

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Ajuste de Parâmetros de Controladores Suplementares  
(POD) Através de Redes Neurais Artificiais em  
Dispositivos FACTS TCSC e SSSC**

**Maxwell Martins de Menezes**

**Orientador: Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo**

Ilha Solteira – SP, Novembro de 2010

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**“Ajuste de Parâmetros de Controladores Suplementares  
(POD) Através de Redes Neurais Artificiais em Dispositivos  
FACTS TCSC e SSSC”**

**MAXWELL MARTINS DE MENEZES**

**Orientador:** Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha  
Solteira, para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP  
Novembro/2010

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

M543a Menezes, Maxwell Martins de.  
Ajuste de parâmetros de controladores suplementares (POD) através de redes neurais artificiais em dispositivos FACTS TCSC e SSSC / Maxwell Martins de Menezes. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010  
116 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2010

Orientador: Percival Bueno de Araujo  
Inclui bibliografia

1. Controladores POD. 2. Estabilidade de sistema de potência. 3. Redes neurais (Computação). 4. TCSC e SSSC.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** Ajuste de Parâmetros de Controladores Suplementares (POD) Através de Redes Neurais Artificiais em Dispositivos FACTS TCSC e SSSC

**AUTOR:** MAXWELL MARTINS DE MENEZES

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

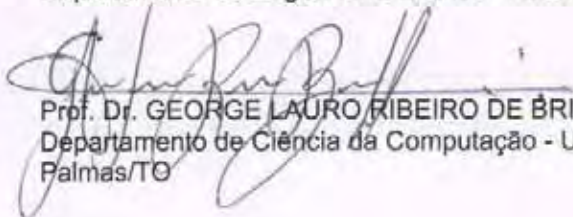
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,  
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



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



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



Prof. Dr. GEORGE LAURO RIBEIRO DE BRITO  
Departamento de Ciência da Computação - Universidade Federal do Tocantins - UFT -  
Palmas/TO

Data da realização: 19 de novembro de 2010.

## **Dedicatória**

*Aos meus pais, Marcos e Tânia, meu irmão,  
Juninho, e demais familiares que acreditaram e  
apoiaram o tempo todo.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente, gostaria de agradecer a DEUS por ter me dado essa incrível oportunidade e força necessária para superar todos os momentos, na alegria ou na tristeza, ao longo de toda minha vida.

Se estou aonde cheguei, é porque muitas pessoas me ajudaram nesse caminho. Por isso venho aqui agradecer a essas pessoas que tanto gosto e admiro.

A minha família na pessoa de meu pai (Marcos) e minha mãe (Tânia) que sempre me ajudaram e apoiaram dando o suporte necessário para contribuir em todas minhas conquistas. Sem esquecer meu irmão (Marcos Jr.), que além de irmão um grande amigo que se tornou com o decorrer de toda nossa vida. Sem esses com certeza não estaria hoje aqui.

Outra pessoa que acreditou em meu potencial, e que sou grato por toda minha vida, é meu primo Ricardo vulgo Bico Doce. Além de me acolher me ensinou valores a cada dia de convivência e além da admiração tenho muito respeito a esta pessoa.

Respeito impar ao meu orientador Percival que acreditou em meu trabalho, que além de passar conhecimento se mostrou uma pessoa de valores incontestáveis.

Aos meus amigos de trabalho, não menos importantes, João Iron, Lord, Adriano, Marcão, Marcos Furini, Carlos Pupin, Carlos Febres, Cuiabá e todos aqueles que conviveram dia-a-dia as dificuldades encontradas em meu trabalho além de propiciar bons momentos em nossa convivência.

Queria manifestar também em especial o carinho para duas pessoas, João Marcos e ao Leandro (Barretin). Companheiros que ganhei em um bom período de minha vida e vou levá-los como amigos pro resto de minha vida.

Sem esquecer também de meus amigos e amigas, Thiago (Batatinha), Gustavo (Tufão), Fabrício (Sagui), Diógenes, Leandro, Ivo, Daniel, Fabio, Rodolfo, Lincoln, Sergio, Emanuel, Patrick e Livia. As esses a minha satisfação em dizer que passei e ainda vamos passar bons momentos.

Finalmente, a Universidade Estadual Paulista pela excelente qualidade no ensino oferecido, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira, e à CAPES pelo apoio financeiro.

# Lista de Figuras

## Capítulo 2

Figura 2.1 – Diagrama Unifilar do Gerador Síncrono.....	23
Figura 2.2 – Potência Ativa e Potência Reativa no Sistema Multimáquinas .....	25
Figura 2.3 – Sistema de Excitação (RAT) do Gerador Síncrono .....	32
Figura 2.4 – Diagrama de Blocos MSP para Sistemas Multimáquinas.....	39

## Capítulo 3

Figura 3.1 – Circuito Equivalente do Dispositivo FACTS TCSC.....	44
Figura 3.2 – Modelo Dinâmico Linear do Dispositivo FACTS TCSC .....	44
Figura 3.3 – Modelo Dinâmico do Dispositivo FACST TCSC com Controlador POD .....	50
Figura 3.4 – Divisão do Bloco washout para o Dispositivo FACTS TCSC.....	51
Figura 3.5 – Divisão dos Blocos Avanço-Atraso de Fase para o Dispositivo FACTS TCSC .	51
Figura 3.6 – Circuito Equivalente do Dispositivo FACTS SSSC .....	54
Figura 3.7 – Diagrama Fasorial Equivalente do Dispositivo FACTS SSSC: $V_s = 0$ .....	55
Figura 3.8 – Corrente entre as Barras k e m .....	55
Figura 3.9 – Diagrama Fasorial: Modos de Operação do Dispositivo FACTS SSSC .....	56
Figura 3.10 – Diagrama Fasorial: $\tilde{V}_s = 0$ .....	58
Figura 3.11 – Modelo Dinâmico do Dispositivo FACTS SSSC com Controlador POD .....	64
Figura 3.12 – Divisão do Bloco washout para o Dispositivo FACTS SSSC .....	64
Figura 3.13 – Divisão do Bloco Avanço-Atraso de Fase para o Dispositivo FACTS SSSC ...	65

## Capítulo 4

Figura 4.1 – Função de Transferência do Sistema de Potência com Controlador POD.....	71
Figura 4.2 – Efeito do Controlador POD no Resíduo Associado ao Autovalor $\lambda_i$ .....	73
Figura 4.3 – Neurônio Biológico.....	75
Figura 4.4 – Modelo de McCulloch e Pitts.....	76

Figura 4.5 – Tipos de Funções de Ativação .....	77
Figura 4.6 – Rede Perceptron Multicamadas (PMC) .....	78

## Capítulo 5

Figura 5.1 – Diagrama Unifilar: Sistema Simétrico de Duas Áreas.....	84
Figura 5.2 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$ .....	89
Figura 5.3 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 2: $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$ .....	90
Figura 5.4 – Desvio do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão 7-8 .....	90
Figura 5.5 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$ .....	94
Figura 5.6 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 2: $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$ .....	94
Figura 5.7 – Desvio do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão 7-8 .....	95
Figura 5.8 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$ .....	98
Figura 5.9 – Desvio do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão 7-8 .....	98
Figura 5.10 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$ .....	100

## Apêndice I

Figura A.I.1 – Sistemas de coordenadas r,m e d,q .....	112
--	-----



## Lista de Tabelas

### Capítulo 5

Tabela 5.1 – Autovalores Dominantes, $\omega_n$ e $\xi$ .....	84
Tabela 5.2 – FACTS TCSC: Módulos dos Resíduos da FTMA .....	86
Tabela 5.3 – FACTS SSSC: Módulos dos Resíduos da FTMA .....	86
Tabela 5.4 – Parâmetros do Controlador POD: dispositivo TCSC/SSSC (Método Clássico)	87
Tabela 5.5 – FACTS TCSC: Autovalores Dominantes, $\xi$ e $\omega_n$ .....	88
Tabela 5.6 – FACTS SSSC: Autovalores Dominantes, $\omega_n$ e $\xi$ .....	89
Tabela 5.7 – Parâmetros do Controlador POD: dispositivo TCSC/SSSC (Método Neural: situação treinada pela RNA).....	92
Tabela 5.8 – FACTS TCSC: Autovalores Dominantes, $\xi$ e $\omega_n$ (situação treinada pela RNA).	92
Tabela 5.9 – FACTS SSSC: Autovalores Dominantes, $\omega_n$ e $\xi$ (situação treinada pela RNA).	93
Tabela 5.10 – Parâmetros do Controlador POD: dispositivo TCSC/SSSC (Método Neural: situação não treinada pela RNA).....	96
Tabela 5.11 – FACTS TCSC: Autovalores Dominantes, $\xi$ e $\omega_n$ (situação não treinada pela RNA) .....	96
Tabela 5.12 – FACTS SSSC: Autovalores Dominantes, $\omega_n$ e $\xi$ (situação não treinada pela RNA) .....	97
Tabela 5.13 – FACTS TCSC: Comparação entre o Método Clássico e o Método Neural .....	99
Tabela 5.14 – FACTS SSSC: Comparação entre o Método Clássico e o Método Neural .....	100

### Apêndice II

Tabela A.II.1 – Dados das Máquinas Geradoras .....	114
Tabela A.II.2 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão .....	114
Tabela A.II.3 – Dados das Linhas de Transmissão .....	114
Tabela A.II.4 – Dados das Linhas de Transmissão (continuação) .....	115
Tabela A.II.5 – Dados das Barras - Caso Base.....	115

## **Lista de Símbolos e Acrônimos**

RAT – Regulador Automático de Tensão

SEP – Sistema Elétrico de Potência

FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems

POD – Power Oscillation Damping

TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor

SVC – Static Var Compensator

SSSC – Static Synchronous Series Compensator

STATCOM – Static Synchronous Compensator

UPFC – Unified Power Flow Controller

GTO – Gate Turn-Off

RNA – Redes Neurais Artificiais

MSP – Modelo de Sensibilidade de Potência

MHP – Modelo de Heffron e Phillips

VSC – Voltage Source Converter

AC – Corrente Alternada

PSS – Power System Stabilizer

ESP – Estabilizador de sistema de potência

FTMA – Função de transferência de malha aberta

PMC – Perceptron Multicamadas

LM – Levenberg-Marquardt

LT – Linha de Transmissão

$A_{POD}$  – Matriz composta por variáveis de estado, formada pelos parâmetros do POD

$A_T$  – vetor de variáveis de estado do sistema com TCSC

$A_{1Gk}, A_{2Gk}, A_{3Gk}$  – Coeficientes de sensibilidade da potência ativa do gerador k

$A_{1km}, A_{2km}, A_{3km}$  – Coeficientes de sensibilidade da potência ativa da L.T. k-m

$B_T$  – vetor de variáveis de entrada do sistema com TCSC

$B_S$  – vetor de variáveis de entrada do sistema com SSSC

$D_k$  – Coeficiente de amortecimento inerente do gerador k

$\tilde{E}'_{ak}$  – Tensão de definição da posição do sistema de coordenadas rotativo  
 $E'_{dk}$  – Tensão interna em eixo direto do gerador k  
 $E_{fdk}$  – Tensão no enrolamento de campo do gerador k  
 $\tilde{E}'_k$  – Tensão interna do gerador k  
 $E'_{qk}$  – Tensão interna em quadratura do gerador k  
 $fd$  – Enrolamento de campo  
 $G(s)$  – Função de transferência em malha fechada  
 $H(s)$  – Função de transferência  
 $H(x)$  – matriz hessiana referente ao treinamento LM  
 $I_{dk}$  – Componente de eixo direto da corrente da barra k  
 $\tilde{i}_k$  – Corrente do gerador k  
 $\tilde{I}_{km}$  – Corrente elétrica que flui pela linha de transmissão k-m  
 $I_{qk}$  – Componente de eixo em quadratura da corrente da barra k  
 $J(x)$  – matriz jacobiana referente ao treinamento LM  
 $J_1, J_2, J_3, J_4, B_1, B_2$  – Matrizes do MSP  
 $J_{1TPOD}, J_{2TPOD}, J_{3TPOD}, B_{1TPOD}, B_{2TPOD}$  – Matrizes do MSP com TCSC e POD  
 $J_{1SPOD}, J_{2SPOD}, J_{3SPOD}, J_{4SPOD}, B_{1SPOD}, B_{2SPOD}$  – Matrizes do MSP com SSSC e POD  
 $K_{Ak}, K_{Vk}$  – Coeficientes da reação de armadura do gerador k no MSP  
 $K_{rk}$  – Ganho do RAT  
 $K_{POD}$  – Ganho do controlador POD para o TCSC e SSSC  
 $K_{TCSC}$  – Ganho estático do TCSC  
 $K_4$  – Coeficiente de reação de armadura referente ao modelo de Heffron e Phillips  
 $M_k = 2H_k$  – Constante de Inércia do gerador k  
 $P_{Gk}$  – Potência ativa gerada pelo gerador k  
 $P_{ki}$  – Fator de participação de uma variável k relacionada a um modo oscilante i  
 $P_{kl}$  – Fluxo de potência ativa entre as barras k e l  
 $P_{km}$  – Fluxo de potência ativa entre as barras k e m

$P_{kmSSSC}$  – Fluxo de potência ativa entre as barras k e m com a instalação do SSSC

$P_{Lk}$  – Carga ativa da barra k

$P_{Meck}$  – Potencia mecânica de entrada do gerador k

$Q_{Gk}$  – Potência reativa gerada pelo gerador k

$Q_{kl}$  – Fluxo de potência reativa entre as barras k e l

$Q_{Lk}$  – Carga reativa da barra k

$Q_{km}$  – Fluxo de potência reativa entre as barras k e m

$Q_{kmSSCC}$  – Fluxo de potência reativa entre as barras k e m com a instalação do SSSC

$r_j$  – Vetor resíduo referente ao treinamento LM

$R1_{Gk}, R2_{Gk}, R3_{Gk}$  – Coeficientes de potência reativa do gerador k

$R1_{km}, R2_{km}, R3_{km}$  – Coeficientes de potência reativa da linha de transmissão k-m

s – Operador de laplace

$s_n$  – Saída intermediaria de cada neurônio

$\tilde{S}_{Gk}$  – Potência complexa entregue pela barra k

$R_{ijk}$  – Resíduo associado ao modo k devido entrada i e saída j

$\tilde{S}_{km}$  – Potência complexa que flui pela linha de transmissão k-m

T – Matriz de Transformação de Coordenadas

$T_{rk}$  – Constante de tempo do RAT

$T_{TCSC}$  – Constante de tempo do TCSC

$T_w$  – Constante de tempo washout para POD

$T'_{d0k}$  – Constante de tempo transitória de eixo direto do gerador k

$T_1, T_2, T_3, T_4$  – Constantes de tempo dos blocos avanço-atraso de fase para POD

u – vetor de variáveis de entrada do sistema

$V_k$  – Magnitude da tensão da barra k

$V_m$  – Magnitude da tensão da barra m

$V_{dk}$  – Componente de eixo direto da tensão da barra k

$V_{qk}$  – Componente de eixo em quadratura da tensão da barra k

$V_{refk}$  – Tensão de referência para o RAT

$V_S$  – Vetor contendo os coeficientes de sensibilidade do SSSC

$\tilde{V}_S$  – Fasor tensão série inserida pelo SSSC

$V_s$  – Tensão série inserida pelo SSSC

$W$  – Vetor peso da RNA

$W_0$  – Vetor peso bias da RNA

$x$  – vetor de variáveis de estado do sistema

$X_{RNA}$  – Vetor de entrada da RNA

$X_{CSC}$  – Reatância do TCSC

$x_{dk}$  – Reatância síncrona de eixo direto do gerador k

$X_{km}$  – Reatância da linha de transmissão k-m

$x_{qk}$  – Reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador k

$X_{ref}$  – Reatância de referência

$x_S$  – matriz estado do sistema com SSSC

$x_T$  – matriz estado do sistema com TCSC

$x'_{dk}$  – Reatância transitória de eixo direto do gerador k

$y$  – Saída efetiva de cada neurônio

$Y_{km}$  – Admitância da linha de transmissão entre as barras k e m

$z$  – vetor de variáveis algébricas do sistema

$Z_{kl}$  – Impedância da linha de transmissão entre as barras k e l

$Z_{km}$  – Impedância da linha de transmissão entre as barras k e m

$Z_{TCSC}$  – Impedância efetiva após instalação do TCSC

$Z_{SSSC}$  – Impedância efetiva após instalação do SSSC

$\Delta X_{CSC}$  – Variável responsável pela modulação da reatância série do TCSC

$\Delta \dot{X}_{TPOD}$  – Representação no espaço de estado com TCSC e POD

$\Delta \dot{X}_{SPOD}$  – Representação no espaço de estado com SSSC e POD

$\Delta X'_1, \Delta X'_2, \Delta X'_{POD}$  – Variáveis definidas para equacionamento do POD

$\alpha$  – Ângulo da tensão série do SSSC

$\delta_k$  – Ângulo interno do gerador k

$\theta_k$  – Ângulo da tensão da barra k

$\theta_{km}$  – Diferença entre os ângulos das tensões da barra k e m ( $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ )

$\Omega_k$  – Conjunto de barras vizinhas à barra k

$\omega_k$  – Velocidade Angular do gerador k

$\omega_n$  – frequência natural não amortecida

$\omega_0$  – Velocidade síncrona – 377 rad/s

$\lambda$  – Autovalor

$\xi$  – Amortecimento relacionado a uma oscilação

$\varphi_{km}$  – Ângulo da corrente em relação a referência do sistema elétrico na linha de transmissão k-m

$\varphi_{ki}$  – Autovetor esquerdo relacionado ao modo oscilatório i em relação a variável k

$\psi_{ik}$  – Autovetor direito relacionado a variável de estado k em relação ao modo oscilatório i

$\dot{X}$  – Representa a derivada da variável X  $\left( \dot{X} = \frac{dX}{dt} \right)$

(r,m) – Sistema de coordenadas fixo, eixos real e imaginário

(d,q) – Sistema de coordenadas rotativo, eixos direto e em quadratura

## **Resumo**

Este trabalho apresenta estudos referentes à estabilidade a pequenas perturbações do SEP, considerando a atuação de FACTS para o amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência. São abordados os dispositivos FACTS TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) e o SSSC (Static Synchronous Series Compensator).

É realizada a representação e modelagem dos dispositivos FACTS no SEP inserindo no Modelo Sensibilidade de Potência.

Para melhorar o desempenho do SEP no que se refere à estabilidade a pequenas perturbações, controladores suplementares são propostos para aumentar o desempenho dos dispositivos TCSC e SSSC, introduzindo o amortecimento necessário ao SEP.

Adicionam-se os controladores suplementares POD no modelo modificado para os dispositivos TCSC e SSSC para verificar sua atuação.

Para encontrar a melhor localização para instalação dos dispositivos é usado a teoria dos resíduos. Esta mesma teoria é usada também para o ajuste dos parâmetros dos controlares juntamente com outro ajuste feito através de Redes Neurais Artificiais (RNA), que é proposto como alternativa de comparação ao método dos resíduos.

Simulações são efetuadas em um sistema teste simétrico para se verificar resultados e a eficácia do controlador POD (parâmetros ajustados pela RNA proposta), acoplados aos dispositivos FACTS, na manutenção da estabilidade a pequenas perturbações do SEP.

Palavras-chave: Controladores POD. Estabilidade de sistema de potência. Redes neurais artificiais. TCSC e SSSC.

## **Abstract**

This work presents studies referred to short term Electric Power System (EPS) perturbations, considering the actuation of FACTS devices for low frequency electromechanical oscillation damping. The devices considered are: FACTS TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) and the SSSC (Static Synchronous Series Compensator).

It is representation and modeling FACTS devices in the EPS inserting in the Power Sensitivity Model.

To improve the performance of the EPS considering the short term perturbations, additional controllers are proposed to increase the performance of the TCSC and SSSC devices, introducing the necessary damping to the EPS.

The additional POD controller is added to the modified model for TCSC and SSSC devices to verify the acting.

The residual theory is used to find the best location to install the devices. The same theory is used to adjust the parameters of the controllers and an adjustment with Artificial Neural Networks (ANN) is proposed as an alternative to the residual method.

Simulations are effectuated for a symmetric test system to verify the efficiency of the POD controller (parameters adjusted by the ANN proposed), coupled with the FACTS devices, to maintain the stability considering the short term perturbations.

**Key-works:** POD Controllers. Electrical power system stability. Artificial neural network. TCSC and SSSC.



## Sumário

CAPÍTULO 1 .....	18
Introdução .....	18
CAPÍTULO 2 .....	22
Modelo Sensibilidade de Potência Multimáquinas .....	22
2.1. Introdução .....	22
2.2. Equações Gerais do MSP para Sistemas Multimáquinas .....	22
2.3. Potências Geradas e Fluxos de Potência no Sistema Multimáquinas.....	25
2.4. Balanço Nodal de Potências no Sistema Multimáquinas .....	29
2.5. Tensão Interna do Gerador Síncrono.....	29
2.6. Tensão de Campo da Máquina Síncrona .....	31
2.7. Equações de Movimento do Gerador Síncrono .....	32
2.8. Representações do Sistema Multimáquinas pelo MSP .....	33
2.9. Conclusões.....	40
CAPÍTULO 3 .....	41
Inclusão dos Dispositivos FACTS e seus Controladores no MSP .....	41
3.1. Introdução.....	41
3.2. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) .....	41
3.3. Static Synchronous Series Compensator (SSSC).....	42
3.4. Controlador Power Oscillation Damping (POD) .....	43
3.5. Inclusão do Dispositivo FACTS TCSC no MSP.....	44
3.6. Inclusão do Dispositivo TCSC com Controlador POD no MSP .....	50
3.7. Inclusão do Dispositivo FACTS SSSC no MSP .....	54
3.8. Inclusão do Dispositivo FACTS SSSC com Controlador POD no MSP .....	63
3.9. Conclusões.....	67
CAPÍTULO 4 .....	70
Localização e Projeto de Controladores POD .....	70
4.1. Introdução.....	70
4.2. Localização do Controlador POD .....	70

4.3. Projeto Clássico do Controlador POD.....	73
4.4. Redes Neurais Artificias.....	74
4.4.1. Neurônio Biológico.....	75
4.4.2. Neurônio Artificial.....	75
4.4.3. Perceptron Multicamadas (PMC).....	78
4.4.4. Algoritmo de Treinamento Levenberg-Marquardt (LM).....	79
4.5. Conclusões.....	81
CAPÍTULO 5.....	83
Simulações e Resultados.....	83
5.1. Introdução.....	83
5.2. Sistema Simétrico de Duas Áreas.....	83
5.3. Localização dos Dispositivos FACTS no SEP.....	85
5.4. Ajuste dos Parâmetros dos Controladores POD – Método Clássico.....	87
5.5. Ajuste dos Parâmetros dos Controladores POD – Método Neural.....	91
5.6. Conclusões.....	101
CAPÍTULO 6.....	103
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	103
Referências.....	106
Apêndice I. Matriz de Transformação de Coordenadas.....	112
Apêndice II. Dados do Sistema Multimáquinas.....	114
Anexo. Artigos Publicados.....	116

# CAPÍTULO 1

## Introdução

Com as crescentes demandas de energia elétrica motivadas pelo desenvolvimento econômico dos últimos anos, a necessidade de produzir e transmitir energia elétrica com confiabilidade e segurança aos usuários tem-se tornado primordial para empresas do setor elétrico. Devido a essas crescentes demandas, surgiu a necessidade de interligações entre grandes SEP. Dentre algumas consequências destas interligações pode-se dizer que se tornou mais crítico manter a estabilidade a pequenas perturbações dos SEP, devido ao fato de que várias unidades geradoras de diferentes características estão trabalhando em conjunto (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS-IEEE/CIGRE, 2004). Isto fez com que surgissem oscilações de baixa frequência pouco amortecidas (ou até mesmo instáveis), entre diferentes unidades geradoras. Essas oscilações podem ser classificadas de acordo com a sua frequência natural não amortecida, sendo de modo interárea (quando um grupo de geradores oscila contra outro grupo de geradores), modo local (unidades geradoras de um determinado local oscilando com o restante do SEP) ou modo intraplanta (oscilações entre unidades geradoras de uma mesma planta) (KUNDUR, 1994).

As oscilações de modo interárea se caracterizam pela faixa de frequências de 0,2 a 0,8 Hz, as de modo local se situam na faixa de frequências de 0,8 a 1,8 Hz e as de modo intraplanta entre 1,5 e 2,5 Hz (LARSEN; SWAN, 1981; YU, 1983; KUNDUR, 1994; SAUER; PAI, 1998; ANDERSON; FOUAD, 2003).

Os SEP, naturalmente, já apresentam um baixo amortecimento natural e essas oscilações prejudicam ainda mais o comportamento do sistema frente a pequenas perturbações.

Outro fato que contribui para a ocorrência de oscilações de baixa frequência é a operação de Reguladores Automáticos de Tensão (RAT) que tem como características pequenas constantes de tempo e altos ganhos. Estas características, importantes no que se refere à estabilidade a grandes perturbações, quando aliadas às condições de alto carregamento e sistema de transmissão vulnerável, podem reduzir substancialmente, ou até mesmo tornar negativo, o amortecimento de algum modo de oscilação, tornando o sistema

instável (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWAN, 1981; YU, 1983; KUNDUR, 1994; SAUER; PAI, 1998; ANDERSON; FOUAD, 2003).

Uma solução para este problema é a construção de novas linhas de transmissão para aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica. Porém, devido a aspectos ambientais e econômicos, muitas vezes esta solução é inviável. Uma alternativa encontrada foi à compensação de reativos, que é muito utilizada para se aumentar a capacidade dos SEP, postergando assim a construção de novas LTs.

No início esta compensação era realizada através de banco de capacitores conectados em série com a LT, o que resultava na diminuição de reatância efetiva da linha. O resultado desta operação era tornar o SEP eletricamente mais robusto.

Com o avanço da tecnologia na área da eletrônica de potência, dispositivos de compensação foram desenvolvidos, os quais foram chamados de FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) (WATANABE et al., 1998; HINGORANI, 1998; SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999) que, quando equipados com controladores suplementares POD (Power Oscillation Damping) (HINGORANI; GYUGYI, 1999), são capazes de introduzir amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

Os dispositivos FACTS podem ser divididos basicamente em duas gerações de acordo com a maneira de compensação utilizada. O TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) e o SVC (Static VAR Compensator) representam principalmente a primeira geração e são caracterizados pela utilização de bancos de capacitores ou reatores chaveados por chaves tiristoras. A segunda geração é representada pelos dispositivos SSSC (Static Synchronous Series Compensator), STATCOM (Static Synchronous Compensator) e UPFC (Unified Power Flow Controller) a qual utiliza conversores fonte de tensão, constituídos basicamente de chaves tiristoras autocomutadas, como por exemplo, o GTO (Gate Turn-Off) (SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999; WATANABE et al., 1998).

Estudos mostraram que os dispositivos FACTS, quando acoplados com controladores suplementares (chamados de POD – Power Oscillation Damping), são capazes de introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994; YANG et al., 1998; UZUNOVIC, 2001; MATHUR; VARMA, 2002; CAI; ERLICH, 2005; KAZEMI; SOHRFOROUZANI, 2006). Para que a introdução de amortecimento seja efetiva o ajuste dos parâmetros dos controladores POD é de fundamental importância.

Alguns métodos podem ser utilizados para o seu projeto sendo que os mais comuns são a compensação de fase e a alocação de polos (CHEN; HSU, 1987; ARAUJO; ZANETTA, 2001; CAI; ERLICH, 2005). Ambos os métodos determinam parâmetros do POD para um dado ponto de operação e assim, para diferentes condições são necessários novos ajustes.

Com objetivo de não se fazer novos ajustes do controlador POD a cada mudança do ponto de operação do SEP, técnicas inteligentes estão sendo propostas para o ajuste de seus parâmetros como lógica fuzzy (KAZEMI; SOHRFOROUZANI, 2006), algoritmos genéticos (MISHRA et al., 2007) e Redes Neurais Artificiais (RNA) (HAYKIN, 1994).

Em vista disso, o principal foco deste trabalho é a utilização das RNAs para o ajuste de parâmetros de controladores POD acoplados a dispositivos FACTS conectados em série com a LT (o TCSC e o SSSC) para introduzir amortecimento ao SEP e analisar sua eficácia na estabilidade a pequenas perturbações.

