# ATUAÇÃO DO SSSC NO CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA E ACRESCENTANDO AMORTECIMENTO AS OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS

CARLOS E. PUPIN\*, PERCIVAL B. DE ARAUJO<sup>†</sup>, ELENILSON V. FORTES<sup>‡</sup>, EDNEI L. MIOTTO<sup>‡</sup>, LUIS F. B. MARTINS<sup>‡</sup>

\*Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Comunitária da Região de Chapecó Av. Senador Attílio Fontana, 591-E, CEP 89809-000, Chapecó, SC, Brasil

<sup>†</sup>Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Ilha Solteira Av. Prof. José Carlos Rossi, 1370, CEP 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

> <sup>‡</sup> Instituto Federal de Goiás, Câmpus de Jataí R. Maria Vieira Cunha, 775, CEP 75804-714, Jataí, GO, Brasil

\*\* Departamento de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Toledo R. Cristo Rei, 19, CEP 85902-490 Toledo, PR, Brasil

> <sup>\*</sup>Instituto Federal do Paraná, Câmpus de Jacarezinho Av. Doutor Tito s/n, CEP 86400-000, Jacarezinho, PR, Brasil

### E-mails: carlos.pupin@unochapeco.edu.br, percival@dee.feis.unesp.br, elenilson.fortes@ifg.edu.br, edneimiotto@utfpr.edu.br, luis.martins@ifpr.edu.br

**Abstract**— This work intends to present, from simulations, the influence of the Static Synchronous Series Compensator (SSSC) on the stability to small perturbations when acting in the power flow control in a test power system. In the modeling of SSSC are considered its non idealities, including its internal dynamics in the control of power flow, which is solved by the method of Newton, from the insertion of its expressions in the Jacobian matrix. Supplementary controllers are applied to add damping to the electromechanical oscillations, adjusted by the residual technique, which will facilitate evaluating how the control of the power flow exerted by the SSSC will influence the damping of the electromechanical oscillations.

Keywords-FACTS, SSSC, POD, Power Flow, Small-signal Stability, Residue Method.

**Resumo**— Este trabalho têm o propósito de apresentar a partir de simulações, a influência do *Static Synchronous Serie Compensator* (SSSC) na estabilidade a pequenas perturbações quando atuando no controle do fluxo de potência em um sistema de potência teste. Na modelagem do SSSC são consideradas suas não idealidades, inclusive sua dinâmica interna no controle do fluxo de potência, que é resolvido pelo método de Newton, a partir da inserção de suas expressões na matriz Jacobiana. Controladores suplementares são aplicados para acrescentar amortecimento as oscilações eletromecânicas, ajustados pela técnica de resíduos, que facilitará avaliar como o controle do fluxo de potência exercido pelo SSSC influenciará no amortecimento das oscilações eletromecânicas.

Palavras-chave— FACTS, SSSC, POD, Fluxo de Potência, Estabilidade a Pequenos Sinais, Técnica dos Resíduos.

# 1 Introdução

As oscilações eletromecânicas de baixa frequência surgem na ocorrência de manobras e pequenas faltas em sistemas elétricos de potência (SEP), acelerando e desacelerando o rotor da máquina geradora em relação ao campo girante (deMello & Concordia, 1969; Kundur, 1994).

Essas oscilações devem ser eliminadas, para não comprometer a estabilidade dinâmica do SEP. Dos controladores capazes de amortecer as oscilações eletromecânicas, pode-se aplicar os estabilizadores de sistemas de potência (ESP) que inserem sinais suplementares de amortecimento no enrolamento de campo dos geradores síncronos, e os FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), que são instalados no sistema de transmissão e que são capazes de minimizar a propagação das oscilações pelas interligações do SEP (Song & Johns, 1999; Hingorani & Gyugyi, 1999).

Os FACTS, em especifico, são capazes de controlar o fluxo de potência do SEP (Hingorani & Gyugyi, 1999; Zhang, 2003). Conforme o tipo e intensidade do controle exercido, modifica as características transitórias do SEP, assunto abordado neste artigo.

