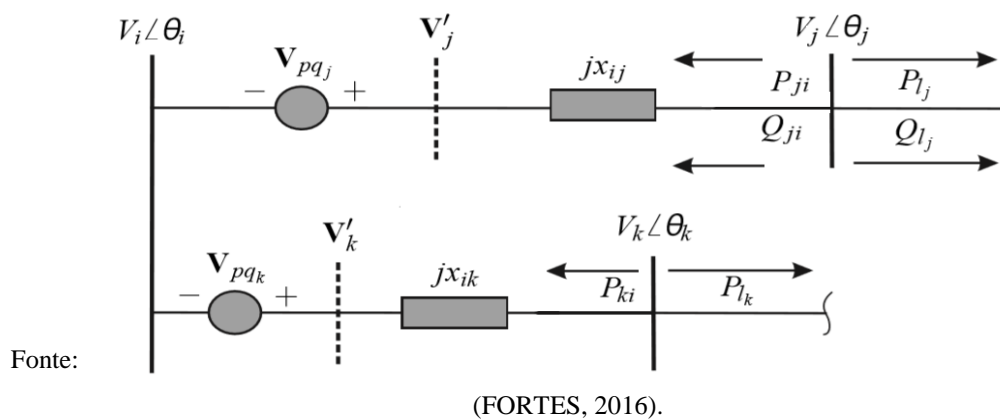
Entretanto, devido à invariância de potência ativa, os graus de controle livres de um IPFC com dois conversores são somente três. A quarta variável é usada para fechar o balanço de potência entre os dois conversores. (VALLE, 2010).

O inversor na linha  $i-j$  é operado como o principal inversor que pode injetar uma tensão em série com a linha  $i-j$  em qualquer ângulo com relação à tensão final de envio, de modo a atender a potência ativa e reativa necessária.

O inversor 2, por outro lado, é obrigado a injetar uma tensão em série com a linha  $i-k$ , de modo a satisfazer a potência ativa (fornecida e absorvida) do inversor  $i-j$ . (GYUGYI; SEN; SCHAUDERR, 1999)

Na figura 11, o IPFC é representado pelo seu circuito equivalente em que os dois VSCs são modelados como fontes de tensão síncrona, os fluxos de potência a serem controlados são  $P_{l_j}$ ,  $Q_{l_j}$  e  $P_{l_k}$ . As restrições de controle dos fluxos de potências ativa e reativa do controlador são apresentadas no conjunto de equações (88).

**Figura 11 - Controle dos fluxos de potência pelo IPFC.**



Os VSCs devem regular os fluxos de energia para seus respectivos pontos de ajuste, ou seja:

$$P_{l_j} - P_{ref_j} = 0 \quad (88a)$$

$$P_{l_k} - P_{ref_k} = 0 \quad (88b)$$

$$Q_{l_j} - Q_{ref_j} = 0 \quad (88c)$$

No conjunto de equações,  $P_{ref_j}$  e  $Q_{ref_j}$ , são valores especificados para o controle dos fluxos de potência 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  $i-k$

O conjunto de equações das potências ativas e reativas nas barras comuns ao IPFC, conforme as equações (82) e (83), obtêm-se os fluxos de potência a ser controlados pelo IPFC expressas em (89), (90) e (91).

$$P_{l_j} = -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{qj} \sin(\theta_{ij}) + V_{pj} \cos(\theta_{ij})) \quad (89)$$

$$P_{l_k} = -V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k b_{ik} (V_{qk} \sin(\theta_{ik}) + V_{pk} \cos(\theta_{ik})) \quad (90)$$

$$Q_{l_j} = V_j^2 b_{ij} - V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - V_j b_{ij} (V_{qj} \cos(\theta_{ij}) - V_{pj} \sin(\theta_{ij})) \quad (91)$$

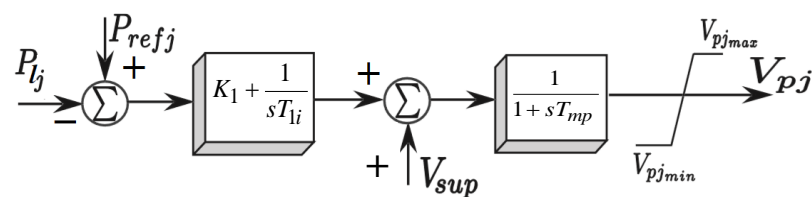
Além das equações do fluxo controlado, considere-se a invariância da potência ativa na equação (92)

$$PE = -V_i b_{ij} V_{pj} - V_i b_{ik} V_{pk} + V_j b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij}) + V_k b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik}) \quad (92)$$

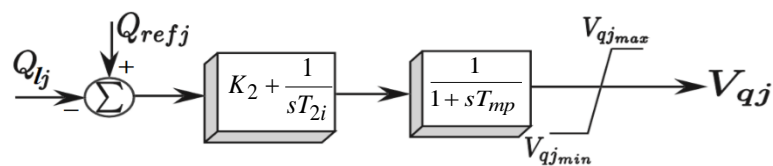
### 3.6 ESTRUTURA DE CONTROLE DO IPFC

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 apresentados na Figura 12.

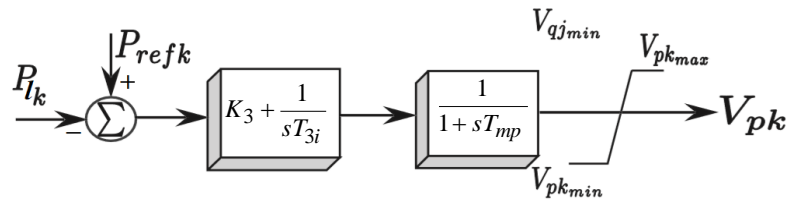
**Figura 12 - Estrutura de controle do IPFC**



(a)



(b)



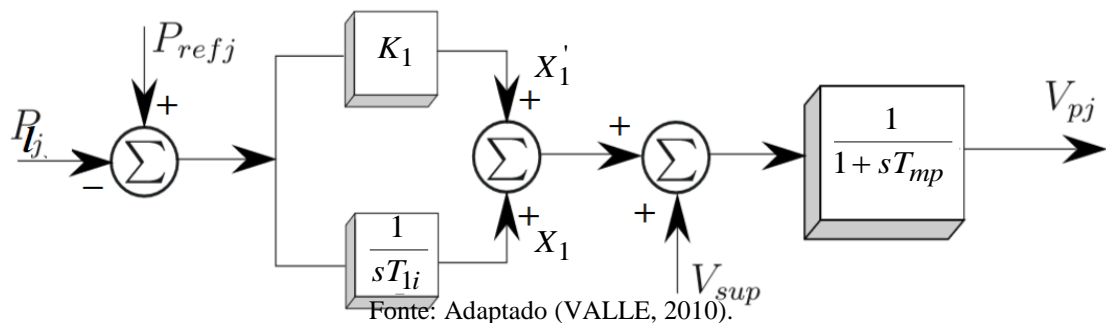
(c)

Fonte: Adaptado (VALLE; ARAUJO, 2015).

Cada controlador exibido na Figura 12 relaciona-se com uma das variáveis das fontes controláveis ( $V_{pj}$ ,  $V_{qj}$  e  $V_{pk}$ ). A quarta variável ( $V_{qk}$ ), no entanto, está relacionada com a invariância de potência ativa (equação 92).

A partir do diagrama de blocos apresentados na Figura 12, é possível encontrar as equações diferenciais que representam o comportamento dinâmico do IPFC. Primeiramente serão representadas, a partir da Figura 12(a), as equações que descrevem a dinâmica da componente em quadratura para o primeiro conversor ( $V_{pj}$ ), conforme ilustrado na Figura 13.

**Figura 13 - Sistema de controle para componente em quadratura para o primeiro conversor**



Fonte: Adaptado (VALLE, 2010).

A partir do diagrama em blocos da Figura 13 são obtidas as equações (93) e (94).

$$\dot{V}_{pj} = \frac{K_1}{T_{mp}} (P_{refj} - P_{lj}) + \frac{1}{T_{mp}} X_1 + \frac{1}{T_{mp}} V_{sup} - \frac{1}{T_{mp}} V_{pj} \quad (93)$$

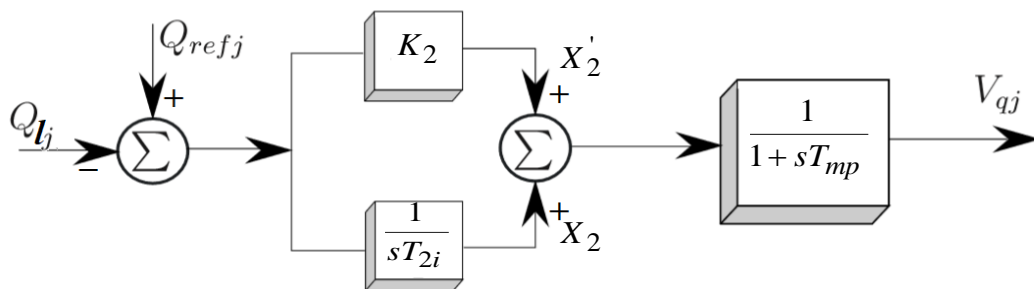
$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_{1i}} (P_{refj} - P_{lj}) \quad (94)$$



Na figura 13 o sinal do controlador POD ( $V_{sup}$ ) estará modulando o componente de quadratura do conversor de fonte de tensão principal (VSC1) para fornecer amortecimento adicional às oscilações do SEP. (VALLE e ARAUJO 2015)

Analogamente, observando a Figura 12 (b), é possível representar a componente em fase para o primeiro conversor ( $V_{qj}$ ) conforme diagrama de blocos indicado na Figura 14.

**Figura 14 - Sistema de controle para componente em fase para o primeiro conversor**



Fonte: Adaptado (VALLE, 2010).

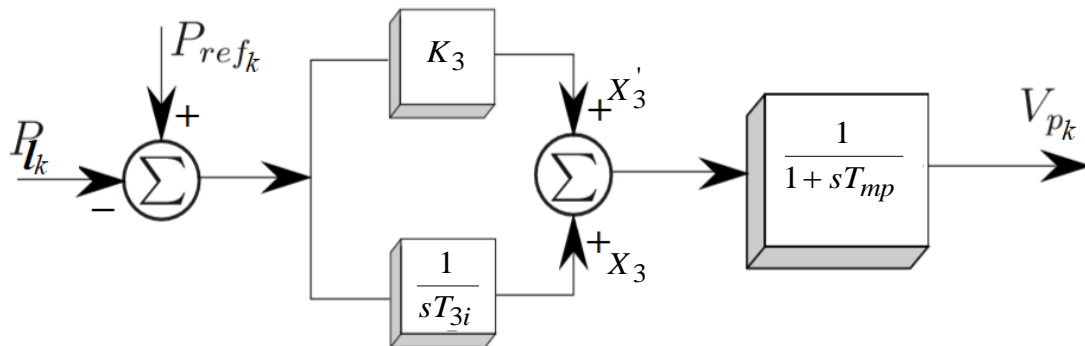
Desta forma tem-se as equações (95) e (96)

$$\dot{V}_{qj} = \frac{K_2}{T_{mp}} (Q_{refj} - Q_{lj}) + \frac{1}{T_{mp}} X_2 - \frac{1}{T_{mp}} V_{qj} \quad (95)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_{2i}} (Q_{refj} - Q_{lj}) \quad (96)$$

Por fim, analisando a Figura 12 (c), é possível representar, em diagrama de blocos, a componente em quadratura para o segundo conversor ( $V_{pk}$ ), conforme Figura 15.

**Figura 15 - Sistema de controle para componente em quadra para o segundo conversor**



Fonte: Adaptado (VALLE, 2010).

Após analisar a Figura 15, tem-se as expressões (97) e (98)

$$\dot{V}_{pk} = \frac{K_3}{T_{mp}} (P_{refk} - P_{lk}) + \frac{1}{T_{mp}} X_3 - \frac{1}{T_{mp}} V_{pk} \quad (97)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{3i}} (P_{refk} - P_{lk}) \quad (98)$$

Nas Figuras 13, 14 e 15  $T_{1i}$ ,  $T_{2i}$ ,  $T_{3i}$  e  $T_{mp}$  são constantes de tempo, enquanto que  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são os ganhos dos controladores PI. Onde  $T_{mp}$  representa o tempo de processamento do sistema de controle do dispositivo e está no intervalo de 1-10 ms. (VALLE; ARAUJO 2015)

É importante destacar que nas equações que descrevem o comportamento dinâmico do IPFC, equações (93) a (98), as variáveis  $P_{lj}$ ,  $Q_{lj}$  e  $P_{lk}$  estão relacionadas com os fluxos controlados nas linhas de transmissão. As grandezas  $P_{refj}$  e  $Q_{refj}$  referem-se aos valores especificados de potências ativa e reativa no trecho  $i-j$  e  $P_{refk}$  refere-se ao valor especificado do fluxo de potência ativa no ramo  $i-k$ . Além disso, a variável  $V_{sup}$  descrita em (93) é nula já que está relacionada com o sinal suplementar fornecido pelo controlador POD, e este ainda não encontra-se atuando no IPFC.

Segundo Zhang, Yokoyama e Ide (2009), os controladores PI são ferramentas poderosas para o controle de fluxo de potência, eles têm um efeito muito positivo no aprimoramento da estabilidade de sinal fraco.

### 3.7 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, é possível linearizar as equações diferenciais que representam a dinâmica do IPFC (equações (93) a (98)). Utilizando-se a expansão em Séries de Taylor num ponto de operação as equações diferenciais podem ser tratadas como equações algébricas expressas em (99) a (104).

$$\Delta \dot{V}_{pj} = \frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial X_1} \Delta X_1 + \frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_j} \Delta V_j + \frac{1}{T_{mp}} \Delta V_{sup} \quad (99)$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (100)$$

$$\Delta \dot{V}_{qj} = \frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial X_2} \Delta X_2 + \frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (101)$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (102)$$

$$\Delta \dot{V}_{pk} = \frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_{pk}} \Delta V_{pk} + \frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial X_3} \Delta X_3 + \frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_{qk}} \Delta V_{qk} + \frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_k} \Delta V_k \quad (103)$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_{pk}} \Delta V_{pk} + \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_{qk}} \Delta V_{qk} + \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_k} \Delta V_k \quad (104)$$

Assim, as equações do fluxo de potência e as equações diferenciais linearizadas que representam a dinâmica do IPFC (descritas no conjunto de equações (99) a 104), podem ser escritas de forma matricial conforme a equação (105). As expressões das derivadas presentes no sistema matricial (105) encontram-se no Apêndice C e D deste trabalho.

A matriz Jacobiana com fluxo expandido considerando a atuação dos controladores PI descrita em (105) é dividida em quatro blocos. 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 em círculos.

Estes elementos têm em sua composição a soma de parcelas referentes às derivadas que possuem algumas das variáveis exclusivas do IPFC ( $V_{pj}$ ,  $V_{qj}$ ,  $V_{pk}$  ou  $V_{qk}$ ). 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 92). 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 (99) a (104). Estas representam as equações diferenciais que constituem a parte dinâmica do IPFC.

Calcula-se o novo ponto de operação, no qual as equações diferenciais do IPFC foram incluídas, obtemos um panorama das variáveis deste dispositivo, ou seja, a matriz Jacobiana Expandida possui informações das variáveis do sistema e as variáveis da dinâmica do IPFC.

$-\Delta V_{pj}$	$\frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{pj}}$	$\frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1}$	$\frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{qj}}$	0	0	0	$\frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_j}$	0	$\frac{\partial V_{pj}}{\partial V_i}$	$\frac{\partial V_{pj}}{\partial V_j}$	0	0	$\Delta V_{pj}$
$-\Delta X_1$	$\frac{\partial X_1}{\partial V_{pj}}$	0	$\frac{\partial X_1}{\partial V_{qj}}$	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	$\Delta X_1$
$-\Delta V_{qj}$	$\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{pj}}$	0	$\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{qj}}$	$\frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2}$	0	0	$\frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j}$	0	$\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_i}$	$\frac{\partial V_{qj}}{\partial V_j}$	0	0	$\Delta V_{qj}$
$-\Delta X_2$	$\frac{\partial X_2}{\partial V_{pj}}$	0	$\frac{\partial X_2}{\partial V_{qj}}$	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	$\Delta X_2$
$-\Delta V_{pk}$	0	0	0	0	$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}}$	$\frac{\partial V_{pk}}{\partial X_3}$	$\frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i}$	0	$\frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_i}$	0	$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_k}$	$\frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{qk}}$	$\Delta V_{pk}$
$-\Delta X_3$	0	0	0	0	$\frac{\partial X_3}{\partial V_{pk}}$	0	$\frac{\partial X_3}{\partial \theta_i}$	0	$\frac{\partial X_3}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial X_3}{\partial V_i}$	0	$\frac{\partial X_3}{\partial V_k}$	$\frac{\partial X_3}{\partial V_{qk}}$	$\Delta X_3$
$\Delta P_i$	$\frac{\partial P_{inj_i}}{\partial V_{pj}}$	0	0	0	$\frac{\partial P_{inj_i}}{\partial V_{pk}}$	0	$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j}$	$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial P_i}{\partial V_i}$	$\frac{\partial P_i}{\partial V_j}$	$\frac{\partial P_i}{\partial V_k}$	0	$\Delta \theta_i$
$\Delta P_j$	$\frac{\partial P_{inj_j}}{\partial V_{pj}}$	0	$\frac{\partial P_{inj_j}}{\partial V_{qj}}$	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	$\Delta \theta_j$
$\Delta P_k$	0	0	0	0	$\frac{\partial P_{inj_k}}{\partial V_{pk}}$	0	$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_i}$	0	$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial P_k}{\partial V_i}$	0	$\frac{\partial P_k}{\partial V_k}$	$\frac{\partial P_k}{\partial V_{qk}}$	$\Delta \theta_k$
$\Delta Q_i$	0	0	$\frac{\partial Q_{inj_i}}{\partial V_{qj}}$	0	0	0	$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_k}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{qk}}$	$\Delta V_i$
$\Delta Q_j$	$\frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial V_{pj}}$	0	$\frac{\partial Q_{inj_j}}{\partial V_{qj}}$	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	$\Delta V_j$
$\Delta Q_k$	0	0	0	0	$\frac{\partial Q_{inj_k}}{\partial V_{pk}}$	0	$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i}$	0	$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial V_i}$	0	$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{qk}}$	$\Delta V_k$
$-PE$	$\frac{\partial PE}{\partial V_{pj}}$	0	$\frac{\partial PE}{\partial V_{qj}}$	0	$\frac{\partial PE}{\partial V_{pk}}$	0	$\frac{\partial PE}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial PE}{\partial \theta_j}$	$\frac{\partial PE}{\partial \theta_k}$	$\frac{\partial PE}{\partial V_i}$	$\frac{\partial PE}{\partial V_j}$	$\frac{\partial PE}{\partial V_k}$	$\frac{\partial PE}{\partial V_{qk}}$	$\Delta V_{qk}$

(105)

### 3.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o dispositivo FACTS IPFC. Trata-se de um eficiente dispositivo capaz de controlar e gerenciar os fluxos de potência ativa e reativa entre as barras em que está instalado a fim de lidar com o problema de sobrecarga. Além disso, foi deduzido todo o equacionamento necessário para a inclusão do IPFC em programa de fluxo de potência. Em especial, destacam-se as equações (80), (81), (82) e (83). Estas expressões representam as potências injetadas e os fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de transmissão comuns à instalação do IPFC.

Em seguida, após ser considerado um modelo dinâmico detalhado de IPFC neste trabalho (controladores PI-Figura 12). Os controladores PI são ferramentas eficientes para o controle de fluxo de potência, eles têm um efeito muito positivo sobre o aprimoramento da estabilidade de sinal fraco. A partir das equações (99) a (104) foi deduzido e descrito um sistema matricial considerando a atuação desses controladores, obtém-se uma representação matricial em (105) considerando a atuação do IPFC (fluxo de potência expandido).

No próximo capítulo será apresentada a inclusão do IPFC no Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC). Neste modelo deverão ser incluídas as variáveis de estado e algébricas que se encontram 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.

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

Como foi mencionado no Capítulo 2, o MSC é uma ferramenta poderosa para representar os componentes do SEP como injeção de corrente e, além disso, o MSC permite a inserção de novos dispositivos na matriz de espaço de estados. Em relação aos dispositivos FACTS, no caso o IPFC faz-se a modelagem como injeção de corrente. Estudos apontam que quando acoplar na malha de controle do IPFC um controlador suplementar conhecido como *Power Oscillation Damping* (POD) (ZHANG; YOKOYAMA; IDE, 2009), este é capaz de fornecer amortecimento aos modos oscilatórios de baixa frequência.

Neste trabalho o dispositivo 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, 2009; VINKOVIC; MIHALIC, 2009; VALLE, 2010; VALLE; KOPCAK; DA COSTA, 2010; REZAEI, 2013; VALLE; ARAUJO, 2013).

Quando realizar o correto ajuste dos parâmetros do IPFC-POD, o dispositivo pode fornecer amortecimento adicional nas oscilações eletromecânicas e, portanto, tal dispositivo produz bons resultados (ZHANG; YOKOYAMA; IDE, 2009; VALLE, 2010; REZAEI, 2013. VALLE. ARAUJO, 2013).

As correntes injetadas pelo dispositivo serão calculadas diretamente da diferença de tensão entre as barras de instalação do IPFC ( $V_j, V_k$ ) e as barras fictícias das fontes de tensão série ( $V'_j, V'_k$ ). Considera-se 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 das tensões serie injetadas ( $r_n$  e  $\gamma_n$ ). Contudo, as correntes ficam expressas em termos das componentes em fase ( $V_{qn}$ ) e em quadratura ( $V_{pn}$ ), eliminando, desta forma, a necessidade prévia dos cálculos de ( $r_n$  e  $\gamma_n$ ). (Este procedimento não é realizado em Rezaei (2013), em Vinkovic e Mihalic (2009) e em Suresh *et al.* (2014).

Outra contribuição deste trabalho é a inclusão das equações diferenciais do controlador PI e as correntes injetadas nas barras de instalação do IPFC (barramento  $i, j$

e  $k$ ) 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.

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

No capítulo 3 foram escritas expressões que determinam as injeções de correntes nas barras  $i$ ,  $j$  e  $k$  (equações (65), (69b) e (70)).