Para a análise do comportamento dinâmico do SEP é proposta à inclusão dos dois dispositivos descritos por seus respectivos modelos dinâmicos, ambos equipados com controladores suplementares POD, para posterior verificação da eficácia destes dispositivos no amortecimento das oscilações de baixa frequência do SEP.

Para a representação do SEP de potência será utilizado o Modelo de Sensibilidade de Potência expandido para o ambiente multimáquinas (MSP-multimáquinas) (COSTA, 1992; DECKMANN; COSTA, 1994), que é um modelo linear. Como consequência poderão ser utilizadas técnicas do controle clássico para a análise da estabilidade a pequenas perturbações do SEP.

Após a modelagem do SEP, considerando a atuação dos dispositivos FACTS TCSC e SSSC, será realizada a implementação computacional através do software Matlab<sup>®</sup> assim como a simulação da rede proposta utilizando o Toolbox Neural Network.

Quanto à organização do texto, no Capítulo 2 é apresentada a formulação matemática do MSP-Multimáquinas, cujas equações matemáticas são configuradas de tal maneira que favoreça uma análise abrangente da estabilidade a pequenas perturbações do SEP.

Definidas as equações que descrevem o SEP, este será representado no domínio do tempo e no domínio da frequência.

No Capítulo 3 é realizado um estudo a respeito dos dispositivos FACTS utilizados nesse trabalho (TCSC e SSSC), sendo apresentadas suas principais características, seus modelos matemáticos e posteriormente, a inclusão dos modelos destes dispositivos no MSP-Multimáquinas.

Também neste Capítulo é feita uma análise a respeito dos sinais estabilizadores suplementares para o SEP e sua inclusão no MSP-Multimáquinas, sendo destacado o controlador POD.

Inicialmente é realizada uma análise sobre o controlador POD, sendo feito um breve resumo citando seu funcionamento e suas vantagens. Em seguida é apresentada sua formulação matemática.

No Capítulo 4 é mostrado o método utilizado para localização do controlador POD no SEP (método dos resíduos). Na sequência são tratados dois métodos para o ajuste de seus parâmetros. Primeiramente é apresentado o método da compensação de fase que aqui será chamado de “método clássico” e na sequência a utilização de RNAs “método neural” para o ajuste de parâmetros do controlador POD.

No Capítulo 5 são mostradas as simulações realizadas em um SEP teste para se fazer uma comparação de desempenho entre os dispositivos FACTS sob estudo, cujos controladores adicionais foram ajustados pelo método clássico e pelo método neural.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do trabalho e sugestões para atividades futuras. Na sequência as Referências, Apêndices e Anexo, necessários para uma melhor compreensão do trabalho.

## CAPÍTULO 2

### Modelo Sensibilidade de Potência Multimáquinas

#### 2.1. Introdução

Neste Capítulo é apresentado o Modelo Sensibilidade de Potência (MSP) (DECKMANN; COSTA, 1994) que pode ser utilizado para o estudo de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas de energia elétrica.

Este modelo se baseia no princípio de que os balanços de potência ativa e potência reativa devem ser satisfeitos continuamente em qualquer barra do sistema durante qualquer processo dinâmico. O modelo resultante é linear e conseqüentemente, pode ser utilizado para a análise da estabilidade a pequenas perturbações.

#### 2.2. Equações Gerais do MSP para Sistemas Multimáquinas

Para o desenvolvimento do MSP será considerado um gerador síncrono trifásico sendo representados os enrolamentos do estator (fases a, b e c), e também um enrolamento do rotor (enrolamento de campo – fd).

Dessa forma, podem ser definidos dois sistemas de coordenadas que atuam no SEP. Um primeiro onde são medidas as grandezas do estator (sistema de coordenadas estático –  $(r,m)$ ), referente aos enrolamentos do estator. E outro sistema onde as medidas são grandezas do rotor (sistema de coordenadas rotativo –  $(d,q)$ ), onde o enrolamento de campo localizado sobre o rotor se move com uma velocidade angular  $\omega$ .

Para facilitar o manuseio das equações é necessária a introdução de uma transformação de coordenadas, baseada na Transformada de Park (ANDERSON; FOUAD, 2003), que permitirá referenciar todas as grandezas a um único sistema de coordenadas. Esta transformação que permite referir as grandezas do sistema de coordenadas fixo  $(r,m)$  ao sistema de coordenadas rotativo  $(d,q)$  e vice-versa é realizada através da matriz T, dada pela

equação (2.1), cuja dedução se encontra no Apêndice I, onde  $\delta_k$  é o ângulo interno do gerador conectado a uma barra k do sistema elétrico de potência.

$$T = \begin{bmatrix} \text{sen}\delta_k & -\text{cos}\delta_k \\ \text{cos}\delta_k & \text{sen}\delta_k \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Na Figura 2.1 é mostrado o diagrama unifilar do gerador síncrono ligado a uma barra genérica k. As variáveis  $\tilde{E}'_k$ ,  $x'_d$ ,  $\tilde{i}_k$  e  $\tilde{V}_k$  correspondem respectivamente à tensão interna do gerador k, à reatância de eixo direto do gerador k, à corrente do gerador k e a tensão terminal da barra k.

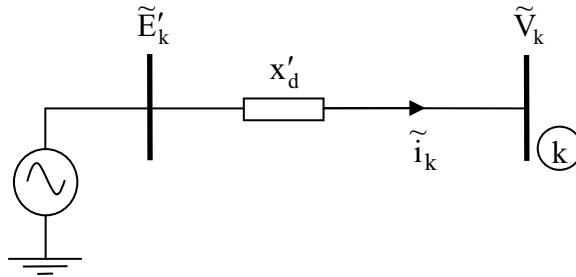


Figura 2.1 – Diagrama Unifilar do Gerador Síncrono

A tensão terminal  $\tilde{V}_k$ , expressa nas componentes de eixo real e eixo imaginário, é dada pela equação (2.2), e por inspeção da Figura 2.1 pode-se escrever a equação (2.3).

$$\tilde{V}_k = V_k \angle \theta_k = V_k \cos \theta_k + j V_k \text{sen} \theta_k = V_{r_k} + j V_{m_k} \quad (2.2)$$

$$\tilde{E}'_k = \tilde{V}_k + j x'_{dk} \tilde{i}_k \quad (2.3)$$

De acordo com (Kundur, 1994; Anderson e Fouad, 2003) pode-se definir uma tensão  $\tilde{E}'_{ak}$ , localizada sobre o eixo em quadratura, a qual determina a localização do sistema de coordenadas rotativo ( $d_k$ ,  $q_k$ ), para cada gerador. Esta tensão é dada pela equação (2.4), onde a grandeza  $x_{qk}$  corresponde à reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador k.

$$\tilde{E}_{ak} = \tilde{V}_k + j x_{qk} \tilde{i}_k \quad (2.4)$$



Aplicando a matriz de transformação T (equação (2.1)) à equação (2.2) faz-se uma mudança de coordenadas, expressando convenientemente a tensão terminal em componentes de eixo direto e eixo em quadratura, cujo resultado é mostrado na equação (2.5).

$$V_{dk} = V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k) \quad (2.5)$$

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

Adotando um procedimento análogo ao realizado com a equação (2.2), as equações (2.3) e (2.4) podem ser expressas em componentes de eixo direto e eixo em quadratura respectivamente, como nas equações (2.6) e (2.7).

$$E'_{dk} = V_{dk} - x'_{dk} I_{qk} \quad (2.6)$$

$$E'_{qk} = V_{qk} - x'_{dk} I_{dk}$$

$$0 = V_{dk} - x_{qk} I_{qk} \quad (2.7)$$

$$E_{ak} = V_{qk} - x_{qk} I_{dk}$$

A partir das equações (2.5), (2.6) e (2.7) podem ser escritas as equações (2.8) e (2.9), para as componentes de eixo direto e eixo em quadratura da tensão terminal do gerador k.

$$V_{dk} = V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k) = E'_{dk} + x'_{dk} I_{qk} = x_{qk} I_{qk} \quad (2.8)$$

$$V_{qk} = V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k) = E'_{qk} - x'_{dk} I_{dk} = E_{ak} - x_{qk} I_{dk} \quad (2.9)$$

Utilizando as equações (2.8) e (2.9) podem ser obtidas as correntes de eixo direto e eixo em quadratura do gerador k, descritas pelas equações (2.10) e (2.11).

$$I_{dk} = \frac{E'_{qk} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{X'_{dk}} \quad (2.10)$$

$$I_{qk} = \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{X_{qk}} \quad (2.11)$$

### 2.3. Potências Geradas e Fluxos de Potência no Sistema Multimáquinas

Um gerador síncrono conectado a uma barra k fornece potência ativa e potência reativa que são transferidas para as cargas através das LTs. A dedução das equações das potências envolvidas no sistema multimáquinas é realizada a partir da Figura 2.2, onde uma barra de geração genérica k é conectada a outras duas barras (m e l), através de linhas de transmissão com impedâncias  $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$  e  $Z_{kl} = R_{kl} + jX_{kl}$ , respectivamente.

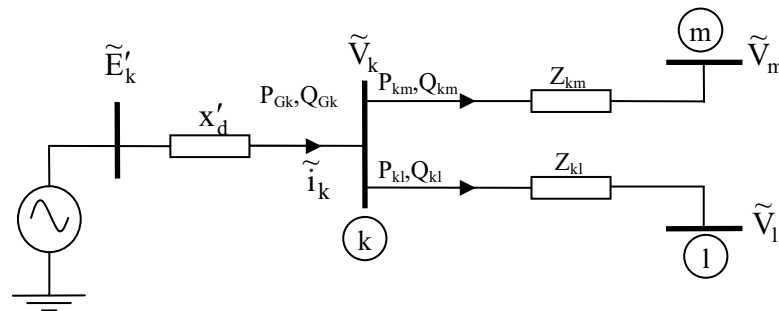


Figura 2.2 – Potência Ativa e Potência Reativa no Sistema Multimáquinas.

Na Figura 2.2 as potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador k são respectivamente, representadas por  $P_{Gk}$  e  $Q_{Gk}$  e as potências ativa e reativa injetadas na barra k para a barra m, são representadas por  $P_{km}$  e  $Q_{km}$ , respectivamente. De uma forma análoga,  $P_{kl}$  e  $Q_{kl}$ , respectivamente são as potências ativa e reativa injetada na barra k para a barra l.

As potências ativas e reativas fornecidas pelo gerador k podem ser obtidas através do cálculo do fluxo de potência complexa entregue pela barra k, conforme a equação (2.12).

$$\tilde{S}_{Gk} = \tilde{V}_k (\tilde{i}_k)^* = P_{Gk} + jQ_{Gk} \quad (2.12)$$

Substituindo as equações (2.8) a (2.11) na equação (2.12) podem ser obtidas as expressões para as potências ativas e reativas geradas, como mostradas nas equações (2.13) e (2.14).

$$P_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] V_k^2 \text{sen}2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.13)$$

$$Q_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{2} \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \cdot [1 - \text{cos}2(\delta_k - \theta_k)] \quad (2.14)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto equilíbrio, as equações (2.13) e (2.14) podem ser linearizadas utilizando da expansão de Taylor, desconsiderando os termos de ordem maior ou igual a dois, cujos resultados são mostrados nas equações (2.15) e (2.16).

$$\Delta P_{Gk} = A1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + A2_{Gk} \Delta E'_{qk} + A3_{Gk} \Delta V_k \quad (2.15)$$

$$A1_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} \right) = \frac{E'_{qk} V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k^2 \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \text{cos}2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.15.a)$$

$$A2_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.15.b)$$

$$A3_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \text{sen}2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.15.c)$$

$$\Delta Q_{Gk} = R1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + R2_{Gk} \Delta E'_{qk} + R3_{Gk} \Delta V_k \quad (2.16)$$

$$R1_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} \right) = -\frac{E'_{qk} V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - V_k^2 \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \text{sen}2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.16.a)$$

$$R2_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.16.b)$$

$$R3_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{2V_k}{x'_{dk}} - V_k \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \cdot [1 - \cos 2(\delta_k - \theta_k)] \quad (2.16.c)$$

As constantes  $A1_{Gk}$ ,  $A2_{Gk}$  e  $A3_{Gk}$  são os coeficientes de potência ativa do gerador  $k$  enquanto que as constantes representadas por  $R1_{Gk}$ ,  $R2_{Gk}$  e  $R3_{Gk}$  são os coeficientes de potência reativa.

Para a obtenção dos coeficientes de potência do sistema de transmissão externo, considere uma linha de transmissão responsável pela ligação entre as barras  $k$  e  $m$  do sistema multimáquinas, conforme o diagrama mostrado na Figura 2.2. Considere que a impedância seja  $Z_{km}$  e, para fins de simplificação, será utilizada sua admitância  $Y_{km}$  (equação (2.17)).

$$Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = \frac{R_{km}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} - j \frac{X_{km}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.17)$$

A linha de transmissão ( $k$ - $m$ ) é percorrida por uma corrente  $I_{km}$ , equação (2.18), transferindo, no sentido da barra  $k$  para a barra  $m$ , fluxo ativo ( $P_{km}$ ) e fluxo reativo ( $Q_{km}$ ), equação (2.19).

$$\tilde{I}_{km} = Y_{km} (\tilde{V}_k - \tilde{V}_m) \quad (2.18)$$

$$\tilde{S}_{km} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_{km})^* = P_{km} + jQ_{km} \quad (2.19)$$

Da manipulação das equações (2.18) e (2.19) são obtidos os fluxos de potência ativa e reativa da barra  $k$  para a barra  $m$ , representadas pelas equações (2.20) e (2.21).

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.20)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 b_{km} + V_k V_m b_{km} \cos\theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin\theta_{km} \quad (2.21)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto equilíbrio, as equações (2.20) e (2.21) podem ser linearizadas, resultando nas equações (2.22) e (2.23).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta\theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (2.22)$$

$$A1_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial(\theta_{km})} \right) = V_k V_m g_{km} \sin\theta_{km} - V_k V_m b_{km} \cos\theta_{km} \quad (2.22.a)$$

$$A2_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial(V_k)} \right) = 2V_k g_{km} - V_m g_{km} \cos\theta_{km} - V_m b_{km} \sin\theta_{km} \quad (2.22.b)$$

$$A3_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial(V_m)} \right) = -V_k g_{km} \cos\theta_{km} - V_k b_{km} \sin\theta_{km} \quad (2.22.c)$$

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta\theta_{km} + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta V_m \quad (2.23)$$

$$R1_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial(\theta_{km})} \right) = -V_k V_m b_{km} \sin\theta_{km} - V_k V_m g_{km} \cos\theta_{km} \quad (2.23.a)$$

$$R2_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial(V_k)} \right) = -2V_k (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_m b_{km} \cos\theta_{km} - V_m g_{km} \sin\theta_{km} \quad (2.23.b)$$

$$R3_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial(V_m)} \right) = V_k b_{km} \cos\theta_{km} - V_k g_{km} \sin\theta_{km} \quad (2.23.c)$$

As constantes  $A1_{km}$ ,  $A2_{km}$  e  $A3_{km}$  são os coeficientes de potência ativa e as constantes  $R1_{km}$ ,  $R2_{km}$  e  $R3_{km}$  são os coeficientes de potência reativa da linha de transmissão (k-m).

## 2.4. Balanço Nodal de Potências no Sistema Multimáquinas

O MSP tem como conceito fundamental a aplicação do balanço incremental de potências (ativa e reativa) em cada barra do sistema (DECKMANN; COSTA, 1994).

Se for considerada uma barra de geração genérica  $k$ , conectada a outras duas barras ( $k-m$ ) e ( $k-l$ ) do sistema elétrico, conforme diagrama mostrado na Figura 2.2, as variações de potência ativa e potência reativa geradas na barra  $k$  ( $\Delta P_{Gk}$  e  $\Delta Q_{Gk}$ ) devem ser iguais à somatória das variações dos fluxos de potência ativa e potência reativa ( $\Delta P_{km}$  e  $\Delta Q_{km}$ ) e ( $\Delta P_{kl}$  e  $\Delta Q_{kl}$ ) nas linhas de transmissão ( $k-m$ ) e ( $k-l$ ).

Generalizando este conceito, considere um conjunto de todas as barras conectadas à barra  $k$ , denominado  $\Omega_k$ . Para maior generalização considere ainda que na barra  $k$  está conectada uma carga que consome (na sua forma incremental) as potências ativa e reativa  $\Delta P_{Lk}$  e  $\Delta Q_{Lk}$ , respectivamente.

Com estas considerações, o balanço incremental de potências (ativa e reativa) na barra  $k$  é dado pelas equações (2.24) e (2.25).

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta P_{km} = 0 \quad (2.24)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta Q_{km} = 0 \quad (2.25)$$

As equações (2.24) e (2.25) são equações algébricas e traduzem o balanço nodal de potência na sua forma incremental em cada barra do sistema multimáquinas. Esta igualdade de potências deve ser satisfeita no decorrer de qualquer processo do sistema elétrico de potência.

## 2.5. Tensão Interna do Gerador Síncrono

As variações da tensão interna do gerador são dadas pela equação (2.26), onde  $x_{dk}$  é a reatância de eixo direto,  $E_{fdk}$  é a tensão de campo do gerador síncrono e  $T'_{d0k}$  a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto. (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994).

$$T'_{d0k} \dot{E}'_{qk} = E_{fdk} - [E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk})I_{dk}] \quad (2.26)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto equilíbrio, a equação (2.26) pode ser linearizada, fornecendo as equações (2.27).

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}'_{qk} = \left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E_{fdk}} \right) \Delta E_{fdk} + \left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E'_{qk}} \right) \Delta E'_{qk} + \left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial I_{dk}} \right) \Delta I_{dk} \quad (2.27)$$

$$\left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E_{fdk}} \right) = 1 \quad (2.27.a)$$

$$\left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E'_{qk}} \right) = -1 \quad (2.27.b)$$

$$\left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial I_{dk}} \right) = -(x_{dk} - x'_{dk}) \quad (2.27.c)$$

A corrente de eixo direto do gerador k (equação (2.10)) também é linearizada em torno de um ponto de equilíbrio e é mostrada no conjunto de equações (2.28).

$$\Delta I_{dk} = \left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial E'_{qk}} \right) \Delta E'_{qk} + \left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial V_k} \right) \Delta V_k + \left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial (\delta_k - \theta_k)} \right) \Delta (\delta_k - \theta_k) \quad (2.28)$$

$$\left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{1}{x'_{dk}} \quad (2.28.a)$$

$$\left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial V_k} \right) = -\frac{\cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.28.b)$$

$$\left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} \right) = \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.28.c)$$

Substituindo (2.28) em (2.27) tem-se a equação (2.29) que expressa às variações da tensão interna do gerador k.

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}'_{qk} = \Delta E_{fdk} - \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} + K_{V_k} \Delta V_k - K_{A_k} \Delta(\delta_k - \theta_k) \quad (2.29)$$

$$K_{V_k} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.29.a)$$

$$K_{A_k} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.29.b)$$

Os coeficientes  $K_{V_k}$  e  $K_{A_k}$  são chamados de “coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono k” no MSP.

Em relação ao modelo de Heffron e Phillips (MHP), onde a reação de armadura é representada pelo termo  $K_4$  e associada apenas às variações do ângulo interno do gerador k ( $\delta_k$ ) (DEMELLO; CONCORDIA, 1969), o MSP fornece maiores informações a respeito da reação de armadura do gerador síncrono (DECKMANN; COSTA, 1994). Observe que pela equação (2.29) a reação de armadura no MSP é determinada pelas variações do ângulo da tensão interna do gerador síncrono ( $\delta_k$ ) e do ângulo da tensão da barra terminal ( $\theta_k$ ) (ponderados pelo termo  $K_{A_k}$ ) além da magnitude da tensão terminal ( $V_k$ ) (ponderada pelo termo  $K_{V_k}$ ).

## 2.6. Tensão de Campo da Máquina Síncrona

Para se considerar os efeitos de enrolamento de campo (variação da tensão de excitação da máquina síncrona), faz-se necessário introduzir o RAT do gerador k.

O RAT tem como função modular a tensão de excitação da máquina síncrona ( $E_{fd}$ ), de acordo com as variações da tensão terminal ( $\Delta V_k$ ) em relação a uma tensão de referência pré-



especificada ( $V_{\text{refk}}$ ), conforme o diagrama mostrado na Figura 2.3.

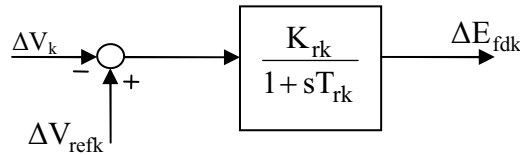


Figura 2.3 – Sistema de Excitação (RAT) do Gerador Síncrono.

Dentre os vários modelos para o RAT, neste trabalho será considerado um de primeira ordem (estático – rápido), representando por um ganho  $K_{rk}$  e por uma constante de tempo  $T_{rk}$ , muito utilizado em estudos da estabilidade a pequenas perturbações (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994).

Por inspeção, da Figura 2.3 pode-se escrever as expressões da tensão de campo  $E_{fd}$  nos domínios da frequência, equação (2.30), e domínios do tempo, equação (2.31).

$$E_{fdk} = \frac{K_{rk}}{1 + sT_{rk}} (V_{refk} - V_k) \quad (2.30)$$

$$\dot{E}_{fdk} = -\frac{E_{fdk}}{T_{rk}} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} (V_{refk} - V_k) \quad (2.31)$$

Admitindo pequenos desvios em torno de um ponto de operação, tem-se a forma linearizada da equação (2.31) mostrada em (2.32).

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k \quad (2.32)$$

## 2.7. Equações de Movimento do Gerador Síncrono

O comportamento das grandezas mecânicas de uma máquina síncrona, em função das grandezas elétricas, é obtido a partir da equação de balanço (swing) da máquina síncrona, representada pela equação (2.33) (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; ANDERSON; FOUAD,

2003; KUNDUR, 1994).

$$M_k \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} = P_{Meck} - P_{Gk} - D_k \frac{d\delta_k}{dt} \quad (2.33)$$

A partir da equação de oscilação do gerador síncrono (equação diferencial de grau dois, que pode ser decomposta em duas equações diferenciais de grau um), as variações do ângulo interno ( $\delta_k$ ) e velocidade angular do rotor ( $\omega_k$ ), linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, são representadas pelas equações (2.34) e (2.35).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_{Meck} - \Delta P_{Gk} - D_k \Delta \omega_k) \quad (2.34)$$

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta \omega_k \quad (2.35)$$

Nas equações (2.34) e (2.35)  $\omega_0$  é a velocidade síncrona (377 rad/s),  $M_k (= 2H_k)$  é a constante de inércia da máquina síncrona e  $D_k$  é o coeficiente de amortecimento inerente do SEP.

Este coeficiente é normalmente designado por “coeficiente de torque de amortecimento do laço eletromecânico” (DEMELLO; CONCORDIA, 1969) e expressa as componentes de torques contrários às oscilações do rotor e aceleração do gerador síncrono. Estes torques se referem a diversos fatores existentes no sistema elétrico de potência como a inércia das cargas, as perdas do sistema de transmissão e do sistema de distribuição, além de possíveis atritos não considerados (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994).

## 2.8. Representações do Sistema Multimáquinas pelo MSP

O conjunto de equações algébricas (2.24) e (2.25) e o conjunto de equações diferenciais (2.29), (2.32), (2.34) e (2.35) permitem representar o sistema multimáquinas através do MSP. Estas representações podem ser realizadas no domínio do tempo e/ou no domínio da frequência.

Para estas representações, considere um sistema multimáquinas constituído de  $ng$

geradores e  $nb$  barras e o conjunto de equações (2.36), que é a representação do SEP pelo MSP-multimáquinas (nesta equação  $\Delta x$ ,  $\Delta z$  e  $\Delta u$  são os vetores de variáveis de estado, variáveis algébricas e entradas do SEP).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta u] \quad (2.36)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta \omega] & [\Delta \delta] & [\Delta E'_q] & [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix}^t \quad (2.36.a)$$

$$\Delta z = \begin{bmatrix} [\Delta \theta] & [\Delta V] \end{bmatrix}^t \quad (2.36.b)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] & [\Delta V_{ref}] & [\Delta P_L] & [\Delta Q_L] \end{bmatrix}^t \quad (2.36.c)$$

$$[\Delta \omega] = [\Delta \omega_1 \dots \Delta \omega_{ng}]^t \quad (2.36.d)$$

$$[\Delta \delta] = [\Delta \delta_1 \dots \Delta \delta_{ng}]^t \quad (2.36.e)$$

$$[\Delta E'_q] = [\Delta E'_{q1} \dots \Delta E'_{q_{ng}}]^t \quad (2.36.f)$$

$$[\Delta E_{fd}] = [\Delta E_{fd1} \dots \Delta E_{fd_{ng}}]^t \quad (2.36.g)$$

$$[\Delta \theta] = [\Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_{nb}]^t \quad (2.36.h)$$

$$[\Delta V] = [\Delta V_1 \dots \Delta V_{nb}]^t \quad (2.36.i)$$

$$[\Delta P_{Mec}] = [\Delta P_{Mec1} \dots \Delta P_{Mecng}]^t \quad (2.36.j)$$

$$[\Delta V_{ref}] = [\Delta V_{ref1} \dots \Delta V_{refng}]^t \quad (2.36.k)$$

$$[\Delta P_L] = [\Delta P_{L1} \dots \Delta P_{Lnb}]^t \quad (2.36.l)$$

$$[\Delta Q_L] = [\Delta Q_{L1} \dots \Delta Q_{Lnb}]^t \quad (2.36.m)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & D_{ng} \end{bmatrix} \quad (2.36.n)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & M_{ng} \end{bmatrix} \quad (2.36.o)$$

$$[\omega_0] = \begin{bmatrix} \omega_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_0 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \omega_0 \end{bmatrix}_{ng \times ng} \quad (2.36.p)$$

$$[x'_d] = \begin{bmatrix} x'_{d1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x'_{d2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & x'_{dng} \end{bmatrix} \quad (2.36.q)$$

$$[x_d] = \begin{bmatrix} x_{d1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x_{d2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & x_{dng} \end{bmatrix} \quad (2.36.r)$$

$$[T'_{do}] = \begin{bmatrix} T'_{do1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & T'_{do2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & T'_{dong} \end{bmatrix} \quad (2.36.s)$$

$$[K_A] = \begin{bmatrix} K_{A1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{A2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K_{Ang} \end{bmatrix} \quad (2.36.t)$$

$$[K_V] = \begin{bmatrix} K_{V1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{V2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K_{Vng} \end{bmatrix} \quad (2.36.u)$$

$$[A1_G] = \begin{bmatrix} A1_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A1_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & A1_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.v)$$

$$[A2_G] = \begin{bmatrix} A2_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A2_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & A2_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.x)$$

$$[A3_G] = \begin{bmatrix} A3_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A3_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & A3_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.z)$$

$$[R1_G] = \begin{bmatrix} R1_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R1_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & R1_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.a')$$

$$[R2_G] = \begin{bmatrix} R2_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R2_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & R2_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.b')$$

$$[\mathbf{R3}_G] = \begin{bmatrix} \mathbf{R3}_{G1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{R3}_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \mathbf{R3}_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.c')$$

Com o conjunto de equações (2.36), podem ser escritas as equações diferenciais e algébricas mostradas nas equações (2.37) e (2.38).

$$\begin{bmatrix} [\Delta \dot{\omega}] \\ [\Delta \dot{\delta}] \\ [\Delta \dot{E}'_q] \\ [\Delta \dot{E}'_{fd}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{D}] & -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A1}_G] & -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A2}_G] & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} \\ [\omega_0] & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & -[\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{K}_A] & -[\mathbf{x}'_d]^{-1}[\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{x}_d] & [\mathbf{T}'_{do}]^{-1} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & -[\mathbf{T}'_r]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E'_{fd}] \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} [\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A1}_G] & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} & -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{A3}_G] & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} \\ [\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{K}_A] & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} & [\mathbf{T}'_{do}]^{-1}[\mathbf{K}_V] & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} & -[\mathbf{T}'_r]^{-1}[\mathbf{K}_r] & [\mathbf{0}]_{ng \times nb-ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \quad (2.37) \\ + \begin{bmatrix} [\mathbf{M}]^{-1} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{T}'_r]^{-1}[\mathbf{K}_r] & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} & [\mathbf{0}]_{ng \times nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{A1}_G] & [\mathbf{A2}_G] & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} \\ [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} \\ [\mathbf{0}]_{ng \times ng} & [\mathbf{R1}_G] & [\mathbf{R2}_G] & [\mathbf{0}]_{ng \times ng} \\ [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E'_{fd}] \end{bmatrix} \quad (2.38) \\ + \begin{bmatrix} [\mathbf{J4}_1] & [\mathbf{J4}_2] \\ [\mathbf{J4}_3] & [\mathbf{J4}_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{nb \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb \times ng} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} & [\mathbf{0}]_{nb \times nb} \\ [\mathbf{0}]_{nb \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb \times ng} & [\mathbf{0}]_{nb \times nb} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix}$$

A matriz  $\mathbf{J4}$  que aparece na representação descrita pela equação matricial (2.36) possui formação semelhante à matriz Jacobiana do fluxo de potência. A lei de formação de cada submatriz componente da matriz  $\mathbf{J4}$  (equação (2.38)) é mostrada no conjunto de equações (2.39).

$$[J4_1] = \begin{cases} J4_{1kk} = -A1_{Gk} - \sum_{k \neq m} A1_{km} \\ J4_{1km} = A1_{km} \end{cases} \quad (2.39.a)$$

$$[J4_2] = \begin{cases} J4_{2kk} = A3_{Gk} - \sum_{k \neq m} A2_{km} \\ J4_{2km} = -A3_{km} \end{cases} \quad (2.39.b)$$

$$[J4_3] = \begin{cases} J4_{3kk} = -R1_{Gk} - \sum_{k \neq m} R1_{km} \\ J4_{3km} = R1_{km} \end{cases} \quad (2.39.c)$$

$$[J4_4] = \begin{cases} J4_{4kk} = R3_{Gk} - \sum_{k \neq m} R2_{km} \\ J4_{4km} = -R3_{km} \end{cases} \quad (2.39.d)$$

A eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$  da equação (2.36) permite realizar a representação na forma de espaço de estados mostrada na equação (2.40) onde “A” é a matriz de estados e “B” é a matriz de entradas.

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.40)$$

$$A = J1 - J2J4^{-1}J3 \quad (2.40.a)$$

$$B = B1 - J2J4^{-1}B2 \quad (2.40.b)$$

Aplicando a Transformada de Laplace nas equações algébricas (2.24) e (2.25) e diferenciais (2.29), (2.32), (2.34) e (2.35), a representação do MSP-multimáquinas no domínio da frequência é obtida, como mostrado na Figura 2.4 (apenas para um gerador genérico k).

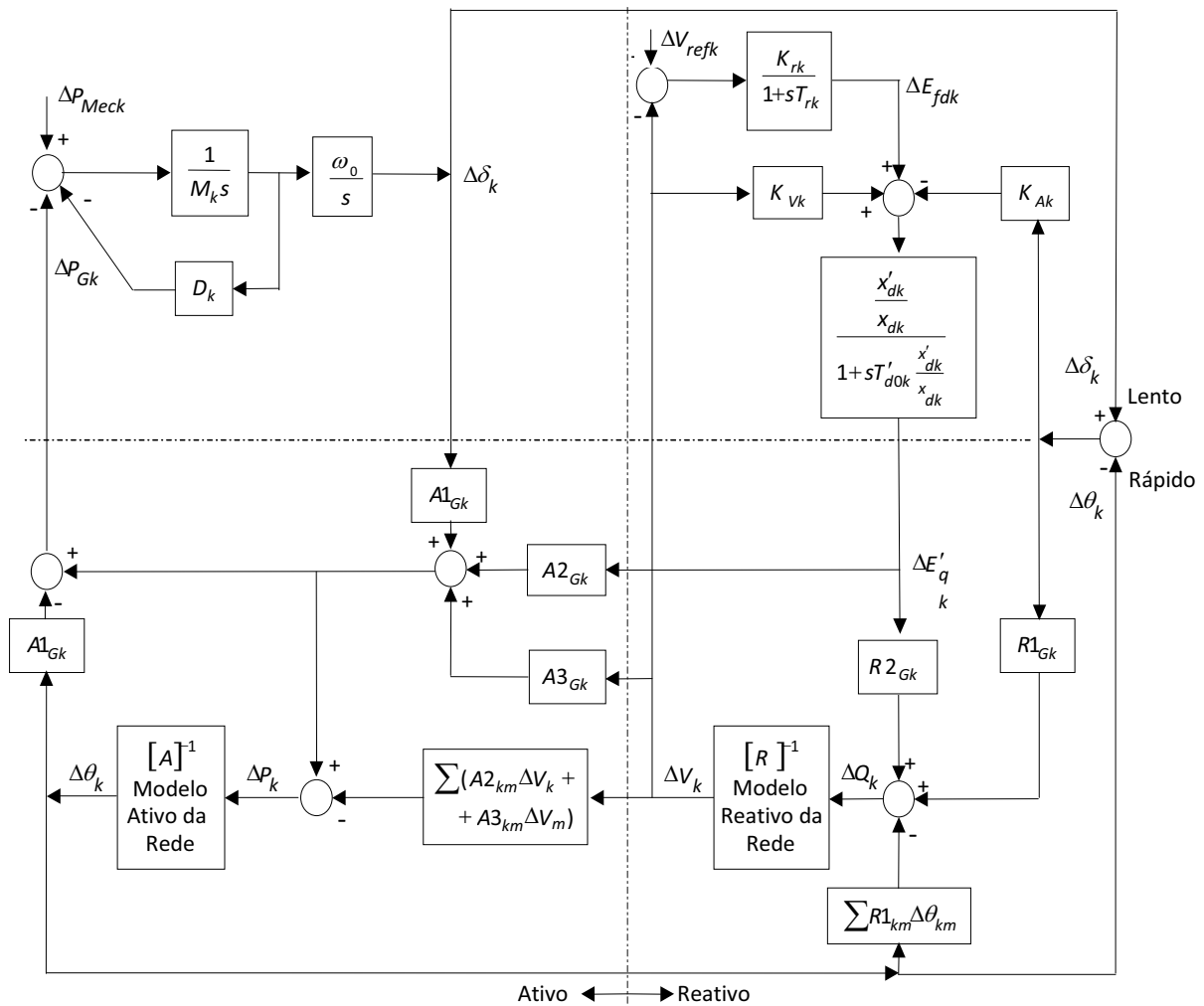


Figura 2.4 – Diagrama de Blocos MSP para Sistemas Multimáquinas.

A representação no domínio da frequência do sistema multimáquinas pelo MSP (diagrama de blocos) permite ver a separação em um subsistema ativo e outro subsistema reativo (delimitados pela linha vertical). À esquerda da linha vertical um subsistema referente às potências ativas envolvidas (subsistema ativo –  $\Delta P_k$ ,  $A_{Gk}$ ,  $A_{km}$ ), e à direita um subsistema reativo (referente às potências reativas envolvidas –  $\Delta Q_k$ ,  $R_{Gk}$ ,  $R_{km}$ ).

O diagrama também é separado por uma linha horizontal que o divide em um subsistema lento (na parte superior) composto de variáveis de estado de variação lenta ( $\Delta\delta_k$ ,  $\Delta E'_{fdk}$ ,  $\Delta E'_{qk}$ ) e em um subsistema rápido (representado na parte inferior), constituído de variáveis algébricas de variação rápida ( $\Delta V_k$ ,  $\Delta\theta_k$ ) (DA COSTA, 1992; DECKMANN; COSTA, 1994).



## 2.9. Conclusões

Neste Capítulo foi apresentado o MSP expandido para o ambiente multimáquinas que pode ser usado no estudo da estabilidade a pequenas perturbações de SEP.

O princípio do modelo é de que os balanços de potência ativa e potência reativa em todas as barras do SEP devem ser satisfeitos em qualquer instante. O modelo resultante é composto por um conjunto de equações diferenciais (onde são definidas as variáveis de estado) e um conjunto de equações algébricas (que definem as variáveis algébricas).

Após o desenvolvimento matemático do modelo, foram feitas representações no domínio do tempo e no domínio da frequência (através de diagramas de blocos).

Estas representações serão modificadas no Capítulo 3 para a inclusão dos modelos dos dispositivos FACTS TCSC e SSSC e seus controladores para posterior análise da estabilidade a pequenas perturbações.

## CAPÍTULO 3

### **Inclusão dos Dispositivos FACTS e seus Controladores no Modelo de Sensibilidade de Potência**

#### **3.1. Introdução**

Neste Capítulo são modelados os dispositivos FACTS TCSC e SSSC para posterior inclusão no MSP. Também são apresentadas as estruturas que definem os controladores POD para cada dispositivo e é feita a inclusão no modelo do SEP. Com isto será verificada a facilidade de inclusão de novos dispositivos no MSP.

#### **3.2. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)**

Para se introduzir melhorias no comportamento em regime permanente e em regime transitório de um SEP podem ser utilizados dispositivos de compensação de potência reativa. A utilização de capacitores série fixos para a compensação da reatância indutiva da LT foi uma solução durante décadas. Porém, para uma efetiva melhora da estabilidade do SEP são exigidos altos níveis de compensação, podendo ocasionar problemas como grandes variações de corrente e fluxo de potência devido às pequenas flutuações na diferença angular entre as barras da LT (KUNDUR, 1994).

O surgimento de tiristores de alta potência proporcionou um grande avanço na compensação de potência reativa e, conseqüentemente, trouxe melhorias na estabilidade dos SEP.

Diante desses avanços, surgem, entre outros, o dispositivo FACTS TCSC que possibilita fazer o controle de fluxo de potência e amortecimento de oscilações, quando equipado com controlador suplementar (NOROOZIAN ; ANDERSSON, 1995; FURINI,

2008; FURINI ; ARAUJO, 2008; FURINI E ARAUJO, 2008 <sup>[2]</sup>).

O TCSC utiliza como princípio fundamental a injeção de uma reatância variável, através da inserção de uma impedância capacitiva, com o objetivo de diminuir a queda de tensão indutiva (aumentando assim a capacidade do sistema de transmissão) e controlar o fluxo de potência na LT.

### 3.3. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

O dispositivo FACTS SSSC pode ser visto como uma fonte de tensão síncrona conectada em série com a LT, capaz de variar a impedância efetiva da linha através de injeção de uma tensão  $V_s$ , em apropriada fase, em relação à corrente da linha, permitindo a troca de potências (ativa e reativa) com o sistema de transmissão.

Se o ângulo da tensão  $V_s$  estiver em fase com a corrente de linha, ocorre à absorção ou injeção de potência ativa. Por outro lado, se o ângulo da tensão  $V_s$  estiver em quadratura com a corrente de linha tem-se a injeção ou absorção de potência reativa (SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002, PUPIN, 2009; PUPIN ET AL., 2009).

O SSSC é basicamente composto de um “conversor fonte de tensão” VSC (Voltage Source Converter) que por meio de tiristores do tipo GTO (Gate Turn-Off) modulam uma tensão em corrente contínua proveniente de uma fonte externa (independente da linha de transmissão). Como resultado tem-se uma tensão AC injetada em série na LT e da mesma frequência fundamental (SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

Para que o SSSC possa trocar potência ativa com a rede é necessária a instalação de um sistema para suprimento de energia mais robusto, substituindo o banco capacitivo, tornando assim o SSSC hábil a compensar a resistência da LT (SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

Se considerado como uma fonte externa de tensão com capacidade suficiente de controlar potência ativa da rede, o SSSC poderá controlar, além da magnitude da tensão da saída AC, também seu ângulo de defasagem em relação à corrente da linha. Neste estudo será considerado que o SSSC irá compensar somente reativos, isto é, não haverá troca de potência ativa com o sistema de transmissão.

### 3.4. Controlador Power Oscillation Damping (POD)

Com a disseminação dos dispositivos FACTS, que podem ser instalados em qualquer localidade do sistema de transmissão, inclusive na interligação entre duas áreas, surgiram estudos que mostraram que estes dispositivos podiam inserir amortecimento a modos de oscilação de baixa frequência, desde que fossem equipados com um controlador adicional, que possuísse a ação suplementar de fornecer torque elétrico em fase com as variações da velocidade angular do rotor (torque de amortecimento) (YANG ET AL. 1998; WANG ; SWIFT, 1998). Estes controladores são comumente chamados de POD – Power Oscillation Damping (UZUNOVIC, 2001; CAI; ERLICH, 2005).

O controlador POD passou a ser utilizado para o controle das oscilações eletromecânicas de baixa frequência, pois permite realizar correções de fase necessárias no SEP, contribuindo significativamente para a introdução de amortecimento (NASSIF, 2004; NASSIF ET ALLI, 2004; CAI; ERLICH, 2005; PEREIRA, 2009; PEREIRA ET AL., 2010; FURINI ET AL. 2010).

A estrutura de um controlador POD é basicamente a mesma de um estabilizador de sistema de potência – ESP (no inglês, PSS – Power System Stabilizer) sendo que a diferença entre eles ocorre no modo de atuação e sinal de entrada. Enquanto que o sinal de saída do ESP é inserido no laço de regulação de tensão do gerador, agindo fortemente sobre os modos locais de oscilação, o POD é instalado em qualquer ponto do sistema de transmissão e pode atuar de maneira efetiva no amortecimento dos modos interárea de oscilação. Além disso, o ESP pode utilizar como sinal de entrada a velocidade angular do gerador (por exemplo), pois este sinal está disponível no local de sua instalação. Em se tratando do POD seus sinais de entrada devem estar disponíveis no local de sua instalação para evitar atrasos no sistema de controle e gastos adicionais com a transmissão do sinal, o que pode diminuir a confiabilidade do sistema elétrico como um todo. Como exemplos de sinal de entrada para o POD podem ser citados o fluxo de potência ativa ou a corrente na linha de transmissão de instalação do FACTS.

De maneira geral um POD é constituído de um filtro passa alta (*washout*), de um circuito compensador de fase e de um ganho estático. O filtro *washout* previne a atuação do controlador em regime permanente. Os blocos de avanço e atraso de fase (*lead-lag*) regulam a defasagem do sinal de entrada conforme o necessário, enquanto que o ganho atua diretamente na quantidade de amortecimento a ser introduzido pelo controlador no SEP.

### 3.5. Inclusão do Dispositivo FACTS TCSC no MSP

Para estudos de estabilidade a pequenas perturbações o dispositivo TCSC, instalado na LT de impedância  $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$  que faz a ligação entre as barras k e m pode ser modelado matematicamente como uma reatância variável ( $X_{CSC}$ ), como mostrado na Figura 3.1.

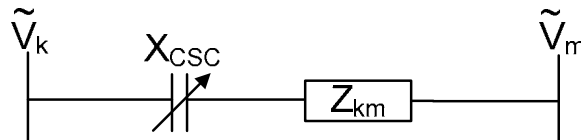


Figura 3.1 – Circuito Equivalente do Dispositivo FACTS TCSC.

A inclusão do TCSC provoca a diminuição da reatância original da linha ( $X_{km}$ ), resultando em uma reatância efetiva ( $X_{TCSC}$ ) como na equação (3.1) (Furini e Araujo, 2008).

$$X_{TCSC} = X_{km} - X_{CSC} \tag{3.1}$$

Na Figura 3.2 um modelo dinâmico linearizado para o TCSC é apresentado, onde o sinal de entrada são as variações da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) na LT onde o controlador está instalado (YANG ET AL., 1998; FURINI; ARAUJO, 2008).

A reatância do TCSC ( $X_{CSC}$ ) é modulada por um bloco de primeira ordem definido por um ganho estático ( $K_{TCSC}$ ) e uma constante de tempo ( $T_{TCSC}$ ), que representa o atraso inerente do sistema de controle do dispositivo. O sinal de referência ( $\Delta X_{ref}$ ) pode ser utilizado para a inserção de um sinal estabilizante suplementar.

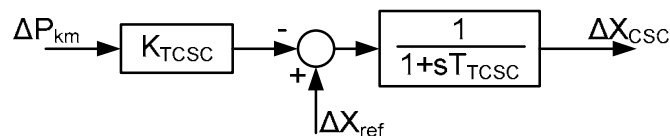


Figura 3.2 – Modelo Dinâmico Linear do Dispositivo FACTS TCSC.

A partir do modelo dinâmico do TCSC apresentado na Figura 3.2, é obtida a equação (3.2) que descreve o comportamento dinâmico do controlador, tornando a reatância do TCSC uma variável de estado do sistema elétrico.

$$\Delta \dot{X}_{CSC} = \frac{1}{T_{TCSC}} (\Delta X_{ref} - \Delta X_{CSC} - K_{TCSC} \Delta P_{km}) \quad (3.2)$$

A inclusão do TCSC no MSP é feita através da consideração da equação (3.2) nas equações dinâmicas do modelo e com a colocação da reatância série constante do dispositivo ( $X_{CSC}$ ), de maneira a modificar os fluxos de potências (ativa e reativa). Assim, a impedância de uma LT entre quaisquer barras  $k$  e  $m$  do SEP, após a inclusão do TCSC, será obtida pela equação (3.3).

$$Z_{TCSC} = R_{km} + j(X_{km} - X_{CSC}) = R_{km} + jX_{ref} \quad (3.3)$$

A corrente e a potência complexa que fluem nesta LT são dadas pelas equações (3.4) e (3.5), respectivamente.

$$\tilde{I}_{km} = \frac{(\tilde{V}_k - \tilde{V}_m)}{Z_{TCSC}} \quad (3.4)$$

$$\tilde{S}_{km} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_{km})^* = P_{km} + jQ_{km} \quad (3.5)$$

A substituição da equação (3.4) na equação (3.5) permite calcular o fluxo de potência complexa na LT de instalação do TCSC.

A separação entre parte real e parte imaginária desta potência complexa fornece os fluxos de potência ativa e potência reativa na linha de transmissão, conforme as equações (3.6) e (3.7), respectivamente.

$$P_{km} = \frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{(X_{km} - X_{CSC})}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (3.6)$$

$$Q_{km} = -\frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{(X_{km} - X_{CSC})}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.7)$$

As equações (3.6) e (3.7) podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio estável fornecendo as equações (3.8) e (3.9) e os respectivos coeficientes de sensibilidade de potência (ativos e reativos).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A4_{km} \Delta X_{CSC} \quad (3.8)$$

$$A1_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial (\theta_{km})} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k V_m \text{sen} \theta_{km}) + \frac{X_{kmef}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k V_m \text{cos} \theta_{km}) \quad (3.8.a)$$

$$A2_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (2V_k - V_m \text{cos} \theta_{km}) + \frac{X_{kmef}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_m \text{sen} \theta_{km}) \quad (3.8.b)$$

$$A3_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k \text{cos} \theta_{km}) + \frac{X_{TCSC}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k \text{sen} \theta_{km}) \quad (3.8.c)$$

$$A4_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial X_{CSC}} \right) = \frac{2R_{km} X_{TCSC}}{|Z_{TCSC}|^4} (V_k^2 - V_k V_m \text{cos} \theta_{km}) + \frac{(-R_{km}^2 + X_{TCSC}^2)}{|Z_{TCSC}|^4} (V_k V_m \text{sen} \theta_{km}) \quad (3.8.d)$$

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta \theta_{km} + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta V_m + R4_{km} \Delta X_{CSC} \quad (3.9)$$

$$R1_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial (\theta_{km})} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k V_m \text{cos} \theta_{km}) + \frac{X_{TCSC}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k V_m \text{sen} \theta_{km}) \quad (3.9.a)$$

$$R2_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_m \text{sen} \theta_{km}) + \frac{X_{TCSC}}{|Z_{TCSC}|^2} (2V_k - V_m \text{cos} \theta_{km}) \quad (3.9.b)$$

$$R3_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k \text{sen} \theta_{km}) - \frac{X_{TCSC}}{|Z_{TCSC}|^2} (V_k \text{cos} \theta_{km}) \quad (3.9.c)$$

$$R4_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial X_{CSC}} \right) = -\frac{2R_{km} X_{TCSC}}{|Z_{TCSC}|^4} (V_k V_m \text{sen} \theta_{km}) + \frac{(-R_{km}^2 + X_{TCSC}^2)}{|Z_{TCSC}|^4} (V_k^2 - V_k V_m \text{cos} \theta_{km}) \quad (3.9.d)$$

Deve ser observado que devido à inclusão do TCSC no sistema elétrico de potência são definidos dois novos coeficientes, um coeficiente ativo  $A4_{kmTCSC}$  e outro reativo  $R4_{kmTCSC}$ , que ponderam, respectivamente, as variações dos fluxos de potência ativa e potência reativa devido às variações da reatância do dispositivo FACTS TCSC.

O comportamento dinâmico do TCSC é completamente descrito pela equação (3.10) obtida na substituição da equação (3.8) na equação (3.2).

$$\Delta \dot{X}_{CSC} = K1_{CSC} \Delta X_{CSC} + K2_{CSC} \Delta \theta_{km} + K3_{CSC} \Delta V_k + K4_{CSC} \Delta V_m + K5_{CSC} \Delta X_{ref} \quad (3.10)$$

$$K1_{CSC} = \frac{(-K_{TCSC} A4_{km} - 1)}{T_{TCSC}} \quad (3.10.a)$$

$$K2_{CSC} = \frac{-K_{TCSC} A1_{km}}{T_{TCSC}} \quad (3.10.b)$$

$$K3_{CSC} = \frac{-K_{TCSC} A2_{km}}{T_{TCSC}} \quad (3.10.c)$$

$$K4_{CSC} = \frac{-K_{TCSC} A3_{km}}{T_{TCSC}} \quad (3.10.d)$$

$$K5_{CSC} = \frac{1}{T_{TCSC}} \quad (3.10.e)$$

Para um sistema multimáquinas com múltiplos dispositivos TCSCs instalados, as constantes definidas na equação (3.10) podem ser agrupadas na forma matricial de acordo com o conjunto de equações (3.11).

$$[K1_{CSC}] = \begin{bmatrix} K1_{CSC1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K1_{CSC2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K1_{CSCnt} \end{bmatrix} \quad (3.11.a)$$



$$[K2_{CSC}] = \begin{cases} K2_{CSC}=(nt, nb \text{ inicial})=-K2_{CSC} \\ K2_{CSC}=(nt, nb \text{ final})=K2_{CSC} \\ K2_{CSC}=(nt, nb)=0 \end{cases} \quad (3.11.b)$$

$$[K34_{CSC}] = \begin{cases} K34_{CSC}=(nt, nb \text{ inicial})=K3_{CSC} \\ K34_{CSC}=(nt, nb \text{ final})=K4_{CSC} \\ K34_{CSC}=(nt, nb)=0 \end{cases} \quad (3.11.c)$$

$$[K5_{CSC}] = \begin{bmatrix} K5_{CSC1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K5_{CSC2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K5_{CSCnt} \end{bmatrix} \quad (3.11.d)$$

Na formulação mostrada na equação (3.11) foi considerado um sistema multimáquinas com  $ng$  geradores,  $nb$  barras e  $nt$  dispositivos TCSC instalados em LT que interligam barras iniciais ( $nb$  inicial) e finais ( $nb$  final), definidas de acordo com o sentido do fluxo de potência na referida LT.

O conjunto de equações (3.11) e a equação matricial (2.37) podem ser agrupados obtendo a equação matricial (3.12), que representa o comportamento das variáveis dinâmicas do MSP para sistemas multimáquinas com consideração de múltiplos dispositivos TCSCs em operação.

$$\begin{bmatrix} [\Delta\dot{\omega}] \\ [\Delta\dot{\delta}] \\ [\Delta\dot{E}'_q] \\ [\Delta\dot{E}'_{fd}] \\ [\Delta\dot{X}_{CSC}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{4ng \times nt} \\ [0]_{nt \times 4ng} & [K1_{CSC}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\omega] \\ [\Delta\delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E'_{fd}] \\ [\Delta X_{CSC}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J2] \\ [K2_{CSC}] & [K34_{CSC}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1] & [0]_{4ng \times nt} \\ [0]_{nt \times 4ng} & [K5_{CSC}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta X_{ref} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para descrever as equações algébricas do sistema multimáquinas considere as equações (3.13) e (3.14) que mostram a regra de formação das submatrizes  $A4_{km}$  e  $R4_{km}$ , que representam o efeito do dispositivo FACTS TCSC no balanço nodal de potência ativa e

potência reativa em cada barra do sistema.

$$[A4_{Tkm}] = \begin{cases} A4_{Tkm} = (\text{nb inicial}, \text{nt}) = -A4_{km} \\ A4_{Tkm} = (\text{nb final}, \text{nt}) = -A4_{mk} \\ A4_{Tkm} = (\text{nb}, \text{nt}) = 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$[R4_{Tkm}] = \begin{cases} R4_{Tkm} = (\text{nb inicial}, \text{nt}) = -R4_{km} \\ R4_{Tkm} = (\text{nb final}, \text{nt}) = -R4_{mk} \\ R4_{Tkm} = (\text{nb}, \text{nt}) = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Com as equações (3.8), (3.9) e (3.14) é obtida a forma matricial das equações algébricas, como mostrado na equação (3.15), que descrevem o balanço nodal de potência ativa e potência reativa que deve ser satisfeito durante todo o tempo.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J3] & [A4_{Tkm}] \\ & [R4_{Tkm}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\omega] \\ [\Delta\delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X_{CSC}] \end{bmatrix} + [J4] \begin{bmatrix} [\Delta\theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B2] & [0]_{ng \times nt} \\ & [0]_{ng \times nt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta X_{ref} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

As equações (3.13) e (3.15), podem ser expressas de uma maneira compacta conforme a equação (3.16), onde o SEP fica descrito por equações de estado e equações algébricas.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_T \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_T & J2_T \\ J3_T & J4_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_T \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_T \\ B2_T \end{bmatrix} \Delta u_T \quad (3.16)$$

A representação no espaço de estados é obtida da eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$ , fornecendo a equação (3.17).

$$\Delta \dot{x}_T = A_T \Delta x_T + B_T \Delta u \quad (3.17)$$

$$A_T = J1_T - J2_T J4_T^{-1} J3_T \quad (3.17.a)$$

$$B_T = B1_T - J2_T J4_T^{-1} B2_T \quad (3.17.b)$$

Na equação (3.17)  $A_T$  é matriz de estados e  $B_T$  é matriz de entradas.

### 3.6. Inclusão do Dispositivo TCSC com Controlador POD no MSP

Na Figura 3.3 é mostrada uma estrutura convencional de um controlador POD (NASSIF ET ALLI, 2004; CAI; ERLICH, 2005; PEREIRA ET AL., 2010; FURINI ET AL., 2010), bem como sua atuação na variável de controle do TCSC ( $\Delta X_{CSC}$ ).

O sinal de entrada escolhido para o POD é a variação do fluxo de potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) na LT onde o dispositivo FACTS TCSC está instalado por se tratar de um sinal disponível localmente e, para facilidade de entendimento, sua expressão é repetida na equação (3.18).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A4_{km} \Delta X_{CSC} \quad (3.18)$$

Outro fato importante é que os modos interárea de oscilação possuem alta observabilidade neste sinal, tornando prática comum o uso do fluxo de potência ativa para a entrada do controlador POD (YANG ET ALLI, 1998).

Ainda na Figura 3.3 é utilizado o sinal  $\Delta X_{ref}$ , sendo este o desvio do valor da reatância do TCSC em regime permanente.

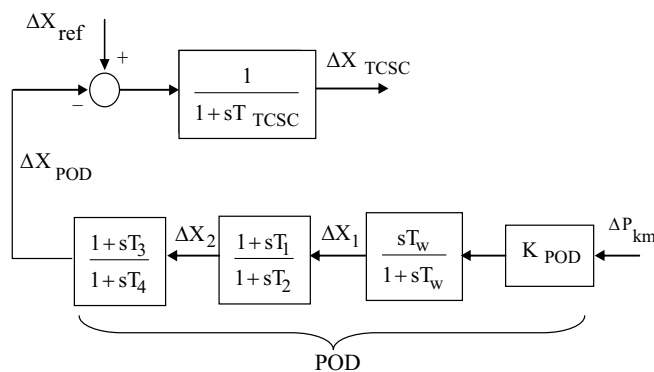


Figura 3.3 – Modelo Dinâmico do Dispositivo FACST TCSC com Controlador POD.