Substituindo (57) e (58) (expressões que representa,  $V_{qn}$  e  $V_{pn}$ ,  $n = j, k$  em (65) encontra-se (106). Sendo possível representá-las em função das componentes de eixo real e eixo imaginário.

$$RE(I_i) = [-V_i \sin \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) + b_{ij} V_j \sin \theta_j + b_{ik} V_k \sin \theta_k] - [b_{ij} V_{pj} \cos \theta_i + b_{ij} V_{qj} \sin \theta_i + b_{ik} V_{pk} \cos \theta_i + b_{ik} V_{qk} \sin \theta_i] \quad (106a)$$

$$IM(I_i) = [V_i \cos \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) - b_{ij} V_j \cos \theta_j - b_{ik} V_k \cos \theta_k] + [b_{ij} V_{qj} \cos \theta_i - b_{ij} V_{pj} \sin \theta_i + b_{ik} V_{qk} \cos \theta_i - b_{ik} V_{pk} \sin \theta_i] \quad (106b)$$

No caso das injeções das correntes nas barras  $j$  e  $k$  em (69b) e (70) encontra-se (107) e (108)

$$RE(I_{ji}) = [b_{ij}(V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j)] + [b_{ij} V_{pj} \cos \theta_i + b_{ij} V_{qj} \sin \theta_i] \quad (107a)$$

$$IM(I_{ji}) = [b_{ij}(V_j \cos \theta_j - V_i \cos \theta_i)] + [-b_{ij} V_{qj} \cos \theta_i + b_{ij} V_{pj} \sin \theta_i] \quad (107b)$$

$$RE(I_{ki}) = [b_{ik}(V_i \sin \theta_i - V_k \sin \theta_k)] + [b_{ik} V_{pk} \cos \theta_i + b_{ik} V_{qk} \sin \theta_i] \quad (108a)$$



$$IM(I_{ki}) = [b_{ik}(V_k \cos \theta_k - V_i \cos \theta_i)] + [-b_{ik}V_{qk} \cos \theta_i + b_{ik}V_{pk} \sin \theta_i] \quad (108b)$$

Nas equações (106), (107) e (108) considere-se :  $b_{in} = -\frac{1}{x_{in}}$  e  $n = j, k$ . A parte da contribuição do dispositivo IPFC na injeção de corrente na barra i, j e k respectivamente nas equações (109), (110) e (111).

$$I_{inj_{ir}} = -\sum_{n=j,k} b_{in}(V_{pn} \cos \theta_i + V_{qn} \sin \theta_i) \quad (109a)$$

$$I_{inj_{im}} = \sum_{n=j,k} b_{in}(V_{qn} \cos \theta_i - V_{pn} \sin \theta_i) \quad (109b)$$

$$I_{inj_{jr}} = b_{ij}(V_{pj} \cos \theta_i + V_{qj} \sin \theta_i) \quad (110a)$$

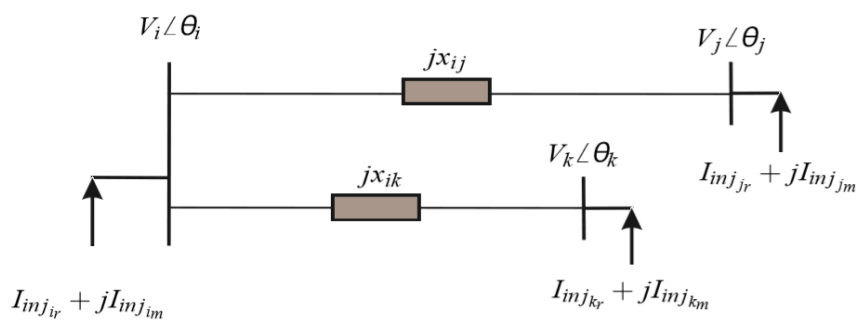
$$I_{inj_{jm}} = b_{ij}(V_{pj} \sin \theta_i - V_{qj} \cos \theta_i) \quad (110b)$$

$$I_{inj_{kr}} = b_{ik}(V_{pk} \cos \theta_i + V_{qk} \sin \theta_i) \quad (111a)$$

$$I_{inj_{km}} = b_{ik}(-b_{ik}V_{qk} \cos \theta_i + V_{pk} \sin \theta_i) \quad (111b)$$

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

**Figura 16 - Modelo de Injeções de corrente pelo IPFC**



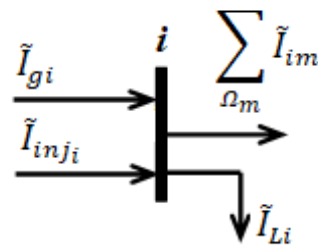
Fonte: Elaborado pelo autor.

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

O conceito fundamental do MSC é o balanço nodal das correntes em todas as barras do sistema. Portanto, as injeções de correntes pelo IPFC nas barras de instalação  $i$ ,  $j$  e  $k$  deve ser satisfeita no SEP.

Realizando o balanço das correntes, em uma barra  $i$  do SEP apresentada na Figura 17 é possível obter o conjunto de expressões (112), (113) e (114), representando o conjunto de equações de balanço nas barras de instalação do IPFC.

**Figura 17 - Balanço das correntes ao considerar o IPFC**



Fonte: Elaboração do próprio autor

$$\tilde{I}_{gi} - \sum_{\Omega_m} \tilde{I}_{im} - \tilde{I}_{Li} + \tilde{I}_{inj_i} = 0 \quad (112)$$

$$\tilde{I}_{gj} - \sum_{\Omega_m} \tilde{I}_{jm} - \tilde{I}_{Lj} + \tilde{I}_{inj_j} = 0 \quad (113)$$

$$\tilde{I}_{gk} - \sum_{\Omega_m} \tilde{I}_{km} - \tilde{I}_{Lk} + \tilde{I}_{inj_k} = 0 \quad (114)$$

As modificações do balanço de corrente ao considerar a contribuição da injeção de correntes pelo IPFC é feita pela soma de  $\tilde{I}_{inj_i}$ ,  $\tilde{I}_{inj_j}$  e  $\tilde{I}_{inj_k}$  nas respectivas barras de instalação.

As expressões das injeções de corrente pelo IPFC podem ser escritas da seguinte forma quando ao considerar pequenas variações no SEP, conforme as equações (115), (116) e (117)

$$\Delta I_{inj_{ir}} = \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{pk}} \Delta V_{pk} + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{qk}} \Delta V_{qk} \quad (115a)$$

$$\Delta I_{injim} = \frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{pk}} \Delta V_{pk} + \frac{\partial I_{injim}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{qk}} \Delta V_{qk} \quad (115b)$$

$$\Delta I_{injjr} = \frac{\partial I_{injjr}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial I_{injjr}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial I_{injjr}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i \quad (116a)$$

$$\Delta I_{injjm} = \frac{\partial I_{injjm}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial I_{injjm}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial I_{injjm}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i \quad (116b)$$

$$\Delta I_{injkr} = \frac{\partial I_{injkr}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial I_{injkr}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial I_{injkr}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i \quad (117a)$$

$$\Delta I_{injkm} = \frac{\partial I_{injkm}}{\partial V_{pj}} \Delta V_{pj} + \frac{\partial I_{injkm}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial I_{injkm}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i \quad (117b)$$

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

Para a inclusão do modelo expandido do MSC considera-se a atuação do dispositivo IPFC (equações diferenciais (99) a (104) e equações algébricas (112) a (114)). A forma matricial do MSC expandido fica representado em (118) e (119). Nesta representação considera-se o SEP formado por  $ng$  geradores e  $nb$  barras. 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 (118) e (119) comparado ao MSC ficam parecidas, porém, o MSC expandido com a atuação do IPFC apresenta 6 linhas e 6 colunas a mais, na matriz  $J1_{ipfc}$ . Tais variáveis de estado são exclusivas do equacionamento obtido para os controladores PI (equações diferenciais (99) a (104)).

Observa-se que a matriz  $J3_{ipfc}$  tem a mesma dimensão de  $J1_{ipfc}$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta w_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_k \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta \dot{V}_{pj} \\ \Delta \dot{X}_1 \\ \Delta \dot{V}_{qj} \\ \Delta \dot{X}_2 \\ \Delta \dot{V}_{pk} \\ \Delta \dot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \mathbf{[J2]} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{pj}} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_{qj}} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial X_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_{pk}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_k \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \end{bmatrix} *$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_i} & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial V_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_j} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_i} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_k} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_i} & 0 & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_{qk}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \\ \Delta V_{qk} \end{bmatrix} *$$

$$\begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{cccc|cccc}
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \mathbf{[B1]} & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_1}{T_{mp}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{1i}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_2}{T_{mp}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{2i}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_3}{T_{mp}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{3i}}
 \end{array} \right]
 \begin{array}{l}
 \Delta P_{mk} \\
 \Delta V_{refk} \\
 \Delta P_{ln} \\
 \Delta Q_{ln} \\
 \Delta P_{refj} \\
 \Delta P_{refj} \\
 \Delta Q_{refj} \\
 \Delta Q_{refj} \\
 \Delta P_{refk} \\
 \Delta P_{refk}
 \end{array}
 \end{array}$$

(118)

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{pk}} & 0 \\ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{pk}} & 0 \\ \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{pk}} & 0 \\ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{pk}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial PE}{\partial V_{pj}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial PE}{\partial V_{qj}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial PE}{\partial V_{pk}} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta w_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_k \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_{pj} \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_{qj} \\ \Delta X_2 \\ \Delta V_{pk} \\ \Delta X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J^4_{r\theta\_ipfc}] & [J^4_{rv\_ipfc}] \\ [J^4_{m\theta\_ipfc}] & [J^4_{mv\_ipfc}] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \\ \Delta V_{qk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P_{mk} \\ \Delta V_{refk} \\ \Delta P_{In} \\ \Delta Q_{In} \\ \Delta P_{refj} \\ \Delta P_{refj} \\ \Delta Q_{refj} \\ \Delta Q_{refj} \\ \Delta P_{refk} \\ \Delta P_{refk} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

(119)

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 à inclusão da variável algébrica definida como  $V_{qk}$ . As componentes da matriz  $J4_{ipfc}$  dadas por  $J4_{r\theta_{ipfc}}$ ,  $J4_{rv_{ipfc}}$ ,  $J4_{m\theta_{ipfc}}$  e  $J4_{mv_{ipfc}}$  são compostas pelos coeficientes encontrados no balanço nodal de correntes descrito no conjunto de equações (115) a (117).

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 ( $P_{refj}$ ,  $P_{refk}$ ,  $Q_{refj}$ ,  $Q_{refk}$ ,  $P_{refj}$  e  $P_{refk}$ ) no ramo  $i-j$  e  $i-k$ .

#### 4.4 CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO

Apresentam-se dois controladores que possuem estruturas idênticas de controle, os controladores ESPs e POD, diferindo no modo de operação e entre os sinais de entrada e de saída de cada um deles, tais controladores serão utilizados neste trabalho.

Neste trabalho os ESPs utilizarão as variações da velocidade angular do rotor ( $\Delta\omega$ ). O ESPs atuam nas malhas de controle dos RATs dos geradores síncronos, inserindo sinais estabilizantes ( $\Delta V_s$ ) e, assim inserindo amortecimento adicional aos modos locais de oscilação do SEP. (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981).

O POD é acoplado à malha de controle do dispositivo IPFC-PI e, neste trabalho, utilizará como sinal de entrada a variação da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) da linha de transmissão onde se conecta com a subestação de instalação. O conjunto IPFC-POD será responsável por inserir amortecimento às oscilações de modo inter-área por meio de um sinal suplementar ( $\Delta V_{sup}$ ). A função deste sinal é modular a componente em quadratura ( $V_{pj}$ ) do conversor primário do IPFC (VALLE, 2010; VALLE, 2013)

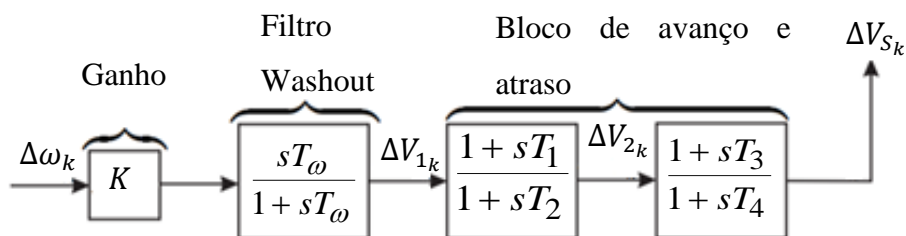
##### 4.4.1 Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP)

O aparecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência do sistema é favorecido pelo fato das longas interligações das linhas de transmissão. Tal problema pode ser agravado quando se considera a atuação dos RATs com ganhos elevados e

constantes de tempo relativamente pequenas (ACHA *et al.*, 2002; DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

Controladores como Estabilizadores do Sistema de Potência (ESPs) (no inglês, Power System Stabilizers - PSS) conhecidos na literatura tem um impacto positivo na melhora da estabilidade do SEP. Quando seus parâmetros são bem ajustados, e portanto, inserir amortecimento aos modos locais de oscilação (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 1993). O diagrama de blocos apresentado na Figura 18 representa a estrutura básica deste controlador.

**Figura 18 - Modelo Dinâmico para o ESP**

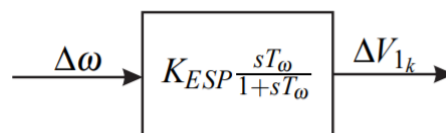


Fonte: Adaptado pelo autor, FORTES E. V., (2016)

O ESP consiste de um ganho  $K_{ESP}$ , um bloco washout (filtro passa baixa), determinado pela constante de tempo  $T_w$  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; DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

Considere-se a figura 19 para a obtenção das equações diferenciais que representam os controladores ESPs.

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



Fonte: (FORTES, 2016).

Analisando a Figura 19 e utilizando a equação obtida em (41) (que representa a interação dinâmica entre as variáveis elétricas e mecânicas da máquina síncrona ( $\Delta\omega_k$ )), obtém-se, em sua forma linearizada, uma nova variável de estado ( $\Delta\dot{V}_{1k}$ ) para a saída do



bloco washout, conforme equação (120). A equação 41 é utilizada e manipulando algebricamente obtém-se a equação (120).

$$\Delta\dot{\omega}_k = -\left(\frac{D_k}{M_k}\right)\Delta\omega_k + \left(-\frac{K1_k}{M_k}\right)\Delta\delta_k + \left(-\frac{K2_k}{M_k}\right)\Delta E'_{qk} + \left(-\frac{K3_k}{M_k}\right)\Delta\theta_k \quad (41^*)$$

$$+ \left(-\frac{K4_k}{M_k}\right)\Delta V_k + \left(\frac{1}{M_k}\right)\Delta P_{meck}$$

$$\Delta\dot{V}_{1k} = \Delta\dot{\omega}_k K_{ESP} - \frac{1}{T_\omega} \Delta V_{1k}$$

$$\Delta\dot{V}_{1k} = -\frac{1}{T_\omega} \Delta V_{1k} + \frac{K_{ESP}}{M_k} \Delta P_{m_k} - \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{1k} \Delta\delta_k - \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{2k} \Delta E'_{qk} - \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{3k} \Delta V_k$$

$$- \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{4k} \Delta\theta_k - \frac{K_{ESP}}{M_k} D_k \Delta\omega_k$$

$$\Delta\dot{V}_{1k} = Z_{11k} \Delta V_{1k} + Z_{12k} \Delta P_{m_k} + Z_{13k} \Delta\delta_k + Z_{14k} \Delta E'_{qk} + Z_{15k} \Delta V_k + Z_{16k} \Delta\theta_k \quad (120)$$

$$+ Z_{17k} \Delta\omega_k$$

Na equação (120) os coeficientes  $Z_{11k}$ ,  $Z_{12k}$ ,  $Z_{13k}$ ,  $Z_{14k}$ ,  $Z_{15k}$ ,  $Z_{16k}$  e  $Z_{17k}$  são dados conforme o conjunto de equações (121).

$$Z_{11k} = -\frac{1}{T_\omega} \quad (121a)$$

$$Z_{12k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \quad (121b)$$

$$Z_{13k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{1k} \quad (121c)$$

$$Z_{14k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{2k} \quad (121d)$$

$$Z_{15k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{3k} \quad (121e)$$

$$Z_{16k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} K_{4k} \quad (121f)$$

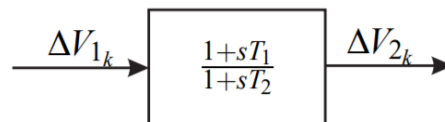
$$Z_{17k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} D_k \quad (121g)$$

Os coeficientes  $K_{1k}$ ,  $K_{2k}$ ,  $K_{3k}$  e  $K_{4k}$ , presentes nas equações (120) e (121), estão definidos no Apêndice B. 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 (DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

Da Figura 20 é possível deduzir a equação (122), 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.

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



Fonte: (FORTES, 2016).

$$\Delta\dot{V}_{2k} = \frac{1}{T_2} \Delta V_{1k} + \frac{T_1}{T_2} \Delta\dot{V}_{1k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k}$$

A partir dessa equação diferencial, a derivada da variação do  $\Delta\dot{V}_{1k}$  é substituída da equação (120) e, com as devidas manipulações matemáticas:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_{2k} = & \left( \frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_\omega} \right) \Delta V_{1k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k} + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} \Delta P_{m_k} - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{1k} \Delta \delta_k \\ & - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{2k} \Delta E'_{qk} - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{3k} \Delta V_k - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} K_{4k} \Delta \theta_k \\ & - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{ESP}}{M_k} D_k \Delta \omega_k \end{aligned}$$

Colocando em evidência o termo da variação da derivada do  $\Delta\dot{V}_{2k}$ , obtém-se a equação (122).

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_{2k} = & Z_{21k} \Delta V_{1k} + Z_{22k} \Delta V_{2k} + Z_{23k} \Delta P_{m_k} + Z_{24k} \Delta \delta_k + Z_{25k} \Delta E'_{qk} + Z_{26k} \Delta V_k \\ & + Z_{27k} \Delta \theta_k + Z_{28k} \Delta \omega_k \end{aligned} \quad (122)$$

Na dedução da equação (122) foi utilizada (120). Os coeficientes  $Z_{21k}$ ,  $Z_{22k}$ ,  $Z_{23k}$ ,  $Z_{24k}$ ,  $Z_{25k}$ ,  $Z_{26k}$ ,  $Z_{27k}$  e  $Z_{28k}$  que constam de (122) ficam expressos no conjunto de equações (123).

$$Z_{21k} = -\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_\omega} \quad (123a)$$

$$Z_{22k} = -\frac{1}{T_2} \quad (123b)$$

$$Z_{23k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \quad (123c)$$

$$Z_{24k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{1k} \quad (123d)$$

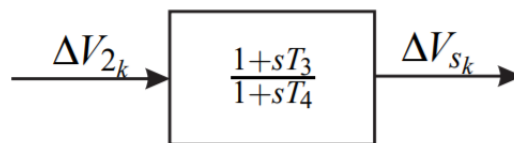
$$Z_{25k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{2k} \quad (123e)$$

$$Z_{26k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{3k} \quad (123f)$$

$$Z_{27k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} K_{4k} \quad (123g)$$

$$Z_{28k} = -\frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} D_k \quad (123h)$$

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



Fonte: (FORTES, 2016).

Dada a Figura 21, descreve-se o comportamento dinâmico, em sua forma linearizada, da terceira variável de estado ( $\Delta\dot{V}_{S_k}$ ), que é a saída do segundo bloco dos compensadores de fase na equação (124).

$$\Delta\dot{V}_{S_k} = \frac{1}{T_4} \Delta V_{2k} + \frac{T_3}{T_4} \Delta\dot{V}_{2k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{S_k}$$

De forma similar substituíse a derivada do termo  $\Delta\dot{V}_{2k}$  e, colocando em evidencia  $\Delta\dot{V}_{S_k}$ , obtém-se a equação (124).

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_{S_k} = & \left(1 - \frac{T_1}{T_\omega}\right) \frac{T_3}{T_2 T_4} \Delta V_{1k} + \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} \Delta V_{2k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{S_k} + \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} \Delta P_{m_k} \\ & - \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} K_{1k} \Delta\delta_k - \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} K_{2k} \Delta E'_{qk} - \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} K_{3k} \Delta V_k \\ & - \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} K_{4k} \Delta\theta_k - \frac{K_{ESP}}{M_k} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} D_k \Delta\omega_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{S_k} = & Z_{31_k} \Delta V_{1_k} + Z_{32_k} \Delta V_{2_k} + Z_{33_k} \Delta V_{S_k} + Z_{34_k} \Delta P_{m_k} + Z_{35_k} \Delta \delta_k \\ & + Z_{36_k} \Delta E'_{q_k} + Z_{37_k} \Delta V_k + Z_{38_k} \Delta \theta_k + Z_{39_k} \Delta \omega_k \end{aligned} \quad (124)$$

Na dedução da equação (124) foi utilizada a equação (122). Os coeficientes  $Z_{31_k}$ ,  $Z_{32_k}$ ,  $Z_{33_k}$ ,  $Z_{34_k}$ ,  $Z_{35_k}$ ,  $Z_{36_k}$ ,  $Z_{36_k}$ ,  $Z_{37_k}$ ,  $Z_{38_k}$ ,  $Z_{39_k}$  ficam expressos no conjunto de equações (125).

$$Z_{31_k} = \left(1 - \frac{T_1}{T_\omega}\right) \frac{T_3}{T_2 T_4} \quad (125a)$$

$$Z_{32_k} = \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} \quad (125b)$$

$$Z_{33_k} = -\frac{1}{T_4} \quad (125c)$$

$$Z_{34_k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} \quad (125d)$$

$$Z_{35_k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{1_k} \quad (125e)$$

$$Z_{36_k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{2_k} \quad (125f)$$

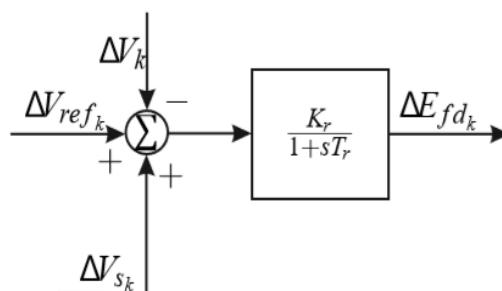
$$Z_{37_k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{3_k} \quad (125g)$$

$$Z_{38_k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} K_{4_k} \quad (125h)$$

$$Z_{39_k} = -\frac{K_{ESP} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} D_k \quad (125i)$$

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

**Figura 22 - Malha de Controle do RAT com o sinal suplementar do ESP**



Fonte: (FORTES, 2016).

Obtém-se pela figura 22 a equação (126) na forma linearizada, sendo a equação diferencial referente à tensão de campo da máquina síncrona.

$$\begin{aligned}\Delta \dot{E}_{fdk} &= \frac{K_r}{T_r} \Delta V_{S_k} + \frac{K_r}{T_r} \Delta V_{refk} - \frac{K_r}{T_r} \Delta V_k - \frac{1}{T_r} \Delta E_{fdk} \\ \Delta \dot{E}_{fdk} &= Z_{41k} \Delta V_{S_k} + Z_{42k} \Delta V_{refk} + Z_{43k} \Delta V_k + Z_{44k} \Delta E_{fdk}\end{aligned}\quad (126)$$

Na equação (126) os coeficientes  $Z_{41k}$ ,  $Z_{42k}$ ,  $Z_{43k}$  e  $Z_{44k}$  ficam expressados da seguinte forma em (127).

$$Z_{41k} = \frac{K_r}{T_r} \quad (127a)$$

$$Z_{42k} = \frac{K_r}{T_r} \quad (127b)$$

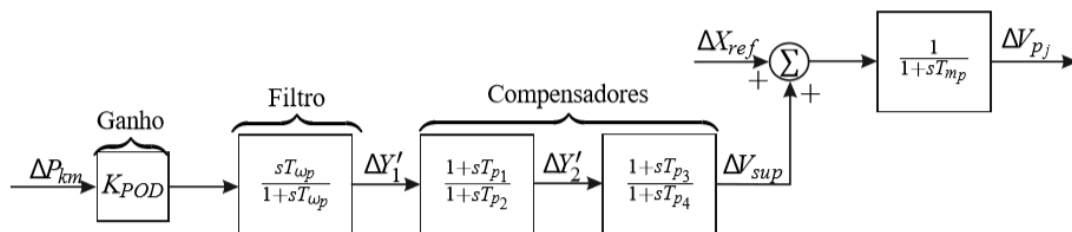
$$Z_{43k} = -\frac{K_r}{T_r} \quad (127c)$$

$$Z_{44k} = -\frac{1}{T_r} \quad (127d)$$

#### 4.4.2 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 apresentada na Figura 23.

**Figura 23 - Modelo Dinâmico do Dispositivo IPFC-POD**



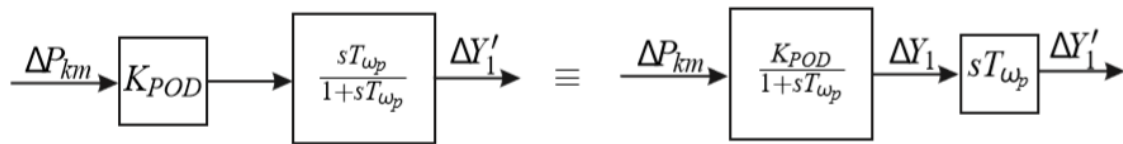
Fonte: (FORTES, 2016).

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 a mesma forma de controle que as do ESP.

O sinal de entrada para o controlador POD será a variação do fluxo de potência 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 inter-área para este sinal (YANG; LIU; MCCLELLY, 1998; FURINI; ARAUJO, 2008; WATANABE *et al.*, 1998).

As equações diferenciais que representam o controlador POD são obtidas pelo mesmo processo do ESP. Sendo assim, considera-se três subdivisões na estrutura de controle apresentado para o POD (Figura 24). O primeiro bloco *Washout* (Figura 24) e a os blocos de avanço-atraso em duas partes (Figura 25 e 26).

**Figura 24 - Divisão do Bloco Washout**



Fonte: (FORTES, 2016).

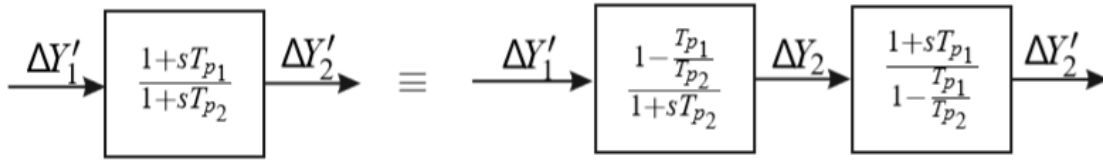
Analisando a Figura 24 e utilizando a equação que determina o fluxo de potência ativa linearizado ( $\Delta P_{km}$ ), ver Apêndice F, podem ser obtidas as expressões (128) e (129).

$$\Delta \dot{Y}'_1 = \frac{1}{T_{\omega_p}} (K_{POD} * (A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta \theta_m + A3_{km} \Delta V_k + A4_{km} \Delta V_m) - \Delta Y_1) \quad (128)$$

$$\Delta Y'_1 = K_{POD} \Delta P_{km} - \Delta Y_1 \quad (129)$$

A equação (132) 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 - Divisão do Primeiro Bloco de Avanço-Atraso de Fase**



Fonte: (FORTES, 2016).

Da maneira similar, a Figura 25 representa o bloco de controle para o POD e com a devida manipulação matemática obtêm-se as equações (130) e (131).

De  $\Delta Y'_1$  a  $\Delta Y_2$ , pode-se obter:

$$\Delta Y'_1 \left( 1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) = \Delta Y_2 + \Delta \dot{Y}_2 T_{p2}$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = \frac{1}{T_{p2}} \left[ \Delta Y'_1 \left( 1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) - \Delta Y_2 \right]$$

Substituindo a equação (129):

$$\Delta Y'_1 = K_{POD} \Delta P_{km} - \Delta Y_1 \quad (129)$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = \frac{1}{T_{p2}} \left[ \left( 1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) \left( (K_{POD} * (A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta \theta_m + A3_{km} \Delta V_k + A4_{km} \Delta V_m) - \Delta Y_1) - \Delta Y_2 \right) \right] \quad (130)$$

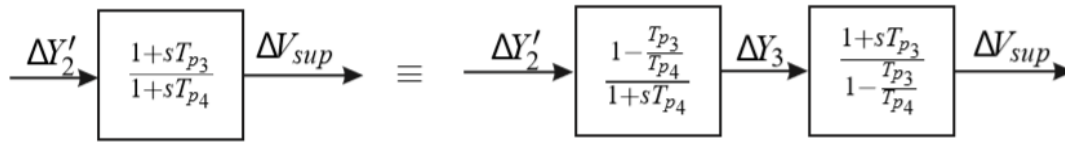
De  $\Delta Y_2$  a  $\Delta Y'_2$  pode-se obter:

$$\Delta Y_2 + \Delta \dot{Y}_2 T_{p1} = \Delta Y'_2 \left( 1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right)$$

$$\Delta Y'_2 = \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) + \Delta Y_2 \quad (131)$$

A equação (130) 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 ( $\dot{Y}_3$ ) fornecida pelo controlador POD, considere a Figura 26.

**Figura 26 - Divisão do Segundo bloco de Avanço-Atraso de Fase**

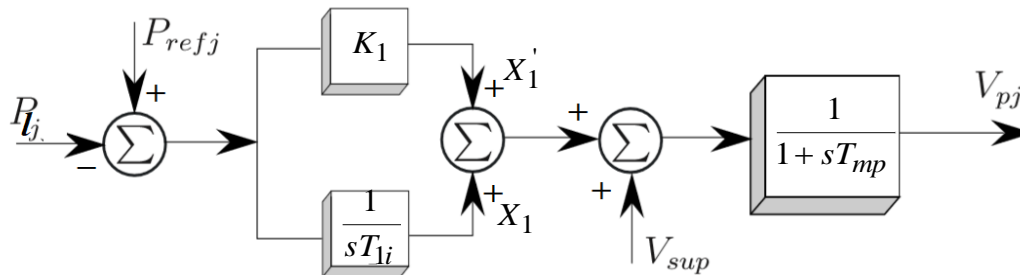
Fonte: (FORTES, 2016).

$$\Delta\dot{Y}_3 = \frac{1}{T_{p4}} \left[ \left( \Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD} * (A1_{km}\Delta\theta_k + A2_{km}\Delta\theta_m + A3_{km}\Delta V_k + A4_{km}\Delta V_m) - \Delta Y_1) \right) \left( 1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \right) - \Delta Y_2 \right] \quad (132)$$

$$\Delta V_{sup} = \Delta Y_3 + \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD}\Delta P_{km} - \Delta Y_1) \right] \quad (133)$$

A equação (132) representa a dinâmica da terceira variável do estado ( $\Delta\dot{Y}_3$ ) para o segundo bloco de avanço-atraso de fase, em função das variáveis algébricas e de estado.

Finalizando, a quarta equação diferencial ( $\dot{V}_{pj}$ ) relacionada ao controlador POD, sua equação relaciona-se com a tensão em quadratura do conversor primário do IPFC ( $\dot{V}_{pj}$ ) e é modulada por um bloco de primeira ordem conforme a Figura 27.

**Figura 27 - Tensão em quadratura do Conversor Primário do IPFC**

Fonte: (FORTES, 2016).

A equação diferencial que descreve o comportamento deste bloco foi apresentada na expressão (93).

$$\dot{V}_{pj} = \frac{K_1}{T_{mp}} (P_{refj} - P_{lj}) + \frac{1}{T_{mp}} X_1 + \frac{1}{T_{mp}} V_{sup} - \frac{1}{T_{mp}} V_{pj} \quad (93^*)$$

A partir daqui se apresenta as equações diferenciais com a forma abreviada (os coeficientes e as variáveis em questão) para  $\Delta\dot{Y}_1, \Delta\dot{Y}_2, \Delta\dot{Y}_3$  e  $\Delta\dot{V}_{pj}$ .



Com a devida manipulação matemática é possível deduzir a equação (134) da equação (128), sendo assim, os coeficientes ( $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$  e  $C_{15}$ ) no conjunto das seguintes expressões (135).

$$\Delta\dot{Y}_1 = C_{11}\Delta\theta_k + C_{12}\Delta\theta_m + C_{13}\Delta V_k + C_{14}\Delta V_m + C_{15}\Delta Y_1 \quad (134)$$

$$C_{11} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega p}} A1_{km} \quad (135a)$$

$$C_{12} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega p}} A2_{km} \quad (135b)$$

$$C_{13} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega p}} A3_{km} \quad (135c)$$

$$C_{14} = \frac{K_{POD}}{T_{\omega p}} A4_{km} \quad (135d)$$

$$C_{15} = -\frac{1}{T_{\omega p}} \quad (135e)$$

De forma semelhante a equação (130) pode se escrever como em (136) em termos dos coeficientes ( $C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}$  e  $C_{26}$ ) e suas respectivas variáveis (137).

$$\Delta\dot{Y}_2 = C_{21}\Delta\theta_k + C_{22}\Delta\theta_m + C_{23}\Delta V_k + C_{24}\Delta V_m + C_{25}\Delta Y_1 + C_{26}\Delta Y_2 \quad (136)$$

$$C_{21} = \frac{A1_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (137a)$$

$$C_{22} = \frac{A2_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (137b)$$

$$C_{23} = \frac{A3_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (137c)$$

$$C_{24} = \frac{A4_{km}K_{POD}}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (137d)$$

$$C_{25} = -\frac{1}{T_{p2}} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}}\right) \quad (137e)$$

$$C_{26} = -\frac{1}{T_{p2}} \quad (137f)$$

Realizando-se o mesmo procedimento na equação (132) escreve-se a equação (138). Em seguida, formula-se  $\Delta\dot{Y}_3$  como seus respectivos coeficientes ( $C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}, C_{36}, C_{37}$ ) conforme o conjunto de equações (139).

$$\Delta\dot{Y}_3 = C_{31}\Delta\theta_k + C_{32}\Delta\theta_m + C_{33}\Delta V_k + C_{34}\Delta V_m + C_{35}\Delta Y_1 + C_{36}\Delta Y_2 + C_{37}\Delta Y_3 \quad (138)$$

$$C_{31} = \frac{T_{p1}A1_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (139a)$$

$$C_{32} = \frac{T_{p1}A2_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (139b)$$

$$C_{33} = \frac{T_{p1}A3_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (139c)$$

$$C_{34} = \frac{T_{p1}A4_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (139d)$$

$$C_{35} = -\frac{T_{p1}}{T_{p2}T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (139e)$$

$$C_{36} = \frac{1}{T_{p4}} \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}}\right) \quad (139f)$$

$$C_{37} = -\frac{1}{T_{p4}} \quad (139g)$$

Por fim, a quarta equação diferencial (93 \*) é escrita em termos do seus coeficientes e as respectivas variáveis em (140) e (141).

$$\Delta\dot{V}_{pj} = \frac{K_1}{T_{mp}} \left( P_{refj} - P_{lj} \right) + \frac{1}{T_{mp}} \Delta X_1 - \frac{1}{T_{mp}} \left( \Delta Y_3 + \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \left[ \Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{POD} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) \right] \right) - \frac{1}{T_{mp}} \Delta V_{pj}$$

$$\Delta\dot{V}_{pj} = (\text{Parcelas já incluídas no MSC}) + C_{41}\Delta\theta_k + C_{42}\Delta\theta_m + \quad (140)$$

$$C_{43}\Delta V_k + C_{44}\Delta V_m + C_{45}\Delta Y_1 + C_{46}\Delta Y_2 + C_{47}\Delta Y_3$$

$$C_{41} = \frac{T_{p1}T_{p3}A1_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}T_{mp}} \quad (141a)$$

$$C_{42} = \frac{T_{p1}T_{p3}A2_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}T_{mp}} \quad (141b)$$

$$C_{43} = \frac{T_{p1}T_{p3}A3_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}T_{mp}} \quad (141c)$$

$$C_{44} = \frac{T_{p1}T_{p3}A4_{km}K_{POD}}{T_{p2}T_{p4}T_{mp}} \quad (141d)$$

$$C_{45} = -\frac{T_{p1}T_{p3}}{T_{p2}T_{p4}T_{mp}} \quad (141e)$$

$$C_{46} = \frac{T_{p3}}{T_{p4}T_{mp}} \quad (141f)$$

$$C_{47} = \frac{1}{T_{mp}} \quad (141g)$$

Obtido o equacionamento necessário para inclusão dos controladores ESPs (equações (120), (122), (124) e (126)) e IPFC-POD (equações (134), (136), (138) e (140)) no MSC, a seção seguinte inclui o MSC considerando a atuação dos controladores suplementares.

#### 4.5 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 (118) e (119) deverão ser modificadas. A modificação se dá pela inclusão das equações (120), (122), (124), (126) (referentes ao ESP) e (134), (136), (138) e (140) (referentes ao conjunto IPFC-POD). A inclusão dessas novas variáveis de estado provocará mudanças nas matrizes  $J1ipfc$ ,  $J2ipfc$ ,  $J3ipfc$  e  $B1ipfc$  e pode ser analisada nas equações matriciais conforme as expressões em (142) e (143).

$$\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 \\ \Delta V_{1k} \\ \Delta V_{2k} \\ \Delta V_{3k} \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix} = \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 \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1} \\ \frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1} \\ \frac{\partial V_{qj}}{\partial X_1} \\ \frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2} \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{\partial V_{pj}}{\partial X_1} \\ 0 \\ \frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2} \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{\partial V_{pj}}{\partial V_{qj}} \\ 0 \\ \frac{\partial V_{qj}}{\partial X_2} \\ 0 \end{matrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial V_{pk}} & \frac{\partial V_{pk}}{\partial X_3} & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial V_{pk}} & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ \begin{matrix} Z_{17k} & Z_{13k} & Z_{14k} & 0 \\ Z_{28k} & Z_{24k} & Z_{25k} & 0 \\ Z_{39k} & Z_{35k} & Z_{36k} & 0 \end{matrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{matrix} Z_{11k} \\ Z_{21k} \\ Z_{31k} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ Z_{22k} \\ Z_{32k} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ Z_{33k} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{matrix} C_{15} \\ C_{25} \\ C_{35} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ C_{26} \\ C_{36} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ C_{37} \end{matrix} \end{bmatrix} \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 \\ \Delta V_{1k} \\ \Delta V_{2k} \\ \Delta V_{3k} \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix}$$

**[J1]**

**[J2]**

$$\begin{array}{r}
 + \\
 \left[ \begin{array}{cccccccccccccc}
 0 & \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial \theta_j} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{pj}}{\partial v_i} & \frac{\partial V_{pj}}{\partial v_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\partial X_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial X_1}{\partial \theta_j} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial X_1}{\partial v_i} & \frac{\partial X_1}{\partial v_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial \theta_j} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{qj}}{\partial v_i} & \frac{\partial V_{qj}}{\partial v_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\partial X_2}{\partial \theta_i} & \frac{\partial X_2}{\partial \theta_j} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial X_2}{\partial v_i} & \frac{\partial X_2}{\partial v_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial \theta_k} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial v_i} & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial v_k} & 0 & 0 & \frac{\partial V_{pk}}{\partial v_k} \\
 0 & \frac{\partial X_3}{\partial \theta_i} & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial \theta_k} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial v_i} & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial v_k} & 0 & 0 & \frac{\partial X_3}{\partial v_k} \\
 0 & 0 & 0 & Z_{16k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{15k} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & Z_{27k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{26k} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & Z_{38k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{37k} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & C_{21} & C_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23} & C_{24} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & C_{31} & C_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & 0 & 0 \\
 \end{array} \right] \begin{array}{l}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \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 \\
 \vdots \\
 \Delta V_{qk}
 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{cccccccccccccc} \right]} \right| *
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{cccc|cccccc}
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_1}{T_{mp}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{1i}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_2}{T_{mp}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{2i}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_3}{T_{mp}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{3i}} \\
 \hline
 Z_{12k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 Z_{23k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 Z_{34k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right]
 \begin{array}{c}
 \Delta P_{mk} \\
 \Delta V_{refk} \\
 \Delta P_{1n} \\
 \Delta Q_{1n} \\
 \Delta P_{refj} \\
 \Delta P_{refj} \\
 \Delta Q_{refj} \\
 \Delta Q_{refj} \\
 \Delta P_{refk} \\
 \Delta P_{refk}
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (142)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{ir}}}{\partial V_{pk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{jr}}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial I_{inj_{kr}}}{\partial V_{pk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{qj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{im}}}{\partial V_{pk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{pj}} & 0 & \frac{\partial I_{inj_{jm}}}{\partial V_{qj}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial I_{inj_{km}}}{\partial V_{pk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \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_{3k} \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{4r\theta\_ipfc} & J_{4rv\_ipfc} \\ J_{4m\theta\_ipfc} & J_{4mv\_ipfc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_n \\ \Delta V_n \\ \Delta V_{qk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{mk} \\ \Delta V_{refk} \\ \Delta P_{ln} \\ \Delta Q_{ln} \\ \Delta P_{refj} \\ \Delta P_{refj} \\ \Delta Q_{refj} \\ \Delta Q_{refj} \\ \Delta P_{refk} \\ \Delta P_{refk} \end{bmatrix} \quad (143)$$

As matrizes sem a inclusão dos controladores suplementares de amortecimento têm sido alteradas, conforme as expressões (142) e (143). As matrizes que não sofreram influência dos controladores ESPs permanecem com a mesma nomenclatura (J4ipfc e B2ipfc). 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 deverão ser consideradas. A mesma análise é válida para cada conjunto IPFC-POD instalado no SEP.

#### 4.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo 4 apresentou-se um modelo de injeção de correntes para o IPFC (conjunto de equações (106), (107) e (108)), efetuou-se o balanço nodal de correntes o que permitiu a inclusão das variáveis de estado e algébricas do IPFC no MSC. Este procedimento foi realizado no equacionamento apresentado em (112), (113) e (114).

Os controladores ESPs e o conjunto IPFC-POD foram modelados neste Capítulo. As etapas para obter suas equações diferenciais (equações (120), (122), (124) e (126) para o ESP e equações (134), (136), (138) e (140) para o POD) foram apresentadas.

Finalizando o Capítulo, os controladores ESP e POD foram incluídos no MSC (equações (142) e (143)). 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 (T1, T2, T3, T3 e KESP) e do conjunto IPFC-POD (Tp1, Tp2, Tp3, Tp4 e KPOD) para se obter um amortecimento desejado para as oscilações eletromecânicas do SEP.



## 5 TÉCNICAS DE AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES

O ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento, pode ser feitos pelas técnicas clássicas ou as técnicas de otimização. Cita-se nas técnicas clássicas os Métodos dos Resíduos (YANG; LIU; MCCLELLY, 1998; VALLE, 2014) e o Modo Descentralizado de Controle-DMC (CHEN; HSU, 1987; VALLE; ARAUJO, 2015; ARAUJO; ZANETA, 2001). O primeiro método realiza o ajuste dos parâmetros dos controladores de forma individual. Assim, ao considerar todos os controladores simultaneamente em operação não garante que o amortecimento desejado seja aquele inicialmente proposto em projeto do amortecimento global do SEP. O segundo método já realiza um ajuste coordenado e simultâneo dos parâmetros dos controladores ESPs e POD (CHEN; HSU, 1987; ARAUJO; ZANETA, 2001). Porém, a desvantagem desta técnica é o fato de que o DMC é caracterizado por um conjunto de equações não lineares que são solucionadas através de um método iterativo. Além disso, o DMC exige que os valores de inicialização do método DMC estejam no entorno de uma solução global. Assim, faz-se necessário realizar um ajuste prévio para inicializar o método DMC.

Em contraste com as técnicas da teoria clássica, as técnicas de otimização têm apresentado ao longo dos últimos anos soluções satisfatórias aos mais diversos problemas de otimização encontrados na literatura. O objetivo de tais técnicas é encontrar uma solução ótima para um dado problema com baixo custo computacional (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

A utilização das técnicas de otimização no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (ESPs e POD) é recente e vem apresentando excelentes resultados. Das técnicas utilizadas para este fim, pode-se citar Bacterial Foraging Optimization (BFO) (MENEZES; ARAUJO; FORTES, 2014), Particle Swarm Optimization (PSO) (HASANVAND *et al.*, 2011; VALLE, 2014), e o Algoritmo Genético (AG) (HASSAN *et al.*, 2014), o Algoritmo Chu-Beasley (FORTES, 2016), e o algoritmo Variable Neighborhood Search (VNS) (FORTES; *et al.*, 2017), o algoritmo Artificial Bee Colony (MARTINS, *et al.*, 2017), o algoritmo Firefly (MARTINS, *et al.*, 2017), o algoritmo Bio-Inspired (MIOTTO, *et al.*, 2018), a Fireworks Metaheuristic (FORTES, *et al.*, 2017), o algoritmo BAT (MIOTTO, E. L., *et al.*, 2017) e o algoritmo

Optimal placement for Fault Indicator using Adaptive Genetic Algorithm (CRUZ H. O., LEÃO F. B., 2017).

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 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 utilizado o Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) que é melhorado com a Hipermutação. Portanto, o algoritmo utiliza o Algoritmo Genético Adaptativo com a Hipermutação (AGAH).

Em linhas gerais, o AGA é especialmente modificado para modular os parâmetros de recombinação e mutação em cada geração. Estas modificações realizadas introduzem características importantes que o diferenciam do AG, tais como controle total da diversidade da população e uma heurística de Busca Local eficiente, características essas não presentes nos AGs tradicionais. Com a modificação proposta tal como a Hipermutação no AGAH espera-se que possam realizar o correto ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares ESPs e no conjunto IPFC-POD e conseqüentemente validar a técnica proposta (AGAH) como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Para testar o desempenho do AGAH, esta terá seu desempenho comparado ao AG, motivo pelo qual estes dois algoritmos serão prontamente apresentados neste Capítulo.

## 5.1 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 em seu livro “Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence” (HOLLAND, 1992). A efetividade incorporada pelos AGs correlaciona-se com o fato de que soluções de qualidade podem ser obtidas independentes da seleção dos parâmetros iniciais os quais geram-se aleatoriamente (GOLDBERG, 2002).

### 5.1.1 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 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.

Cada cromossomo é representado por seus respectivos genes (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007), 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). A solução de um problema de otimização pode ser codificada e representada em uma estrutura de dados denominada de cromossomos (indivíduos). Esta primeira etapa que representa os AGs é fundamental para um bom desempenho do algoritmo, pois é nela que se define o genótipo.

O operador de mutação altera de forma aleatória um ou mais genes de um cromossomo. A probabilidade de ocorrência da 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 genes de dois ou mais cromossomos segundo a seleção de indivíduos por torneio (GOLDBERG, 1989). A hipermutação acontece nos genes do mesmo indivíduo sujeito a certas restrições ou condições.

A partir das definições mencionadas, o AGAH consiste das seguintes componentes. O cromossomo ou indivíduo faz a analogia de uma possível solução do problema. Os genes são os elementos que compõem tal cromossomo. Considera-se neste trabalho as constantes de tempo e ganho (Variáveis do problema) dos controladores suplementares de amortecimento como os genes do cromossomo. A população é constituída por dez possíveis soluções (indivíduos) do problema de otimização proposto. Gera-se os descendentes a partir dos operadores genéticos tais como a recombinação, a mutação e a hipermutação aplicados em geral a um par de cromossomos, os quais são denominados de pais. Considera-se, a população atual como a nova geração de forma que

se obtenham os melhores descendentes ou indivíduos. Finalmente, o Fitness é conhecido como medida de aptidão. O valor do Fitness de cada indivíduo da população é representado por um número positivo cujo objetivo é medir quão adequada é a solução que está sendo avaliada. No trabalho proposto o fitness faz as contas dos controladores que atingiram o amortecimento desejado.

Para melhor entendimento, segue a Tabela 1, onde pode-se observar uma população com seus respectivos cromossomos e os valores dos genes em cada cromossomo.

**Tabela 1 - Estrutura de dados e terminologia de um AG (Cromossomo com 9 genes e variáveis reais)**

PSS-G2			PSS-G3			POD		
T1	T2	Kpss	T1	T2	Kpss	T1	T2	Kpod
1	0.62	2.6	0.81	0.62	1.8	0.4	0.18	4.01

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O AG efetua uma ampla exploração do espaço de busca, assim, explorando todo o espaço de busca e ao mesmo tempo um ótimo aproveitamento das melhores soluções (MICHALEWICZ, 1994). No AG, a cada geração, nas melhores soluções, 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 a distância do amortecimento desejado com o amortecimento calculado. Neste Trabalho, a função objetivo utilizada para o AGAH é definida na equação (147).

### 5.1.2 Mecanismos de seleção de indivíduos

Os mecanismos de seleção utilizados no AG baseiam-se na escolha dos melhores fitness da população para se reproduzirem. Dentre os diversos mecanismos de seleção de indivíduos pode-se citar na literatura o Método da Roleta (GOLDBERG, 1989), a Seleção Elitista (FOGEL, 1994; MICHALEWICZ, 1994), 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.

## 5.2 ALGORITMO GENÉTICO COM ELITISMO

O método Elitismo consiste em selecionar um determinado número de melhores indivíduos de determinadas populações para serem utilizados posteriormente na reprodução. Gerando-se novos indivíduos com características genéticas derivadas dos melhores indivíduos. Porém, isto pode levar à diminuição da diversidade da população, pois os novos indivíduos são sempre gerados a partir dos melhores indivíduos (MITCHELL, 1998).

## 5.3 ALGORITMO GENÉTICO ADAPTATIVO

A técnica de solução a ser empregada neste trabalho é o Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) baseado em (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2014). O algoritmo tem taxas de recombinação e mutação que são dinamicamente calibradas em cada geração baseadas na diversidade da população dessa geração. Para este processo o cálculo das taxas (Diversidade, recombinação e mutação) foram baseadas no trabalho de (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2014).

O mecanismo é baseado no uso da taxa de diversidade da população para controlar dinamicamente o processo evolucionário do algoritmo.