Como o sinal de entrada do controlador POD não é uma variável de estado, cada bloco

que forma sua estrutura pode ser dividido em dois blocos (FURINI; ARAUJO, 2008), resultando na definição de novas variáveis de estado (sem significado físico), mas que são úteis para modelar o controlador na forma de espaço de estados.

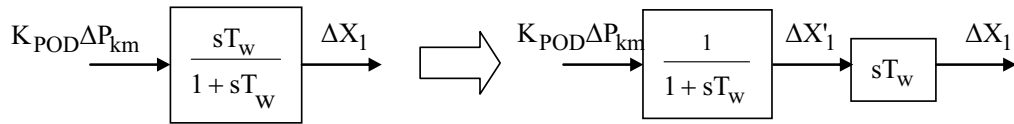


Figura 3.4 – Divisão do Bloco *washout* para o Dispositivo FACTS TCSC.

A divisão para o bloco *washout* pode ser feita como mostrado na Figura 3.4 onde, por inspeção, obtém-se a equação (3.19), que define a variável de estado  $\Delta X'_1$ .

$$\Delta \dot{X}'_1 = \frac{K_{POD}}{T_w} \Delta P_{km} - \frac{1}{T_w} \Delta X'_1 \quad (3.19)$$

De forma análoga, a mesma divisão é aplicada aos blocos de avanço-atraso de fase, resultando nas Figuras 3.5.a e 3.5.b.

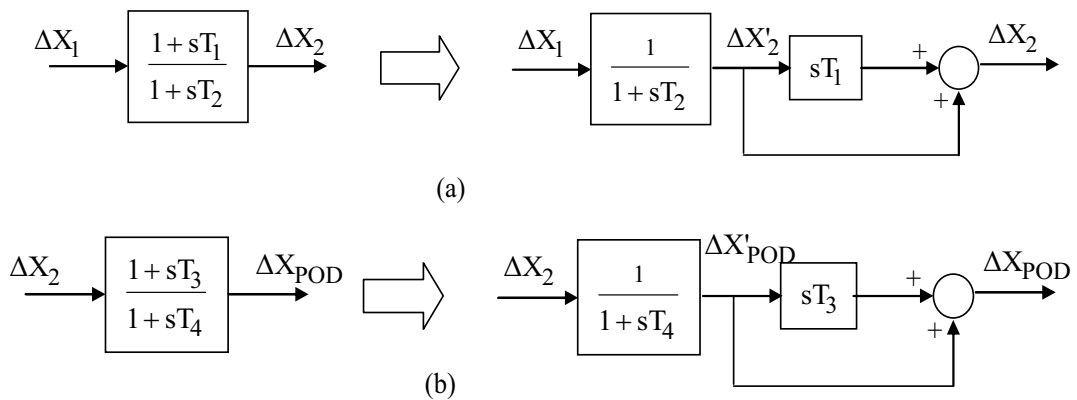


Figura 3.5 – Divisão dos Blocos Avanço-Atraso de Fase para o Dispositivo FACTS TCSC.

Por inspeção, a partir do diagrama de blocos da Figura 3.5.a e da equação (3.19) é obtida a variável de estado  $\Delta X'_2$  do primeiro bloco de compensação de avanço-atraso de fase (equação (3.20)).

$$\Delta \dot{X}'_2 = \frac{K_{POD}}{T_2} \Delta P_{km} - \frac{1}{T_2} \Delta X'_1 - \frac{1}{T_2} \Delta X'_2 \quad (3.20)$$

De maneira análoga, para a obtenção da variável de estado  $\Delta X'_{\text{POD}}$  (equação (3.21)), utiliza-se da Figura 3.5.b e da equação (3.20).

$$\Delta \dot{X}'_{\text{POD}} = K_{\text{POD}} \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta P_{\text{km}} - \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta X'_1 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} \Delta X'_2 - \frac{1}{T_4} \Delta X'_{\text{POD}} \quad (3.21)$$

Finalmente, obtém-se a expressão da variável de interesse  $\Delta X_{\text{CSC}}$  como mostrada na equação (3.22), agora definida como uma variável de estado.

Esta variável será a responsável pela modulação da reatância série do dispositivo TCSC e, conseqüentemente, a responsável pela introdução de amortecimento ao sistema de energia elétrica.

$$\Delta \dot{X}_{\text{CSC}} = -\frac{K_{\text{POD}} T_1 T_3}{T_{\text{TCSC}} T_2 T_4} \Delta P_{\text{km}} - \frac{T_1 T_3}{T_{\text{TCSC}} T_2 T_4} \Delta X'_1 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_3}{T_4 T_{\text{TCSC}}} - \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} \Delta X'_{\text{POD}} - \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} \Delta X_{\text{CSC}} + \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} \Delta X_{\text{ref}} \quad (3.22)$$

Para a inclusão do controlador POD no MSP, novamente são modificadas as equações (3.12) e (3.15). Estas modificações resultam nas equações (3.23) e (3.24), onde o vetor de variáveis de estado é acrescido das variáveis introduzidas pelo POD.

$$\begin{bmatrix} [\Delta \dot{\omega}] \\ [\Delta \dot{\delta}] \\ [\Delta \dot{E}'_q] \\ [\Delta \dot{E}'_{fd}] \\ [\Delta \dot{X}'_1] \\ [\Delta \dot{X}'_2] \\ [\Delta \dot{X}'_{\text{POD}}] \\ [\Delta \dot{X}_{\text{CSC}}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{4ng \times 4nt} \\ [0]_{4nt \times 4ng} & [A_{\text{POD}}]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E'_{fd}] \\ [\Delta X'_1] \\ [\Delta X'_2] \\ [\Delta X'_{\text{POD}}] \\ [\Delta X_{\text{CSC}}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J2] \\ [J_{\text{POD}}]_{4nt \times 2nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1] \\ [0]_{3 \times (2ng + 2nb + nt)} \\ [0]_{nt \times (2ng + 2nb)} \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{\text{ref}} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta X_{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J3] & [0]_{2nb \times 3nt} & [A4_{T_{km}}] \\ & & [R4_{T_{km}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\omega] \\ [\Delta\delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_{POD} \\ [\Delta X_{CSC}] \end{bmatrix} + [J4] \begin{bmatrix} [\Delta\theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B2] & [0]_{ng \times nt} \\ & [0]_{ng \times nt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta X_{ref} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

A submatriz  $A_{POD}$ , presente na equação (3.23), relaciona os parâmetros de operação do POD com os coeficientes de sensibilidade do TCSC ( $A4_{km}$  e  $R4_{km}$ ). Esta submatriz é mostrada na equação (3.25). A submatriz  $J_{POD}$ , também presente na equação (3.23), relaciona os parâmetros do POD com a magnitude e ângulo das tensões nas barras do sistema que receberam a instalação do POD. As duas primeiras colunas da matriz  $J_{POD}$  multiplicam as variações angulares, enquanto que as duas últimas ponderam as variações da magnitude das tensões nas barras do sistema elétrico. Esta submatriz é mostrada na equação (3.26).

$$[A_{POD}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 & \frac{K_{POD}}{T_W} A4_{km} \\ -\frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{K_{POD}}{T_2} A4_{km} \\ -\frac{1}{T_2 T_4} & \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} & -\frac{1}{T_4} & \frac{K_{POD} T_1}{T_2 T_4} A4_{km} \\ -\frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} & -\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_3}{T_4 T_{TCSC}} & -\left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_{TCSC}} & -\frac{K_{POD} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} A4_{km} - \frac{1}{T_{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[J_{POD}] = \begin{bmatrix} \frac{K_{POD}}{T_W} A1_{km} & -\frac{K_{POD}}{T_W} A1_{km} & \frac{K_{POD}}{T_W} A2_{km} & \frac{K_{POD}}{T_W} A3_{km} \\ \frac{K_{POD}}{T_2} A1_{km} & -\frac{K_{POD}}{T_2} A1_{km} & \frac{K_{POD}}{T_2} A2_{km} & \frac{K_{POD}}{T_2} A3_{km} \\ \frac{K_{POD} T_1}{T_2 T_4} A1_{km} & -\frac{K_{POD} T_1}{T_2 T_4} A1_{km} & \frac{K_{POD} T_1}{T_2 T_4} A2_{km} & \frac{K_{POD} T_1}{T_2 T_4} A3_{km} \\ -\frac{K_{POD} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} A1_{km} & \frac{K_{POD} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} A1_{km} & -\frac{K_{POD} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} A2_{km} & -\frac{K_{POD} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} A3_{km} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

As equações (3.23) e (3.24) representam completamente o MSP e podem ser

organizadas na equação (3.27) de uma forma compacta.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{TPOD} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_{TPOD} & J2_{TPOD} \\ J3_{TPOD} & J4_{TPOD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{TPOD} \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{TPOD} \\ B2_{TPOD} \end{bmatrix} [\Delta u_{TPOD}] \quad (3.27)$$

A representação no espaço de estados é obtida da eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$ , fornecendo a equação (3.28).

$$\Delta \dot{X}_{TPOD} = (J1_{TPOD} - J2_{TPOD} J4^{-1} J3_{TPOD}) \Delta X_{TPOD} + (B1_{TPOD} - J2_{TPOD} J4^{-1} B2_{TPOD}) \Delta u_{TPOD} \quad (3.28)$$

### 3.7. Inclusão do Dispositivo FACTS SSSC no MSP

Considerando o SSSC como uma tensão variável inserida em série com a linha de transmissão por um transformador de acoplamento de reatância  $X_C$ , o circuito elétrico com o dispositivo FACTS SSSC instalado pode ser representado por um equivalente como mostrado na Figura 3.6.

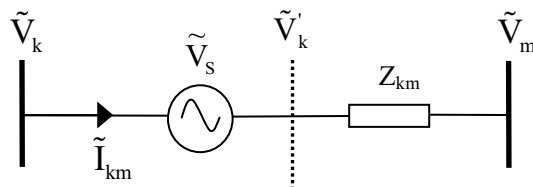


Figura 3.6 – Circuito Equivalente do Dispositivo FACTS SSSC.

Na Figura 3.6  $Z_{km}$  é a impedância entre as barras k e m e  $Z_{SSSC}$  é a impedância equivalente após a inserção do dispositivo SSSC, resultante da soma das impedâncias entre as barras k e m e da reatância do transformador de acoplamento, como na equação (3.29)

$$Z_{SSSC} = Z_{km} + jX_C \quad (3.29)$$

Para a dedução do modelo do dispositivo FACTS SSSC, inicialmente será considerado que a tensão série do SSSC é nula ( $\tilde{V}_s = 0$ ). Nesta condição a corrente que percorre a linha de

transmissão que liga as barras k e m é dada na equação (3.30) e na Figura 3.7 é mostrado o diagrama fasorial equivalente do sistema (Pupin, 2009).

$$\tilde{I}_{km} = \frac{(\tilde{V}_k - \tilde{V}_m)}{Z_{SSSC}} \quad (3.30)$$

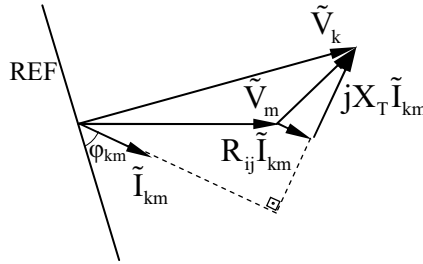


Figura 3.7 – Diagrama Fasorial Equivalente do Dispositivo FACTS SSSC:  $V_s = 0$ .

O ângulo e a corrente, referenciados ao sistema elétrico é obtido após manipulações geométricas, decompondo o fasor da corrente em parte real e parte imaginária, conforme mostrado na Figura 3.8.

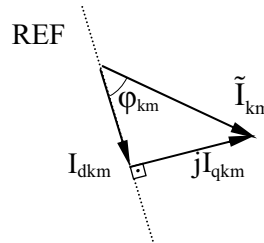


Figura 3.8 – Corrente entre as Barras k e m.

Manipulando a equação (3.30) obtém-se a expressão da corrente em função das variáveis da linha de transmissão entre as barras k e m (equação (3.31)).

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{km} = I_{dkm} + jI_{qkm} = & \frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_k \cos\theta_k - V_m \cos\theta_m) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_k \sin\theta_k - V_m \sin\theta_m) + \\ & + j \left[ \frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_k \sin\theta_k - V_m \sin\theta_m) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_m \cos\theta_m - V_k \cos\theta_k) \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

O ângulo da corrente para o caso de ( $\tilde{V}_s = 0$ ) é dado pela equação (3.32).



$$\phi_{km} = \tan^{-1} \left[ \frac{R_{km} (V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m) + X_{SSSC} (V_m \cos \theta_m - V_k \cos \theta_k)}{R_{km} (V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m) + X_{SSSC} (V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m)} \right] \quad (3.32)$$

Neste trabalho somente será considerada a compensação reativa por parte do SSSC. Sendo assim, a tensão série injetada pelo SSSC na rede sempre estará em quadratura com a corrente, independente do tipo de compensação reativa realizada (capacitiva ou indutiva).

Considerando a tensão série injetada diferente de zero, o SSSC pode atuar de duas diferentes formas, modo capacitivo (suprindo reativos) ou modo indutivo (absorvendo reativos) como mostrado nas Figuras 3.9.a e 3.9.b, respectivamente.

A variável  $\tilde{V}_s$  é definida a partir do nível de compensação reativa que se deseja aplicar na LT através do SSSC. A equação (3.33) atribui o valor de  $\tilde{V}_s$  considerando um nível k de compensação estipulado e é obtida a partir de manipulações geométricas do diagrama fasorial mostrado na Figura 3.9.a.

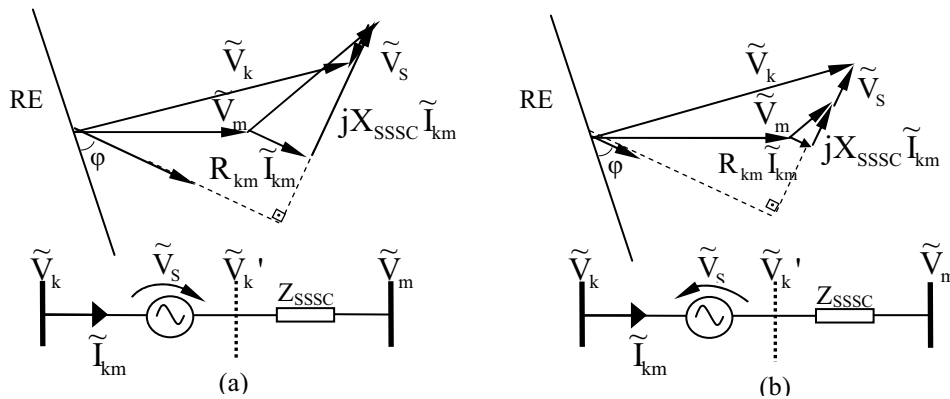


Figura 3.9 – Diagrama Fasorial: Modos de Operação do Dispositivo FACTS SSSC.

Com a tensão série injetada pelo SSSC definida na equação (3.34), é possível determinar a corrente na linha de transmissão entre as barras k e m, conforme mostrada na equação (3.35).

$$V_s = kX_{SSSC} |\tilde{I}_{km}| = kX_{SSSC} \sqrt{\frac{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}{R_{km}^2 + X_{SSSC}^2 (1-k)^2}} \quad (3.33)$$

$$\tilde{V}_s = V_s \angle \alpha \quad (3.34)$$

$$\tilde{I}_{km} = I_{km} \angle \varphi = \frac{\tilde{V}_k - \tilde{V}_s - \tilde{V}_m}{Z_{SSSC}} = \frac{\tilde{V}_k - \tilde{V}_m}{Z_{SSSC}} + \left( -\frac{\tilde{V}_s}{Z_{SSSC}} \right) = \tilde{I}_0 + \tilde{I}_{kmSSSC} \quad (3.35)$$

Analisando a equação (3.35) pode-se concluir que a corrente na linha de transmissão pode ser obtida pela superposição de efeitos, somando o termo da corrente na condição inicial ( $\tilde{I}_0$ ) com a parcela da corrente introduzida pelo SSSC, mostrada na equação (3.36).

$$\tilde{I}_{kmSSSC} = -\frac{\tilde{V}_s}{Z_{SSSC}} = -\frac{V_s}{|Z_{SSSC}|^2} (R_{km} \cos \alpha + X_{SSSC} \operatorname{sen} \alpha) - j \frac{V_s}{|Z_{SSSC}|^2} (R_{km} \operatorname{sen} \alpha - X_{SSSC} \cos \alpha) \quad (3.36)$$

O fluxo de potência complexa entre as barras k e m com a inclusão do SSSC é expresso pela equação (3.37), obtida utilizando-se novamente o conceito da superposição de efeitos. Desta forma, pode-se efetuar a soma dos termos de potência complexa para a condição de  $\tilde{V}_s = 0$  com a potência complexa injetada pelo SSSC quando  $\tilde{V}_s \neq 0$ .

$$\dot{S}_{km} = \dot{S}_{km0} + \dot{S}_{kmSSSC} \quad (3.37)$$

O desenvolvimento do termo  $\dot{S}_{kmSSSC}$  da expressão (3.37), que representa a parcela de potência complexa (ativa e reativa) inserida pelo SSSC, fornece as equações (3.38) a (3.40).

$$\dot{S}_{kmSSSC} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_{kmSSSC})^* = P_{kmSSSC} + j Q_{kmSSSC} \quad (3.38)$$

$$P_{kmSSSC} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_s \cos(\theta_k - \alpha) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_m \operatorname{sen}(\theta_k - \alpha) \quad (3.39)$$

$$Q_{kmSSSC} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_s \operatorname{sen}(\theta_k - \alpha) - \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_s \cos(\theta_k - \alpha) \quad (3.40)$$

A potência ativa e a potência reativa são representadas respectivamente pelas equações (3.39) e (3.40), estando ambas em função do ângulo da tensão série  $\tilde{V}_s$  do dispositivo FACTS SSSC.

Considerando o SSSC atuando em seu modo capacitivo, ou seja, com o ângulo da tensão  $\tilde{V}_S$  atrasada de  $90^\circ$  em relação à corrente da linha de transmissão ( $\alpha = \varphi - 90^\circ$ ), as equações (3.39) e (3.40) podem ser reescritas como nas equações (3.41) e (3.42).

$$P_{km_{SSSC}} = \frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_S \sin(\theta_k - \varphi) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_S \cos(\theta_k - \varphi) \quad (3.41)$$

$$Q_{km_{SSSC}} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_S \cos(\theta_k - \varphi) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_S \sin(\theta_k - \varphi) \quad (3.42)$$

As equações (3.41) e (3.42) estão em função do ângulo da tensão da barra k ( $\theta_k$ ) e do ângulo da corrente que flui da barra k para a m ( $\varphi$ ). Tem-se assim, a necessidade de se determinar as equações das potências em função de valores conhecidos, como os ângulos das tensões nas barras k e m. Para este fim, considere o diagrama fasorial mostrado na Figura 3.10, na condição de  $\tilde{V}_S = 0$ , onde  $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$  e  $\theta_{m\varphi} = \theta_m - \varphi$ .

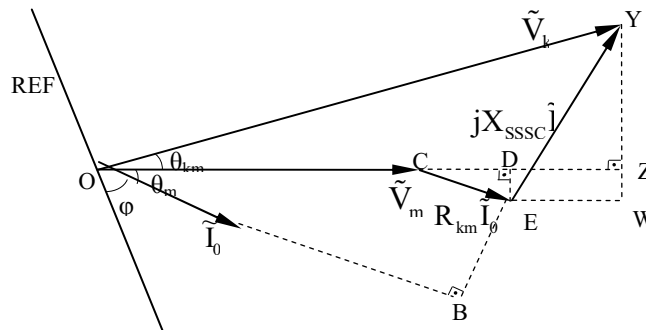


Figura 3.10 – Diagrama Fasorial:  $\tilde{V}_S = 0$ .

A partir da Figura 3.10 e relações geométricas, são escritas as equações (3.43) a (3.48).

$$\cos(\theta_k - \varphi) = \frac{\overline{OB}}{\overline{OY}} = \frac{R_{km}}{V_k} I_0 + \frac{V_m}{V_k} \cos(\theta_m - \varphi) \quad (3.43)$$

$$\sin(\theta_k - \varphi) = \frac{\overline{BY}}{\overline{OY}} = \frac{X_{SSSC}}{V_k} I_0 + \frac{V_m}{V_k} \sin(\theta_m - \varphi) \quad (3.44)$$

$$\cos(\theta_k - \theta_m) = \frac{\overline{OZ}}{V_k} = \frac{V_m}{V_k} + \frac{R_{km}}{V_k} I_0 \cos(\theta_m - \varphi) + \frac{X_{SSSC}}{V_k} I_0 \sin(\theta_m - \varphi) \quad (3.45)$$

$$\sin(\theta_k - \theta_m) = \frac{\overline{YZ}}{V_k} = \frac{X_{SSSC}}{V_k} I_0 \cos(\theta_m - \varphi) - \frac{R_{km}}{V_k} I_0 \sin(\theta_m - \varphi) \quad (3.46)$$

$$\cos(\theta_m - j) = \frac{\overline{CD}}{R_{km} I_0} = \frac{V_k \left[ R_{km} \left( \cos\theta_{km} - \frac{V_m}{V_k} \right) + X_{SSSC} \sin\theta_{km} \right]}{\sqrt{(R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km})}} \quad (3.47)$$

$$\sin(\theta_m - j) = \frac{\overline{DE}}{R_{km} I_0} = \frac{V_k \left[ -R_{km} \sin\theta_{km} + X_{SSSC} \left( \cos\theta_{km} - \frac{V_m}{V_k} \right) \right]}{\sqrt{(R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km})}} \quad (3.48)$$

Substituindo-se as equações (3.47) e (3.48) nas equações (3.43) e (3.44), são obtidas as equações (3.45) e (3.46).

$$\cos\theta_{kj} = \frac{R_{km}}{V_k |Z_{SSSC}|} \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}} + \frac{V_m \left[ R_{km} \left( \cos\theta_{km} - \frac{V_m}{V_k} \right) + X_{SSSC} \sin\theta_{km} \right]}{|Z_{SSSC}| \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \quad (3.45)$$

$$\sin\theta_{kj} = \frac{X_{SSSC}}{V_k |Z_{SSSC}|} \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}} + \frac{V_m \left[ -R_{km} \sin\theta_{km} + X_{SSSC} \left( \cos\theta_{km} - \frac{V_m}{V_k} \right) \right]}{|Z_{SSSC}| \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \quad (3.46)$$

Voltando às equações da potência ativa e da potência reativa inseridas pelo SSSC no sistema, equações (3.41) e (3.42), e substituindo as equações (3.45) e (3.46), obtêm-se as expressões das potências ativa e reativa injetadas ou absorvidas pelo SSSC na forma desejada, como mostradas nas equações (3.47) e (3.48).

$$P_{km_{SSSC}} = \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left( \frac{V_k^2 - V_k V_m \cos\theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \right) + \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_k V_m V_S \sin\theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \quad (3.47)$$

$$Q_{km_{SSSC}} = -\frac{2R_{km} X_T V_k V_m V_S \text{sen}\theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} + \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left( \frac{V_k^2 - V_k V_m \cos\theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \right) \quad (3.48)$$

Somando as equações (3.47) e (3.48), que representam as potências ativa e reativa inseridas no sistema elétrico pelo dispositivo FACTS SSSC, com a equação (3.37), que fornece as expressões da potência ativa e da potência reativa transferida da barra k para a barra m, são obtidas as equações (3.49) e (3.50), que modelam o dispositivo FACTS SSSC no SEP, considerando a resistência da linha de transmissão.

$$P_{km} = \frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos\theta_{km}) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_k V_m \text{sen}\theta_{km}) \quad (3.49)$$

$$+ \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left( \frac{V_k^2 - V_k V_m \cos\theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \right) + \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_k V_m V_S \text{sen}\theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}}$$

$$Q_{km} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_k V_m \text{sen}\theta_{km}) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos\theta_{km}) \quad (3.50)$$

$$- \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_k V_m V_S \text{sen}\theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} + \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left( \frac{V_k^2 - V_k V_m \cos\theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \right)$$

A linearização das equações (3.49) e (3.50) fornecem as equações (3.51) e (3.52), onde ficam definidos os coeficientes de sensibilidade de potência ativa e potência reativa da linha de transmissão, respectivamente.

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta\theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A4_{km} \Delta V_S \quad (3.51)$$

$$A1_{km} = \frac{\delta P_{km}}{\delta\theta_{km}} = \frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_m \text{sen}\theta_{km} + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_m \cos\theta_{km} \quad (3.51.a)$$

$$+ \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_k V_m V_S \text{sen}\theta_{km} (V_m^2 - V_k V_m \cos\theta_{km})}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}}$$

$$+ \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_k V_m V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left[ \frac{\cos\theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} - \frac{V_k V_m \text{sen}^2\theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}^3} \right]$$

$$\begin{aligned}
A2_{km} &= \frac{\delta P_{km}}{\delta V_k} = \frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_m \text{sen} \theta_{km} \\
&+ \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_m V_S \text{sen} \theta_{km} (V_m^2 - V_k V_m \cos \theta_{km})}{|Z_T|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} \\
&+ \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left[ \frac{V_k - V_m \cos \theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} + \frac{V_k V_m^2 \text{sen}^2 \theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}^3} \right]
\end{aligned} \tag{3.51.b}$$

$$\begin{aligned}
A3_{km} &= \frac{\delta P_{km}}{\delta V_m} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k \cos \theta_{km} + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k \text{sen} \theta_{km} \\
&+ \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_k V_S \text{sen} \theta_{km} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km})}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} \\
&- \frac{2R_{km} X_T V_k V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left[ \frac{\cos \theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} + \frac{(V_m - V_k \cos \theta_{km})(V_k - V_m \cos \theta_{km})}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}^3} \right]
\end{aligned} \tag{3.51.c}$$

$$A4_{km} = \frac{\delta P_{km}}{\delta V_S} = \frac{2R_{km} X_{SSSC} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km})}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} + \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_k V_m \text{sen} \theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} \tag{3.51.d}$$

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta \theta_{km} + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta V_m + R4_{km} \Delta V_S \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}
R1_{km} &= \frac{\delta Q_{km}}{\delta \theta_{km}} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_m \cos \theta_{km} + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k V_m \text{sen} \theta_{km} \\
&+ \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_k V_m V_S \text{sen} \theta_{km} (V_m^2 - V_k V_m \cos \theta_{km})}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} \\
&- \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_k V_m V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left[ \frac{\cos \theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} - \frac{V_k V_m \text{sen}^2 \theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}^3} \right]
\end{aligned} \tag{3.52.a}$$

$$\begin{aligned}
R2_{km} &= \frac{\delta Q_{km}}{\delta V_k} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_m \text{sen} \theta_{km} + \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) \\
&- \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_m V_S \text{sen} \theta_{km} (V_m^2 - V_k V_m \cos \theta_{km})}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} \\
&+ \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_S}{|Z_{SSSC}|^3} \left[ \frac{V_k - V_m \cos \theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}} + \frac{V_k V_m^2 \text{sen}^2 \theta_{km}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}}^3} \right]
\end{aligned} \tag{3.52.b}$$

$$\begin{aligned}
R3_{km} = & \frac{\delta Q_{km}}{\delta V_m} = -\frac{R_{km}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k \sin\theta_{km} - \frac{X_{SSSC}}{|Z_{SSSC}|^2} V_k \cos\theta_{km} \\
& - \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) V_k^2 V_m V_s \sin^2\theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \\
& - \frac{2R_{km} X_{SSSC} V_k V_s \sin\theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3} \left[ \frac{1}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} - \frac{V_m (V_m - V_k \cos\theta_{km})}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}^3} \right] \quad (3.52.c)
\end{aligned}$$

$$R4_{km} = \frac{\delta Q_{km}}{\delta V_s} = -\frac{2R_{km} X_{SSSC} V_k V_m \sin\theta_{km}}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} + \frac{(-R_{km}^2 + X_{SSSC}^2) (V_k^2 - V_k V_m \cos\theta_{km})}{|Z_{SSSC}|^3 \sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}}} \quad (3.52.d)$$

Observe que a consideração da atuação do dispositivo FACTS SSSC no SEP faz com que sejam definidos dois novos coeficientes, um coeficiente ativo  $A4_{km}$  e outro reativo  $R4_{km}$ , que ponderam respectivamente as variações dos fluxos de potência ativa e potência reativa, devido às variações da tensão  $V_s$  introduzida pelo SSSC.