A taxa de diversificação é dada por:

$$Div_{(q)} = \left(1 - \frac{ceq}{np}\right) * 100 \quad (144a)$$

$$If \text{fitness}(i) \leq \min(\text{fitness}) + \frac{DFD}{np} \quad (144b)$$

$$DFD = \sqrt{\sum_{i=1, np} (\min(\text{fitness}) - \text{fitness}(i))^2} \quad (144c)$$

Sendo:

$Div_{(q)}$ : Taxa de diversificação calculada (percentual)

$q$  : Contador do número de gerações do AG

$ceq$  : Número máximo calculado dos melhores indivíduos

$np$  : Número total de indivíduos da população

DFD : Desvio padrão em relação ao mínimo fitness da população

A estratégia consiste em determinar a diversidade percentual da população (percentual máximo de indivíduos diferentes em relação à população) em cada geração do algoritmo usando a equação (144). A partir desse parâmetro as taxas de recombinação e mutação são automática e dinamicamente calibradas baseadas na saturação da população da geração corrente.

As equações das taxas de recombinação e mutação propostas são escritas como:

$$tr_{(q)} = \left( \frac{Div_{(q)}}{100} \right) * e^{\left( \frac{Div_{(q)}}{100} - 1 \right)} \quad (145)$$

$$tm_{(q)} = \left( 1 - \frac{Div_{(q)}}{100} \right) * e^{\left( \frac{Div_{(q)}}{100} \right)} \quad (146)$$

Sendo:

$tr_{(q)}$  : Taxa de recombinação variável

$tm_{(q)}$  : Taxa de mutação variável

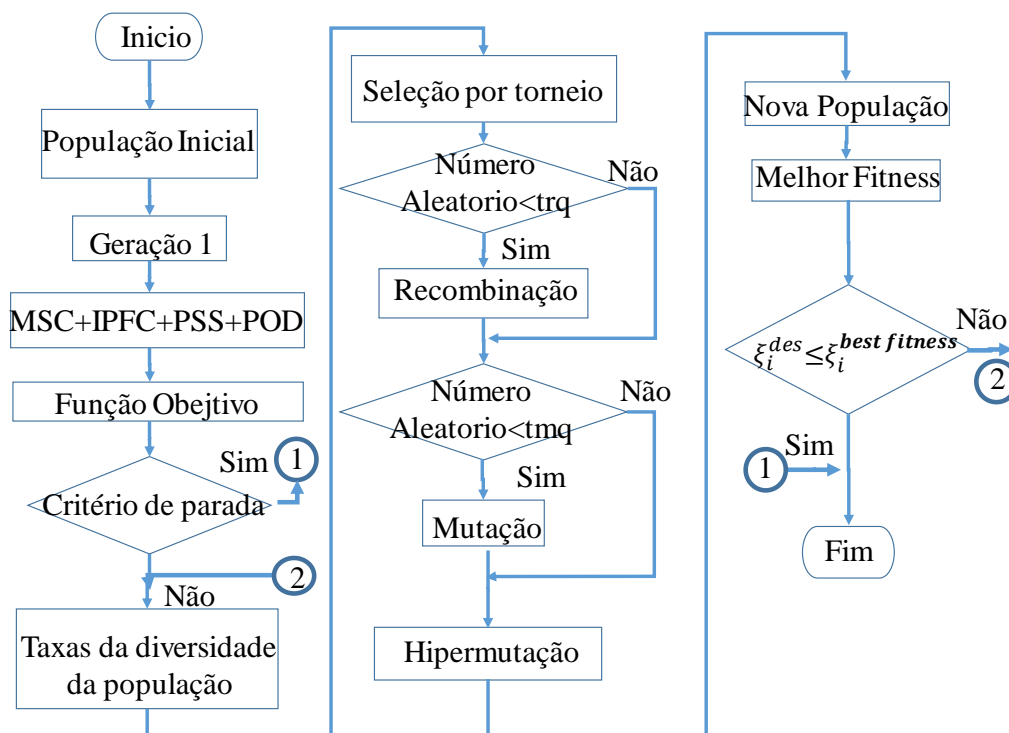
A diversidade da população é mantida em níveis adequados em todo o ciclo evolutivo do algoritmo como consequência, o algoritmo explora melhor o espaço de busca do problema.

### 5.3.1 Diagrama de blocos do AGAH

O diagrama de blocos do algoritmo genético adaptativo com a hipermutação proposto é ilustrado nas Figura 28 e 29. Descreve-se o procedimento da codificação para o AGAH, o qual realiza o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento. No passo primeiro gera-se dez indivíduos de forma aleatória, sendo assim, a primeira geração. A população inicial é avaliada no MSC expandido que considera o PSS e o IPFC-POD. No passo segundo calcula-se os autovalores do SEP e conseqüentemente, o fitness dos indivíduos na população atual. No passo terceiro, a condição ‘while’ é ativada até atingir o valor desejado ou até ficar fora do ‘loop’. Inicializa-se a taxa de diversidade da população e as respectivas taxas de recombinação e mutação. A hipermutação ativa-se quando a quantidade dos melhores indivíduos fica se repetindo nas gerações, portanto, potenciais indivíduos geram-se ao se

estimular a população com a hipermutação. O algoritmo considera o gene de um controlador que atingiu o amortecimento desejado e o coloca no gene no outro controlador do mesmo indivíduo. Tal procedimento acelera a convergência devido ao aumento da chance do indivíduo com o amortecimento desejado. Finalmente, o passo último é selecionar a melhor configuração ou solução, assim, os melhores indivíduos sobrevivem na seguinte geração.

**Figura 28 - Diagrama de blocos do AGAH**



Fonte: Elaborado pelo Autor

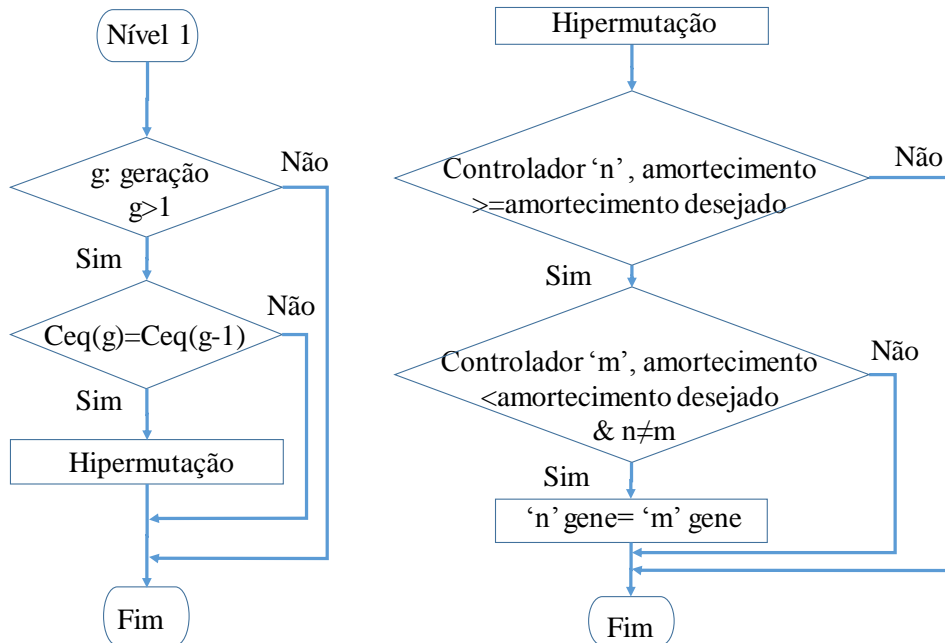
### 5.3.2 Diagrama de blocos da Hipermutação

A convergência torna-se o maior problema para o AG devido ao ritmo constante na busca da solução que conduz a um tempo muito longo na convergência do problema. Além disso, a solução depende substancialmente da população inicial.

A crescente diversidade dos indivíduos permite a não saturação da população, e assim, possibilidade de achar a solução. A hipermutação torna possível que o AGA possa lidar com indivíduos estagnados. É preciso mencionar que a mutação ajuda a gerar novas soluções. Tanto a mutação como a hipermutação não se sobrepõem. No caso da

hipermutação, a Figura 29 mostra que ela depende da diversidade da população sendo ativada quando o número máximo de melhores indivíduos ( $Ceq$ ) não muda de uma geração a outra.

**Figura 29 - Diagrama de blocos da Hipermutação**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O MSC considera a atuação dos controladores suplementares e, assim, obtém-se os autovalores do sistema avaliados em cada indivíduo da população. Em cada geração do AGAH observa-se que a recombinação e a mutação para cada indivíduo dependem da taxa de diversificação da população. Os melhores indivíduos ficam para se reproduzir nas seguintes gerações. Finalmente, o algoritmo termina se encontrar o amortecimento dentro da faixa de interesse ou até passar o limite das restrições.

#### 5.4 FUNÇÃO OBJETIVO

Utiliza-se a estratégia da Busca Local, com o intuito de 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 (147).

$$F(x^r) = \sum_{i=1}^n |\xi_i^{calc} - \xi_i^{des}| \quad (147)$$

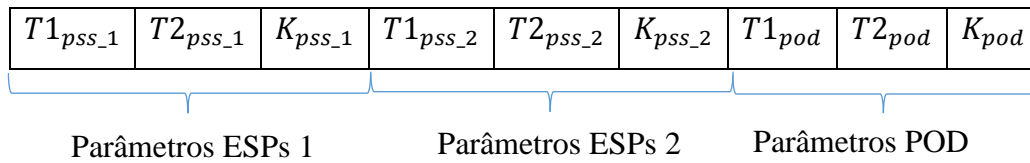


A função objetivo é definida tal como é apresentado em (147). Esta minimiza a distância entre os amortecimentos desejados ( $\xi_i^{des}$ ) e os amortecimentos calculados ( $\xi_i^{calc}$ ) determinados a cada iteração realizada pelo algoritmo.

## 5.5 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO SUJEITAS ÀS CONDIÇÕES DE RESTRIÇÃO

A modelagem do SEP conforme foi exposta no Capítulo 2 faz possível a determinação da estabilidade ou não, analisando-se os autovalores da matriz de estado (equação (118 e 119)). Ao se verificar tal 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 inter-área). Portanto, a importância do correto ajuste dos parâmetros dos controladores (constantes de tempo e ganhos) ESPs e do conjunto IPFC-POD a inserir o amortecimento desejado nas oscilações eletromecânicas de baixa frequência presentes no SEP é vital.

Analisando as Figuras (18) e (23) (Capítulo 4) observa-se a equivalência dos modelos dinâmicos para os controladores ESP e o IPFC-POD. 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  $T1_{pss} = T3_{pss}$ ,  $T2_{pss} = T4_{pss}$  (KUNDUR, 1994). As constantes de tempo  $T_{\omega_{pss}}$  nos ESPs e  $T_{\omega_{pod}}$  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 com a instalação de  $n$  controladores ESPs em  $n$  máquinas síncronas e equipado com um conjunto IPFC-POD. Na Figura (28) é apresentada a representação de uma proposta de solução para o AG Adaptativo (indivíduo), utilizada na formulação da população no AGAH.

**Figura 30 - Indivíduo do AGAH**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observe que as primeiras 3 posições do indivíduo representado na Fig. 30 destinam-se às duas constantes de tempo  $T1_{pss\_1}$  e  $T2_{pss\_1}$  do controlador PSS instalados em um gerador síncrono, a terceira posição é o ganho  $K_{pss\_1}$ . Do mesmo jeito se for outro gerador com PSS, as seguintes 3 posições ficam com as constantes de tempo  $T1_{pss\_2}$  e  $T2_{pss\_2}$  do controlador PSS, seguido do ganho  $K_{pss\_2}$ . A posição 7 em diante refere-se à constantes de tempo  $T1_{pod}$  e  $T2_{pod}$  do conjunto IPFC-POD. Mantendo essa mesma ordem é representada o ganho  $K_{pod}$ .

Os indivíduos pertencentes a uma população inicial ou melhorada pelo AGAH tal como representado na Figura (28) e (29), devem estar sujeitos às restrições impostas pelo conjunto de inequações (148) a (150).

$$T1_{min_{pss\_1}} \leq T1_{pss\_1} \leq T1_{max_{pss\_1}}, T2_{min_{pss\_1}} \leq T2_{pss\_1} \leq T2_{max_{pss\_1}}, K_{min_{pss\_1}} \leq K_{pss\_1} \leq K_{max_{pss\_1}} \quad (148)$$

$$T1_{min_{pss\_2}} \leq T1_{pss\_2} \leq T1_{max_{pss\_2}}, T2_{min_{pss\_2}} \leq T2_{pss\_2} \leq T2_{max_{pss\_2}}, K_{min_{pss\_2}} \leq K_{pss\_2} \leq K_{max_{pss\_2}} \quad (149)$$

$$T1_{min_{pod}} \leq T1_{pod} \leq T1_{max_{pod}}, T2_{min_{pod}} \leq T2_{pod} \leq T2_{max_{pod}}, K_{min_{pod}} \leq K_{pod} \leq K_{max_{pod}} \quad (150)$$

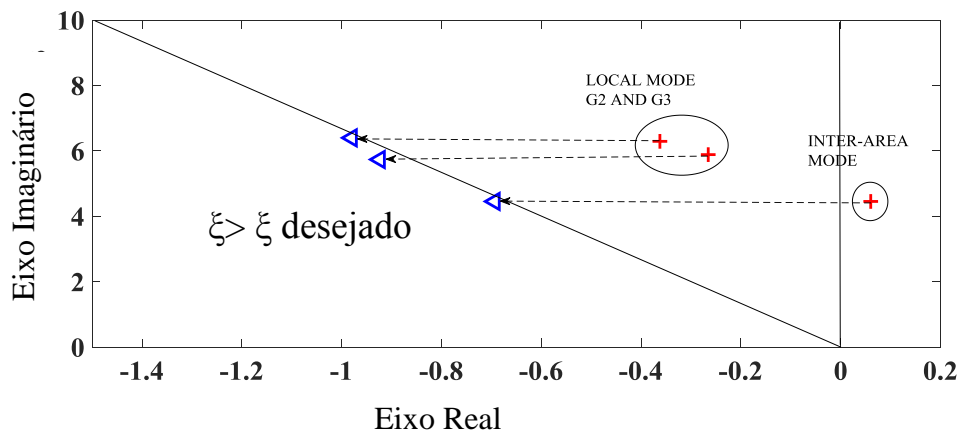
Enquanto que os parâmetros do controlador PI ficam fixos com valores determinados, sendo assim, que o foco da otimização dos parâmetros é o ESPs e o POD.

$$T1_{PI} = 0.0872, T2_{PI} = 0.045, T3_{PI} = 0.01 \quad (151)$$

$$Kp1_{PI} = 3.3492, Kp2_{PI} = 2.601, Kp3_{PI} = 1.2761 \quad (152)$$

Nas equações (148) a (150), todos os parâmetros dos controladores suplementares (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 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 (147). O deslocamento dos autovalores calculados, a cada iteração, para a região de amortecimento desejado é apresentado na seguinte figura.

**Figura 31 - Região de localização dos autovalores desejados**



Fonte: Elaborado pelo autor.

No trabalho considera-se uma faixa de amortecimento desejada para todos aos autovalores de interesses calculados ( $\lambda_i^{calc}$ ). Assim, o algoritmo deve realizar os ajustes coordenados dos parâmetros dos controladores, ESPs e IPFC-POD.

## 5.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O foco principal deste Capítulo foi a apresentação de uma técnica de otimização (AGAH) baseada no AG. Posteriormente (Capítulo 6), esta técnica será utilizada para realizar os ajustes dos parâmetros (constantes de tempo e ganhos) dos controladores suplementares de amortecimento (ESPs e do conjunto IPFC-POD), sendo seu desempenho comparado ao algoritmo genético clássico de otimização disponível na literatura.

Inicialmente foi apresentado o Algoritmo Genético. Foram mencionados os conceitos básicos e algumas definições sobre estes algoritmos. Em seguida, baseado nos AGs, foi apresentado o AGAH. Este algoritmo possui algumas características (taxas dinâmicas de

recombinação e mutação calibradas em cada geração baseadas na diversidade da população dessa geração) e a hipermutação 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 AGAH em uma busca local eficiente, testado no sistema Simétrico de Duas Áreas (KUNDUR, 1994), 2014).

## 6 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Neste Capítulo apresenta-se os resultados de simulações realizadas no sistema teste Simétrico de Duas Áreas e do Sistema New England. O objetivo é avaliar o desempenho e a eficácia do algoritmo proposto (AGAH) no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (ESPs e o conjunto IPFC-POD) frente ao AG clássico de otimização disponível na literatura (AG) e validar o modelo de injeção de corrente proposto para o IPFC.

Primeiramente, identifica-se quais barras do sistema possuem tensão abaixo de 0,95 pu (ou acima de 1,05 pu). Em seguida, o IPFC é instalado na subestação da barra em queda de tensão e por meio do controle de fluxos de potências ativa e reativa nas linhas em que o dispositivo se encontra instalado espera-se o melhoramento da tensão nessa barra e das barras vizinhas.

Os algoritmos serão submetidos a realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento considerando-se os seguintes cenários distintos: 1) No sistema Simétrico de Duas Áreas, o amortecimento desejado maior que 15% para os modos local e inter-área; 2) No sistema New England, o amortecimento desejado maior que 10% tanto para os modos local e inter-área.

Todas as simulações efetuadas neste Capítulo foram realizadas no ambiente Matlab, sem o auxílio de qualquer toolbox, por meio de implementação dos algoritmos AG Adaptativo e o AG clássico. 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 podem ser encontrados no Anexo A.

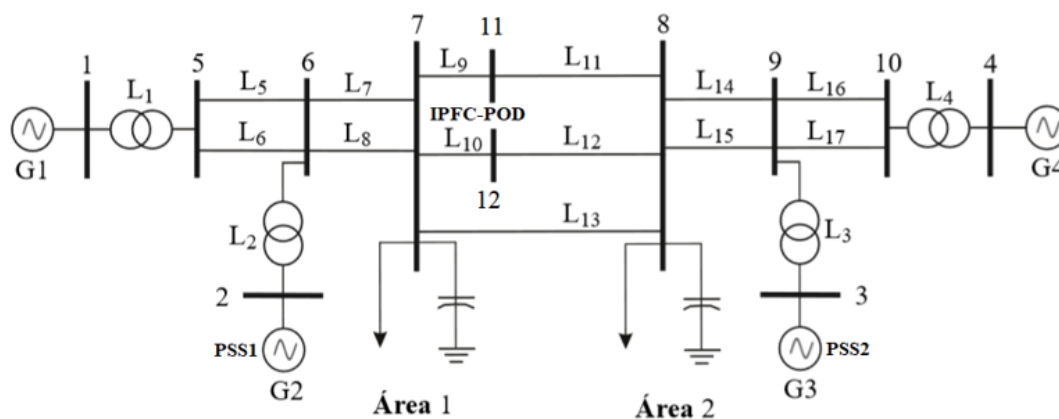
### 6.1 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

O sistema benchmark Simétrico de Duas Áreas é utilizado neste trabalho. O sistema teste possui duas áreas e 14 barras (já incluídas duas novas barras fictícias), 4 geradores e 2 shunts de barras instaladas nos barramentos 7 e 8. Apesar de ter compensação reativa nesses barramentos, a queda de tensão não é solucionada. Além

disso, o Sistema é caracterizado por possuir longas linhas de transmissão na interligação das barras 7 e 8.

O leitor pode averiguar os dados do sistema no Anexo A.

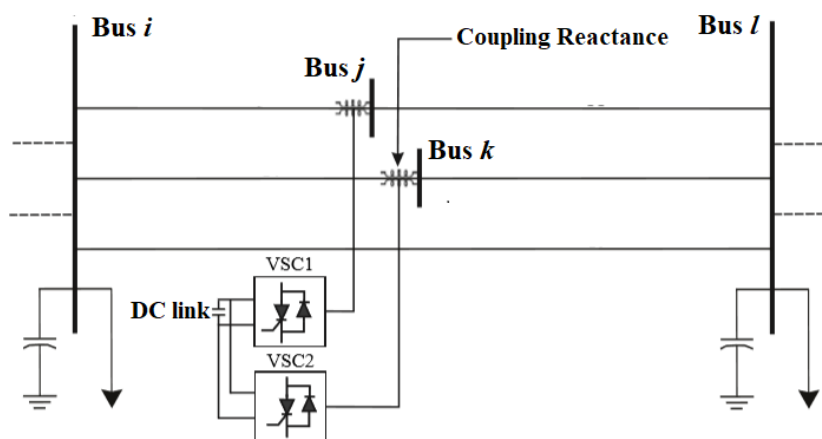
**Figura 32 - Diagrama unifilar do Sistema Simétrico de Duas Áreas**



Fonte: Elaborado pelo autor.

A instalação do IPFC é no barramento 7, o dispositivo FACTS instalado neste sistema teste consiste de dois conversores em série e as reatâncias de acoplamento com as linhas  $L_9$  e  $L_{10}$ .

**Figura 33 - Local de instalação do IPFC**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera-se o IPFC off-line, isto é, sem a atuação dele sobre o controle dos fluxos de potência. Neste caso, a tabela 2 apresenta as variáveis de inicialização do IPFC. Observe-se que os valores ficam em torno zero, então é possível afirmar que o IPFC não exerce controle nos fluxos de potência ativa e reativa do sistema teste.

**Tabela 2 - Parâmetros de IPFC sem atuação no controle de fluxo**

$V_{pj}$	$V_{pk}$	$V_{qj}$	$V_{qk}$
7.2235e-06	3.6717e-05	4.8724e-05	-6.5298e-05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos resultados na Tabela 3, conclui-se que o sistema é instável no modo inter-área ( $\lambda_3$ ) devido ao seu amortecimento negativo. Enquanto que os autovalores de modo local ( $\lambda_2$  e  $\lambda_1$ ) possuem um baixo amortecimento. Esta classificação se dá por meio da análise das respectivas frequências natural não amortecidas de cada modo de interesse. O sistema é composto por 22 autovalores, sendo um deles de valor ‘zero’ que representa uma variável de estado (deslocamento angular) como referência no sistema. Além disso, considerou-se a compensação nas barras 7 e 8, assim como a influência do shunt das linhas em questão.

Pode-se concluir, a partir da tabela 3, um problema que deve ser solucionado. O problema está relacionado com a instabilidade do sistema para o modo inter-área e para os amortecimentos fracos dos modos locais.

Para resolver tal problema de instabilidade, equipa-se os geradores e o IPFC com os seus respectivos controladores suplementares de amortecimento com o intuito de inserir amortecimento adicional aos modos locais com a instalação dos ESP (estabilizador de sistema de potência) e ao modo inter-área com a instalação do IPFC-POD (controlador das oscilações de potência).

**Tabela 3 - Autovalores do sistema sem atuação do IPFC**

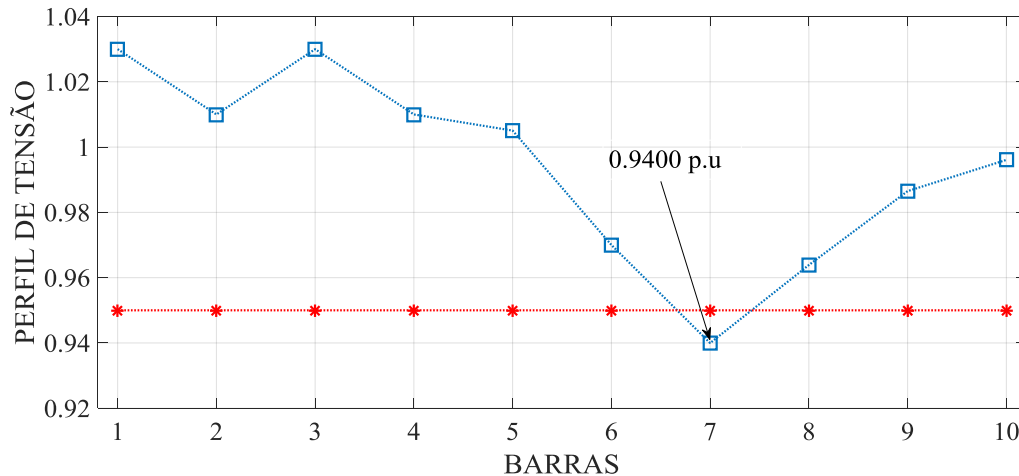
Sem Atuação do IPFC			
Modo	$\sigma_i \pm j * \omega_i$	$\xi_i$	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0.34066 \pm 6.29151j$	0.05406	1.00279
$\lambda_2$	$-0.27195 \pm 5.900198j$	0.04604	0.94004
$\lambda_3$	$0.048564 \pm 4.34763j$	-0.01116	0.69199

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 34 apresenta-se o perfil de tensão do sistema simétrico de duas áreas para o caso base. O afundamento da tensão no barramento 7 tem um valor de 0.9400 p.u. que ficou abaixo da faixa aceitável de tensão (0.9500 até 1.050 p.u.) apesar de ter dois shunts de compensação nas barras 7 e 8, onde tem se colocado as maiores cargas no sistema teste.

Para resolver esse problema foi proposto a atuação do IPFC no controle de fluxo de potência com o controlador PI (controlador proporcional integral). Portanto, o IPFC 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.

**Figura 34 - Perfil de tensão de Sistema Simétrico de Duas Áreas**



Fonte: Elaborado pelo autor.

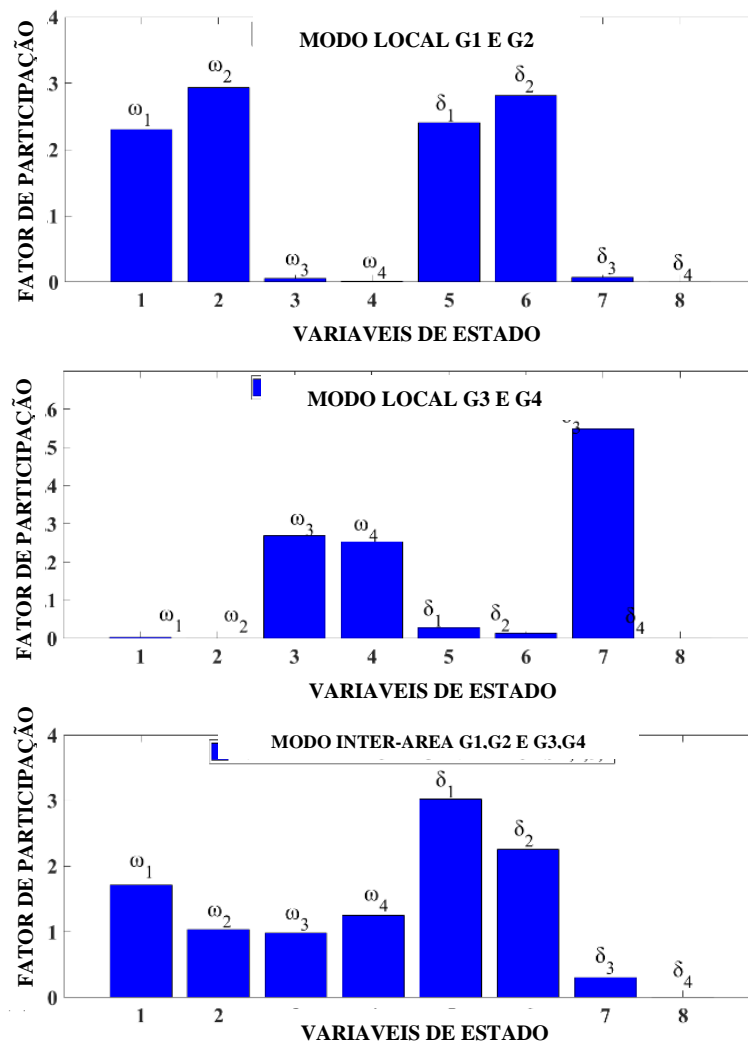
### 6.1.1 Localização dos dispositivos de controle (ESPs e IPFC-POD)

Os controladores ESP1 e ESP2 encontram-se instalados no gerador 2 e no gerador 3, respectivamente. O controlador POD foi instalado no barramento 7 devido a que tal barra apresenta o pior perfil de tensão devido, ou seja, fora da margem de tensão aceitável.

Soluções paliativas como a instalação do ESP objetivam resolver o problema da instabilidade local no sistema, porém a influência do ESP no modo inter-área é quase desprezível. A instabilidade no modo inter-área é solucionada com a instalação do conjunto IPFC-POD.



**Figura 35 - Factor de Participação no Sistema Simétrico de Duas Áreas**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a figura 35, é possível determinar em quais geradores do sistema Simétrico de Duas Áreas serão alocados esses dispositivos. Ao analisar os fatores de participação (KUNDUR, 1994) dos autovalores do sistema teste pode-se concluir que o gerador 2 e o gerador 3 possuem maior participação no modo local e no conjunto de geradores 1, 2 e 3 oscilam em relação ao gerador 4. Portanto, faz-se a instalação dos controladores suplementares de amortecimento (ESP) nos geradores 2 e 3.

### 6.1.2 Influência do IPFC no controle de tensão no sistema Simétrico de Duas Áreas

O IPFC-PI controlador efetua o controle dos fluxos de potências ativas e reativas entre os barramentos 7 e 8. Conforme se apresentou na figura 33, o IPFC exerce controle das potências ativa e reativa na linha 7-11 e somente potência reativa na linha 7-11.

Os parâmetros do controlador PI foram considerados fixos (FORTES, 2016). É preciso mencionar que tais parâmetros podem ser modificados com a utilização de alguma meta-heurística e, portanto, tendo a influência na estabilidade do sistema teste.

**Tabela 4 - Parâmetros do controlador IPFC-PI**

Ganhos			Tempos		
$K_{p1}$	$K_{p2}$	$K_{p3}$	$T_{1i}$	$T_{2i}$	$T_{3i}$
3.3492	2.6010	1.2761	0.0872	0.0450	0.1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

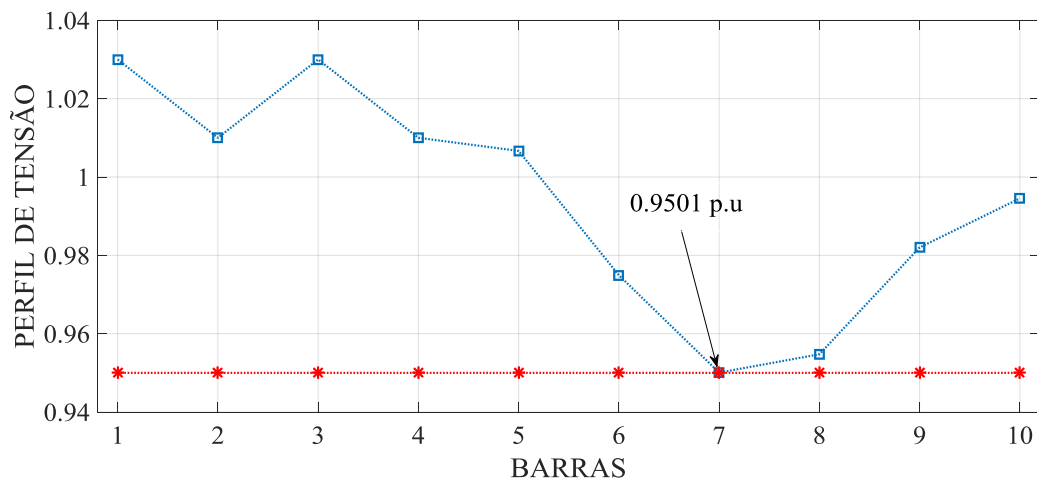
O IPFC passou a exercer o controle sobre os fluxos de potência ativa e reativa e, assim, modulando as componentes do eixo direto e em quadratura das fontes de tensão. Na tabela 5 apresenta-se os valores das variáveis de estrutura de controle do IPFC após a sua atuação no controle de fluxos de potência.

**Tabela 5 - Parâmetros de IPFC com atuação no controle de fluxo**

$V_{pj}$	$V_{pk}$	$V_{qj}$	$V_{qk}$
0.1187	0.0545	-0.2406	0.0964

Fonte: Elaborado pelo autor.

A correção do problema de afundamento de tensão é feita com as seguintes especificações nas variáveis do controlador PI. Na linha 11-8 a potência de referência ativa fica em 75.83 MW e a potência de referência reativa em -79.87 MVAR. Na linha 12-8 a potência de referência ativa fica em 75.83 MW. Vale destacar que o IPFC realiza uma transferência no fluxo de potência ativa entre as linhas do SEP por meio dos conversores e o restante do sistema.

**Figura 36 - Perfil de tensão no sistema teste com atuação do IPFC-PI**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se concluir que o controle do IPFC-PI resolveu a queda de tensão no barramento 7, além disso, as tensões nos barramentos vizinhos foram melhoradas e o fluxo de potência nas linhas de transmissão dos barramentos 7 e 8 em questão ficaram aliviados. Porém, observe-se na tabela 6 que o Sistema apresenta ainda os dois modos locais e o modo inter-área.

Apesar de ter sido corrigido o afundamento de tensão o sistema é instável pelo fato de conter o amortecimento negativo no modo inter-área. Portanto, tal modo pode prejudicar ou comprometer a estabilidade do sistema se ficar sujeito a variações ou perturbações de potência em qualquer instante do tempo.

**Tabela 6 - Autovalores do sistema com atuação do IPFC sem os controladores suplementares EPSs e POD**

Com Atuação do IPFC sem ESP e POD			
Modo	$\sigma_i \pm j * \omega_i$	$\xi_i$	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0.36263 \pm 6.29238i$	0.05753	1.00312
$\lambda_2$	$-0.26561 \pm 5.88476i$	0.04508	0.93754
$\lambda_3$	$0.06050 \pm 4.45749i$	-0.01357	0.70949

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.1.3 Restrições dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESP e POD

O intuito do AGAH é realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (ESP e o POD). As constantes de tempo no bloco de avanço e atraso e o ganho do ESP e o POD ficam expressos dentro das restrições (153) e (154).

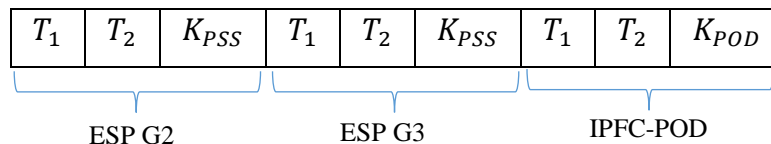
$$0.05 \leq T_{1\_PSS} \leq 1, 0.05 \leq T_{2\_PSS} \leq 1, 1 \leq K_{PSS} \leq 5 \quad (153)$$

$$0.05 \leq T_{1\_POD} \leq 1, 0.05 \leq T_{2\_POD} \leq 1, 0.05 \leq K_{POD} \leq 5 \quad (154)$$

É importante destacar que as restrições das variáveis em questão dependem da natureza do sistema teste a se avaliar. As modificações delas podem gerar soluções aceitáveis ou limitar a busca da solução.

O indivíduo ou cromossomo do AGAH no caso do sistema Simétrico de Duas Áreas fica representado na figura 37.

**Figura 37 - Cromossomo do sistema Simétrico de Duas Áreas**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.1.4 Performance dos algoritmos AGAH e AG Clássico no sistema Simétrico de Duas Áreas

Considera-se o amortecimento desejado entre a faixa de 15 até 17 por cento. Vale ressaltar que o tempo computacional se torna mais eficiente se a faixa de busca for entre 15 até 30 por cento. Por outro lado, se a margem do amortecimento desejado ficar estreita, o tempo computacional aumenta. Avaliou-se o desempenho do AGAH e o GA em 100 testes efetuados e, assim, obtém-se o tempo de convergência, o erro da distância do amortecimento e o número de gerações até achar a solução.

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo AGAH. Pode-se observar que o AGAH funciona bem. No caso o amortecimento desejado é maior ou igual

a 15 por cento, o tempo medio de convergência ficou em 18.29 segundos. Além disso, pode-se afirmar que os valores de amortecimento do AGAH têm menos erro em comparação com o AG. Observa-se que o mínimo tempo da convergência fica em torno de 4.86 segundos e o máximo em 26.84 segundos. Por outro lado, a convergência do AG leva maior tempo ao redor de 30.91 segundos em média.

Considerou-se 10 indivíduos na população do AGAH e do AG, a seleção por torneio faz a escolha dos três melhores indivíduos. Em relação ao AG as taxas de recombinação e mutação são 0.8 e 0.1, respetivamente.

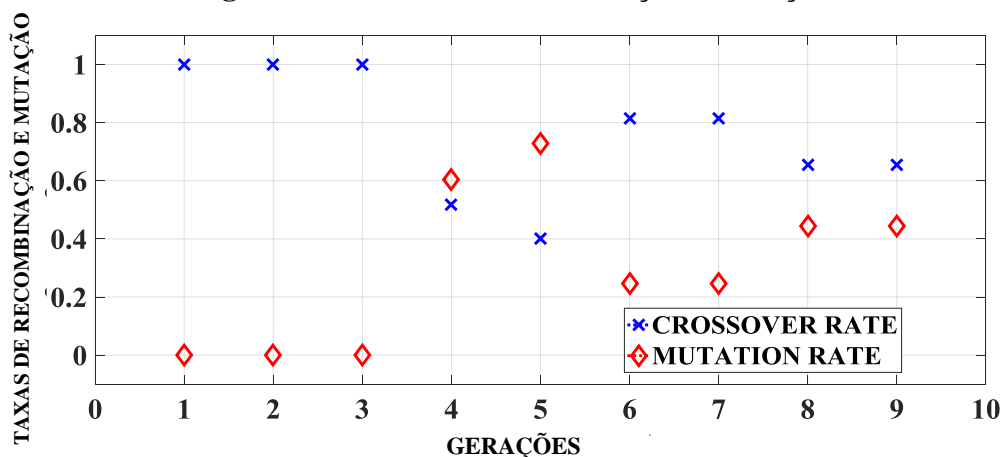
**Tabela 7 - Comparação de desempenho do AG Adaptativo e o AG Clássico**

Algoritmo	Amortecimento o desejado	Tempo (s)			Error			Geração		
		Avg	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	Max
AGAH	$0.15 < \xi_{\min}$	<b>18.29</b>	<b>4.86</b>	<b>26.84</b>	<b>0.0156</b>	<b>0.0050</b>	<b>0.0256</b>	<b>7.53</b>	<b>2</b>	<b>10</b>
AG	$0.15 < \xi_{\min}$	<b>30.91</b>	<b>14.63</b>	<b>58.46</b>	<b>0.0317</b>	<b>0.0179</b>	<b>0.0541</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>17</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 38 descreve o comportamento das taxas de recombinação e a mutação, observe-se que as taxas são calibradas dinamicamente ao longo da geração 1 até a 9. As taxas se adaptam em cada geração, portanto pode-se garantir a diversificação da população. Observe-se na figura 39 a evolução do melhor valor de amortecimento em cada geração. A estrutura do algoritmo faz com que o amortecimento se aproxime ou até fique perto do amortecimento desejado.

**Figura 38 - Taxas de recombinação e mutação**

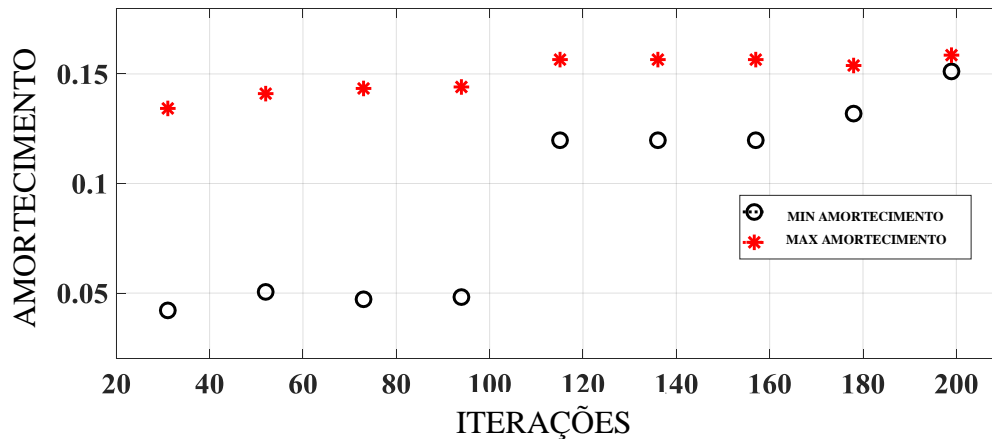


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 39 pode-se observar que o amortecimento desejado é 15 por cento. Os valores em asterisco é o máximo amortecimento e aqueles em círculo representam o

mínimo amortecimento numa geração, apesar de que os valores iniciais de amortecimento máximo e mínimo ficam afastados do amortecimento desejado. Vale destacar a efetividade do algoritmo sem importar que a primeira geração foi formada aleatoriamente e seus valores ficam evoluindo até alcançar o amortecimento desejado.

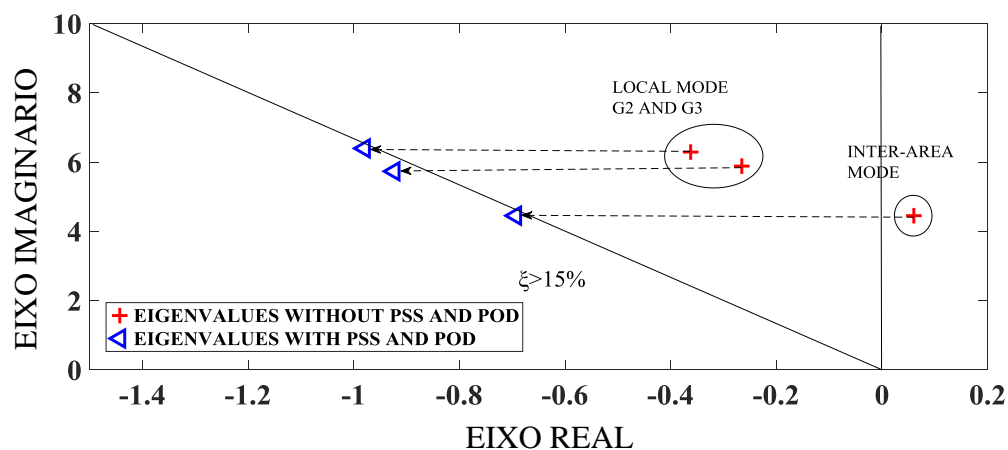
**Figura 39 - Evolução dos amortecimentos ao longo das iterações**



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 40 descreve os valores iniciais dos autovalores movimentando-se na região dos autovalores com o amortecimento maior que 15 por cento. Os valores finais dos autovalores ficam na região desejada.

**Figura 40 - Autovalores do sistema com o correto ajuste do ESP e POD**



A tabela 8 apresenta os autovalores com o amortecimento maior que 15 por cento tanto para os modos locais  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  como para o modo inter-área  $\lambda_3$ .

**Tabela 8 - Autovalores do sistema com atuação do IPFC e o ajuste coordenado dos controladores suplementares EPSs e POD**

Com Atuação do IPFC, ESP e POD			
Mode	$\sigma_i \pm j\omega_i$	$\xi_i$	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	<b>-0.979 ± j6.400</b>	<b>0.1513</b>	<b>1.030</b>
$\lambda_2$	<b>-0.923 ± j5.746</b>	<b>0.1586</b>	<b>0.926</b>
$\lambda_3$	<b>-0.693 ± j4.462</b>	<b>0.1534</b>	<b>0.718</b>

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

A tabela 9 apresenta os parâmetros dos controladores ESP e POD com o ajuste coordenado realizado pelo AGAH.

**Tabela 9 - Ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares ESP e POD**

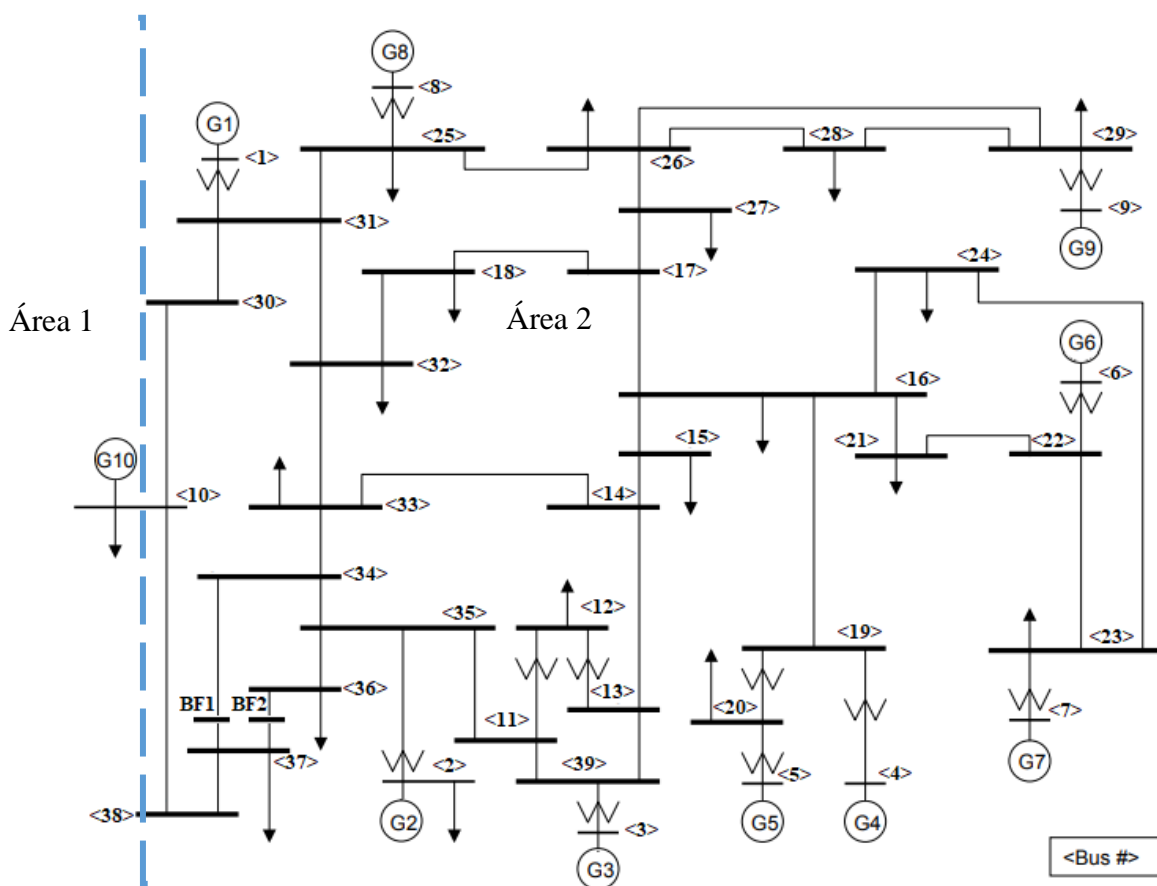
ESP e o POD parâmetros	15% ≤ $\xi$ min ≤ 17%		
	PSS G2	PSS G3	POD
$T_1 = T_3$ (s)	<b>0.877</b>	<b>0.245</b>	<b>0.778</b>
$T_2 = T_4$ (s)	<b>0.431</b>	<b>0.145</b>	<b>0.255</b>
$K$ (p.u)	<b>1.592</b>	<b>2.604</b>	<b>2.741</b>

Fonte: Dados oriundos da pesquisa.

## 6.2 SISTEMA NEW ENGLAND

A figura 41 apresenta o sistema IEEE 39 barras, o qual é conhecido como o Sistema New England de 10 geradores. O gerador 10 da área 2 representa um conjunto de geradores. Avalia-se a estabilidade do sistema teste e o ajuste coordenado dos controladores ESP e POD. Utiliza-se a plataforma MatLab para levar a cabo as análises em questão.

Figura 41 - Diagrama unifilar do Sistema New England

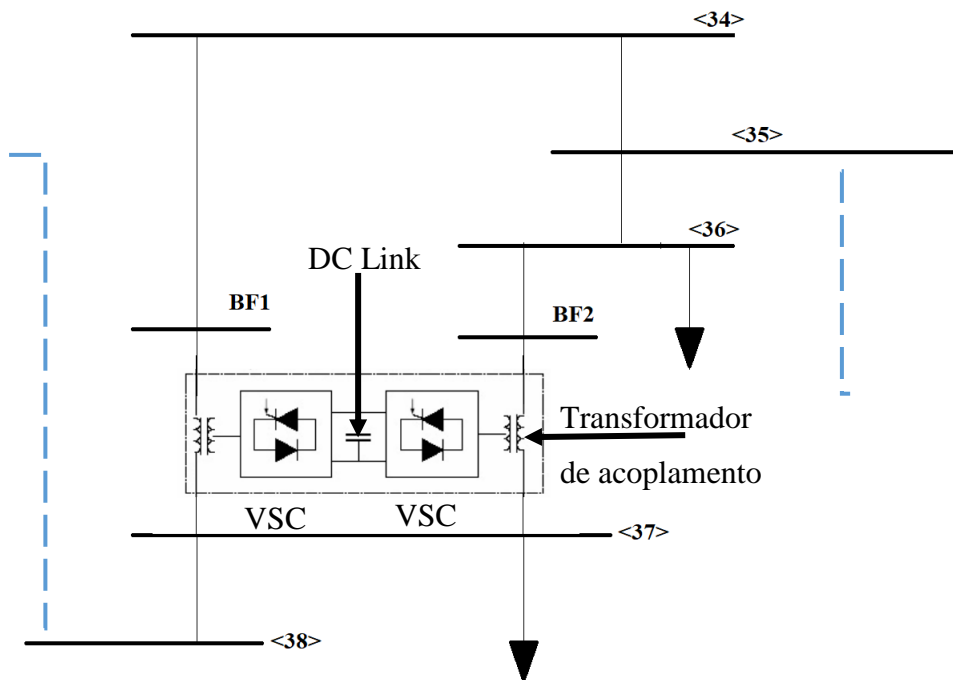


Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema possui duas áreas (áreas 1 e 2). Neste diagrama unifilar são incluídas duas barras fictícias BF1 e BF2, duas linhas 37-BF1 e 37-BF2 que representam as reatâncias de acoplamento do IPFC, cujos valores é de 0,01 pu.