A representação matricial do novo sistema de potência com a inclusão do SSSC é praticamente o mesmo do representado no capítulo 2, equações (2.37) e (2.38), com exceção do vetor de entradas  $\Delta u$  e da matriz de entradas “B” (formada pelas submatrizes B1 e B2), que incluirão as variáveis do SSSC.

A representação matricial no domínio do tempo é descrita nas equações (3.53) e (3.54).

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ [\Delta \omega] \\ \cdot \\ [\Delta \delta] \\ \cdot \\ [\Delta E'_q] \\ \cdot \\ [\Delta E'_{fd}] \end{bmatrix} = [J1] \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E'_{fd}] \end{bmatrix} + [J2] \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0]_{ngx1} \\ [0]_{ngx1} \\ [0]_{ngx1} \\ [0]_{ngx1} \end{bmatrix} B1 \begin{bmatrix} [\Delta P_M] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_s] \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

A inclusão do SSSC ao sistema acarretou no surgimento da variável de entrada  $\Delta V_s$ , presente no vetor de entradas  $\Delta u$ .

$$\begin{bmatrix} [0] \\ \bar{[0]} \\ [0] \end{bmatrix} = [J3] \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} + [J4] \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B2 & VS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_M] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_S] \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Conseqüentemente, a matriz que multiplica o vetor  $\Delta u$  foi expandida em uma coluna (VS), e é composta pelos coeficientes de sensibilidade A4 e R4. A regra de formação do vetor VS é apresentada na expressão (3.55).

$$[VS]_{(2nb \times 1)} = \begin{cases} VS_{(k \times 1)} = -A4_{km}, \text{ se } k \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{(m \times 1)} = -A4_{mk}, \text{ se } m \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS_{(k+nb \times 1)} = -R4_{km}, \text{ se } k \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{(m+nb \times 1)} = -R4_{mk}, \text{ se } m \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS = 0, \text{ para qualquer barra diferente de } k \text{ e } m. \end{cases} \quad (3.55)$$

As equações (3.53) e (3.54), podem ser expressas de uma maneira compacta conforme a equação (3.56), de maneira que a representação no espaço de estados é obtida da eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$ , fornecendo a equação (3.57).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_s \\ B2_s \end{bmatrix} [\Delta u_s] \quad (3.56)$$

$$\Delta \dot{x}_s = (J1 - J2J4^{-1}J3)\Delta x_s + (B1_s - J2J4^{-1}B2_s)\Delta u_s \quad (3.57)$$

### 3.8. Inclusão do Dispositivo FACTS SSSC com Controlador POD no MSP

Na Figura 3.11 é mostrada uma estrutura convencional do POD (CASTRO ET ALLI, 2007; FURINI E ARAUJO, 2008), bem como sua atuação na variável de controle do SSSC ( $\Delta V_s$ ).



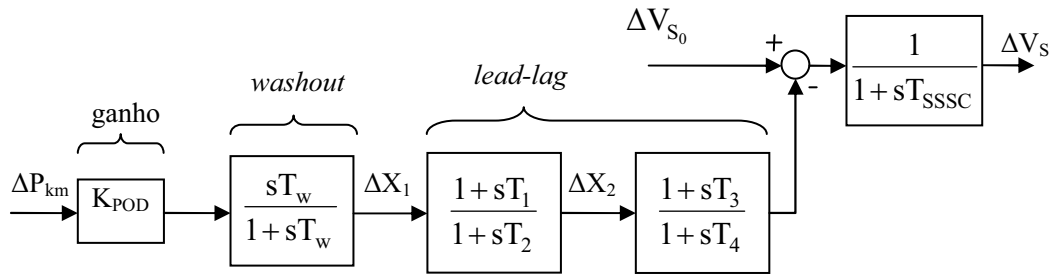


Figura 3.11 – Modelo Dinâmico do Dispositivo FACTS SSSC com Controlador POD.

Novamente será considerado como sinal de entrada para o controlador POD a variação de fluxo de potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) na linha de transmissão onde o SSSC estiver instalado, cuja expressão é mostrada na equação (3.58).

Ainda na Figura 3.11 é utilizado o sinal  $\Delta V_{s_0}$ , sendo este o desvio do valor da tensão do SSSC em regime permanente.

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A4_{km} \Delta V_s \tag{3.58}$$

Da mesma forma que o realizado no caso do controlador POD para o TCSC, a inclusão do modelo do controlador POD para o dispositivo FACTS SSSC será realizada através da divisão dos blocos que formam sua estrutura.

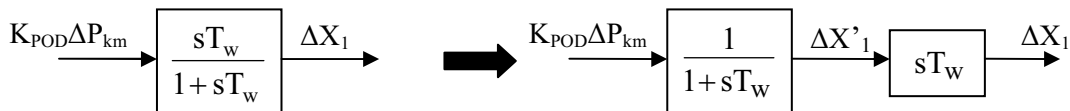


Figura 3.12 – Divisão do Bloco washout para o Dispositivo FACTS SSSC.

A divisão para o bloco washout pode ser feita como mostrado na Figura 3.12 onde, por inspeção, obtém-se a equação (3.59), que define a variável de estado  $\Delta X'_1$ .

$$\Delta \dot{X}'_1 = \frac{K_{POD}}{T_w} \Delta P_{km} - \frac{1}{T_w} \Delta X'_1 \tag{3.59}$$

De forma análoga, é aplicado aos blocos de avanço-atraso de fase, resultando nas Figuras 3.13.a e 3.13.b.

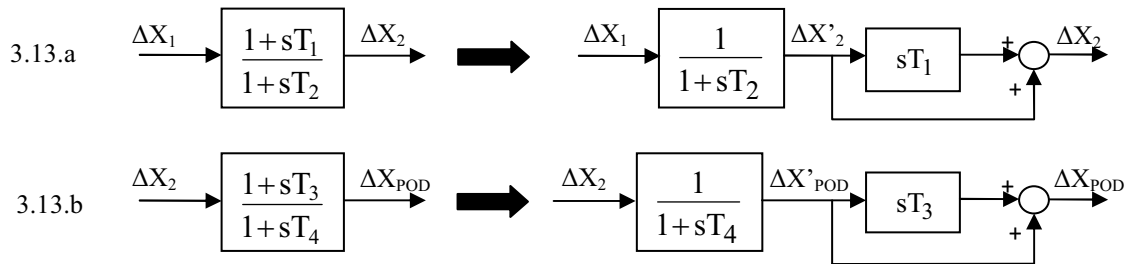


Figura 3.13 – Divisão do Bloco Avanço-Atraso de Fase para o Dispositivo FACTS SSSC.

Através de manipulações do diagrama de blocos da Figura 3.13.a e da equação (3.59), é obtida a variável de estado  $\Delta X'_2$  do primeiro bloco avanço-atraso de fase (equação (3.60)). Para a obtenção da variável de estado  $\Delta X'_{\text{POD}}$ , mostrada na equação (3.61), utiliza-se da Figura 3.13.b e da equação (3.60).

$$\Delta \dot{X}'_2 = \frac{K_{\text{POD}}}{T_2} \Delta P_{\text{km}} - \frac{1}{T_2} \Delta X'_1 - \frac{1}{T_2} \Delta X'_2 \quad (3.60)$$

$$\Delta \dot{X}'_{\text{POD}} = K_{\text{POD}} \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta P_{\text{km}} - \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta X'_1 + \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{1}{T_4} \Delta X'_2 - \frac{1}{T_4} \Delta X'_{\text{POD}} \quad (3.61)$$

Finalmente, obtém-se a expressão variável  $\Delta V_s$ , agora definida como uma variável de estado, e que será a responsável pela modulação da tensão série do SSSC e, conseqüentemente, a responsável pela introdução de amortecimento no sistema de energia elétrica (equação (3.62)).

$$\Delta \dot{V}_s = -\frac{K_{\text{POD}} T_1 T_3}{T_{\text{SSSC}} T_2 T_4} \Delta P_{\text{km}} - \frac{T_1 T_3}{T_{\text{SSSC}} T_2 T_4} \Delta X'_1 + \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{T_3}{T_4 T_{\text{SSSC}}} - \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \frac{1}{T_{\text{SSSC}}} \Delta X'_{\text{POD}} - \frac{1}{T_{\text{SSSC}}} \Delta V_s + \frac{1}{T_{\text{SSSC}}} \Delta V_{S_0} \quad (3.62)$$

Para a inclusão do controlador POD no MSP, novamente são modificadas as equações (3.53) e (3.54), resultando nas equações (3.63) e (3.64).

$$\begin{bmatrix} [\Delta\dot{\omega}] \\ [\Delta\dot{\delta}] \\ [\Delta\dot{E}'_q] \\ [\Delta\dot{E}'_{fd}] \\ [\Delta\dot{X}'_1] \\ [\Delta\dot{X}'_2] \\ [\Delta\dot{X}'_{POD}] \\ [\Delta\dot{V}_s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{4ng \times 4nt} \\ [0]_{4nt \times 4ng} & [A_{POD}]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\omega] \\ [\Delta\delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E'_{fd}] \\ [\Delta X'_1] \\ [\Delta X'_2] \\ [\Delta X'_{POD}] \\ [\Delta V_s] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J2] \\ [J_{POD}]_{4nt \times 2nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1] \\ [0]_{3 \times (2ng+2nb+nt)} \\ [0]_{nt \times (2ng+2nb)} \quad \frac{1}{T_{SSSC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta V_{s_0} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J3] & [VS_2]_{2nb \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\omega] \\ [\Delta\delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E'_{fd}] \\ \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_{POD} \\ [\Delta V_s] \end{bmatrix} + [J4] \begin{bmatrix} [\Delta\theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B2] & [0]_{ng \times nt} \\ [0]_{ng \times nt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta V_{s_0} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Na equação (3.63) estão presentes as submatrizes  $A_{POD}$  e  $J_{POD}$  cujas estruturas são mostradas nas equações (3.65) e (3.66), respectivamente.

$$[A_{POD}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 & \frac{K_{POD}}{T_w} A4_{km} \\ -\frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{K_{POD}}{T_2} A4_{km} \\ -\frac{1}{T_2 T_4} & \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} & -\frac{1}{T_4} & \frac{K_{POD} T_1}{T_2 T_4} A4_{km} \\ -\frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{SSSC}} & -\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_3}{T_4 T_{SSSC}} & -\left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_{SSSC}} & -\frac{K_{POD} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{SSSC}} A4_{km} - \frac{1}{T_{SSSC}} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$[J_{\text{POD}}] = \begin{bmatrix} \frac{K_{\text{POD}}}{T_W} A1_{\text{km}} & -\frac{K_{\text{POD}}}{T_W} A1_{\text{km}} & \frac{K_{\text{POD}}}{T_W} A2_{\text{km}} & \frac{K_{\text{POD}}}{T_W} A3_{\text{km}} \\ \frac{K_{\text{POD}}}{T_2} A1_{\text{km}} & -\frac{K_{\text{POD}}}{T_2} A1_{\text{km}} & \frac{K_{\text{POD}}}{T_2} A2_{\text{km}} & \frac{K_{\text{POD}}}{T_2} A3_{\text{km}} \\ \frac{K_{\text{POD}} T_1}{T_2 T_4} A1_{\text{km}} & -\frac{K_{\text{POD}} T_1}{T_2 T_4} A1_{\text{km}} & \frac{K_{\text{POD}} T_1}{T_2 T_4} A2_{\text{km}} & \frac{K_{\text{POD}} T_1}{T_2 T_4} A3_{\text{km}} \\ -\frac{K_{\text{POD}} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{\text{SSSC}}} A1_{\text{km}} & \frac{K_{\text{POD}} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{\text{SSSC}}} A1_{\text{km}} & -\frac{K_{\text{POD}} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{\text{SSSC}}} A2_{\text{km}} & -\frac{K_{\text{POD}} T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{\text{SSSC}}} A3_{\text{km}} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

A matriz  $A_{\text{POD}}$  relaciona os parâmetros de operação do POD com coeficientes de sensibilidade do SSSC ( $A4_{\text{km}}$  e  $R4_{\text{km}}$ ). A matriz  $J_{\text{POD}}$  relaciona os parâmetros do POD com a magnitude e ângulo das tensões nas barras do sistema que receberam a instalação do POD. As duas primeiras colunas da matriz  $J_{\text{POD}}$  multiplicam as variações angulares, enquanto que as duas últimas ponderam as variações da magnitude das tensões nas barras do sistema elétrico.

As equações (3.63) e (3.64) descrevem completamente o sistema elétrico de potência multimáquinas, com um dispositivo FACTS SSSC instalado, acoplado a um controlador do tipo POD, representado pelo Modelo de Sensibilidade de Potência. Estas duas equações podem ser agrupadas de uma forma compacta, como mostrada na equação (3.67).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{\text{SPOD}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_{\text{SPOD}} & J2_{\text{SPOD}} \\ J3_{\text{SPOD}} & J4_{\text{SPOD}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{\text{SPOD}} \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{\text{SPOD}} \\ B2_{\text{SPOD}} \end{bmatrix} [\Delta u_{\text{SPOD}}] \quad (3.67)$$

A representação no espaço de estados é obtida da eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$ , fornecendo a equação (3.68).

$$\Delta \dot{X}_{\text{SPOD}} = (J1_{\text{SPOD}} - J2_{\text{SPOD}} J4^{-1} J3_{\text{SPOD}}) \Delta X_{\text{SPOD}} + (B1_{\text{SPOD}} - J2_{\text{SPOD}} J4^{-1} B2_{\text{SPOD}}) \Delta u_{\text{POD}} \quad (3.68)$$

### 3.9. Conclusões

Discutiu-se neste Capítulo sobre a crescente necessidade de ampliação dos SEP para continuar o fornecimento de energia elétrica em níveis seguros de operação. Como possível solução foi abordada a utilização de dispositivos FACTS e dispositivos de controle

(controlador POD).

Foram abordadas as inclusões no Modelo Sensibilidade de Potência dos dispositivos FACTS TCSC e SSSC.

Para estas inclusões o TCSC foi representado como uma reatância variável, responsável pela compensação série da linha de transmissão e o SSSC como uma fonte de tensão em série com a LT, fazendo a compensação de reativos a partir do controle desta tensão.

Com as inclusões dos dispositivos FACTS TCSC e SSSC realizadas, dispositivos adicionais de controle, aqui chamados de POD, foram modelados e também inseridos no MSP.

O ajuste dos parâmetros do controlador POD e também a sua melhor localização para maior eficácia no fornecimento de torque de amortecimento é assunto para o próximo Capítulo.

## CAPÍTULO 4

### Localização e Projeto de Controladores POD

#### 4.1. Introdução

A localização dos dispositivos FACTS com controladores POD deve ser adotada de forma a obter a maior eficácia no fornecimento de torque de amortecimento aos modos oscilatórios fracamente amortecidos. Esta localização, de maneira geral, pode ser determinada a partir da análise dos resíduos da função de transferência em malha aberta do SEP, para diversos sinais de entrada e saída do controlador POD (MARTINS; LIMA, 1990; YANG ET AL., 1998; FURINI; ARAUJO, 2008).

Uma vez definida a localização do dispositivo FACTS com controlador POD, é necessário fazer o ajuste dos parâmetros do controlador. Dois métodos serão aqui apresentados. Primeiramente o método dos resíduos (que utiliza a compensação de fase) que aqui será chamado de “método clássico”. Posteriormente é apresentado o método de ajuste por RNAs ou “método neural”, buscando melhorar a eficiência e buscar alternativas para o ajuste dos parâmetros dos controladores PODs.

#### 4.2. Localização do Controlador POD

Utilizando a teoria dos resíduos é possível determinar qual a melhor localização para a instalação de dispositivos FACTS acoplados com controladores suplementares e também ajustar os parâmetros dos controladores para atuação direta e efetiva em um modo oscilatório presente no SEP.

Considerando o diagrama de blocos da Figura 4.1 que mostra a função de transferência do sistema elétrico (SEP(s)) realimentado por um controlador POD (representado pela função de transferência KH(s)), a análise dos resíduos da função de transferência de malha aberta (FTMA) fornece uma indicação da melhor localização dos dispositivos FACTS e

controladores suplementares (MARTINS; LIMA, 1990; YANG et al., 1998; FURINI, 2008).

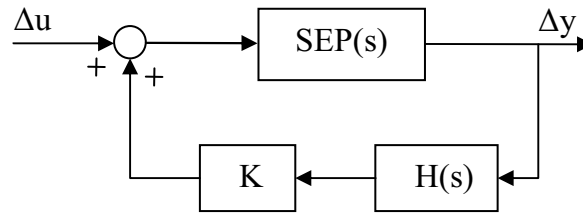


Figura 4.1 – Função de Transferência do Sistema de Potência com Controlador POD.

A função de transferência em malha fechada  $G(s)$  que define a resposta dinâmica do sistema ( $\Delta y$ ) quando da ocorrência de alguma perturbação em uma das entradas do sistema ( $\Delta u$ ), pode ser calculada como mostrado na equação (4.1).

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} B + D \quad (4.1)$$

Na equação (4.1)  $A$  é matriz de estado,  $B$  é a matriz de entradas (relacionada à controlabilidade),  $C$  é a matriz de saídas (relacionada com a observabilidade) e  $D$  é a matriz de transferência direta da entrada para a saída.

Os autovalores ( $\lambda_i$ ) da matriz  $A$  são todos os valores da variável “ $s$ ” que satisfazem a equação  $\det(sI - A) = 0$ . Estes autovalores podem assumir valores reais ou complexos (neste caso sempre se apresentam em pares conjugados).

Os autovalores reais descrevem modos não oscilatórios (no domínio do tempo são exponenciais). Os pares complexos conjugados definem modos oscilatórios com uma taxa de amortecimento ( $\xi$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ).

Na equação (4.2) é mostrada a forma de obtenção destes parâmetros (Kundur, 1994; Furini, 2008).

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i \Rightarrow \begin{cases} \omega_n = |\lambda_i| = \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2} \\ \xi = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \end{cases} \quad (4.2)$$

A estabilidade ou não de um sistema linear pode ser determinada pela localização dos

autovalores da matriz de estados no plano complexo.

Pelo Primeiro Método de *Lyapunov* se todos os autovalores da matriz de estados  $A$  possuem parte real negativa (autovalores situados no semiplano esquerdo do plano complexo), o sistema é considerado estável. Basta um autovalor possuir parte real positiva (autovalor situado no semiplano direito do plano complexo), para se definir como sistema instável para aquele ponto de operação.

No caso de SEP com alto carregamento, a situação crítica para a ocorrência da instabilidade é a falta de amortecimento relacionada a algum modo oscilatório (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994; BRETAS; ALBERTO, 2000).

É possível de se determinar a influência de uma variável de estado qualquer em um modo oscilatório com o uso dos fatores de participação ( $p_{ki}$ ), que pode ser calculado de acordo com a equação (4.3).

$$P_{ki} = \varphi_{ki} \psi_{ik} \quad (4.3)$$

Na equação (4.4)  $\psi_{ik}$  é o autovetor direito relativo à variável de estado  $k$ , enquanto que  $\varphi_{ik}$  é o autovetor esquerdo relacionado ao modo oscilatório  $i$ , definindo assim a participação ( $p_{ki}$ ) de uma variável  $k$  na oscilação do modo  $i$ .

A partir dos resíduos da função de transferência  $G(s)$  é possível obter informações sobre controlabilidade e observabilidade da entrada e saída do controlador.

Estes resíduos são determinados pela expansão da função de transferência  $G(s)$  (equação (4.2)) em frações parciais em função da matriz  $C$  (matriz relacionada com a observabilidade do sistema linear), da matriz  $B$  (matriz associada à controlabilidade do sistema linear) e dos autovetores esquerdo e direito (MARTINS; LIMA, 1990; YANG et al., 1998; FURINI, 2008), como descrito na equação (4.4)

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{C \varphi_i \psi_i B}{(s - \lambda_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{(s - \lambda_i)} \quad (4.4)$$

Para cada termo  $i$  tem-se um escalar chamado resíduo ( $R_i$ ) que dá a participação de um sistema de controle em um modo oscilatório entre os sinais de saída  $y(s)$  e entrada  $u(s)$ . O resíduo  $R_i$  é definido como o produto entre a observabilidade de uma entrada  $j$  presente na matriz  $C$  e a controlabilidade de uma saída  $k$  na matriz  $B$ , associados a um determinado



autovalor, como expresso na equação (4.5) (MARTINS; LIMA, 1990; FURINI, 2008).

$$\begin{aligned} \text{Obser} &= C_j \varphi_i \\ \text{Cont} &= \psi_i B_k \\ R_{i_{jk}} &= \text{Obser} \cdot \text{Cont} \end{aligned} \quad (4.5)$$

O controlador deve ser então incorporado ao sistema, de forma a introduzir amortecimento ao modo oscilatório de interesse. A equação (4.6) descreve o deslocamento sofrido pelo autovalor devido à atuação de um controlador. A variação do autovalor é proporcional ao valor absoluto do resíduo, ou seja, quanto maior o resíduo associado ao autovalor, maior será o deslocamento alcançado e, conseqüentemente, maior o amortecimento introduzido.

$$\Delta \lambda_i = R_{i_{jk}} \text{KC}(\lambda_i) \quad (4.6)$$

### 4.3. Projeto Clássico do Controlador POD

O projeto clássico do controlador POD pode ser baseado no conceito de compensação de fase, onde devem ser determinados seus parâmetros para que o resíduo se desloque  $\theta$  graus para o semiplano esquerdo do plano complexo, conforme mostrado na Figura 4.2.

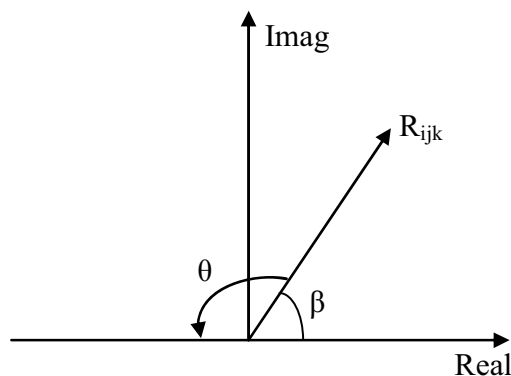


Figura 4.2 – Efeito do Controlador POD no Resíduo Associado ao Autovalor  $\lambda_i$ .

A relação entre o deslocamento do autovalor e seu correspondente resíduo ( $R_{ijk}$ ) é

mostrada na equação (4.7).

$$\Delta\lambda_1 = R_{ijk} \text{POD}(\lambda_1) = R_{ijk} \left( K_{\text{POD}} H(\lambda_1) \right) \quad (4.7)$$

O projeto do controlador POD se resume em calcular as constantes de tempo  $T_1=T_3$ ,  $T_2=T_4$  e o ganho  $K_{\text{POD}}$  de forma a introduzir a compensação de fase necessária para o deslocamento do autovalor de interesse. Considerando que a fase a ser compensada pelo controlador seja  $\theta$ ,  $\omega_i$  a frequência em rad/s do modo eletromecânico de interesse e  $\lambda_{ides}$  a posição desejada para o autovalor, o conjunto de equações mostradas em (4.8) fornece os procedimentos para obtenção dos parâmetros do controlador POD (FURINI; ARAUJO, 2008).

$$\begin{aligned} \theta &= 180^\circ - \beta \\ \alpha &= \frac{1 - \text{sen}(\theta/2)}{1 + \text{sen}(\theta/2)} \\ T_2 &= \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}; \quad T_1 = \alpha T_2 \\ K_{\text{POD}} &= \left| \frac{\lambda_{ides} - \lambda_i}{R_{ijk} C(\lambda_i)} \right| \end{aligned} \quad (4.8)$$

#### 4.4. Redes Neurais Artificiais

Nesta seção, em um primeiro momento, será realizado uma breve explanação sobre as redes neurais artificiais, objetivando explorar seus principais conceitos e características relevantes. Na sequência é tratada a rede neural que será utilizada neste trabalho, ou seja, a Perceptron Multicamadas.

Considerada tais abordagens, será mostrada a rede neural artificial aplicada no projeto dos parâmetros do controlador POD, na tentativa de se buscar alternativas para resolver a questão de um novo ajuste a cada mudança do ponto de operação do SEP.

A utilização de redes neurais para o projeto de parâmetros de controladores PODs se justifica pelas suas características de aprendizagem e capacidade de generalização.

#### 4.4.1. Neurônio Biológico

O sistema nervoso é responsável pela decisão, integração de idéias e sensações e pela adaptação do organismo e do próprio ser, sendo essa última função realizada através do aprendizado. Este sistema é constituído por células que são responsáveis pelo seu funcionamento denominadas neurônios.

Utilizando a Figura 4.3 se pode identificar a estrutura biológica de um neurônio.

Esta estrutura é composta basicamente pelo corpo celular (parte principal do neurônio que tem como função de receber e processar informações de outros neurônios). Também fazem parte desta estrutura as sinapses que são válvulas capazes de controlar o fluxo de informação entre os neurônios. Os dendritos são responsáveis pelo recebimento dos estímulos e/ou informações de outros neurônios para conduzi-los ao corpo celular. Finalmente, é o axônio que transmite os estímulos/informações a outros neurônios.

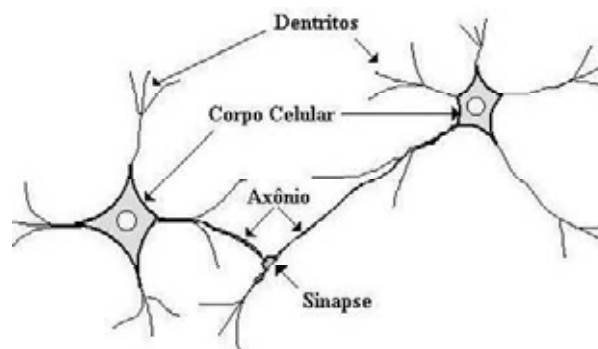


Figura 4.3 – Neurônio Biológico.

Vários modelos de neurônios têm sido apresentados na literatura especializada, porém, apresenta-se a seguir um modelo básico de neurônio encontrado com frequência em trabalhos do gênero, conhecido como o neurônio de McCulloch & Pitts (MCCULLOCH; PITTS, 1943).

#### 4.4.2. Neurônio Artificial

O primeiro modelo proposto por McCulloch e Pitts (MCCULLOCH; PITTS, 1943) interpretou o funcionamento do neurônio biológico como sendo um circuito binário, então um modelo binário equivalente é apresentado na Figura 4.4.

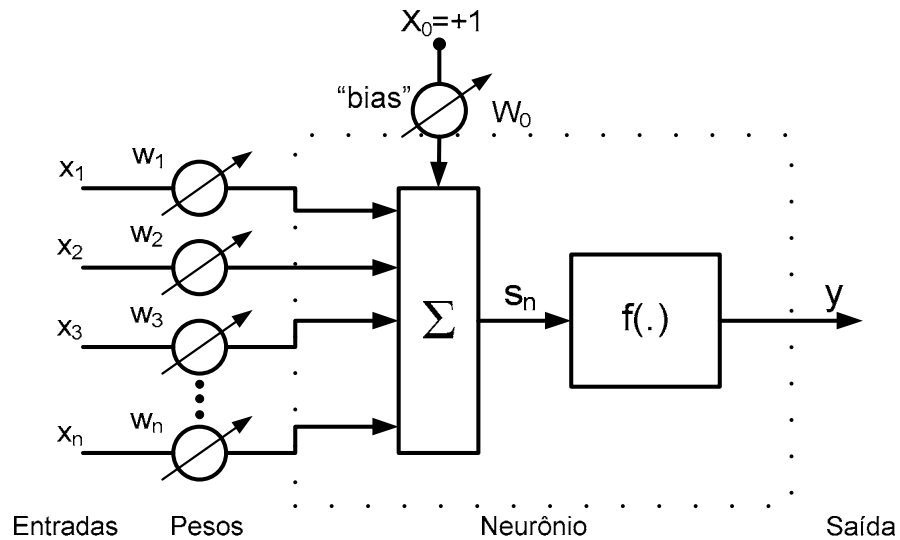


Figura 4.4 – Modelo de McCulloch e Pitts.