**Figura 42 - Local de instalação do IPFC no Sistema New England**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 42 é ilustrada a instalação do IPFC entre as barras 34, 37 e 36. A escolha é motivada pelos resultados na análise de fluxo de potência. O IPFC consiste de dois controladores de fonte de tensão (VSC) os quais ficam instalados nas linhas 37-BF1 e 37-BF2. As fontes de tensão têm um elo comum CC. O fato de que o IPFC pode controlar a magnitude da tensão e o ângulo dos VSC nas duas linhas de transmissão, permite o grau de controle de ordem 4. Porém, o CC link possui já um grau de controle. Sendo assim, o grau de liberdade no controle é de ordem 3.

Para o caso base, considera-se o IPFC sem atuação sobre os fluxos de potência entre as linhas 37-BF1 e 37-BF2. Nesta situação as variáveis de inicialização do IPFC ficam em valores bem pequenos, próximas de zero como se apresenta na tabela 10.

**Tabela 10 - Variáveis de controle dos controladores de fonte de tensão no sistema New England**

$V_{pj}$	$V_{pk}$	$V_{qj}$	$V_{qk}$
-8.63e-7	-2.47e-6	4.69e-7	-7.52e-7

Fontes: Elaborado pelo autor.

Dos resultados na Tabela 11, conclui-se que o sistema é instável nos modos locais ( $\lambda_4$ ,  $\lambda_6$  e  $\lambda_7$ ) devido ao seu amortecimento negativo. Enquanto que os autovalores de

modo inter-área ( $\lambda_8$ ) possui um baixo amortecimento. O sistema é composto por 70 autovalores, sendo um deles de valor ‘zero’ que representa uma variável de estado (deslocamento angular) como referência no sistema. Pode-se concluir a partir da tabela 11, que o problema está relacionado com a instabilidade do sistema para o modo local e o amortecimento fraco do modo inter-área. Portanto, uma solução é a instalação dos controladores suplementares de amortecimento (ESP e IPFC-POD) com o intuito de inserir amortecimento adicional ao sistema.

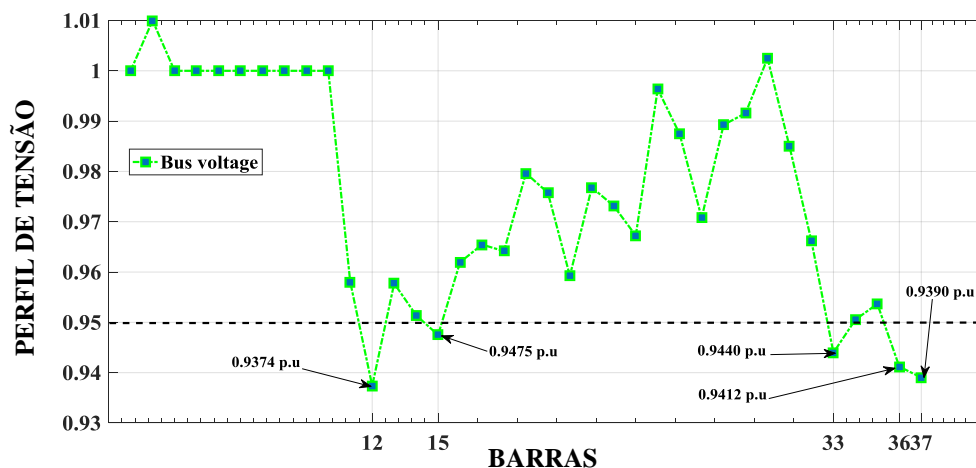
**Tabela 11 - Autovalores do Sistema sem atuação do IPFC no sistema New England**

Sem Atuação do IPFC			
Modo	$\sigma_i \pm j * \omega_i$	$\xi_i$	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0.2371 \pm j8.3076$	0.0285	1.3227
$\lambda_2$	$-0.1711 \pm j8.2536$	0.0207	1.3139
$\lambda_3$	$-0.2637 \pm j8.0904$	0.0326	1.2883
$\lambda_4$	$0.2361 \pm j6.9216$	-0.0341	1.1023
$\lambda_5$	$-0.2847 \pm j6.6919$	0.0425	1.0660
$\lambda_6$	$0.0064 \pm j6.4153$	-0.000991	1.0210
$\lambda_7$	$0.2398 \pm j5.9154$	-0.0405	0.9422
$\lambda_8$	$-0.0202 \pm j4.0065$	0.005	0.6377

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera-se como barramento swing a barra 2. Apresenta-se na figura 43 o perfil de tensão do sistema New England.

**Figura 43 - Perfil de tensão para o sistema New England**



Fonte: Elaborado pelo autor.

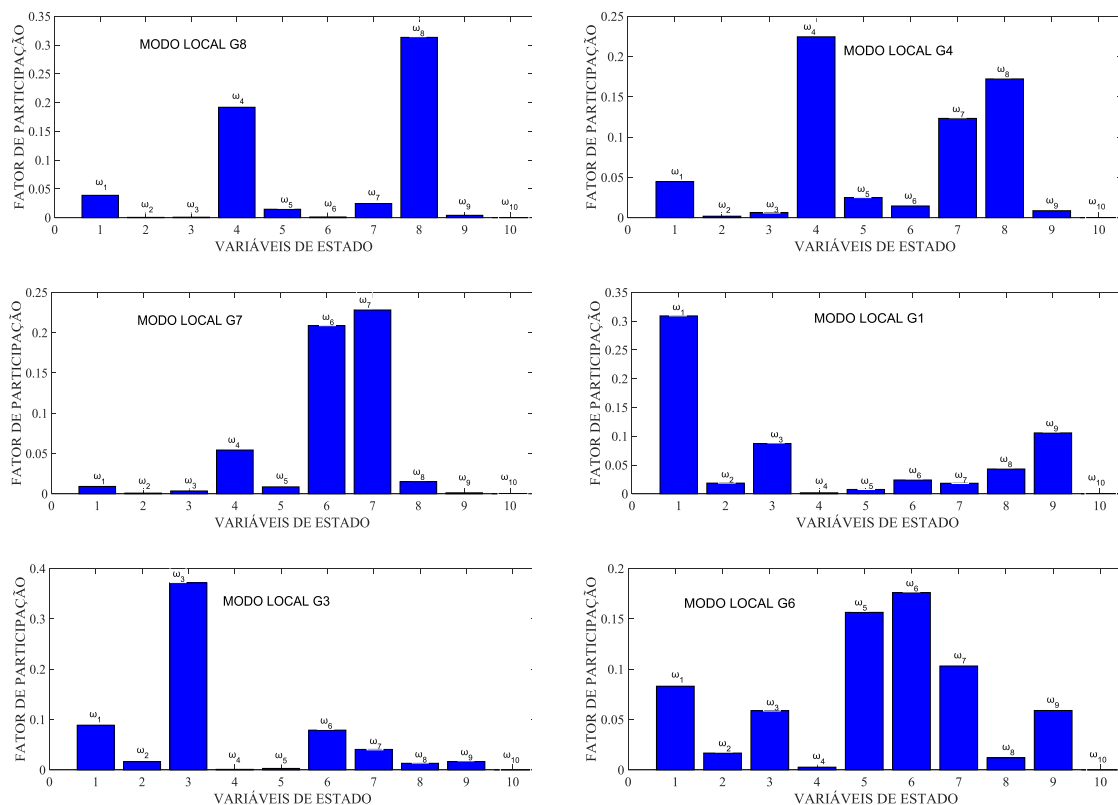
O afundamento da tensão no barramento 12, 15, 33, 36 e 37 tem um valor menor que 0.95. É importante mencionar que o sistema carece de compensação nas barras com queda de tensão.

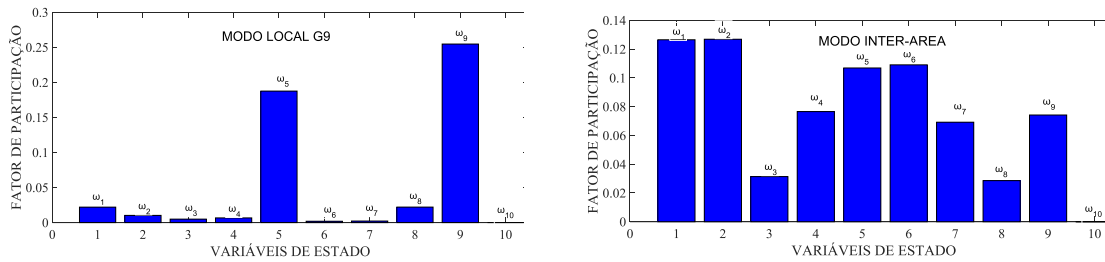
Para resolver esse problema foi proposta a atuação do IPFC no controle de fluxo de potência com o controlador PI (controlador proporcional integral). Portanto, o IPFC ao efetuar o correto controle de fluxos de potências espera-se corrigir o problema de tensão nas barras em questão.

### 6.2.1 Localização dos dispositivos de controle ESP e IPFC-POD

Os controladores encontram-se instalados nos geradores 1,3,4,6,7,8 e 9, respectivamente. O controlador POD é instalado no barramento 37 por fatores técnicos apresentados na figura 42.

**Figura 44 - Factor de Participação no Sistema New England**





Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a figura 44, é possível determinar em quais geradores do sistema New England serão alocados esses dispositivos. Ao analisar os fatores de participação dos autovalores do sistema teste pode se concluir que os geradores 1,3,4,6,7,8 e 9 possuem maior participação nos modos locais. Pode-se observar no fator de participação do modo inter-área que o gerador 10 oscila em relação aos demais geradores. Este fato é devido que a área 1 (conhecida como sistema New York) representa um conjunto de geradores o qual é caracterizada pelo gerador 10.

## 6.2.2 Influência do IPFC no controle da tensão no sistema New England

A tabela 12 apresenta os parâmetros do controlador PI no caso do sistema New England. Os parâmetros deste controlador PI foram considerados fixos (FORTES 2016). É preciso mencionar que tais parâmetros podem ser modificados com a utilização de alguma meta-heurística e, portanto, tendo a influência na estabilidade do sistema teste.

**Tabela 12 - Parâmetros do controlador IPFC-PI**

Ganhos			Tempos(s)		
$K_{p1}$	$K_{p2}$	$K_{p3}$	$T_{1i}$	$T_{2i}$	$T_{3i}$
0.6553	0.6218	0.7020	0.009	0.0036	0.0079

Fonte: Elaborado pelo autor.

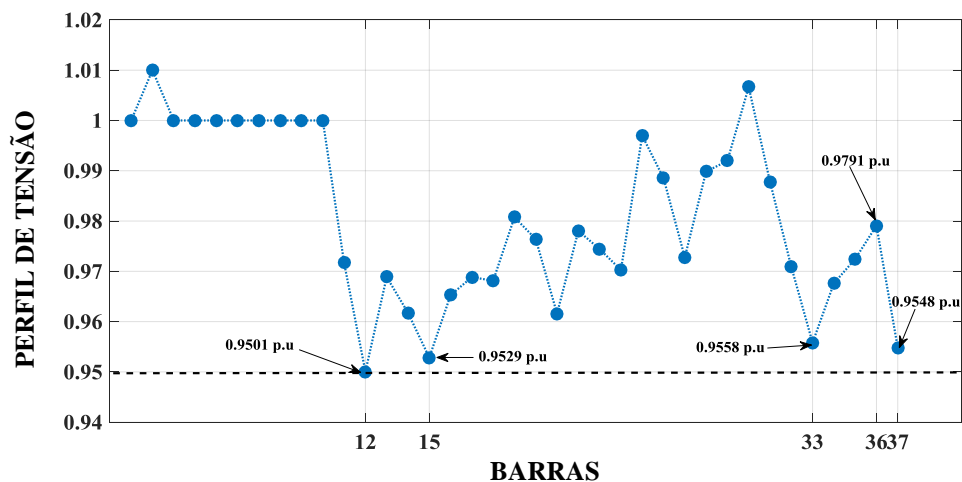
Com a atuação do IPFC na barra 37, exerceu-se o controle sobre os fluxos de potência ativa e reativa e, assim, os parâmetros das fontes de tensão controladas foram modulados como se apresenta na tabela 13.

**Tabela 13 - Paramtros do IPFC-PI com atuação no controle de fluxo**

$V_{pj}$	$V_{pk}$	$V_{qj}$	$V_{qk}$
-0.2942	-0.3057	-0.0490	0.0055

Fonte: Elaborado pelo autor.

A correção do problema de afundamento de tensão é feita com as seguintes especificações nas variáveis do controlador PI. Na linha FB1-34 a potência de referência ativa fica em -410.51 MW e a potência de referência reativa em -55.81 MVAR. Na linha FB2-36 a potência de referência ativa fica em -316.71 MW. Vale destacar que o IPFC realiza uma transferência no fluxo de potência ativa entre as linhas do SEP por meio dos conversores e o restante do sistema. Após a atuação do IPFC-PI, um novo perfil de tensão é encontrando, ver figura 45. Pode-se concluir que a atuação do IPFC melhorou as tensões nas barras, ficando todas dentro dos limites de valores aceitáveis ( $\pm 5\%$  do valor nominal).

**Figura 45 - Perfil de tensão no sistema New England com a atuação do IPFC-PI**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se concluir que o controle do IPFC-PI resolveu a queda de tensão nas barras 12,15,33,36 e 37, além disso, as tensões nos barramentos vizinhos foram melhoradas. Porém, observe-se na tabela 14 que o Sistema apresenta ainda sete modos locais e um modo inter-área.

**Tabela 14 - Autovalores do sistema com atuação do IPFC sem os controladores suplementares EPSs e POD**

Sem Atuação do IPFC sem ESP e POD
-----------------------------------

Modo	$\sigma_i \pm j * \omega_i$	$\xi_i$	$\omega_{ni} (Hz)$
$\lambda_1$	$-0.2331 \pm j8.3126$	0.0280	1.3235
$\lambda_2$	$-0.1792 \pm j8.2571$	0.0217	1.3145
$\lambda_3$	$-0.2645 \pm j8.0985$	0.0326	1.2896
$\lambda_4$	$0.2252 \pm j6.9281$	-0.0325	1.1032
$\lambda_5$	$-0.3031 \pm j6.7270$	0.0450	1.0717
$\lambda_6$	$0.0238 \pm j6.4223$	-0.0037	1.0222
$\lambda_7$	$0.2435 \pm j5.9257$	-0.0411	0.09439
$\lambda_8$	$-0.0250 \pm j4.0133$	0.0062	0.6388

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.2.3 Restrições dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESP e POD

As constantes de tempo no bloco de avanço e atraso e o ganho do ESP e o POD para o sistema New England ficam expressos dentro das restrições (155) e (156).

$$0.1 \leq T_{1\_PSS} \leq 1.5, 0.01 \leq T_{2\_PSS} \leq 0.1, 1 \leq K_{PSS} \leq 10 \quad (155)$$

$$0.1 \leq T_{1\_POD} \leq 0.4, 0.1 \leq T_{2\_POD} \leq 0.4, 0.1 \leq K_{POD} \leq 0.4 \quad (156)$$

É importante destacar que as restrições das variáveis em questão dependem da natureza do sistema teste a se avaliar. As modificações das mesmas podem gerar soluções aceitáveis ou limitar a busca da solução.

O indivíduo ou cromossomo do AGAH no caso do sistema New England fica representado na figura 46. O cromossomo contém 24 genes, 21 genes correspondentes aos ESP e três genes do IPFC-POD.

**Figura 46 Cromossomo do sistema New England**

$T_1$	$T_2$	$K_{PSS}$	.....	$T_1$	$T_2$	$K_{PSS}$	$T_1$	$T_2$	$K_{POD}$
-------	-------	-----------	-------	-------	-------	-----------	-------	-------	-----------

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 6.2.4 Performance dos algoritmos AGAH e AG no sistema New England

No caso do sistema New England considera-se o amortecimento desejado maior do que 10 por cento e menor do que 30 por cento. Avaliou-se o desempenho do AGAH e o GA em 20 testes efetuados e, assim, obtém-se o tempo de convergência, o erro da distância do amortecimento, o número de gerações até achar a solução. A diferença deste sistema teste com o Simétrico de Duas Áreas faz que fique mais complexo atingir os amortecimentos desejados. A complexidade tem a ver com o número de ESP instalados no sistema e o POD, o ajuste coordenado se torna sensível e, portanto, mais difícil a se resolver.

A tabela 15 apresenta os resultados obtidos pelos algoritmos AGAH e AG. Pode-se observar que o AGAH e o AG tiveram um tempo bem parecido, porém, o tempo médio de convergência do AGAH é melhor em comparação ao AG.

Outro aspecto a se observar é a questão das gerações que foram maiores em comparação com o sistema Simétrico de Duas Áreas, sendo na média 10 gerações e o máximo até 26 gerações. Tais valores são compreensíveis devido ao fato de que o sistema New England é mais complexo a se resolver.

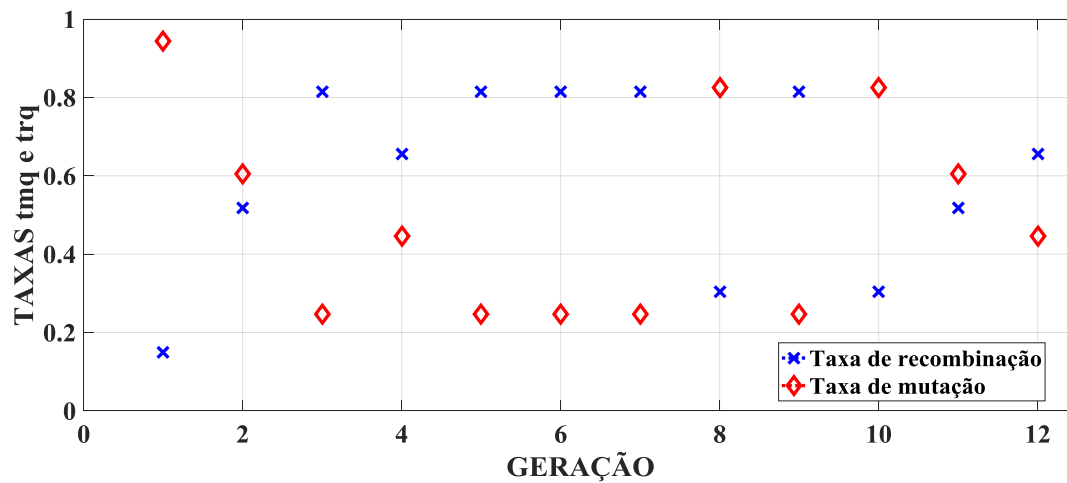
**Tabela 15 - Comparação de desempenho do AG Adaptativo e o AG Clássico**

Algoritmo	Amortecimento desejado	Tempo (s)			O erro distância			Geração		
		Avg	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	Max
AGAH	$0.10 < \xi_{\min}$	101.76	36.23	289.28	0.404	0.263	0.561	10.2	3	26
AG	$0.10 < \xi_{\min}$	110.87	21.90	240.63	0.375	0.209	0.550	11.7	3	26

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 47 descreve o comportamento das taxas de recombinação e mutação. Observe-se que as taxas são calibradas dinamicamente ao longo da geração 1 até a 12. As taxas se adaptam em cada geração, portanto pode-se garantir a diversificação da população. A estrutura do algoritmo faz que as taxas se adaptem segundo a diversificação da população e, assim, pode-se gerar novas soluções.

**Figura 47 - Taxas de recombinação e mutação ao longo das gerações-caso New England**

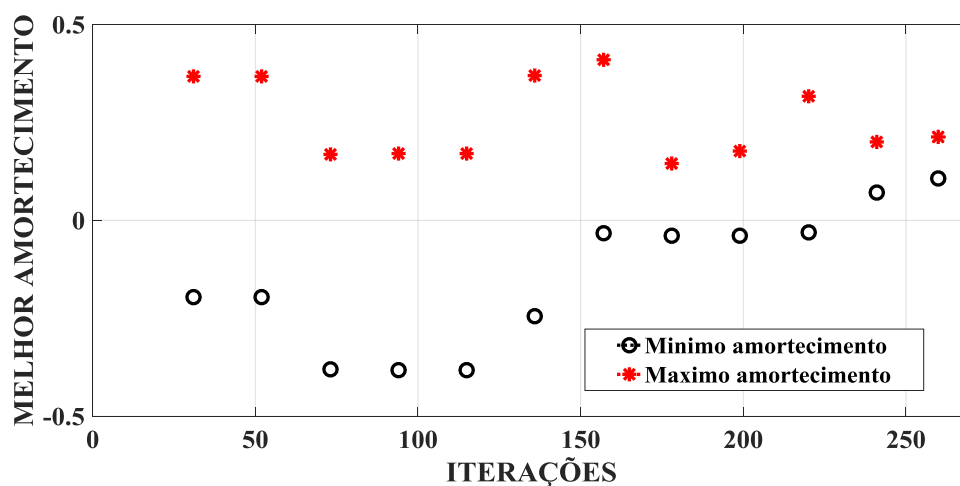


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 48 pode-se observar que o amortecimento desejado é maior que 10 por cento. Os valores em asterisco é o máximo amortecimento e aqueles em círculo representam o mínimo amortecimento numa geração.

Apesar de que os valores iniciais de amortecimento máximo e mínimo ficam afastados do amortecimento desejado. Vale destacar a efetividade do algoritmo sem importar que a primeira geração foi formada aleatoriamente e seus valores ficam evoluindo até alcançar o amortecimento desejado.

**Figura 48 - Evolução dos amortecimento , amortecimento maior que 10 por cento**

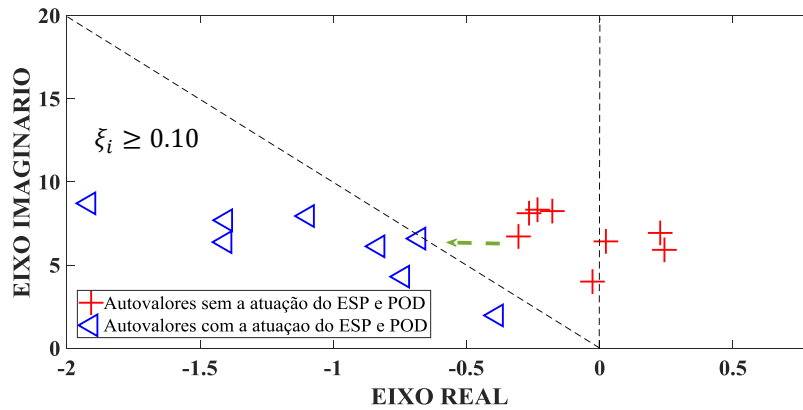


Fonte: Elaborado pelo autor.



A figura 49 descreve os valores iniciais dos autovalores movimentando-se na região dos autovalores com o amortecimento maior que 10 por cento. Os valores finais dos autovalores ficam na região desejada.

**Figura 49 - Autovalores do sistema New England com e sem os controladores suplementares de amortecimento**



A tabela 16 apresenta os autovalores com o amortecimento maior que 10 por cento tanto para os modos locais como para o modo inter-área.