Observando a Figura 4.4 pode-se determinar um vetor de entrada  $X_{RNA} = [X_1 X_2 X_3 \dots X_n]$  de tamanho  $n$  e seus respectivos pesos  $W_{RNA} = [w_1 w_2 w_3 \dots w_n]$ . Também pode conter um peso bias ( $w_0$ ) alimentado por uma entrada ( $X_0 = +1$ ) que controla o nível de saída do neurônio. A soma acumulada de maneira ponderada das várias entradas pelos seus respectivos pesos produz a entrada efetiva do neurônio que resulta na equação (4.9).

$$s_n = \sum_{i=1}^n X_{RNA} W_{RNA} \tag{4.9}$$

Obtido o valor da soma ponderada, uma função de ativação  $f(.)$  processa este valor para determinar a sua ativação ou não para obter-se a saída  $y$  do neurônio (equação (4.10)). É importante observar que cada neurônio pode conter  $n$  entradas, porém somente uma saída que pode servir como entrada de  $n$  neurônios.

$$y = f(s) \tag{4.10}$$

As funções de ativação  $f(.)$ , geralmente não-lineares, mais usuais são as do tipo Degrau (equação (4.11) e Figura 4.5.a), Rampa (equação (4.12) e Figura 4.5.b) e dois tipos de funções Sigmóides: Sigmóide (1) (equação (4.13) e Figura 4.5.c) e Sigmóide (2) (equação (4.14) e Figura 4.5.d).

Nas equações (4.13) e (4.14) o parâmetro  $\lambda$  determina a inclinação da curva.

$$f(s_n) = \begin{cases} 1, s_n \geq 0 \\ -1, s_n < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$f(s_n) = \begin{cases} 0, s_n < 0 \\ x, 0 \leq s_n \leq 1 \\ 1, s_n > 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$f(s_n) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda s_n}} \quad (4.13)$$

$$f(s_n) = \frac{(1 - e^{-\lambda s_n})}{(1 + e^{-\lambda s_n})} \quad (4.14)$$

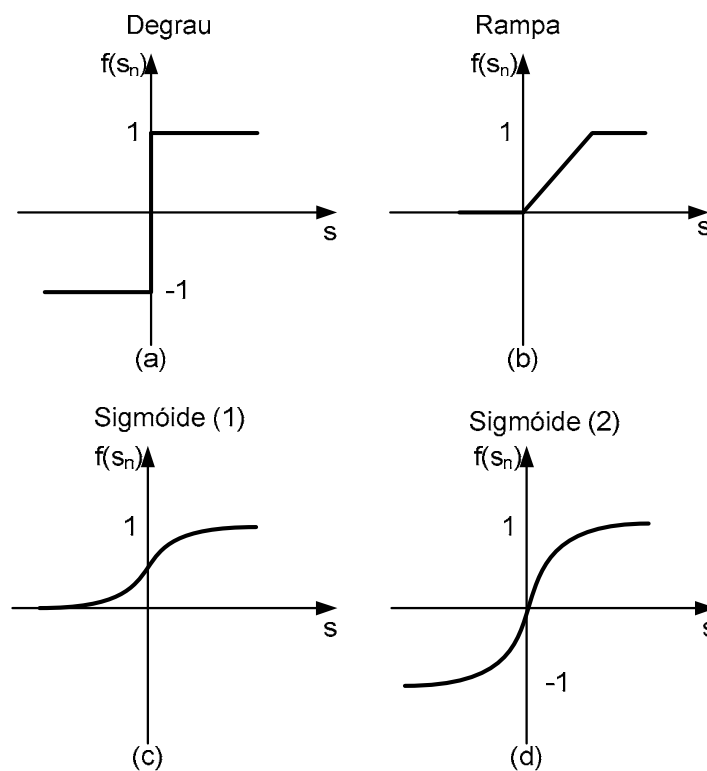


Figura 4.5 – Tipos de Funções de Ativação.

Devido à capacidade de aprender e generalizar, o emprego de redes neurais artificiais tem sido frequentemente utilizadas para soluções de vários problemas de complexidade elevada. Seu aprendizado consiste no ajuste de parâmetros de forma que esta produza um resultado esperado. Este aprendizado consiste em regras definidas que é chamado de

treinamento.

De uma forma geral pode classificar as redes neurais artificiais em uma combinação de neurônios e um algoritmo de treinamento. Deve-se levar em consideração para se caracterizar esse agrupamento o número de camadas da rede, o número de neurônios por camadas, o tipo das conexões e o grau de complexidade entre os neurônios.

Neste trabalho será considerada apenas a rede feed-forward que também é conhecida como Perceptron Multicamadas (PMC).

#### 4.4.3. Perceptron Multicamadas (PMC)

Este tipo de rede é representado por camadas e obrigatoriamente necessita de uma camada de entrada (neurônios que têm sua entrada como entrada da rede) e uma camada de saída (neurônios que têm sua saída como saída da rede), podendo ou não ter camadas intermediárias (neurônios que não pertencem nem à camada de entrada e nem à de saída).

Uma rede PMC consiste de elementos de processamento (neurônios) e suas conexões. Cada neurônio pode ter  $X_{RNAi}$  entradas, mas somente uma saída, que pode ser utilizada com entrada para vários neurônios através de suas conexões, como pode ser visualizada na Figura 4.6. Cada conexão entre neurônios possui um peso que determina e controla a distribuição na saída do neurônio.

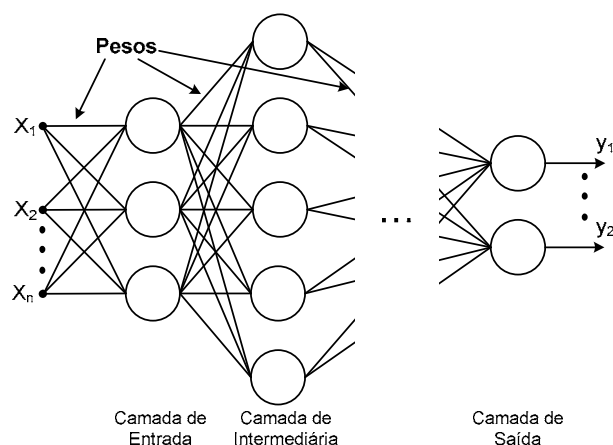


Figura 4.6 – Rede Perceptron Multicamadas (PMC).

Nestas redes cada camada de neurônios recebe sinais somente das camadas anteriores, ou seja, elas não possuem laços de realimentação e suas saídas são exclusivamente determinadas em função de sua entrada e valores dos pesos (HAYKIN, 1994).

A entrada de todos os neurônios é a soma de  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  entradas ponderadas por seus respectivos pesos  $(W_1, W_2, \dots, W_n)$  e adicionado o bias  $(W_0)$ , que podem ser chamadas de saídas intermediárias (equação (4.15)).

$$s_n = X_1 W_1 + X_2 W_2 + \dots + X_n W_n + W_0 \quad (4.15)$$

Após o processamento do neurônio, uma saída intermediária  $s_n$ , (equação (4.15)) e mostrada na Figura 4.4, é usualmente processada por uma função de ativação não linear que produz o sinal emitido para a saída de cada neurônio. O sinal de saída pode servir de entrada de outros  $n$  neurônios. O processamento do sinal do neurônio geralmente é feito por uma função de ativação  $f(s)$ , que produz o sinal de saída do neurônio. Neste trabalho a função de ativação que será utilizada é a função Sigmóide (2), que pode ser vista na Figura 4.5.d. Esta função tem a capacidade de assumir valores em determinados intervalos, sendo estes valores calculados pela equação (4.14).

A propriedade mais importante da RNA é a sua facilidade e habilidade de aprender para se obter desempenho satisfatório, o que é feito através de um processo iterativo de ajuste de pesos que é chamado de treinamento. Existem vários tipos de treinamentos para cada tipo de RNA e as diferenças ocorrem na maneira como são ajustados os pesos.

Quando a rede tem um treinamento bem sucedido, seus parâmetros internos e os pesos das conexões estão ajustados de forma a produzir respostas na saída com percentual de erro aceitável. A escolha do algoritmo de treinamento depende da topologia da rede, dificuldade do problema a ser resolvido e ao conjunto de padrões de treinamento.

Um dos algoritmos mais importantes e utilizados na literatura, o *backpropagation* (Másson e Wang, 1990), tem baixa taxa de convergência. Buscando alternativas se encontrou na literatura um algoritmo que vem sendo utilizado com frequência e se mostra muito eficiente, o *Levenberg-Marquardt* (HAGAN; MENHAJ, 1994), que é o algoritmo de treinamento que será utilizado neste trabalho.

#### 4.4.4. Algoritmo de Treinamento Levenberg-Marquardt (LM)

Levenberg-Marquardt (LM) é um algoritmo de otimização eficiente e aceito para solucionar problemas de minimização de funções não-lineares, que tem como objetivo que a soma dos quadrados das distâncias entre a saída desejada e a resposta do neurônio de saída

seja a menor possível (RANGANATHAN, 2004).

O problema de mínimos quadrados pode ser escrito como a soma dos erros quadráticos (equação (4.16)), onde o vetor de entrada é  $X_{RNA} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ .

$$f(X_{RNA}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j^2(X_{RNA}) \quad (4.16)$$

A diferença entre a saída desejada e a resposta do neurônio de saída é representada por um vetor resíduo definida pela equação (4.17).

$$r_j(X_{RNA}) = (r_1(X_{RNA}), r_2(X_{RNA}), \dots, r_m(X_{RNA})) \quad (4.17)$$

Substituindo a equação (4.17) em (4.16), podemos escrever a equação (4.18).

$$f(X_{RNA}) = \frac{1}{2} \|r_j(X_{RNA})\|^2 \quad (4.18)$$

Como o algoritmo de LM se baseia no método de otimização de Newton, que utiliza o recurso da matriz Hessiana (matriz que representa derivada segunda), pode-se definir as derivadas de  $f$  utilizando a matriz Jacobiana (matriz que representa derivada primeira) definida na equação (4.19).

$$J(X_{RNA}) = \frac{\delta r_j}{\delta X_{RNA}} \quad (4.19)$$

A matriz Jacobiana tem sua determinação mais simples se comparada com a matriz Hessiana e como o método de LM é expresso em função da soma dos erros quadráticos, a matriz Hessiana pode ser expressa pela equação (4.20) e a atualização dos pesos pode ser obtida pela equação (4.21) e equação (4.22).

$$H(X_{RNA}) = J^T(X_{RNA})J(X_{RNA}) \quad (4.20)$$



$$X_{RNA}(i+1) = X_{RNA}(i) - H^{-1}g(X_{RNA}) \quad (4.21)$$

$$g(X_{RNA}) = 2J^T(X_{RNA})r(X_{RNA}) \quad (4.22)$$

Substituindo as equações (4.20) e (4.22) na equação (4.21), obtêm a equação (4.23) que é a atualização dos pesos da matriz Hessiana para o algoritmo de LM, onde  $\lambda$  é uma constante do método de LM.

$$X_{RNA}(i+1) = X_{RNA}(i) - [J^T(X_{RNA})J(X_{RNA}) + \lambda \text{diag}[H]]^{-1} J^T(x)r(X_{RNA}) \quad (4.23)$$

Não existe uma regra bem definido sobre seleção dos padrões de treinamento (FREEMAN; SKAPURA, 1992), assim, a escolha dos padrões de treinamento pode ser feito de forma aleatória. Esta escolha deve ser criteriosa de forma que não haja conflito de informações. Deve-se então, escolher padrões de treinamento que traduzam o comportamento do sistema da melhor maneira possível.

#### 4.5. Conclusões

O ajuste dos parâmetros do controlador POD e também a sua melhor localização para maior eficácia no fornecimento de torque de amortecimento foram abordados. A escolha da localização será realizada através dos resíduos da função de transferência em malha aberta. O ajuste dos parâmetros do controlador POD é feito de dois modos: clássico e neural.

Uma vez ajustados os parâmetros do controlador, será considerada sua atuação no sistema elétrico de potência.

Em um primeiro momento considerou-se o método clássico e após apresentou-se uma alternativa para o ajuste de parâmetros de controladores POD, o método neural. Discutiu-se sobre a estrutura da RNAs no qual foi apresentada a rede e o algoritmo de treinamento utilizado no trabalho, PMC e Levenberg-Marquardt, respectivamente.

Para um bom ajuste dos parâmetros do controlador através do método neural, além da seleção dos melhores padrões de treinamento é imprescindível ter sucesso no algoritmo de treinamento da RNA, obtendo parâmetros com porcentagem de erro aceitável.

Uma vez definido o modelo do sistema elétrico de potência considerando os

dispositivos FACTS TCSC e SSSC e também seus controladores e os métodos de ajuste que serão utilizados, simulações serão realizadas em um sistema de potência teste para obtenção de resultados, que serão mostrados no Capítulo 5.

## CAPÍTULO 5

### Simulações e Resultados

#### 5.1. Introdução

Neste Capítulo serão apresentados os resultados, simulações e análises do comportamento dinâmico do um SEP multimáquinas teste, com a atuação dos dispositivos FACTS TCSC e SSSC equipados com controladores suplementares POD.

Para as simulações será utilizado um sistema simétrico de duas áreas, composto por 4 geradores, especialmente proposto para se estudar o comportamento de oscilações de baixa frequência associadas ao modo interárea de oscilação (KLEIN et al., 1991; KUNDUR, 1994).

Todas as modelagens descritas nos Capítulos anteriores foram implementadas computacionalmente utilizando-se o software MATLAB<sup>®</sup>.

São apresentadas análises no domínio da frequência (autovalores da matriz de estados  $A$ , frequência natural não amortecida e coeficientes de amortecimento associados a autovalores pares complexos conjugados, resíduos de funções de transferência).

As análises no domínio do tempo são realizadas a partir de curvas de respostas temporais do sistema, a partir da ocorrência de uma pequena perturbação em alguma “entrada” do SEP.

Neste trabalho a pequena perturbação será considerada uma variação em degrau na potência mecânica de algum gerador do SEP.

#### 5.2. Sistema Simétrico de Duas Áreas

O SEP teste é composto de duas áreas iguais e foi proposto para se estudar os fatores que influenciam os modos interárea de oscilação (diagrama unifilar mostrado na Figura 5.1).

Cada área possui dois geradores, sendo interligadas por três LTs longas em paralelo. Esta interligação das duas áreas apresenta alta reatância indutiva e tal fato, aliado ao ponto de operação considerado neste trabalho contribui para a falta de amortecimento do sistema,

tornando-o instável.

Os dados dos geradores, barras, LT e fluxo de potência para o caso base são mostrados no Apêndice II (não é o objetivo deste trabalho a análise de métodos de solução de fluxo de potência, portanto, para o sistema teste considerado foi utilizado a ferramenta MATPOWER<sup>®</sup>, desenvolvida para a linguagem MATLAB<sup>®</sup>, disponível em (ZIMMERMAN, 2009)).

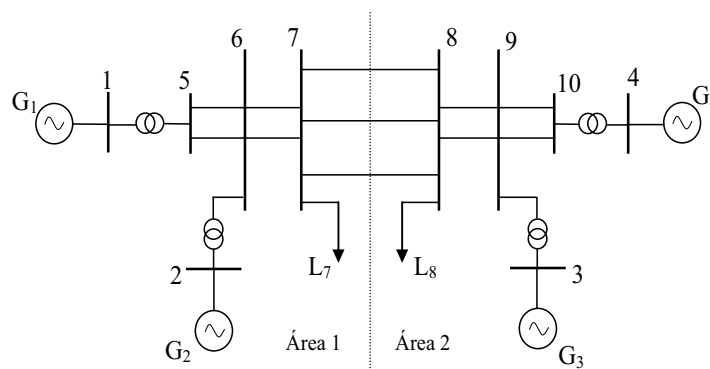


Figura 5.1 – Diagrama Unifilar: Sistema Simétrico de Duas Áreas

Na Tabela 5.1 são mostrados os autovalores de interesse ( $\lambda$ ), bem como o coeficiente de amortecimento ( $\zeta$ ) e a frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ) a eles associados, considerando o caso base (sistema sem a atuação dos dispositivos FACTS).

Estes autovalores foram classificados em modo local 1 e modo local 2 (modos se encontram na faixa de frequências de 0,7 a 2,0 Hz e estão associados às oscilações dos rotores de um grupo de geradores próximos, fisicamente ou eletricamente) e modo interárea de oscilação (modos que se localizam-se na faixa de frequências de 0,1 a 0,8 Hz e são relacionados com as oscilações de grupos de geradores de uma área contra outro grupo de geradores de outra área), a partir de sua frequência natural de oscilação (LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994).

Tabela 5.1 – Autovalores Dominantes,  $\omega_n$  e  $\zeta$

Autovalores	$\zeta$	$\omega_n$ (Hz)
$-0,2356 \pm j 6,2953$ (local 1)	0,0374	1,0026
$-0,1585 \pm j 5,8779$ (local 2)	0,0270	0,9358
$0,0460 \pm j 4,1382$ (interárea)	-0,0111	0,6587

Analisando-se os valores mostrados na Tabela 5.1 pode-se concluir que o par complexo conjugado associado ao modo interárea de oscilação é o responsável pela instabilidade do sistema (modo oscilatório na faixa de frequências típicas: de 0,2 a 0,8 Hz (LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994)).

Para solucionar o problema da instabilidade é proposta a inclusão de dispositivos FACTS TCSC ou SSSC equipados com controladores POD no SEP.

Para posterior comparação entre o desempenho dos dois dispositivos será considerada a mesma compensação fixa (10% da reatância da LT de instalação) e o mesmo coeficiente de amortecimento desejado ( $\xi = 0.1$  para o modo de oscilação interárea) para ajuste dos parâmetros dos PODs.

### 5.3. Localização dos Dispositivos FACTS no Sistema Elétrico de Potência

No Capítulo 4 uma das seções mostrava que é possível determinar a melhor localização para a instalação de dispositivos FACTS acoplados aos controladores suplementares analisando-se os resíduos da função de transferência em malha aberta (FTMA).

Estes resíduos dependem do tipo de dispositivo FACTS (no caso deste trabalho, TCSC ou SSSC) e do sinal de entrada escolhido para o controlador POD.

Neste trabalho será utilizado como sinal de entrada para os controladores a variação da potência ativa ( $\Delta P_e$ ) na LT de instalação do dispositivo. A escolha deste sinal se justifica por ser um sinal disponível localmente, além de que os modos interárea de oscilação possuem alta observabilidade neste sinal (YANG et al., 1998).

Os resultados da aplicação do método dos resíduos ao sistema simétrico são mostrados na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3, onde são apresentados os módulos dos resíduos da FTMA para os dispositivos TCSC e SSSC, respectivamente, para suas possíveis localizações.

Pode-se escolher como a melhor localização para instalação do dispositivo FACTS acoplado ao POD a interligação que possui o maior resíduo da função de transferência em malha aberta (MARTINS; LIMA, 1990; YANG et al., 1998). Também é importante verificar os valores de reatância das linhas de instalação (quanto menor a reatância da linha, menor a faixa de compensação que pode ser introduzida) (SADIKOVIC, 2004). Além disso, o método dos resíduos pode não fornecer a melhor localização se houver um zero mal posicionado na FTMA, o que pode dificultar o deslocamento de um polo problemático, visto que este zero irá atraí-lo (entenda por um zero mal posicionado a ocorrência de um zero muito próximo de um

polo de interesse ou o zero se localizar no semiplano direito do plano complexo) (MARTINS; LIMA, 1990; MHASKAR; KULKARNI, 2006).

Tabela 5.2 – FACTS TCSC: Módulos dos Resíduos da FTMA

Linha de Transmissão	Z(pu)	Modo Local 1	Modo Local 2	Modo Interárea	
1 – 5	0,001+j0,012	140,230	1,4993	20,201	Área 1
2 – 6	0,001+j0,012	274,220	0,2869	21,908	
5 – 6	0,005+j0,05	142,580	1,4028	20,018	
6 – 7	0,002+j0,2	1,3265	2,7771	166,520	Interligação
7 – 8	0,022+j0,22	0,7349	0,3717	27,869	
8 – 9	0,002+j0,02	5,0980	1,2624	137,990	
3 – 9	0,001+j0,012	6,1628	264,060	14,047	Área 2
9 – 10	0,005+j0,05	0,0917	154,860	18,388	
4 – 10	0,001+j0,012	0,0889	152,980	18,687	

Tabela 5.3 – FACTS SSSC: Módulos dos Resíduos da FTMA

Linha de Transmissão	Z(pu)	Modo Local 1	Modo Local 2	Modo Interárea	
1 – 5	0,001+j0,012	19,811	0,210	2,660	Área 1
2 – 6	0,001+j0,012	32,300	0,038	2,484	
5 – 6	0,005+j0,05	20,718	0,202	2,680	
6 – 7	0,002+j0,2	0,107	0,195	10,760	Interligação
7 – 8	0,022+j0,22	0,330	0,161	12,825	
8 – 9	0,002+j0,02	0,325	0,057	9,240	
3 – 9	0,001+j0,012	0,656	29,024	1,420	Área 2
9 – 10	0,005+j0,05	0,011	20,030	2,272	
4 – 10	0,001+j0,012	0,013	20,145	2,551	

Analisando os valores mostrados na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3 pode-se observar que as interligações com maiores módulos de resíduos são as entre as barras 6-7, 7-8 e 8-9. Isso pode ser explicado pelo fato de que essas linhas serem uma extensão da linha de interligação, ou seja, constituem em um caminho obrigatório para o fluxo interárea.

Entretanto, analisando os dados das linhas do SEP (Apêndice II) e também observando

as Tabelas 5.2 e Tabela 5.3, observa-se que a linha de transmissão de maior reatância é a que está entre as barras 7-8, o que propiciaria um maior índice de compensação, quando comparada com as outras duas possíveis localizações.

Outro fato a ser considerado é a existência de zeros mal posicionados na FTMA. Para este sistema em particular, quando o sinal de entrada para os controladores é a variação da potência ativa na linha de interligação, ocorre um zero no semiplano direito do plano complexo associado ao modo interárea de oscilação. Este zero atrairá o polo, dificultando o seu deslocamento (MOURA et al., 2010).

Em função dos argumentos expostos decidiu-se pela instalação dos dispositivos FACTS e seus respectivos controladores suplementares entre as barras 7 e 8 do SEP teste.

Com a localização dos dispositivos FACTS acoplado aos controladores POD definida (interligação entre as barras 7 e 8), também fica definido o sinal de entrada para os controladores POD, a saber, o fluxo de potência ativa entre as barras 7 e 8 ( $\Delta P_{78}$ ).

Na próxima seção será tratado do ajuste dos parâmetros dos controladores pelo método clássico (compensação de fase) e pelo método neural.

#### 5.4. Ajuste dos Parâmetros dos Controladores POD – Método Clássico

Neste caso o ajuste dos parâmetros é realizado pelo método dos resíduos da função de transferência em malha aberta (MARTINS; LIMA, 1990; YANG et al., 1998) utilizando as equações (4.9) (Capítulo 4) e os valores obtidos são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros do Controlador POD: dispositivo TCSC/SSSC (Método Clássico)

	$K_{POD}$	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)
<b>TCSC</b>	0,1492	0,0806	0,6914	0,0806	0,6914
<b>SSSC</b>	0,2290	0,0947	0,5925	0,0947	0,5925

Analisando os valores mostrados na Tabela 5.4 conclui-se que os controladores para os dois dispositivos são de atraso de fase. Mais ainda: o controlador destinado ao dispositivo FACTS SSSC exige um ganho maior que o controlador a ser acoplado ao TCSC, para um mesmo valor de coeficiente de amortecimento de projeto. Isto implica em se exigir uma maior atuação do controlador do SSSC do que do controlador do TCSC.

Depois de incluso o dispositivo TCSC equipado com seu controlador POD (ajustado com os parâmetros mostrados na Tabela 5.4) no sistema elétrico de potência, novas simulações foram realizadas e os autovalores de interesse, bem como os coeficientes de amortecimento ( $\zeta$ ) e as frequências naturais ( $\omega_n$ ) a eles associados são dados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – FACTS TCSC: Autovalores Dominantes,  $\zeta$  e  $\omega_n$

<b>Autovalores</b>	$\zeta$	$\omega_n$ (Hz)
$-0,2437 \pm j 6,2980$ (local 1)	0,0387	1,0031
$-0,1638 \pm j 5,8792$ (local 2)	0,0279	0,9361
$-0,4107 \pm j 4,3762$ (interárea)	0,0934	0,6996
$-1,3032 \pm j 0,8742$ (controlador 1)	0,8305	0,2498
$-19,6530 \pm j 0,1786$ (controlador 2)	0,9999	3,1279

A análise dos autovalores mostrados na Tabela 5.5 permite concluir que o sistema torna-se estável após a inserção do dispositivo TCSC com seu controlador acoplado. Além disso, pode-se observar que o coeficiente de amortecimento obtido para o modo interárea é bastante próximo do especificado em projeto.

Quanto aos modos locais de oscilação, eles também sofrem deslocamentos com a atuação do TCSC sendo que para a situação simulada ambos os modos se tornam mais amortecidos, quando comparados com os valores dados na Tabela 5.1.

Observe também que a atuação do controlador POD faz com que sejam excitados dois modos oscilatórios, aqui chamados de modo controlador 1 e modo controlador 2. Estes novos modos não devem comprometer a integridade do sistema, pois são bastante amortecidos (coeficientes de amortecimento em 0,8305 e 0,9999, respectivamente).

Considerando o controlador POD para o dispositivo SSSC com os parâmetros mostrados na Tabela 5.4 foram realizadas novas simulações e os autovalores dominantes da matriz de estados e seus coeficientes de amortecimento e frequências naturais associados são mostrados na Tabela 5.6.

Da análise dos autovalores mostrados na Tabela 5.6 se pode concluir pela estabilidade do sistema elétrico após a inserção do dispositivo SSSC com controlador POD. Também pode ser observado que o coeficiente de amortecimento real do modo interárea é bastante próximo do valor de projeto ( $\xi = 0,1008$ ).



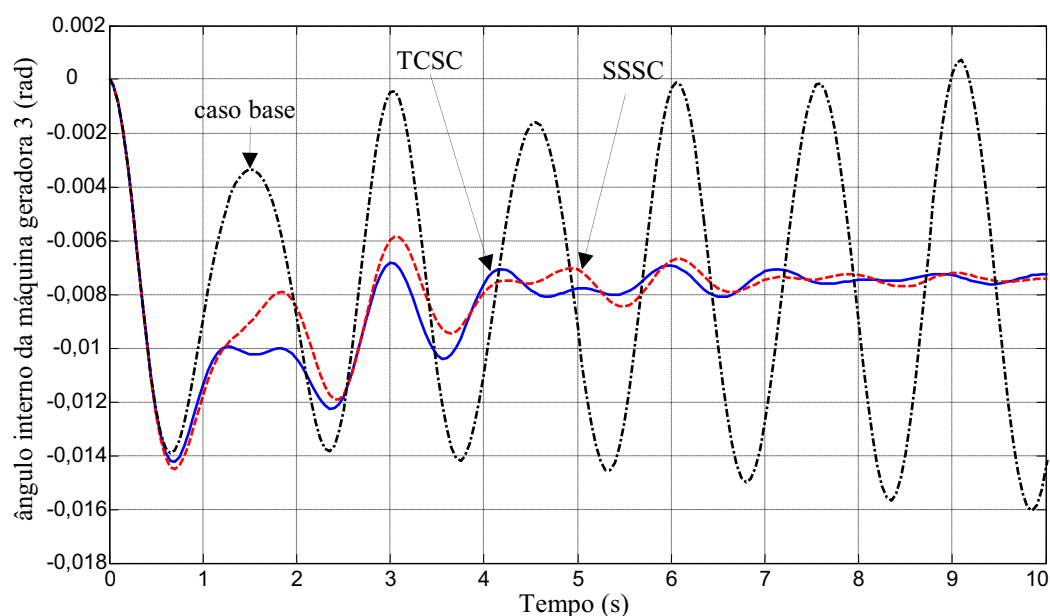
Tabela 5.6 – FACTS SSSC: Autovalores Dominantes,  $\omega_n$  e  $\xi$ 

Autovalores	$\xi$	$\omega_n$ (Hz)
$-0,2428 \pm j 6,2956$ (local 1)	0,0385	1,0027
$-0,1630 \pm j 5,8778$ (local 2)	0,0277	0,9358
$-0,4205 \pm j 4,1513$ (interárea)	0,1008	0,6641
$-1,5754 \pm j 0,8976$ (controlador)	0,8689	0,2886

No que se referem aos modos locais de oscilação, eles também sofrem deslocamentos com a atuação dos dispositivos FACTS, sendo que para a situação simulada ambos os modos também se tornaram mais amortecidos, quando comparados com os valores da Tabela 5.1.