**Tabela 16 - Autovalores do sistema com atuação do IPFC e os controladores suplementares EPSs e POD**

Com Atuação do IPFC, ESP e POD			
Modo	$\sigma_i \pm j * \omega_i$	$\xi_i$	$\omega_{ni}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-1.9169 \pm j8.7052$	0.215	1.418
$\lambda_2$	$-1.0954 \pm j7.9658$	0.136	1.279
$\lambda_3$	$-1.4026 \pm j7.6829$	0.179	1.243
$\lambda_4$	$-0.6776 \pm j6.5821$	0.102	1.053
$\lambda_5$	$-1.4026 \pm j6.3596$	0.215	1.036
$\lambda_6$	$-0.8321 \pm j6.1412$	0.134	0.986
$\lambda_7$	$-0.7397 \pm j4.2986$	0.169	0.694
$\lambda_8$	$-0.3863 \pm j1.9757$	0.191	0.320

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 17 apresenta os parâmetros dos controladores ESP e POD com o ajuste coordenado realizado pelo AGAH.

**Tabela 17 - Ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares ESP e POD**

Parâmetros ESP e POD	$10\% \leq \xi_{min}$							
	ESP 1	ESP 3	ESP 4	ESP 6	ESP 7	ESP 8	ESP 9	POD
$T_1 = T_3$ (s)	<b>1.2818</b>	<b>0.5468</b>	<b>0.5120</b>	<b>0.6881</b>	<b>0.2567</b>	<b>0.5386</b>	<b>0.6600</b>	<b>0.2109</b>
$T_2 = T_4$ (s)	<b>0.0280</b>	<b>0.0301</b>	<b>0.0364</b>	<b>0.0606</b>	<b>0.0927</b>	<b>0.0440</b>	<b>0.0345</b>	<b>0.3340</b>
$K$ (p.u)	<b>6.4813</b>	<b>6.0437</b>	<b>5.8266</b>	<b>6.9188</b>	<b>3.7216</b>	<b>3.4926</b>	<b>1.9000</b>	<b>0.1300</b>

### 6.3 CONCLUSOES DO CAPITULO

Neste Capítulo foram aplicadas duas técnicas de otimização (AGAH e o AG), apresentadas no Capítulo 5, para realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e IPFC-POD. Utilizou-se os sistemas testes Simétrico de Duas Áreas e o sistema New England com o objetivo de avaliar o algoritmo proposto.

O foco principal deste Capítulo foi validar a técnica apresentada no Capítulo 5, denominada Algoritmo Genético Adaptativo com Hiper-mutação, a partir da comparação do seu desempenho com o AG Clássico. Vale destacar que AGAH fornece melhor tempo de convergência e fica bem mais perto da solução desejada.

Para validar a técnica de otimização (AGAH) proposta neste trabalho, foram realizadas simulações nos sistemas testes, sendo efetuadas da seguinte forma: 100 testes, considerando a faixa de amortecimento maior que 15% no caso do Simétrico de Duas Áreas e 100 testes para o sistema New England com o amortecimento maior que 10%.

Desta forma, o AGAH tem sua atuação validada no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (ESPs e IPFC-POD) e, conseqüentemente, pode ser utilizado como ferramenta no estudo da análise da estabilidade a pequenas perturbações.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma metaheurística para o estudo da análise de estabilidade para um sistema elétrico de potência quando sujeito a pequenas perturbações. Para isso foi utilizado o Modelo de Sensibilidade de Corrente para um sistema multimaquinas que é fundamentado no atendimento instantâneo do balanço nodal de correntes em cada barra.

No Capítulo 3 encontra-se a modelagem matemática do dispositivo IPFC como a injeção de potência nas barras de instalação e as equações diferenciais linearizadas do controlador PI. Forma-se a matriz Jacobiana do Fluxo de Potência expandido ao se considerar as injeções de potência do IPFC e as equações do controlar PI. No Capítulo 4, apresenta-se a modelagem do dispositivo IPFC como injeção de corrente, sendo assim, o IPFC é inserido ao MSC. O controlador do fluxo de potência PI e os controladores suplementares de amortecimento ESP e POD foram incluídos no MSC. Este equacionamento possibilita realizar a análise da estabilidade do SEP modelado pelo MSC e considerando a atuação do IPFC-PI, ESP e POD.

No Capítulo 5 apresenta-se a técnica de otimização AGAH capaz de ajustar em forma coordenada os parâmetros dos controladores ESPs e IPFC-POD para se obter um amortecimento desejado para oscilações eletromecânicas do SEP.

As simulações do trabalho, realizadas a partir do equacionamento matemático do SEP no Modelo de Sensibilidade de Corrente, utilizaram o sistema teste Simétrico de Duas Áreas e o sistema New England. Observou-se os autovalores do sistema sem a atuação dos controladores suplementares de amortecimento, apresentando amortecimentos fraco ou até negativos nos modos locais e inter-área nos sistemas testes. Por outro lado, com a atuação do IPFC e os controladores ESP e POD, foi inserido amortecimento adicional nos modos locais e inter-área aos sistemas testes pelo ajuste do AGAH.

Foi constatada por meio destas análises que o AGAH adaptativo apresenta um melhor desempenho ao se comparar com o AG clássico, se comparado com o sistema simétrico de duas áreas. Porém, o AGAH e o AG têm resultados similares quando se analisa um sistema de maior porte como o sistema New England. Apesar de terem resultados parecidos o AGAH tem melhor tempo de convergência.

Em conclusão, pelo exposto neste trabalho e após as considerações aqui apresentadas, a estrutura do modelo de injeção de potência do dispositivo o IPFC no sistema elétrico de potência e o sistema de controle baseados nos controladores PI, apresentaram resultados satisfatórios no perfil de tensão, portanto, realizou-se o correto gerenciamento das potências ativas e reativas.

Além disso, o conjunto IPFC-POD melhorou os amortecimentos eletromecânicos dos modos locais tanto quanto dos modos inter-área nos sistemas testes em análises e, assim, aumentou-se consideravelmente a estabilidade a pequenas perturbações dos sistemas Simétrico de Duas Áreas e 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 resultados obtidos com o Algoritmo Genético Adaptativo com Hiper-mutação no ajuste dos parâmetros dos controlares ESPs e do conjunto IPFC-POD, fato este que o credencia como ferramenta na análise da estabilidade de SEP quando sujeito a pequenas perturbações.

## 7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta o Modelo de Sensibilidade de Corrente 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 potência inserido na matriz Jacobiana no fluxo de potência e o controlador PI, teve desempenho satisfatório no correto gerenciamento dos fluxos de potência, e assim, melhorou-se o perfil da tensão do SEP. O Interline Power Flow Controller modelado por injeção de corrente, os controladores suplementares de amortecimento ESP e POD tem influência positiva no amortecimento dos modos oscilatórios (modo local e modo inter-área) quando ajustados em forma correta. A instalação do ESP e o POD no sistema, apresentaram bons resultados para mitigar amortecimentos fracos ou negativos dos sistemas testes utilizados neste trabalho.

O Algoritmo Genético Adaptativo com Hiper-mutação 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:

- Neste trabalho considerou-se o método de Newton-Raphson para se obter o fluxo de potência no SEP. Uma alternativa interessante entre outras, seria implementar um modelo completo de fluxos de potência ótimo, considerando a inclusão do Interline Power Flow Controller e dispositivos FACTS em geral, e verificar a partir de então como modelos de fluxos de potências ótimos podem atuar na análise da estabilidade a pequenas perturbações.
- As tecnologias de armazenamento de energia elétrica tais como bobinas superconductoras de armazenamento de energia (Superconducting Magnetic Energy Storage –SMES) podem oferecer compensação de potência flexíveis e rápidos e, portanto, fornece estabilidade na rede elétrica e qualidade energética. Uma proposta é a combinação do conjunto dos dispositivos FACTS e os sistemas SMES com o intuito de garantir a confiabilidade e a estabilidade no SEP.
- O uso de técnicas de otimização para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores no gerenciamento de fluxo de potência e os controladores suplementares de amortecimento poderiam se adaptar a restrições no mercado desregulado no SEP segundo o contrato de potência, e assim, obter resultados mais próximos a realidade na análise de estabilidade no SEP.
- Outra proposta tem a ver com a consideração de fontes renováveis de geração de energia no modelo proposto neste trabalho, o análise da estabilidade ao se considerar novos cenários de geração renovável abre novos horizontes para identificar os modos eletromecânicos de oscilação e a identificação da coerência entre geradores e áreas no SEP.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- ACHA, E.; AGELLIDIS, V. G.; ANAYA-LARA, O.; MILLE, T. J. **Power electronic control in electrical systems**. Sri Lanka: Newnes, 2002. 443 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.
- 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.
- 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).
- CRUZ, H. O.; LEÃO F. B. Optimal placement fo fault indicator using adaptive genetic algorithm. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2017, Chicago. Proceedings [...]* Pistacaway: IEEE, 2017. p. 1-5.
- DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, Pistacaway, v. 9, n. 2, p. 965–971, 1994.
- DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation Control. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Pistacaway, v. PAS-88, n. 4, p. 316–329, 1969.
- FORTES, E. V. **Aplicação do algoritmo genético de Chu-Beasley especializado no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares e dispositivo FACTS IPFC**. 2016. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.
- FORTES, E. V.; MACEDO, L. H.; ARAUJO, P. B.; ROMERO, R. A VNS algorithm for the design of supplementary damping controllers for small-signal stability analysis. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, London, v. 94, p. 41-56, 2018.
- FORTES, E. V.; MACEDO, L. H.; MARTINS, L. F. B.; MIOTTO, E. L. A fireworks metaheuristic for the design of PSS and TCSC-POD controllers for Small-Signal Stability Studies. *In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 12th, 2017, Mar Del Plata. Proceedings [...]* Mar Del Plata: Universidad Nacional de Mar Del Plata, 2017. p. 1-6.

FOGEL, D. An introduction to simulated evolutionary optimization. **IEEE Transactions on Neural Networks**, Piscataway, v. 5, n. 1, p. 3–14, Jan 1994.

FURINI, M. A. **Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — 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).

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.

GOLDBERG, D. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. [S. l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. 412 p. (Artificial Intelligence).

GOLDBERG, D. E. **The design of innovation**. Boston: Kluwer, 2002. 231 p.

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.

HASANVAND, H. ; B. BAKHSHIDEH ZAD ; B. MOZAFARI ; S. SOLEYMANI. Design of optimal power swing damping and fuzzy logic controller for SVC using improved Particle Swarm Optimization Algorithm. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATIONS AND INDUSTRIAL ELECTRONICS (ICCAIE), 2011, Penang. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2011. P. 172-177.

HINGORANI, N. G. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. **Proceedings of the IEEE**, Piscataway, v. 76, n 4, p. 481-482, 1988.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission 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. [S.l.]: MIT, 1992. 211 p. (Bradford book).

KOPCAK, I. **Uma plataforma unificada para análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência.** 2007. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2007.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control.** New York, NY: McGrawHill, 1994.

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, 1981.

LEÃO, F. B.; PEREIRA, R.; MANTOVANI, J. R. Fast fault section estimation in distribution control centers using adaptive genetic algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 63, p. 787-805, 2014.

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 em Engenharia Elétrica) - Faculdade em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 1992.

MARTINS, L. F. B.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MACEDO, L. H. Design of the PI-UPFC-POD and PSS Damping Controllers Using an Artificial Bee Colony Algorithm. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Heidelberg, v. 28, n. 6, p. 762-773, 2017.

MARTINS, L. F. B.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MIOTTO, E. L.; GAMINO, B. R. Design of the PSSs, PI-UPFC and PI-UPFC-POD controllers using the Firefly Algorithm. *In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION*, 12th, 2017, Mar Del Plata. **Proceedings [...]** Mar Del Plata: Universidad Nacional de Mar Del Plata, 2017. p. 1-7.

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 em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.

MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V. **Bacterial foraging optimization algorithm used to adjust the parameters of power system stabilizers and thyristor controlled series capacitor-power oscillation damping controller.** *In: 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. L., ARAUJO, P. B., FORTES, E. V., GAMINO, B. R., MARTINS, L. F. B., Coordinated Tuning of the Parameters of PSS and POD controllers using Bio-inspired Algorithms. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Piscataway, v. 54, n. 4, p. 3845-3857, 2018.



MIOTTO, E. L., ARAUJO, P. B., FORTES, E. V., MARTINS, L. F. B., GAMINO, B. R. Coordinated tuning of the parameters of PSS and POD controllers using the BAT Algorithm. *In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION*, 12th, 2017, Mar Del Plata. **Proceedings** [...] Mar Del Plata: Universidad Nacional de Mar Del Plata, 2017. p. 1-7.

MIOTTO, E. L., ARAUJO, P. B., ANDRE TAKAHASHI, L. M., FORTES, E. V., Tuning of the parameters of damping controllers for power electrical systems using Bioinspired Algorithms. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON)*, 13th, 2018, São Paulo. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2018. p. 844-851.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms: complex adaptive systems**. [S.l.]: Bradford Books, 1998. (A Bradford book).

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. 164 p.

MOUSSA, H. A. M.; YU, Y. Dynamic Interaction of Multimachine Power System and Excitation Control. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, Piscataway, v. 93, n. 4, p. 1150–1158, 1974.

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.

PÁDUA JÚNIOR, C. R.; TAKAHASHI, A. L. M.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de Kirchhoff para correntes. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE SBAI 2013*, Fortaleza - CE. **Anais** [...] Fortaleza, 2013. p. 1-6.

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 em Engenharia Elétrica) - 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.

SAUER, P. W.; PAI, M. A. **Power system dynamics and stability**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

SURESH, V.; SIVANAGARAJU, S.; RAVINDRABABU, M.; SRIKUMAR, K. Power Flow Analysis in the presence of Power Injection Model of IPFC. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, CONTROL, ENERGY AND SYSTEMS (ACES)*, 2014, Hooghy. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2014. p. 1-6.

TAKAHASHI, A. L. M., FORTES, E. V., ARAUJO, P. B., MIOTTO, E. L., MARTINS, L. F. B. A Current sensitivity model for power systems stability studies. *In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON)*, 13th, 2018, São Paulo. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2018.

TAKAHASHI, A. L. M.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; TECHATHANA, 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*, 2005, Singapore. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2005. p. 1-6.

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.

VALLE, D.; ARAUJO, P. B., 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. B. 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, 2015.

VALLE, D. B. **A Influência do IPFC na estabilidade de pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — 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 em Engenharia Elétrica) — 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**, Netherlands, v. 79, n. 8, p. 1247-1254, 2009.

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.

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**, London, v. 150, n. 3, p. 268–274, 2003.

ZHANG, J.; YOKOYAMA, A. Optimal Power Flow Control for Congestion Management by Interline Power Flow Controller (IPFC). *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2006, Chongqing. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2006. p.

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. p. 1-6.

## ANEXO A – DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

Nas Tabelas 12 a Tabela 15 são reproduzidos os dados do Sistema de Duas Áreas, cujos dados podem ser encontrados em Sauer e Pai (1998).

**Tabela 18-Dados das linhas de transmissão do sistema Simétrico de Duas Áreas.**

Barrainicial	Barrafinal	$r$ (p.u.)	$x$ (p.u.)	$b$ (p.u.)
1	5	0,001	0,012	0
2	6	0,001	0,012	0
7	8	0,022	0,22	0,33
7	8	0,022	0,22	0,33
7	8	0,022	0,22	0,33
6	7	0,002	0,02	0,03
6	7	0,002	0,02	0,03
4	10	0,001	0,012	0
3	9	0,001	0,012	0
9	8	0,002	0,02	0,03
9	8	0,002	0,02	0,03
5	6	0,005	0,05	0,075
5	6	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

**Tabela 19-Dados dos geradores síncronos do sistema Simétrico de Duas Áreas.**

Gerador	$x'_d$ (p.u.)	$x_q$ (p.u.)	$x_d$ (p.u.)	$T_{d0}$ (p.u.)	$H$ (s)	$D$ (p.u.)
G1	0,033	0,19	0,2	8	54	0,01
G2	0,033	0,19	0,2	8	54	0,01
G3	0,033	0,19	0,2	8	63	0,01
G4	0,033	0,19	0,2	8	63	0,01

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

**Tabela 20 -Dados dos reguladores automáticos de tensão do sistema Simétrico de Duas Áreas.**

<b>Gerador</b>	G1	G2	G3	G4
<b><i>Ke</i> (p.u.)</b>	200	200	200	200
<b><i>Te</i> (s)</b>	0,001	0,001	0,001	0,001

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

**Tabela 21-Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema Simétrico de Duas Áreas.**

<b>Barra</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tensão (p.u.)</b>	<b>Fase (°)</b>	<b>P<sub>G</sub> (MW)</b>	<b>Q<sub>G</sub> (MVar)</b>	<b>P<sub>L</sub> (MW)</b>	<b>Q<sub>L</sub>(MVar)</b>
1	2	1.000	8.683	700.00	195.97	0.00	0.00
2	2	1.000	-2.088	700.00	505.25	0.00	0.00
3	2	1.000	-11.924	700.00	601.55	0.00	0.00
4	3	1.000	0*	743.69	236.08	0.00	0.00
5	1	0.973	3.846	-	-	0.00	0.00
6	1	0.936	-6.928	-	-	0.00	0.00
7	1	0.886	-16.162	-	-	1159.00	212.00
8	1	0.865	-26.575	-	-	1575.00	288.00
9	1	0.924	-16.765	-	-	0.00	0.00
10	1	0.968	-5.149	-	-	0.00	0.00

### ANEXO B – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND

Nas Tabelas 42 a 45 são reproduzidos os dados do Sistema *New England*, cujos dados podem ser encontrados em Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 22 – Dados das linhas de transmissão do sistema *New England*.

Barra Inicial	Barra final	$r$ (p.u.)	$x$ (p.u.)	$b$ (p.u.)	Barra inicial	Barra final	$r$ (p.u.)	$x$ (p.u.)	$b$ (p.u.)
30	31	0,0035	0,0411	0,6987	16	24	0,0003	0,0059	0,0680
30	10	0,0010	0,0250	0,7500	17	18	0,0007	0,0082	0,1319
31	32	0,0013	0,0151	0,2572	17	27	0,0013	0,0173	0,3216
31	25	0,0070	0,0086	0,1406	21	22	0,0008	0,0140	0,2565
32	33	0,0013	0,0213	0,2214	22	23	0,0006	0,0096	0,1846
32	18	0,0011	0,0133	0,2138	23	24	0,0022	0,0350	0,3610
33	34	0,0008	0,0128	0,1342	25	26	0,0032	0,0323	0,5130
33	14	0,0008	0,0129	0,1382	26	27	0,0014	0,0147	0,2396
34	35	0,0002	0,0026	0,0434	26	28	0,0043	0,0474	0,7802
37	34	0,0008	0,0112	0,1476	26	29	0,0057	0,0625	1,0290
35	36	0,0006	0,0092	0,1130	28	29	0,0014	0,0151	0,2490
35	11	0,0007	0,0082	0,1389	12	11	0,0016	0,0435	0,0000
36	37	0,0004	0,0046	0,0780	12	13	0,0016	0,0435	0,0000
37	F <sub>1</sub>	0,0000	0,0010	0,0000	35	2	0,0000	0,0250	0,0000
F <sub>1</sub>	38	0,0023	0,0363	0,3804	39	3	0,0000	0,0200	0,0000
38	10	0,0010	0,0250	1,2000	19	4	0,0007	0,0142	0,0000
39	11	0,0004	0,0043	0,0729	20	5	0,0009	0,0180	0,0000
39	13	0,0004	0,0043	0,0729	22	6	0,0000	0,0143	0,0000
13	14	0,0009	0,0101	0,1723	23	7	0,0005	0,0272	0,0000

14	15	0,001 8	0,0217	0,3660	25	8	0,000 6	0,023 2	0,000 0
15	16	0,000 9	0,0094	0,1710	31	1	0,000 0	0,018 1	0,000 0
16	17	0,000 7	0,0089	0,1342	29	9	0,000 8	0,015 6	0,000 0
16	19	0,001 6	0,0195	0,3040	19	20	0,000 7	0,013 8	0,000 0
16	21	0,000 8	0,0135	0,2548					

Fonte: Adaptado de Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 23 – Dados dos geradores síncronos do sistema *New England*.

Gerador	$x'_d(\text{p.u.})$	$x_q(\text{p.u.})$	$x_d(\text{p.u.})$	$T_{d0}(\text{p.u.})$	$H(\text{s})$	$D(\text{p.u.})$
G1	0,0310	0,0609	0,1000	10,2	42,0	4,00
G2	0,0697	0,2820	0,2950	6,56	30,3	9,75
G3	0,0531	0,2370	0,2495	5,70	35,8	10,0
G4	0,0436	0,2580	0,2620	6,56	28,6	10,0
G5	0,1320	0,6200	0,6700	5,40	26,0	3,00
G6	0,0500	0,2410	0,2540	7,30	34,8	10,0
G7	0,0490	0,2920	0,2950	5,66	26,4	8,00
G8	0,0570	0,2800	0,2900	6,70	24,3	9,00
G9	0,0570	0,2050	0,2106	4,79	34,5	14,0
G10	0,0001	1,00E-10	1,00E-10	7,00	1,0E+09	10,0

Fonte: Adaptado de Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 24 – Dados dos reguladores automáticos de tensão (Sistema de Duas Áreas).

Gerador	G1	G2	G3	G4	G4	G6	G7	G8	G9	G10
$K_e(\text{pu})$	5,00 0	6,20 0	5,00 0	5,00 0	40,0 0	5,00 0	40,0 0	5,00 0	40,0 0	0,00 1
$T_e(\text{s})$	0,06	0,05	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	9999

Fonte: Adaptado de Araujo e Zanetta (2001).

Tabela 25 – Dados das barras e carregamento para o fluxo de potência convergido do sistema *New England*.

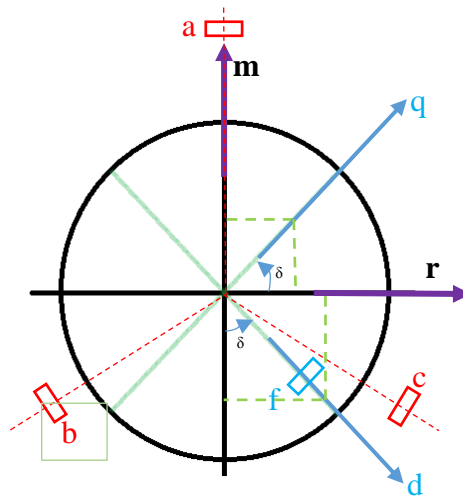
Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Fase (°)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVar)
1	2	1,0000	-3,35	250	88,12	0	0
2	1	1,0000	0,00	552,58	239,29	9	5
3	2	1,0000	2,30	650	239,99	0	0
4	2	1,0000	4,50	632	141,94	0	0
5	2	1,0000	3,60	508	133,09	0	0
6	2	1,0000	6,50	650	194,56	0	0
7	2	1,0000	9,68	560	132,99	0	0

8	2	1,0000	2,72	540	37,78	0	0
9	2	1,0000	8,66	830	66,73	0	0
10	2	1,0000	-10,7	1000	174,29	1104	250
11	3	0,9561	-6,41	0	0	0	0
12	3	0,9357	-6,39	0	0	8	88
13	3	0,9563	-6,25	0	0	0	0
14	3	0,9500	-8,06	0	0	0	0
15	3	0,9466	-8,35	0	0	320	153
16	3	0,9614	-6,65	0	0	329	32
17	3	0,9648	-7,87	0	0	0	0
18	3	0,9634	-8,87	0	0	158	30
19	3	0,9794	-0,70	0	0	0	0
20	3	0,9757	-1,71	0	0	628	103
21	3	0,9589	-3,99	0	0	274	115
22	3	0,9766	1,03	0	0	0	0
23	3	0,9729	0,71	0	0	275	85
24	3	0,9667	-6,56	0	0	309	-92
25	3	0,9959	-4,49	0	0	224	48
26	3	0,9868	-5,84	0	0	139	17
27	3	0,9701	-8,08	0	0	281	76
28	3	0,9890	-1,90	0	0	206	28
29	3	0,9914	1,19	0	0	284	27
30	3	1,0040	-8,98	0	0	0	0
31	3	0,9851	-5,98	0	0	0	0
32	3	0,9652	-9,22	0	0	322	2
33	3	0,9423	-10,23	0	0	500	184
34	3	0,9480	-8,98	0	0	0	0
35	3	0,9512	-8,21	0	0	0	0
36	3	0,9400	-10,68	0	0	233	84
37	3	0,9391	-11,24	0	0	522	176
38	3	0,9920	-10,92	0	0	0	0
39	3	0,9608	-5,47	0	0	0	0
F <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Dados da pesquisa.