Observe ainda que no caso do dispositivo SSSC com um controlador POD acoplado é excitado apenas mais um modo oscilatório (chamado de modo controlador na Tabela 5.6). Este modo não compromete a estabilidade do sistema elétrico, pois possui coeficiente de amortecimento elevado ( $\xi = 0,8689$ ).

Na Figura 5.2 e na Figura 5.3 são mostrados os comportamentos dos ângulos internos das máquinas geradoras 3 (pertencente à área 2) e 2 (pertencente à área 1), em relação ao ângulo interno da máquina 1 (pertencente à área 1), após uma perturbação em degrau de 0,05 pu no torque mecânico de entrada do gerador 1 ( $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$  e  $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$ , respectivamente).

Figura 5.2 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3:  $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$

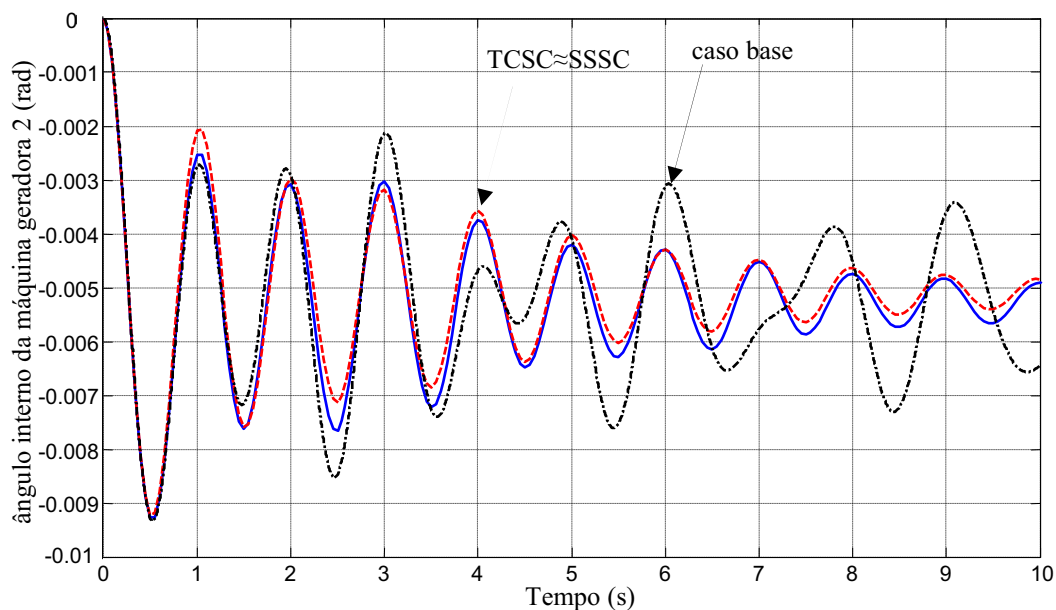


Figura 5.3 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 2:  $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$

Comparando-se as curvas estáveis das Figuras 5.2 e 5.3 pode-se afirmar que a máquina 3 é mais afetada pela perturbação que a máquina 2 (o desvio em regime permanente do ângulo interno da máquina 3 é maior que o da máquina 2).

Na Figura 5.4 é mostrado o comportamento dos desvios do fluxo de potência ativa na linha de transmissão 7-8 (local de instalação do conjunto (TCSC/SSSC) +POD), para o caso base e com a atuação dos dispositivos TCSC e SSSC equipados com controlador POD. A análise das curvas mostradas permite afirmar que os dispositivos TCSC e SSSC conseguiram controlar o fluxo de potência ativa na linha de transmissão 7-8.

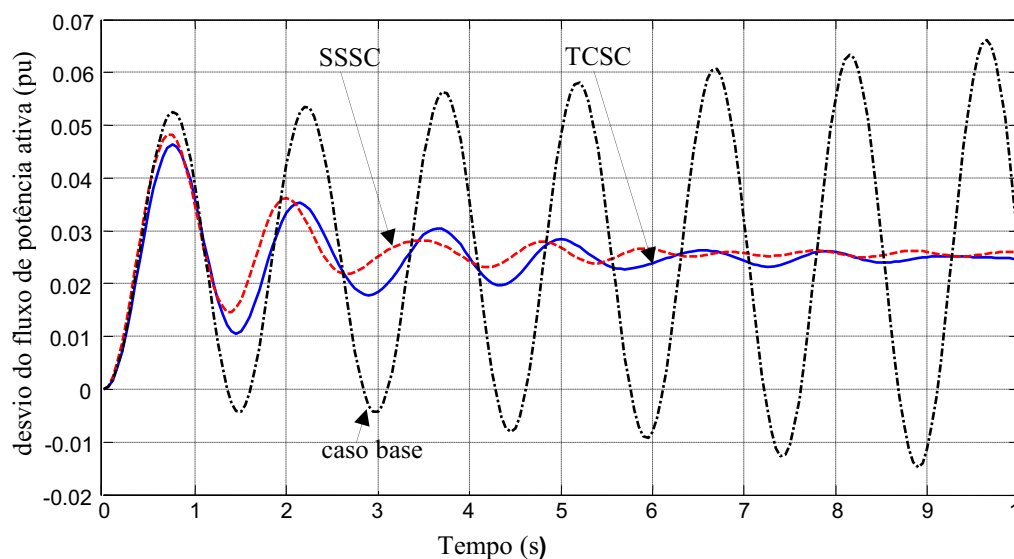


Figura 5.4 – Desvio do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão 7-8

Observando as curvas mostradas (Figuras 5.2 à Figura 5.4) vê-se que a atuação dos dispositivos FACTS seja o TCSC ou o SSSC com seus respectivos controladores tornou o sistema estável (como já concluído pela análise dos autovalores – Tabela 5.5 e Tabela 5.6) sendo esta estabilidade caracterizada por oscilações de amplitude decrescente.

### 5.5. Ajuste dos Parâmetros dos Controladores POD – Método Neural

Neural Network Toolbox é uma ferramenta para elaboração, execução, visualização e simulação de redes neurais contida no software Matlab<sup>®</sup>. A ferramenta fornece suporte completo para projetar e gerenciar redes neurais, além de simplificar a criação de funções e redes neurais personalizadas.

A rede neural que será utilizada neste trabalho é a Perceptron Multicamadas com treinamento supervisionado (Levenberg-Marquardt).

A estrutura da RNA é composta por 1 camada de entrada com dois neurônios (as variações da potência ativa gerada pela máquina 4 e as variações da potência ativa entre as barras 7 e 8), 1 camada intermediária com 3 neurônios e 1 camada de saída com três neurônios ( $T_1$ ,  $T_2$  e  $K_{POD}$ ).

A escolha das entradas da RNA deveu-se ao fato de que testes preliminares mostraram que tais variáveis traduziam melhor o comportamento do sistema elétrico. As saídas da RNA são os parâmetros dos controladores POD.

A coleta dos padrões de treinamento da RNA (entradas e saídas) capazes de reproduzir situações (não necessariamente reais) do sistema elétrico para o projeto dos PODs foi realizado pelo método dos resíduos (Febres e Araujo, 2008). Para este fim os desvios da potência ativa gerada pela máquina 4 (barra slack do sistema) e os desvios da potência ativa na linha de transmissão entre as barras 7 e 8 sofreram variações na faixa de 1% a 12%.

Primeiramente foi alterado o carregamento da barra 7 para mais e para menos do que o caso base. Na sequência o mesmo procedimento foi realizado para a barra 8. A partir destas simulações foram obtidas as entradas utilizadas para o treinamento da RNA, sendo que estes padrões foram utilizados para os dois dispositivos (TCSC e SSSC). Após o treinamento, a RNA se tornou capaz de realizar o projeto dos PODs para situações em que foi treinada e também para condições de operação inéditas.

Na Tabela 5.7 são mostrados os parâmetros para controladores PODs para os dispositivos TCSC e SSSC obtidos através da RNA, considerando como ponto de operação o

caso base do sistema elétrico de potência, que é uma situação conhecida pela RNA (ponto de operação que fez parte do treinamento pela RNA).

Tabela 5.7 – Parâmetros do Controlador POD: dispositivo TCSC/SSSC (Método Neural: situação treinada pela RNA)

	$K_{POD}$	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)
<b>TCSC</b>	0,1494	0,0807	0,6934	0,0807	0,6934
<b>SSSC</b>	0,2290	0,0947	0,5930	0,0947	0,5930

Comparando os valores dos parâmetros dos PODs mostrados na Tabela 5.7 (método neural, situação treinada pela RNA) com os da Tabela 5.4 (método clássico) pode-se observar que são bastante próximos. Este resultado já era esperado pois em ambos os casos o ajuste foi feito para o caso base.

Quanto aos valores mostrados na Tabela 5.7 novamente se verifica que os controladores são de atraso de fase. Além disso, o controlador destinado ao dispositivo FACTS SSSC também exige um ganho maior que o controlador a ser acoplado ao TCSC, para uma ação de controle equivalente, implicando em um maior esforço de controle para o controlador associado ao SSSC.

Depois de incluso os dispositivos TCSC e SSSC equipados com seus respectivos controladores no sistema elétrico de potência, novas simulações foram realizadas e os autovalores de interesse, bem como os coeficientes de amortecimento ( $\zeta$ ) e as frequências naturais ( $\omega_n$ ) a eles associados são dados na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 – FACTS TCSC: Autovalores Dominantes,  $\zeta$  e  $\omega_n$  (situação treinada pela RNA)

<b>Autovalores</b>	$\zeta$	$\omega_n$ (Hz)
-0,2437 ± j 6,298 (local 1)	0,0387	1,0031
-0,1638 ± j 5,8792 (local 2)	0,0279	0,9361
-0,4086 ± j 4,3762 (interárea)	0,0930	0,6995
-1,3007 ± j 0,87105 (controlador 1)	0,8309	0,2492
-19,6530 ± j 0,17805 (controlador 2)	0,9999	3,1279

Tabela 5.9 – FACTS SSSC: Autovalores Dominantes,  $\omega_n$  e  $\xi$  (situação treinada pela RNA)

<b>Autovalores</b>	$\xi$	$\omega_n$ (Hz)
-0,2428 ± j 6,2956 (local 1)	0,0385	1,0027
-0,1630 ± j 5,8777 (local 2)	0,0277	0,9358
-0,4198 ± j 4,1518 (interárea)	0,1006	0,6642
-1,5741 ± j 0,89647 (controlador)	0,8690	0,2883

A análise dos autovalores mostrados na Tabela 5.8 e Tabela 5.9 permite concluir que o sistema elétrico de potência se torna estável após a inserção dos dispositivos FACTS acoplados aos seus respectivos controladores PODs cujos parâmetros foram calculados através da RNA. Além disso, pode-se observar que o coeficiente de amortecimento real do modo interárea é o de projeto para a atuação do dispositivo SSSC (0.1006) e bastante próximo do desejado para o dispositivo TCSC (0.0930).

Quanto aos modos locais de oscilação, eles também sofrem deslocamentos com a atuação dos FACTS e seus controladores sendo que para a situação simulada ambos os modos se tornam mais amortecidos, quando comparados com os valores mostrados na Tabela 5.1 (sistema elétrico sem compensação). Se a comparação for feita com os valores mostrados nas Tabelas 5.5 e 5.6 (autovalores obtidos com os PODs ajustados pelo método clássico), pode-se afirmar que a ação dos controladores sob os modos locais é a mesma, independente do método de ajuste utilizado.

Assim como quando da atuação dos controladores ajustados pelo método clássico, é importante notar que a inclusão do dispositivo TCSC acoplado ao POD excita mais dois modos oscilatórios no sistema de potência (modos controladores 1 e 2 – Tabela 5.8). A operação do dispositivo SSSC em conjunto com o POD excita novamente apenas mais um modo oscilatório (modo controlador, na Tabela 5.9). Observe que estes modos não são do tipo local nem do tipo interárea, estando relacionados com a estrutura e princípio de funcionamento dos FACTS e PODs e não comprometem a integridade do sistema elétrico pois são fortemente amortecidos (apresentam valores elevados de coeficiente de amortecimento  $\xi$ ).

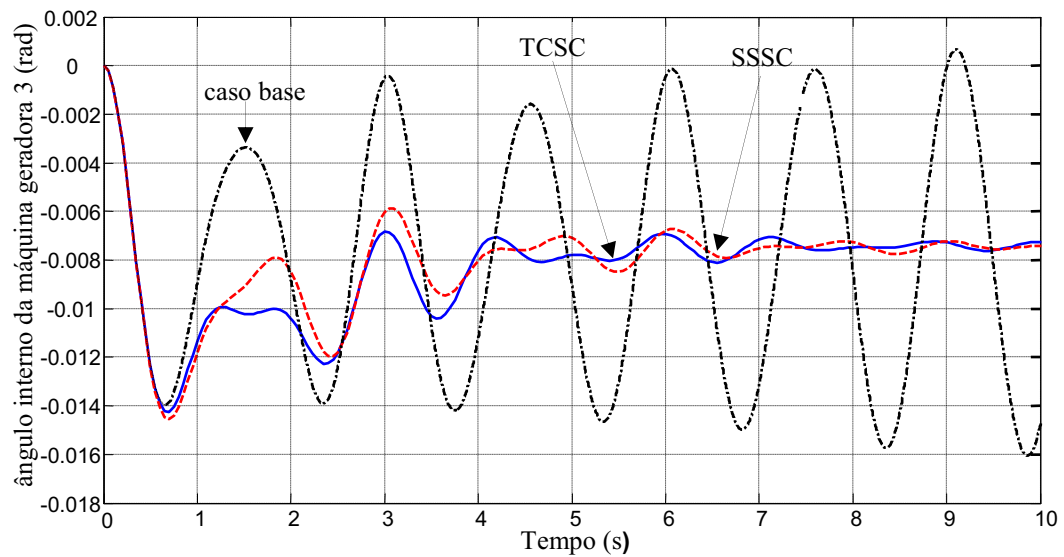


Figura 5.5 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3:  $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$

Na Figura 5.5 e na Figura 5.6 são mostrados os comportamentos dos ângulos internos das máquinas geradoras 3 (pertencente à área 2) e 2 (pertencente à área 1) em relação ao ângulo interno da máquina 1 (pertencente à área 1), após uma perturbação em degrau de 0,05 pu no torque mecânico de entrada do gerador 1 ( $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$  e  $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$ , respectivamente). Na Figura 5.7 são apresentados os desvios do fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 7 e 8 (local de instalação do conjunto TCSC/SSSC com os respectivos PODs).

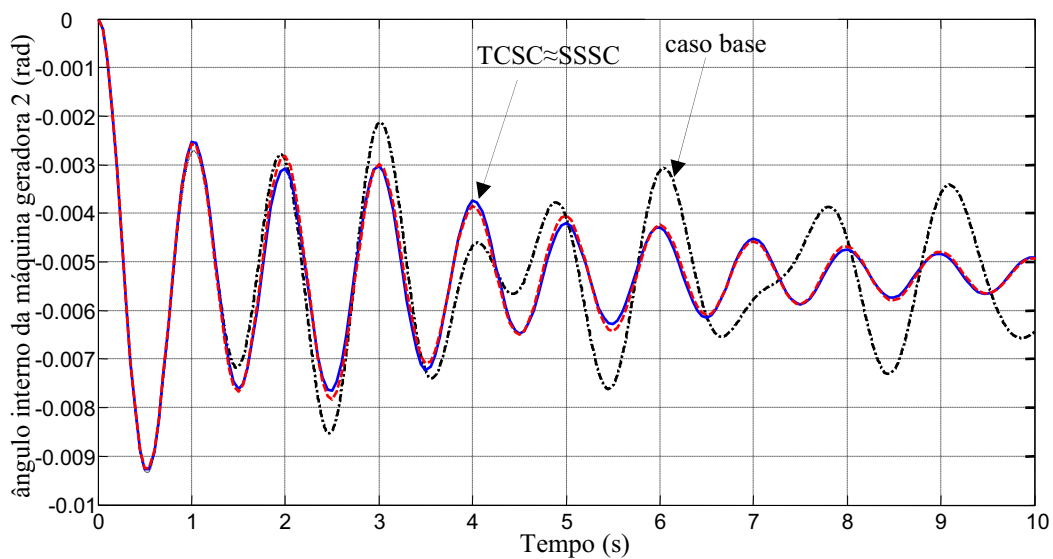


Figura 5.6 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 2:  $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$

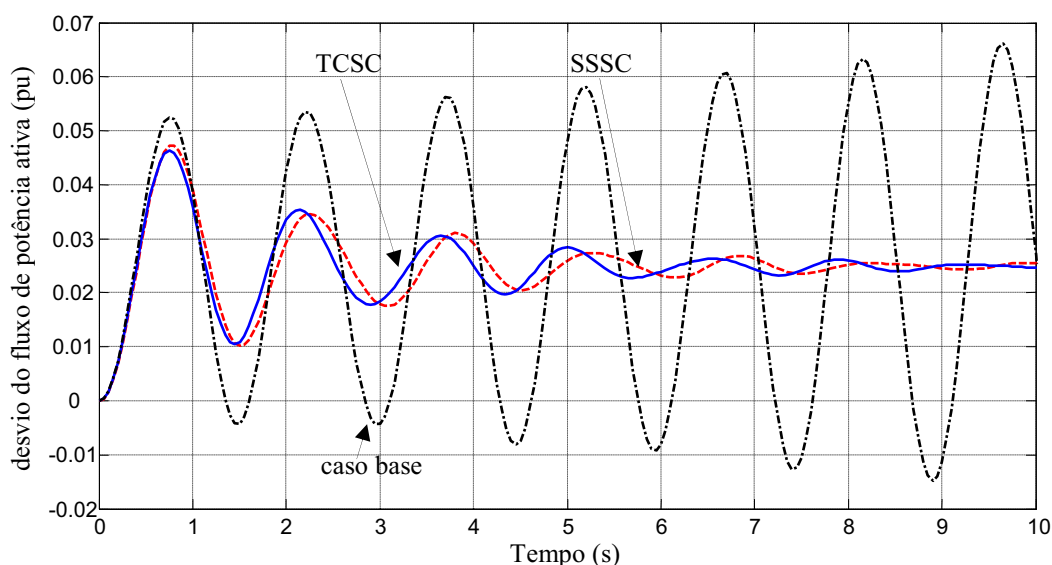


Figura 5.7 – Desvio do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão 7-8

A partir dos gráficos mostrados nestas Figuras pode-se concluir novamente pela estabilidade do sistema elétrico de potência devido à atuação dos dispositivos FACTS e seus controladores adicionais.

Comparando-se os gráficos mostrados na Figuras 5.5 (obtidos com os PODs ajustados pelo método neural) com os gráficos apresentados na Figura 5.2 (obtidos com os PODs ajustados pelo método clássico), observa-se que são bastante próximos. Este comportamento deve-se ao fato de que os padrões de treinamento utilizados na RNA foram coletados através do método clássico e em ambos os casos (método clássico ou método neural) o projeto foi realizado para o caso base. As mesmas conclusões podem ser obtidas comparando-se as Figuras 5.3 e 5.6 e as Figuras 5.4 e 5.7.

Uma grande vantagem da RNA é a sua capacidade de generalização, isto é, particularizando para o caso deste trabalho, o fornecimento de parâmetros do controlador POD em situações na qual ela não foi treinada.

Para exemplificar esta capacidade, foi considerada uma situação em que as cargas ativas das barras 7 e 8 sofrem um aumento de 8% e 5%, respectivamente (situação não utilizada no treinamento da RNA). Após o processamento da RNA, são obtidos novos parâmetros dos controladores POD, que são mostrados na Tabela 5.10.

Novamente, a partir dos valores obtidos para os parâmetros, pode-se afirmar que os controladores são de atraso de fase e que o controlador POD projetado para o dispositivo TCSC requer um maior ganho quando comparado com o controlador projetado para o

dispositivo SSSC.

Tabela 5.10 – Parâmetros do Controlador POD: dispositivo TCSC/SSSC (Método Neural: situação não treinada pela RNA)

	$K_{POD}$	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)
TCSC	0,2968	0,0761	0,7012	0,0761	0,7012
SSSC	0,2321	0,0923	0,5986	0,0923	0,5986

Uma comparação entre os valores dos parâmetros mostrados na Tabela 5.7 (método neural, situação já apresentada para a RNA) com os da Tabela 5.10 (método neural, situação não apresentada à RNA) permite concluir que o POD associado ao TCSC é mais sensível às variações do ponto de operação que o POD associado ao dispositivo SSSC (observe que o ganho do controlador associado ao TCSC sofre alteração bem maior que o ganho do controlador associado ao SSSC, para uma mesma variação no ponto de operação do sistema elétrico de potência).

Os dispositivos FACTS com os controladores ajustados de acordo com os valores dados na Tabela 5.10 foram colocados em operação no sistema elétrico e novas simulações foram realizadas. Os autovalores de interesse, bem como os coeficientes de amortecimento ( $\zeta$ ) e as frequências naturais ( $\omega_n$ ) a eles associados são dados na Tabela 5.11 e na Tabela 5.12.

Tabela 5.11 – FACTS TCSC: Autovalores Dominantes,  $\zeta$  e  $\omega_n$  (situação não treinada pela RNA)

Autovalores	$\zeta$	$\omega_n$ (Hz)
$-0,2381 \pm j 6,3000$ (local 1)	0,0378	1,0034
$-0,0224 \pm j 6,1120$ (local 2)	0,0037	0,9727
$-0,4263 \pm j 4,5112$ (interárea)	0,0941	0,7212
$-1,2249 \pm j 0,8658$ (controlador 1)	0,8166	0,2387
$-19,7760 \pm j 0,6629$ (controlador 2)	0,9994	3,1492



Tabela 5.12 – FACTS SSSC: Autovalores Dominantes,  $\omega_n$  e  $\zeta$  (situação não treinada pela RNA)

<b>Autovalores</b>	$\zeta$	$\omega_n$ (Hz)
-0,2369 ± j 6,2959 (local 1)	0,0376	1,0027
-0,0203 ± j 6,1140 (local 2)	0,0033	0,9731
-0,4373 ± j 4,2614 (interárea)	0,1021	0,6818
-1,5210 ± j 0,8835 (controlador)	0,8647	0,2800

Analisando os valores mostrados nas Tabelas 5.11 e 5.12 pode-se afirmar que a RNA foi capaz de calcular os parâmetros dos controladores PODs em uma situação não treinada com eficiência, pois os coeficientes de amortecimento real do modo interárea (0,0941 para a atuação do TCSC e 0,1021 para o SSSC) estão bem próximos do coeficiente de amortecimento especificado em projeto.

Quanto aos modos locais, estes também sofrem deslocamentos no plano complexo como nos casos simulados anteriormente.

Comparando-se os valores relacionados ao modo local 1 da Tabela 5.1 com os mostrados nas Tabelas 5.11 e 5.12 pode-se concluir que este sofre pequena alteração, tornando-se um pouco mais amortecido. Se a comparação for realizada entre os valores mostrados nas Tabelas 5.5 e 5.6 (ou Tabelas 5.8 e 5.9) com os das Tabelas 5.11 e 5.12 a conclusão é que o modo local 1 sofre pequeno deslocamento, tornando-se menos amortecido.

Com relação ao modo local 2, para os parâmetros de ajuste mostrados na Tabela 5.10, este sofre grande deslocamento, tornando-se fracamente amortecido quando comparado com os valores obtidos para as outras condições de ajuste (Tabelas 5.1, 5.5, 5.6, 5.8 e 5.9).

No caso do sistema teste considerado esta diminuição de amortecimento não resultou em instabilidade, mas deve ser preocupante. Se esta tendência de baixo amortecimento do modo local 2 obtido com os parâmetros dos PODs listados na Tabela 5.10 continuar para outros pontos de operação, a estabilidade do sistema elétrico de potência poderá ser comprometida. Para se evitar esta situação, um projeto coordenado dos dispositivos TCSC ou SSSC equipados com PODs e Estabilizadores de Sistemas de Potência é recomendado para tornar o sistema eletricamente mais robusto.

Na Figura 5.8 é mostrado os comportamentos dos ângulos internos da máquina 3

(pertencente à área 2) em relação ao ângulo interno da máquina 1 (pertencente à área 1).

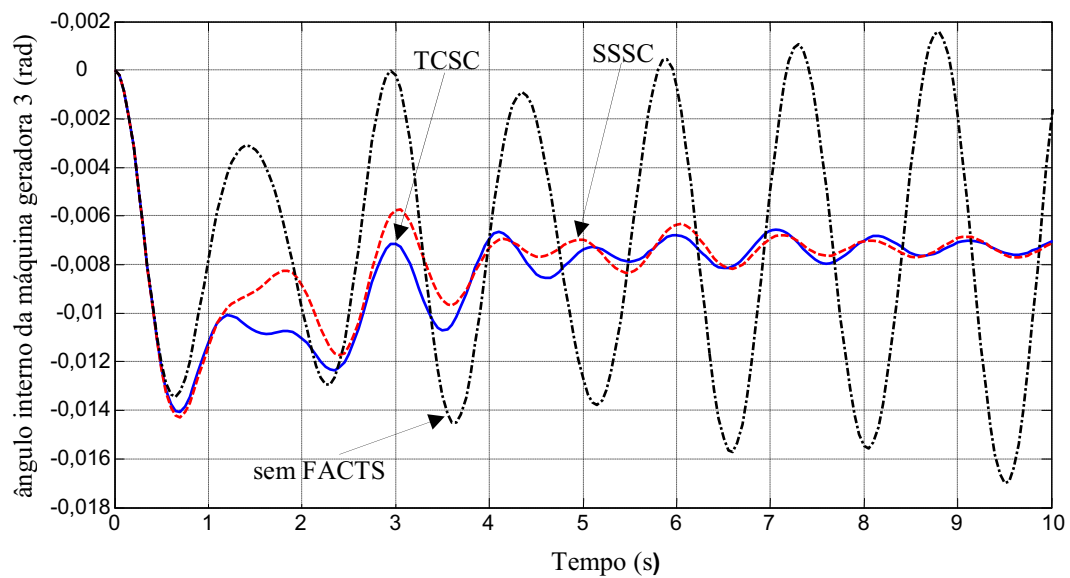


Figura 5.8 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3:  $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$

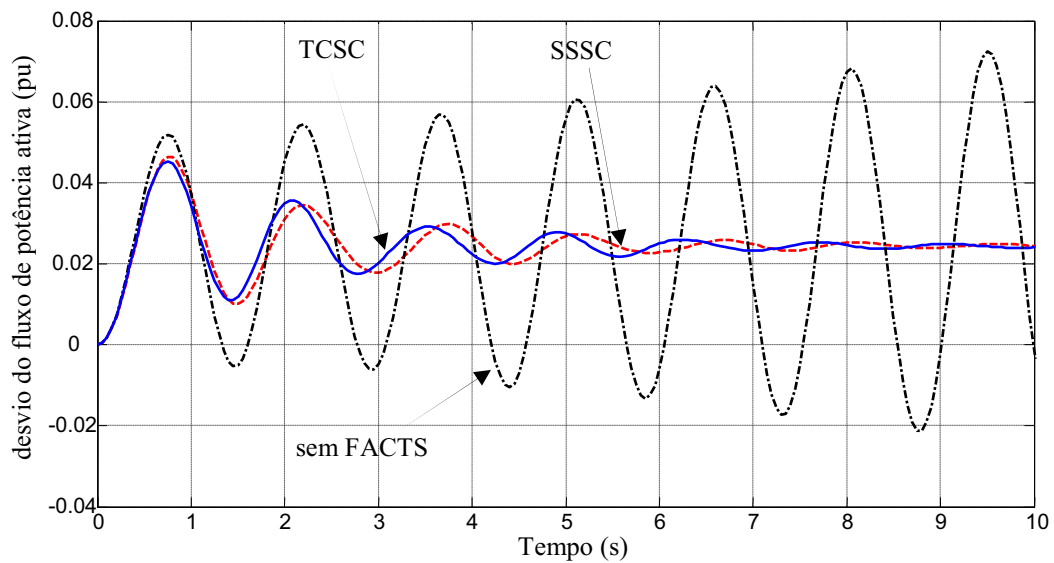


Figura 5.9 – Desvio do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão 7-8

Na Figura 5.9 é mostrado o comportamento dos desvios do fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 7 e 8 (local de instalação dos dispositivos FACTS).

A análise das curvas mostradas em ambas as Figuras permite concluir pela estabilidade do sistema elétrico de potência, caracterizada por oscilações de amplitude decrescente.

A vantagem de se utilizar uma RNA no ajuste de parâmetros do controlador POD é que ao se alterar o carregamento do sistema elétrico, a RNA (depois de feito o treinamento) identifica o novo ponto de operação e modifica os parâmetros do controlador para manter o coeficiente de amortecimento definido em projeto, não necessitando de um novo ajuste manual (caso do método clássico).

Para se analisar este fato (para o caso do dispositivo TCSC) considere a Tabela 5.13 onde é mostrado o autovalor associado ao modo interárea considerando o ponto de operação que reflete a situação não utilizada no treinamento da RNA (as cargas ativas das barras 7 e 8 sofrem um aumento de 8% e 5%, respectivamente).

Tabela 5.13 – FACTS TCSC: Comparação entre o Método Clássico e o Método Neural

<b>Método de Ajuste</b>	<b>Autovalores</b>	$\zeta$	$\omega_n$ (Hz)
Clássico	$-0,19379 \pm j 4,3881$ (interárea)	0,0441	0,6991
Neural	$-0,4263 \pm j 4,5112$ (interárea)	0,0941	0,7212

Quando se utiliza para este ponto de operação os parâmetros do POD mostrados na Tabela 5.4 (método clássico), obtém-se um coeficiente de amortecimento associado ao modo interárea de 0,0441, bem abaixo do especificado em projeto (0,1). Se os parâmetros do POD são os mostrados na Tabela 5.10 (quando a RNA modifica os parâmetros para se considerar o novo ponto de operação) o coeficiente de amortecimento que se obtém é de 0,0941, bastante próximo do especificado em projeto.

O efeito desta diferença entre os coeficientes de amortecimento pode ser visualizado nos gráficos mostrados na Figura 5.10 onde são apresentadas as curvas do ângulo interno da máquina geradora 3 (pertencente à área 2) em relação ao ângulo interno da máquina 1 (pertencente à área 1).

Observe na Figura 5.10 que a curva referente ao ajuste pelo método clássico é bem menos amortecida que a curva referente ao ajuste realizado pelo método neural. Isto implica que o sistema elétrico com o POD ajustado pelo método clássico terá um maior intervalo de tempo para se atingir a condição de regime permanente, se comparado com o sistema elétrico onde o POD é ajustado pelo método neural.

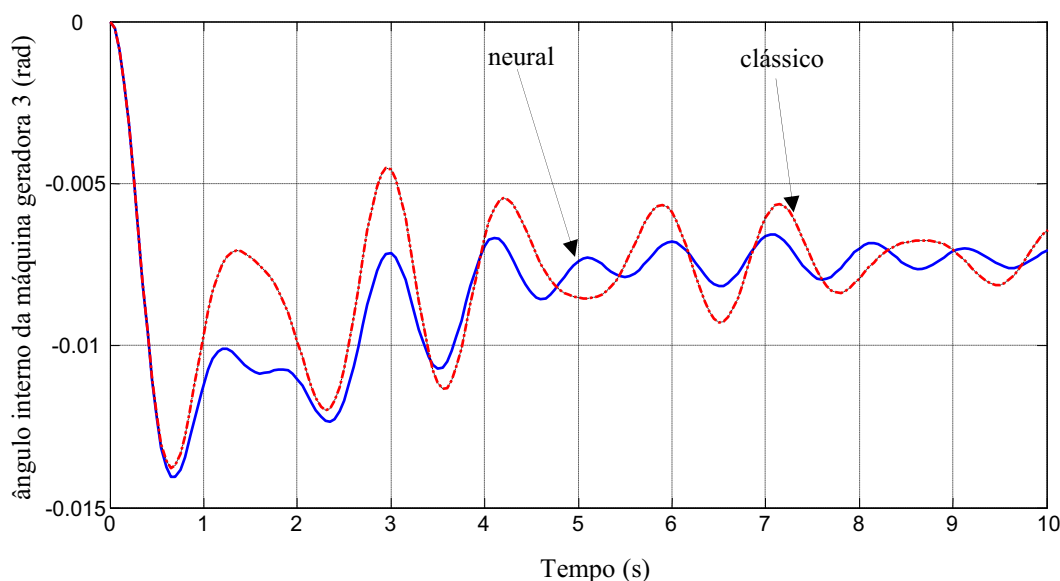


Figura 5.10 – Ângulo Interno: Máquina Geradora 3:  $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$

Na Tabela 5.14 são apresentados os coeficientes de amortecimento associados ao modo interárea para as mesmas situações da Tabela 5.13, só que para o dispositivo SSSC.

Observe que os coeficientes de amortecimento obtidos com controladores projetados pelos métodos clássico e neural estão bem próximos dos estipulados em projeto (0,1033 para o método clássico e 0,1021 para o método neural).

Tabela 5.14 – FACTS SSSC: Comparação entre o Método Clássico e o Método Neural

Método de Ajuste	Autovalores	$\zeta$	$\omega_n$ (Hz)
Clássico	$-0,4410 \pm j 4,2477$ (interárea)	0,1033	0,6991
Neural	$-0,4373 \pm j 4,2614$ (interárea)	0,1021	0,6818

Este resultado mostra que no caso do sistema teste simulado e para as condições de operação consideradas, o POD associado ao dispositivo SSSC é menos sensível às variações do ponto de operação que o POD associado ao dispositivo TCSC (observe que os valores dos parâmetros do POD associado ao SSSC mostrados nas Tabelas 5.4 (método clássico), 5.7 (método neural em situação treinada pela RNA) e 5.10 (método clássico em situação não apresentada à RNA) são bastante próximos).

Baseado apenas neste resultado pode-se afirmar que o método clássico de ajuste fornece parâmetros robustos para o controlador POD quando o dispositivo considerado for o

SSSC, diferentemente da situação onde o dispositivo é o TCSC o método neural é necessário pois o POD associado a este dispositivo é mais sensível às variações do ponto de operação do sistema elétrico de potência.

## 5.6. Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados os resultados obtidos quando da inclusão dos dispositivos FACTS TCSC e SSSC no Modelo Sensibilidade de Potência para sistemas multimáquinas. As modelagens realizadas nos Capítulos 2 e 3 foram aplicadas a um sistema de potência simétrico de duas áreas, por ter uma característica didática, fácil visualização e estudo dos principais modos eletromecânicos de oscilação de baixa frequência (modos locais e modos interáreas).

O sistema mostrou ter três modos de oscilação, sendo dois deles estáveis (caracterizados como modos locais de oscilação) e um modo oscilatório instável com frequência característica de modo de oscilação interárea.

A localização e ajuste dos parâmetros dos controladores para ambos os dispositivos foram realizados a partir dos resíduos da função de transferência em malha aberta e um método alternativo sugerido para o ajuste de parâmetros dos controladores, método neural (que utiliza a RNA Perceptron Multicamadas para o ajuste dos parâmetros do POD).

Em comum, as atuações dos dois dispositivos com seus respectivos controladores, introduziram torque de amortecimento de maneira eficaz ao sistema elétrico de potência, tornando-o estável, independentemente do método utilizado para o projeto dos controladores POD.

Porém, a justificativa da RNA não se aplica ao dispositivo SSSC, por que o ganho do seu controlador POD (que faz a compensação de fase necessária para obter-se o amortecimento desejado) é pouco sensível à mudança do ponto de operação do sistema elétrico. Observou-se das simulações realizadas que uma vez ajustado os parâmetros do controlador pelo método clássico e se o sistema for submetido a uma mudança do ponto de operação, o coeficiente de amortecimento associado ao modo interárea ainda é bastante próximo ao estipulado em projeto.

Comportamento diferente ocorre quando o dispositivo é o TCSC, onde o ajuste pelo método neural é mais necessário quando se comparado com o ajuste feito pelo método clássico. As simulações mostraram que o ajuste feito pelo método clássico não consegue

manter o coeficiente de amortecimento especificado em projeto quando o sistema elétrico altera o seu ponto de operação. Este coeficiente só é mantido o de projeto quando o método neural altera os parâmetros do POD, em função do ponto de operação do sistema elétrico de potência.

## CAPÍTULO 6

### Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram apresentados estudos referentes à estabilidade às pequenas perturbações (estabilidade dinâmica) do SEP no ambiente multimáquinas, sob a ação de dois dispositivos FACTS.

Foram comparadas as atuações dos dispositivos TCSC e SSSC com controladores POD acoplados, para se introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência.

O modelo utilizado para se representar o SEP foi o Modelo de MSP, que é uma alternativa ao modelo linear de Heffron & Phillips, que é bastante utilizado na literatura em estudos da estabilidade de oscilações de baixa frequência. O princípio fundamental do MSP baseia-se no fato de que o balanço de potências (ativa e reativa) deve ser satisfeito continuamente em qualquer barra do sistema elétrico durante qualquer processo dinâmico.

Uma das vantagens de utilizar o MSP consiste em não ser necessária a representação de um barramento infinito nem a redução do sistema externo de transmissão às barras internas dos geradores, o que torna muito facilitada a sua extensão para o sistema de potência multimáquinas. Além disso, a inclusão de outros dispositivos na modelagem é feita de maneira relativamente simples, aproveitando todo o equacionamento anteriormente efetuado.

Realizada a formulação matemática do MSP, foram desenvolvidos os equacionamentos dos dispositivos FACTS TCSC e SSSC, sendo avaliadas as características mais importantes e relevantes desses dispositivos. Também foram apresentados estudos funcionais dos mesmos, seguido de suas representações dinâmicas (modelagem). Estas modelagens foram então incorporadas ao MSP.

Na sequência, para cada dispositivo, apresentou-se um modelo matemático que descreve o seu controlador POD, bem como seu acoplamento ao dispositivo FACTS TCSC ou SSSC. Com o controlador devidamente descrito incluiu-se a formulação matemática que representa a instalação do TCSC e SSSC acoplados com controladores POD no MSP-multimáquinas.

Para a localização e o ajuste dos parâmetros do POD foi utilizado o método dos

resíduos (método clássico) da função de transferência em malha aberta. Foi também realizado o ajuste do POD utilizando-se redes neurais artificiais (método neural) para posterior comparação com o método clássico.

Através da análise dos autovalores de um sistema de potência teste, pode-se concluir que depois de inserido os dispositivos TCSC e SSSC acoplados aos controladores POD, o sistema antes instável, se tornou estável, ou seja, os dispositivos e seus controladores (ajustados pelo método clássico ou pelo método neural) cumpriram o objetivo de fornecer amortecimento necessário a fim de estabilizar as oscilações eletromecânicas de baixa frequência, associadas a um modo interárea de oscilação. As mesmas conclusões foram obtidas a partir da análise no domínio do tempo para determinadas variáveis do sistema elétrico. Além disso, observou-se a proximidade entre as curvas de respostas destas variáveis, indicando uma atuação semelhante dos dois dispositivos.

No que se refere ao emprego da RNA PMC para o projeto dos parâmetros do controlador POD, esta se mostrou eficaz, tanto para condições por ela treinadas quando para condições desconhecidas.

Da análise feita dos parâmetros do controlador de cada dispositivo, pode-se concluir que o ganho do controlador POD, projetado para o mesmo coeficiente de amortecimento desejado, para o dispositivo SSSC é maior que o ganho do controlador POD para o dispositivo TCSC, ou seja, ambos os controladores fornecem o amortecimento estipulado em projeto para o sistema elétrico, porém o controlador acoplado ao dispositivo SSSC exigirá um maior esforço de controle, quando comparado com o POD associado ao dispositivo TCSC.

Entretanto, quando ocorrem variações no carregamento do sistema, a alteração dos parâmetros do controlador POD associado ao dispositivo SSSC para se manter o coeficiente de amortecimento especificado é bem pequena quando comparada com as alterações necessárias dos parâmetros do controlador POD associado ao dispositivo TCSC. Dito de outra forma, nas condições avaliadas e para o sistema teste considerado, os parâmetros do controlador associado ao dispositivo TCSC precisam ser reajustados para cada mudança do ponto de operação do sistema elétrico de potência, enquanto que os parâmetros do POD associado ao dispositivo SSSC sofrem pouca variação.

Em vista disso, no caso do sistema teste considerado e para os pontos de operação avaliados, a questão de um novo ajuste dos parâmetros a cada mudança do ponto de operação do sistema elétrico de potência se justifica somente para o dispositivo TCSC. Como consequência, a utilização da RNA para projeto de parâmetros do controlador POD é indicada



para o dispositivo TCSC, enquanto que o método clássico supre satisfatoriamente as condições do projeto do POD para o dispositivo SSSC.

Outra conclusão obtida a partir das simulações foi que a atuação do controlador POD associado ao TCSC excita dois novos modos oscilatórios (modos controladores 1 e 2). No caso do POD ser associado ao SSSC apenas um modo controlador é excitado.

De maneira geral, ambos os dispositivos se mostraram eficazes em fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência quando equipados com controladores POD bem ajustados, com desempenhos muito semelhantes. Vale ressaltar que o SSSC é considerado uma evolução do TCSC, porém, como se verificou através dos resultados, o TCSC ainda é um dispositivo muito eficiente para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência quando comparado com o SSSC.

Para trabalhos futuros é proposta a utilização do método neural de ajuste para um sistema de potência de maior porte como, por exemplo, o conhecido como “New England”. Este sistema é interessante, pois tem como característica modos instáveis do tipo local e tipo interárea. Assim, o ajuste coordenado dos parâmetros de controladores de diferentes filosofias (como os estabilizadores de sistemas de potência para atuar sobre os modos locais e PODs associados a dispositivos FACTS para agir sobre os modos interárea) atuando no sistema elétrico seria necessário, justificando ainda mais a utilização de RNA’s em seus projetos. Outro fato a ser levado em consideração é que a existência de modos instáveis de diferentes características em um mesmo sistema de potência é muito próxima dos sistemas elétricos reais.

Também é proposto um estudo mais aprofundado do comportamento dos dispositivos TCSC e SSSC (entre outros dispositivos sugeridos) para analisar as características que os diferem quando ambos são equipados com o mesmo controlador POD.

## Referências

- ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. 2.ed. Iowa: Iowa State University, 2003. 568p. (IEEE Power System Engineering Series).
- ARAÚJO, P. B.; ZANETTA JR, L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. *International Journal of Electric Power and Energy Systems*, England, v.23, n.3, p.173-178, 2001.
- BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. *Estabilidade transitória em sistemas eletromagnéticos*. São Carlos: USP/EESC, 2000. 155p.
- CAI, L. J. C.; ERLICH, I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Berlin, Germany, v.20, n.1, p.294-300, 2005.
- CASTRO, M. S.; AYRES, H. M.; KOPCAK, I.; SILVA, L. C. P.; DA COSTA, V. F. A Influência do modo de operação do SSSC na estabilidade de ângulo de sistemas elétricos de potência. *Revista Controle & Automação*, Natal, v.18, n.3, p.347-360, 2007.
- CHEN, C. L.; HSU, Y. Y. Coordinated Synthesis of Multimachine Power System Stabilizer Using an Efficient Decentralized Modal Control (DMC) Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, Atlanta, v.2, n.3, p.543-550, 1987.
- Da COSTA, V. F. **Modelo de sensibilidade de potência para análise de oscilações de baixa frequência em sistemas de energia elétrica**. 1992. 199f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação- FEEC, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, 1992.
- DECKMANN, S. M.; Da COSTA, V. F. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, Campinas, v.9, n.2, p.965-971, 1994.

- DeMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, New York, v.88, n.4, p.316-329, 1969.
- FEBRES, C. A. T.; ARAUJO, P. B. Damping of low-frequency oscillations by supplementary control of power system stabilizers. *Revista TEMA - Tendências Matemática Aplicada e Computacional*, Ilha Solteira, v.9, n.2, p.223-232, 2008.
- FREEMAN, J. A.; SKAPURA D. M. Neural networks algorithms, applications and programming techniques. [S.l.]: Addelfon-Wefley, 1992. p.89–106.
- 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. 153f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira, 2008.
- FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. <sup>[1]</sup> A Comparative study of the damping oscillation function of TCSC and UPFC. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, Bogota, v.1, p.1-6, 13-15 Aug. 2008.
- FURINI, M. A.; ARAUJO P. B. <sup>[2]</sup> Melhora da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas usando o dispositivo FACTS thyristor–controlled series capacitor – TCSC. *Revista Controle & Automação*, Campinas, v.19, n.2, p.214-225, 2008.
- FURINI, M. A.; LOPES, M. L. M.; ARAUJO, P. B. Rede Neural ARTMAP Nebulosa Aplicada no Projeto de Controladores ESP e UPFC/POD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3., 2010, Belém. *Anais...* Belém: [s.n.], 2010. v.1, p.1-6.
- HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. B. Training feedforward networks with the marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Tehran, v.5, n.6, p.989-983, 1994.
- HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. New Jersey: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1994. 823p.

- HINGORANI N. G. High power electronics and flexible AC transmission systems. *IEEE Power Engineering Review*, New York, v.76, n.4, p.3-4, 1998.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: IEEE Press - John Wiley, 1999. 452p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE. Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.19, n.3, p.1387-1401, 2004.
- KAZEMI, A.; SOHRFOROUZANI, V. M. Power system damping using fuzzy controlled FACTS devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Tehran, v.28, n.5, p.349-357, 2006.
- KLEIN M.; ROGERS G. J.; KUNDUR P. A Fundamental study of inter-area oscillation in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.6, n.3, p.914-921, 1991.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. EUA: MacGraw-Hill, 1994. 1167p.
- LARSEN E. V.; SWANN D. A. Applying power system stabilizers, part I: general concepts, part II: performance objectives and tuning concepts, part III: practical considerations. *IEEE Power Apparatus and Systems*, New York, v.PAS-100, n.12, p.3017–3046, 1981.
- MARTINS N.; LIMA L. T. G. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.5, n.4, p. 74–82, 1990.
- MÁSSON, E.; WANG Y-J. Introduction to computation and learning in artificial neural networks. *European Journal of Operational Research*, North-Holand, v.47, n.1, p.1–28, 1990.
- MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. *Thyristor based FACTS controllers for electrical transmission systems*. New York: Wiley-IEEE P, 2002. 495p.

- McCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Illinois, v.5, n.4, p.115-133, 1943.
- MHASKAR, U. P.; KULKARNI, A. M. Power oscillation damping using FACTS devices: modal controllability, observability in local signals, and location of transfer function zeros. *IEEE Transactions Power Systems*, Bangalore, India, v.21, n.1, p.285-294, 2006.
- MISHRA, S.; TRIPATHY, M.; NANDA, J. Multi-machine power system stabilizer design by rule based bacteria foraging. *Electric Power Systems Research*, Delhi, v.77, n.12, p.1595–1607, 2007.
- MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Influência dos zeros na localização e controle de dispositivos FACTS UPFC/POD para o amortecimento de oscilações eletromecânicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3., 2010, Belém. *Anais...* Belém: [s.n.], 2010. v.1, p.1-6.
- NASSIF, A. B. **Análise da estabilidade de ângulo e de tensão de sistemas elétricos de potência sujeitos a pequenas perturbações.** 2004. 148f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação- FEEC, Universidade Estadual de Campinas- UNICAMP, 2004.
- NASSIF, A. B.; CASTRO, M. S.; Da COSTA, V. F.; SILVA, L. C. P. Comparação do PSS, SVC e STATCOM no amortecimento de oscilações de modo local em sistemas de potência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA-CBA, 15., 2004, Gramado: UFRGS, 2004. p1-6.
- NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. Damping of power system oscillations by use of controllable components. *IEEE Transactions Power Delivery*, Stockholm, v.9, n.4, p.2046–2054, 1994.
- PEREIRA, A. L. S. **Utilização de redes neurais artificiais no ajuste de controladores suplementares e dispositivo FACTS STATCOM para a melhoria da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência.** 2009. 110f. Tese (Doutorado)-

- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2009.
- PEREIRA, A. L. S.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Uso de RNAs para ajuste de controladores adicionais do sistema elétrico de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3., 2010, Belém. *Anais...* Belém: [s.n.], 2010. v. 1, p.1-6.
- 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. 145f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2009.
- PUPIN, C. E.; PINA, A. P.; ARAUJO, P. B. Atuação do SSSC na estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2009, Blumenau. *Anais...* Blumenau: FURB, 2009. p.1-6.
- RANGANATHAN A. *The levenberg-marquardt algorithm*. Mountain View: [s.n.], 2004.  
Disponível em: <<http://www.ananth.in/docs/lmtut.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2010.
- SADIKOVIC, R. *Damping controller design for power system oscillations*. Zurich: Technical Report, Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, 2004. 14 p.
- SAUER P. W.; PAI M. A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357p.
- SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC transmission systems - FACTS*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 592p.
- UZUNOVIC, E. **EMTP, transient stability and power flow models and controls of VSC based FACTS controllers**. 2001. 225f. Tese (Doutorado)- Department of Electrical & Computer Engineering, University Of Waterloo, Waterloo, 2001.
- WANG H. F.; SWIFT F. J. An unified model for the analysis of FACTS devices in damping

power system oscillations part II: multi-machine power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.13, n.4, p.1355-1362, 1998.

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

YANG, N.; LIU Q.; MACCALLEY J. D. TCSC Controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Ames, v.13, n.14, p.1304–1310, 1998.

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

ZIMMERMAN R.; GAN D. MATPOWER – A MATLAB power system simulation package. [S.l. s.n.], 1997. 1p. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower/>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

## Apêndice I. Matriz de Transformação de Coordenadas

Considere dois sistemas de coordenadas distintos, conforme Figura A.I.1, onde tem-se um sistema fixo, determinado pelos eixos real (r) e imaginário (m), e outro rotativo, determinado pelos eixos direto (d) e em quadratura (q).

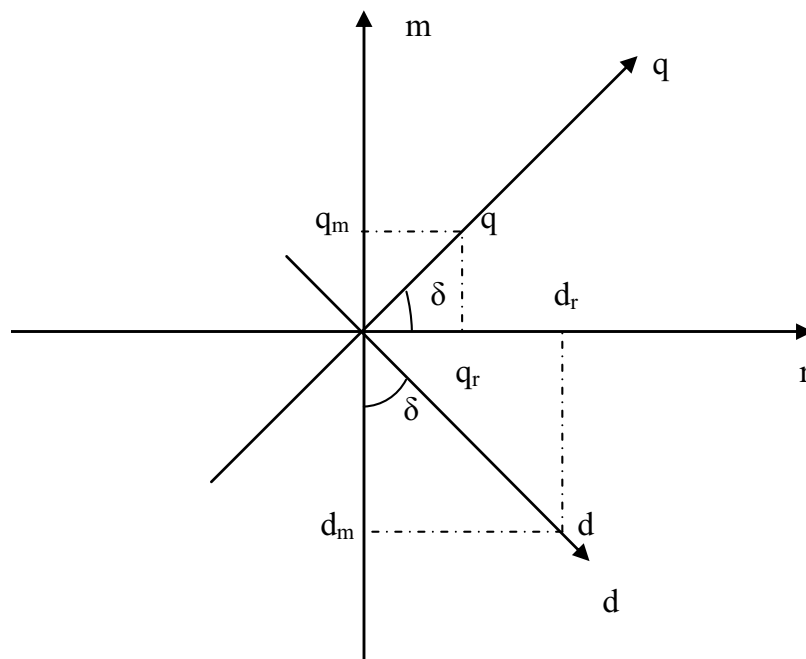


Figura A.I.1 – Sistemas de coordenadas r,m e d,q

Da Figura A.I.1 pode-se expressar uma grandeza sobre o eixo real (r), como na expressão (A.I.1).

$$r = d_r + q_r \quad (\text{A.I.1})$$

De maneira semelhante para uma grandeza no eixo imaginário (m), tem-se a equação (A.I.2).

$$m = -d_m + q_m \quad (\text{A.I.2})$$



Da Figura A.I.1 também podem ser obtidas as relações trigonométricas de interesse, descritas pelas equações (A.I.3).

$$\begin{aligned}
 \cos \delta &= \frac{q_r}{q} \\
 \text{sen } \delta &= \frac{q_m}{q} \\
 \cos \delta &= \frac{d_m}{d} \\
 \text{sen } \delta &= \frac{d_r}{d}
 \end{aligned}
 \tag{A.I.3}$$

Através de substituições pertinentes, pode ser escrito o sistema matricial que transforma uma grandeza representada no sistema de coordenadas (r,m), para o sistema de coordenadas (d,q) (equação A.I.4).

$$\begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \text{sen } \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}
 \tag{A.I.4}$$

De maneira similar, obtém-se a transformada inversa entre os sistemas de coordenadas (d,q) e (r,m) (equação A.I.5).

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \text{sen } \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix}
 \tag{A.I.5}$$

## Apêndice II. Dados do Sistema Multimáquinas

Os dados reproduzidos nas Tabelas A.II.1- A.II.4 podem ser encontrados em (KUNDUR, 1994).

Tabela A.II.1 – Dados das Máquinas Geradoras

	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>	<b>G4</b>
<b><math>x'_d</math> (pu)</b>	0,033	0,033	0,033	0,033
<b><math>x_q</math> (pu)</b>	0,19	0,19	0,19	0,19
<b><math>x_d</math> (pu)</b>	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>H (s)</b>	54	54	63	63
<b>D (pu)</b>	0,1	0,1	0,1	0,1
<b><math>T'_{do}</math> (s)</b>	8	8	8	8

Tabela A.II.2 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão

Variável	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>	<b>G4</b>
<b>Kr (pu)</b>	200	200	200	200
<b>Tr (pu)</b>	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabela A.II.3 – Dados das Linhas de Transmissão

<b>Barra Inicial</b>	<b>Barra Final</b>	<b>R (pu)</b>	<b>X (pu)</b>	<b>B (pu)</b>
1	5	0,001	0,012	-
2	6	0,001	0,012	-
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	-
3	9	0,001	0,012	-
9	8	0,002	0,02	0,03
9	8	0,002	0,02	0,03

Tabela A.II.4 – Dados das Linhas de Transmissão (continuação)

Barra Inicial	Barra Final	R (pu)	X (pu)	B (pu)
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

Tabela A.II.5 – Dados das Barras - Caso Base

Barra	V (pu)	Ang. (graus)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVar)	P <sub>L</sub> (MW)	Q <sub>L</sub> (MVar)
1	1,0	8,683	700,00	195,97	-	-
2	1,0	-2,088	700,00	505,25	-	-
3	1,0	-11,92	700,00	601,55	-	-
4	1,0	0	743,69	236,08	-	-
5	0,973	3,846	-	-	-	-
6	0,936	-6,928	-	-	-	-
7	0,886	-16,16	-	-	1159	212
8	0,865	-26,57	-	-	1575	288
9	0,924	-16,76	-	-	-	-
10	0,968	-5,149	-	-	-	-

## **Anexo. Artigos Publicados**

MENEZES, Maxwell Marques de; ARAUJO, Percival Bueno de. **Ajuste de Parâmetros de Controladores POD Através de RNAs em Dispositivos TCSC e SSSC**. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA CBA 2010, 2010, Bonito-MS. Anais do XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA CBA 2010, paper n. 65845\_1, p. 2008-2015, (Cd-rom).

MENEZES, Maxwell Martins de; ARAUJO, Percival Bueno de. **Comparação de Desempenho entre o TCSC e SSSC com Controladores Suplementares**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE 2010, Belém do Pará-PA. Anais SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE 2010, paper n. sbse2010-0055, p. 01-06.

MENEZES, Maxwell Martins de; ARAUJO, Percival Bueno de. **Ajuste de Parâmetros de Controladores Suplementares para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em SEP Utilizando Redes Neurais Artificiais**. In: VI CONGRESSO DA ACADEMIA TRINACIONAL DE CIENCIAS – C3N, 2009, Foz do Iguaçu-PR. Anais do VI CONGRESSO DA ACADEMIA TRINACIONAL DE CIENCIAS – C3N 2009, paper n. 60749\_1, p. 01-09, (Cd-rom). ISSN: 1982-2758.