## APÊNDICE A – TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS



O componente no eixo real e imaginário das grandezas do eixo (d,q) :

$$r = d_r + q_r \quad (157a)$$

$$m = -d_m + q_m \quad (157b)$$

Das relaciones trigonométricas tem-se:

$$q_r = q \cos \delta \quad (157c)$$

$$d_m = d \cos \delta \quad (157d)$$

$$q_m = q \sin \delta \quad (157e)$$

$$d_r = d \sin \delta \quad (157f)$$

$$r = d \sin \delta + q \cos \delta \quad (158a)$$

$$m = -d \cos \delta + q \sin \delta \quad (158b)$$

Finalmente na sua forma matricial, obtém-se a matriz de transformação de coordenadas:

$$\begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (158c)$$

$$T = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (159)$$

T representa a matriz de Hermite.

## APÊNDICE B – COEFICIENTES DO MSC

Este apêndice fornece as expressões dos coeficientes de sensibilidade de corrente para o sistema multimáquinas descrito no Capítulo 2.

### B.1 COEFICIENTES DOS GERADORES

#### B.1.1 Coeficientes reais

$$R1_{gk} = \frac{\partial I_{rgk}}{\partial \delta_k} = \frac{E'_{qk} \cos \delta_k}{x'_{dk}} + \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \cos(2\delta_k - \theta_k) \quad (160a)$$

$$R2_{gk} = \frac{\partial I_{rgk}}{\partial E'_{qk}} = \frac{\sin \delta_k}{x'_{dk}} \quad (160b)$$

$$R3_{gk} = \frac{\partial I_{rgk}}{\partial \theta_k} = - \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \sin \delta_k}{x'_{dk}} - \frac{V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \cos(\delta_k)}{x_{qk}} \quad (160c)$$

$$R4_{gk} = \frac{\partial I_{rgk}}{\partial V_k} = - \frac{\sin \delta_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{\cos(\delta_k) \sin(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (160d)$$

#### B.1.2 Coeficientes imaginários

$$M1_{gk} = \frac{\partial I_{mgk}}{\partial \delta_k} = \frac{E'_{qk} \sin \delta_k}{x'_{dk}} + \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \sin(2\delta_k - \theta_k) \quad (161a)$$

$$M2_{gk} = \frac{\partial I_{mgk}}{\partial E'_{qk}} = - \frac{\cos \delta_k}{x'_{dk}} \quad (161b)$$

$$M3_{gk} = \frac{\partial I_{mgk}}{\partial \theta_k} = \frac{V_k \cos(\delta_k) \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{V_k \sin \delta_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (161c)$$

$$M4_{gk} = \frac{\partial I_{mgk}}{\partial V_k} = \frac{\cos \delta_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{\sin \delta_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (161d)$$

## B.2 COEFICIENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

### B.2.1 Coeficientes reais

$$R1_{kj} = \frac{\partial I_{rkj}}{\partial \theta_k} = - \frac{V_k(r_{kj} \sin \theta_k - x_{kj} \cos \theta_k)}{|Z_{kj}|^2} \quad (162a)$$

$$R2_{kj} = \frac{\partial I_{rkj}}{\partial \theta_j} = \frac{V_j(r_{kj} \sin \theta_j - x_{kj} \cos \theta_j)}{|Z_{kj}|^2} \quad (162b)$$

$$R3_{kj} = \frac{\partial I_{rkj}}{\partial V_k} = \frac{(r_{kj} \cos \theta_k + x_{kj} \sin \theta_k)}{|Z_{kj}|^2} \quad (162c)$$

$$R4_{kj} = \frac{\partial I_{rkj}}{\partial V_j} = - \frac{(r_{kj} \cos \theta_j + x_{kj} \sin \theta_j)}{|Z_{kj}|^2} \quad (162d)$$

### B.2.2 Coeficientes imaginários

$$M1_{kj} = \frac{\partial I_{mkj}}{\partial \theta_k} = \frac{V_k(r_{kj} \cos \theta_k + x_{kj} \sin \theta_k)}{|Z_{kj}|^2} \quad (163a)$$

$$M2_{kj} = \frac{\partial I_{mkj}}{\partial \theta_j} = - \frac{V_j(r_{kj} \cos \theta_j + x_{kj} \sin \theta_j)}{|Z_{kj}|^2} \quad (163b)$$

$$M3_{kj} = \frac{\partial I_{mkj}}{\partial V_k} = \frac{(r_{kj} \sin \theta_k - x_{kj} \cos \theta_k)}{|Z_{kj}|^2} \quad (163c)$$

$$M4_{kj} = \frac{\partial I_{mkj}}{\partial V_j} = - \frac{(r_{kj} \sin \theta_j - x_{kj} \cos \theta_j)}{|Z_{kj}|^2} \quad (163d)$$

### B.3 COEFICIENTES DAS CARGAS

#### B.3.1 Coeficientes reais

$$R1_{Lk} = \frac{\partial I_{rLk}}{\partial \theta_k} = - \frac{(P_{Lk} \sin \theta_k - Q_{Lk} \cos \theta_k)}{V_k} \quad (164a)$$

$$R2_{Lk} = \frac{\partial I_{rLk}}{\partial V_k} = - \frac{(P_{Lk} \cos \theta_k + Q_{Lk} \sin \theta_k)}{(V_k)^2} \quad (164b)$$

$$R3_{Lk} = \frac{\partial I_{rLk}}{\partial P_{Lk}} = \frac{\cos \theta_k}{V_k} \quad (164c)$$

$$R4_{Lk} = \frac{\partial I_{rLk}}{\partial Q_{Lk}} = \frac{\sin \theta_k}{V_k} \quad (164d)$$

#### B.3.2 Coeficientes imaginários

$$M1_{Lk} = \frac{\partial I_{mLk}}{\partial \theta_k} = \frac{(P_{Lk} \cos \theta_k + Q_{Lk} \sin \theta_k)}{V_k} \quad (165a)$$

$$M2_{Lk} = \frac{\partial I_{mLk}}{\partial V_k} = - \frac{(P_{Lk} \sin \theta_k - Q_{Lk} \cos \theta_k)}{(V_k)^2} \quad (165b)$$

$$M3_{Lk} = \frac{\partial I_{mLk}}{\partial P_{Lk}} = \frac{\sin \theta_k}{V_k} \quad (165c)$$

$$M4_{Lk} = \frac{\partial I_{mLk}}{\partial Q_{Lk}} = - \frac{\cos \theta_k}{V_k} \quad (165d)$$

#### B.4 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO DO ROTOR

$$K1_k = \frac{\partial P_e}{\partial \delta_k} = \frac{V_k E'_{qk} \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k^2 \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \cos(2(\delta_k - \theta_k)) \quad (166a)$$

$$K2_k = \frac{\partial P_e}{\partial E'_{qk}} = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (166b)$$

$$K3_k = \frac{\partial P_e}{\partial \theta_k} = -\frac{V_k E'_{qk} \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - V_k^2 \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \cos(2(\delta_k - \theta_k)) = -K1_k \quad (166c)$$

$$K4_k = \frac{\partial P_e}{\partial V_k} = \frac{E'_{qk} \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k \left( \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \sin(2(\delta_k - \theta_k)) \quad (166d)$$

#### B.5 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DA TENSÃO INTERNA DA MÁQUINA SÍNCRONA

$$K5_k = -\frac{(x_{dk} - x'_{dk}) V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (167a)$$

$$K6_k = -\frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \quad (167b)$$

$$K7_k = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} = -K5_k \quad (167c)$$

$$K8_k = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (167d)$$

**APÊNDICE C – DERIVADAS DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS  
COMUNS NAS BARRAS DE INSTALAÇÃO DO IPFC**

**C.1 DERIVADAS DAS POTÊNCIAS ATIVAS NAS BARRAS  $I, J, K$**

$$P_i = -V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} - V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_i b_{ij} V_{pj} - V_i b_{ik} V_{pk}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{pj}} = -V_i b_{ij} \quad (168a)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial X_1} = 0 \quad (168b)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{qj}} = 0 \quad (168c)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial X_2} = 0 \quad (168d)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{pk}} = -V_i b_{ik} \quad (168e)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial X_3} = 0 \quad (168f)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (168g)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = +V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (168h)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = +V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (168i)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = -V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} - V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - \boxed{V_{pj} b_{ij} - V_{pk} b_{ik}} \quad (168j)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (168k)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_k} = -V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (168l)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{qk}} = 0 \quad (168m)$$

$$P_j = V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{pj}} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (169a)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial X_1} = 0 \quad (169b)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{qj}} = V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (169c)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial X_2} = 0 \quad (169d)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{pk}} = 0 \quad (169e)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial X_3} = 0 \quad (169f)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} = V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij}) \quad (169g)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} = -V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (-V_{qj} \cos \theta_{ij} + V_{pj} \sin \theta_{ij}) \quad (169h)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_k} = 0 \quad (169i)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_i} = V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (169j)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_j} = V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (169k)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_k} = 0 \quad (169l)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_{qk}} = 0 \quad (169m)$$

$$P_k = V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_k b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{pj}} = 0 \quad (170a)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial X_1} = 0 \quad (170b)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{qj}} = 0 \quad (170c)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial X_2} = 0 \quad (170d)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{pk}} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (170e)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial X_3} = 0 \quad (170f)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} = V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + \overset{\text{IPFC}}{V_k b_{ik} (V_{qk} \cos \theta_{ik} - V_{pk} \sin \theta_{ik})} \quad (170g)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_j} = 0 \quad (170h)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + \overset{\text{IPFC}}{V_k b_{ik} (-V_{qk} \cos \theta_{ik} + V_{pk} \sin \theta_{ik})} \quad (170i)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_i} = V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (171j)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_j} = 0 \quad (172k)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} + b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik}) \quad (172l)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{qk}} = V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (172m)$$



C.2 DERIVADAS DAS POTÊNCIAS RETIVAS NAS BARRAS  $I, J, K$ 

$$Q_i = -V_i^2 b_{ii} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - V_i b_{ij} V_{qj} - V_i b_{ik} V_{qk}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{pj}} = 0 \quad (173a)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial X_1} = 0 \quad (173b)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{qj}} = -V_i b_{ij} \quad (173c)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial X_2} = 0 \quad (173d)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{pk}} = 0 \quad (173e)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial X_3} = 0 \quad (173f)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (173g)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (173h)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (173i)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_{ii} b_{ii} + V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \overset{\text{IPFC}}{\boxed{-V_{qj} b_{ij} - V_{qk} b_{ik}}} \quad (173j)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (173k)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_k} = V_i b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (173l)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{qk}} = -V_i b_{ik} \quad (173m)$$

$$Q_j = -V_j^2 b_{ij} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{pj}} = -V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (174a)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial X_1} = 0 \quad (174b)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{qj}} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (174c)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial X_2} = 0 \quad (174d)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{pk}} = 0 \quad (174e)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial X_3} = 0 \quad (174f)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} = -V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + \overset{\text{IPFC}}{V_j b_{ij} (-V_{qj} \sin \theta_{ij} - V_{pj} \cos \theta_{ij})} \quad (174g)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} = V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + \overset{\text{IPFC}}{V_j b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij})} \quad (174h)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_k} = 0 \quad (174i)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_i} = V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (174j)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_j} = -2V_j b_{ij} + V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} + \overset{\text{IPFC}}{b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij})} \quad (174k)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_k} = 0 \quad (174l)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_{qk}} = 0 \quad (174m)$$

$$Q_k = -V_k^2 b_{ik} + V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k b_{ik} (V_{qk} \cos \theta_{ik} - V_{pk} \sin \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{pj}} = 0 \quad (175a)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial X_1} = 0 \quad (175b)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{qj}} = 0 \quad (175c)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial X_2} = 0 \quad (175d)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{pk}} = -V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (175e)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial X_3} = 0 \quad (175f)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} = -V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + \overset{\text{IPFC}}{V_k b_{ik} (-V_{qk} \sin \theta_{ik} - V_{pk} \cos \theta_{ik})} \quad (175g)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_j} = 0 \quad (175h)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + \overset{\text{IPFC}}{V_k b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik})} \quad (175i)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_i} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (175j)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_j} = 0 \quad (175k)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_i b_{ik} \cos \theta_{ik} + \overset{\text{IPFC}}{b_{ik} (V_{qk} \cos \theta_{ik} - V_{pk} \sin \theta_{ik})} \quad (175l)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{qk}} = V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (175m)$$

## C.3 DERIVADA DA INVARIÂNCIA DE POTÊNCIAS ATIVA

$$PE = -V_i b_{ij} V_{pj} - V_i b_{ik} V_{pk} + V_j b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij}) + V_k b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik})$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{pj}} = -V_i b_{ij} + V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (176a)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial X_1} = 0 \quad (176b)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{qj}} = V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (176c)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial X_2} = 0 \quad (176d)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{pk}} = -V_i b_{ik} + V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (176e)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial X_3} = 0 \quad (176f)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial \theta_i} = V_j b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij}) + V_k b_{ik} (V_{qk} \cos \theta_{ik} - V_{pk} \sin \theta_{ik}) \quad (176g)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial \theta_j} = V_j b_{ij} (-V_{qj} \cos \theta_{ij} + V_{pj} \sin \theta_{ij}) \quad (176h)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial \theta_k} = V_k b_{ik} (-V_{qk} \cos \theta_{ik} + V_{pk} \sin \theta_{ik}) \quad (176i)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_i} = -b_{ij} V_{pj} - b_{ik} V_{pk} \quad (176j)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_j} = b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (176k)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_k} = b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik}) \quad (176l)$$

$$\frac{\partial PE}{\partial V_{qk}} = V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (176m)$$

## APÊNDICE D – DERIVADAS DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO IPFC

D.1 Sistema de controle para componente em quadratura para o primeiro conversor.

$$\dot{V}_{pj} = \frac{K_1}{T_{mp}} \left( P_{refj} + V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij}) \right) + \frac{X_1}{T_{mp}} + \frac{V_{sup}}{T_{mp}} - \frac{V_{pj}}{T_{mp}}$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_{pj}} = \frac{K_1}{T_{mp}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - \frac{1}{T_{mp}} \quad (177a)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial X_1} = \frac{1}{T_{mp}} \quad (177b)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_{qj}} = \frac{K_1}{T_{mp}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (177c)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial \theta_i} = \frac{K_1}{T_{mp}} \left( V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij}) \right) \quad (177d)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial \theta_j} = \frac{K_1}{T_{mp}} \left( -V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (-V_{qj} \cos \theta_{ij} + V_{pj} \sin \theta_{ij}) \right) \quad (177e)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_i} = \frac{K_1}{T_{mp}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (177f)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pj}}{\partial V_j} = \frac{K_1}{T_{mp}} \left( V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij}) \right) \quad (177g)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_{1i}} \left( P_{refj} + V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij}) \right)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_{pj}} = \frac{1}{T_{1i}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (178a)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_{qj}} = \frac{1}{T_{1i}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (178b)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_i} = \frac{1}{T_{1i}} \left( V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij}) \right) \quad (178c)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_1}{\partial \theta_j} = \frac{1}{T_{1i}} \left( -V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (-V_{qj} \cos \theta_{ij} + V_{pj} \sin \theta_{ij}) \right) \quad (178d)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_i} = \frac{1}{T_{1i}} (V_j b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (178e)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_1}{\partial V_j} = \frac{1}{T_{1i}} (V_i b_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} (V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_{pj} \cos \theta_{ij})) \quad (178f)$$

D.2 Sistema de controle para componente em fase para o primeiro conversor

$$\dot{V}_{qj} = \frac{K_2}{T_{mp}} (Q_{refj} - V_j^2 b_{ij} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij})) + \frac{X_2}{T_{mp}} - \frac{V_{qj}}{T_{mp}}$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_{pj}} = -\frac{K_2}{T_{mp}} V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (179a)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_{qj}} = \frac{K_2}{T_{mp}} V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} - \frac{1}{T_{mp}} \quad (179b)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial X_2} = \frac{1}{T_{mp}} \quad (179c)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial \theta_i} = \frac{K_2}{T_{mp}} (-V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{qj} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (179d)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial \theta_j} = \frac{K_2}{T_{mp}} (+V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (179e)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_i} = \frac{K_2}{T_{mp}} (V_j b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (179f)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{qj}}{\partial V_j} = \frac{K_2}{T_{mp}} (-2V_j b_{ij} + V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij})) \quad (179g)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_{2i}} (Q_{refj} - V_j^2 b_{ij} + V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij}))$$

$$\frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_{pj}} = \frac{1}{T_{2i}} (-V_j b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (180a)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_{qj}} = \frac{1}{T_{2i}} (V_j b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (180b)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_i} = \frac{1}{T_{2i}} (-V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{qj} \sin \theta_{ij} - V_j b_{ij} V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (180c)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_2}{\partial \theta_j} = \frac{1}{T_{2i}} (V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{qj} \sin \theta_{ij} + V_j b_{ij} V_{pj} \cos \theta_{ij}) \quad (180d)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_i} = \frac{1}{T_{2i}} (V_j b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (180e)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_2}{\partial V_j} = \frac{1}{T_{2i}} \left( -2V_j b_{ij} + V_i b_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} (V_{qj} \cos \theta_{ij} - V_{pj} \sin \theta_{ij}) \right) \quad (180f)$$

### D.3 SISTEMA DE CONTROLE PARA COMPONENTE EM QUADRATURA PARA O SEGUNDO CONVERSOR

$$\dot{V}_{pk} = \frac{K_3}{T_{mp}} \left( P_{refk} + V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_k b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik}) \right) + \frac{X_3}{T_{mp}} - \frac{V_{pk}}{T_{mp}}$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_{pk}} = \frac{K_3}{T_{mp}} V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} - \frac{1}{T_{mp}} \quad (181a)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial X_3} = \frac{1}{T_{mp}} \quad (181b)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_{qk}} = \frac{K_3}{T_{mp}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (181c)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial \theta_i} = \frac{K_3}{T_{mp}} \left( V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k b_{ik} (V_{qk} \cos \theta_{ik} - V_{pk} \sin \theta_{ik}) \right) \quad (181d)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial \theta_k} = \frac{K_3}{T_{mp}} \left( -V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k b_{ik} (-V_{qk} \cos \theta_{ik} + V_{pk} \sin \theta_{ik}) \right) \quad (181e)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_i} = \frac{K_3}{T_{mp}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (181f)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{pk}}{\partial V_k} = \frac{K_3}{T_{mp}} \left( V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} + b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik}) \right) \quad (181g)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{3i}} \left( P_{refk} + V_i V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} + V_k b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik}) \right)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_{pk}} = \frac{1}{T_{3i}} V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (182a)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_{qk}} = \frac{1}{T_{3i}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (182b)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_i} = \frac{1}{T_{3i}} \left( V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k b_{ik} (V_{qk} \cos \theta_{ik} - V_{pk} \sin \theta_{ik}) \right) \quad (182c)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_3}{\partial \theta_k} = \frac{1}{T_{3i}} \left( -V_i V_k b_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k b_{ik} (-V_{qk} \cos \theta_{ik} + V_{pk} \sin \theta_{ik}) \right) \quad (182d)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_i} = \frac{1}{T_{3i}} V_k b_{ik} \sin \theta_{ik} \quad (182e)$$

$$\frac{\partial \dot{X}_3}{\partial V_k} = \frac{1}{T_{3i}} \left( V_i b_{ik} \sin \theta_{ik} + b_{ik} (V_{qk} \sin \theta_{ik} + V_{pk} \cos \theta_{ik}) \right) \quad (182f)$$



**APÊNDICE E– DERIVADAS DAS INJEÇÕES DE CORRENTES DO  
DISPOSITIVO IPFC**

E.1 Derivada da Injeção de corrente na barra  $i$  do dispositivo IPFC na sua componente real.

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial V_{pj}} = -b_{ij} \cos \theta_i \quad (183a)$$

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial V_{qj}} = -b_{ij} \sin \theta_i \quad (183b)$$

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial V_{pk}} = -b_{ik} \cos \theta_i \quad (183c)$$

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial \theta_i} = (b_{ij}V_{pj} \sin \theta_i - b_{ij}V_{qj} \cos \theta_i + b_{ik}V_{pk} \sin \theta_i - b_{ik}V_{qk} \cos \theta_i) \quad (183d)$$

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial V_{qk}} = -b_{ik} \sin \theta_i \quad (183e)$$

E.2 Derivada da Injeção de corrente na barra  $i$  do dispositivo IPFC na sua componente imaginaria.

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{pj}} = -b_{ij} \sin \theta_i \quad (184a)$$

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{qj}} = b_{ij} \cos \theta_i \quad (184b)$$

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{pk}} = -b_{ik} \sin \theta_i \quad (184c)$$

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial \theta_i} = (-b_{ij}V_{qj} \sin \theta_i - b_{ij}V_{pj} \cos \theta_i - b_{ik}V_{qk} \sin \theta_i - b_{ik}V_{pk} \cos \theta_i) \quad (184d)$$

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{qk}} = b_{ik} \cos \theta_i \quad (184e)$$

E.3 Derivada da Injeção de corrente na barra  $j$  do dispositivo IPFC na sua componente real.

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial V_{pj}} = b_{ij} \cos \theta_i \quad (185a)$$

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial V_{qj}} = b_{ij} \sin \theta_i \quad (185b)$$

$$\frac{\partial I_{injir}}{\partial \theta_i} = b_{ij} (-V_{pj} \sin \theta_i + V_{qj} \cos \theta_i) \quad (185c)$$

E.4 Derivada da Injeção de corrente na barra  $j$  do dispositivo IPFC na sua componente imaginaria.

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{pj}} = b_{ij} \sin \theta_i \quad (186a)$$

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial V_{qj}} = -b_{ij} \cos \theta_i \quad (186b)$$

$$\frac{\partial I_{injim}}{\partial \theta_i} = b_{ij} (V_{pj} \cos \theta_i + V_{qj} \sin \theta_i) \quad (186c)$$

E.5 Derivada da Injeção de corrente na barra  $k$  do dispositivo IPFC na sua componente real.

$$\frac{\partial I_{injkr}}{\partial V_{pk}} = b_{ik} \cos \theta_i \quad (187a)$$

$$\frac{\partial I_{injkr}}{\partial V_{qk}} = b_{ik} \sin \theta_i \quad (187b)$$

$$\frac{\partial I_{injkr}}{\partial \theta_i} = b_{ik} (-V_{pk} \sin \theta_i + V_{qk} \cos \theta_i) \quad (187c)$$

E.6 Derivada da Injeção de corrente na barra  $k$  do dispositivo IPFC na sua componente imaginaria.

$$\frac{\partial I_{injkm}}{\partial V_{pk}} = b_{ik} \cos \theta_i \quad (188a)$$

$$\frac{\partial I_{injkm}}{\partial V_{qk}} = -b_{ik} \sin \theta_i \quad (188b)$$

$$\frac{\partial I_{injkm}}{\partial \theta_i} = b_{ik} (V_{pk} \cos \theta_i + V_{qk} \sin \theta_i) \quad (188c)$$

**APÊNDICE F- VARIAÇÃO DA POTENCIA ATIVA NUM PONTO DE  
OPERAÇÃO**

$$P_{km} = t^2 V_k^2 g_{km} - t V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (189a)$$

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta \theta_m + A3_{km} \Delta V_k + A4_{km} \Delta V_m \quad (189b)$$

$$A1_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = -V_k V_m (-g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (189c)$$

$$A2_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (189d)$$

$$A2_{km} = -A1_{km} \quad (189e)$$

$$A3_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2V_k g_{km} - V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (189f)$$

$$A4_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -V_k (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (189g)$$

**APÊNDICE G– TRABALHO APRESENTADO NA UNB-BRASILIA 2018  
WORKSHOP ON COMMUNICATION NETWORKS AND POWER SYSTEMS  
(WCNPS)**

Luis Gustavo Cordero Bautista, Percival Bueno de Araujo. Analysis of the Influence of IPFC-POD and PSS controllers coordinated tuning by an Adaptive Genetic Algorithm with Hyper-mutation. Conference WCNPS November 2018. IEEE Xplore.

DOI : 10.1109/WCNPS.2018.8604367

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8604367>