Considerando a não idealidade dos FACTS, a inserção destes dispositivos no sistema de transmissão pode comprometer a estabilidade a pequenos sinais, e quanto maiores os esforços dos FACTS para controlarem o fluxo de potência, mais a característica transitória do SEP é afetada.

Para agregar amortecimento as oscilações eletromecânicas são aplicados controladores de avanço e atraso de fase conhecidos como POD (*Power Oscillation Damping*), que durante a ocorrência de transitórios, regulam o sinal de saída dos FACTS atenuando essas oscilações quando corretamente ajustados, melhorando a estabilidade do SEP (Kundur, 1994; Larsen & Swann, 1981).

Das diferentes técnicas de ajuste do controlador POD, neste trabalho são aplicados os resíduos da função de transferência do SEP (Yang et al., 1998; Pagola et al., 1989).

O método dos resíduos consiste em uma técnica de controle clássico, que a partir da função de transferência que representa todo o sistema de potência, determina os ajustes dos controladores suficiente para deslocar os autovalores dos modos oscilatórios para um ponto especificado. O módulo do resíduo também auxilia na determinação de um bom local de instalação dos FACTS, facilitando a atuação dos controladores em amortecer as oscilações eletromecânicas de baixa frequência do SEP (Yang et al., 1998; Pagola et al., 1989).

Para atingir a modelagem e análise da estabilidade, inicialmente se soluciona o fluxo de potência pelo método de Newton (Monticelli, 1983), com a atuação dos dispositivos FACTS do tipo SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*), controlando uma variável do SEP que pode ser o fluxo de potência ativa ou reativa (Song & Johns, 1999; Hingorani & Gyugyi, 1999).

Com os resultados do fluxo de potência se constrói o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) (Deckmann & Costa, 1994), para a análise transitória do SEP. Adaptado ao MSP, é incluído o controlador POD ao SSSC, ajustado a partir da técnica dos resíduos.

Diferentes localidades do SSSC e tipos de controle do fluxo são avaliados, para destacar como a estabilidade do SEP é afetada devido ao tipo e intensidade de controle do fluxo de potência exercido pelo SSSC. Este é o grande mérito do trabalho, que avaliará como o controle do fluxo de potência pelo SSSC afetará as oscilações eletromecânicas, e a capacidade do FACTS em amortecer essas oscilações.

### 2 Modelagem do SSSC

O SSSC é um dispositivo FACTS de segunda geração, que opera a partir da conversão CC para CA pelo *Voltage Source Converter* (VSC), inserindo tensão ajustada em magnitude e fase, em sincronismo com a corrente da rede (Hingorani & Gyugyi, 1999; Mathur &Varma, 2002; Song & Johns, 1999).



Figura 1. Diagrama unifilar representativo do SSSC.

Neste trabalho o SSSC é modelado como uma fonte de tensão ideal em série com uma impedância representativa das perdas internas do dispositivo e do transformador de acoplamento ( $z_{SSSC}$ ), instalado em série com a linha de transmissão (Zhang, 2003). Na Figura 1, o diagrama unifilar representativo do SSSC instalado na linha de transmissão entre as barras k e m, em modelo  $\pi$  (pi), com  $b_{km}^{sh}$  considerado no equacionamento.

A partir da expressão da corrente na linha com o SSSC ( $\tilde{I}_{km}$ ), obtém-se o fluxo de potência ativa e reativa (1).

$$\tilde{S}_{km} = P_{km} + jQ_{km} = \tilde{V}_k \left[ y_T \left( \tilde{V}_k + \tilde{V}_{SC} - \tilde{V}_m \right) + jb_{km}^{sh} \tilde{V}_k \right]$$

$$P_{km} = P_{km_0} + P_{km_{SC}} = g_T V_k^2 - g_T V_k V_m cos \theta_{km}$$

$$-b_T V_k V_m sen \theta_{km} + g_T V_k V_{SC} cos \theta_{k\beta} + b_T V_k V_{SC} sen \theta_{k\beta}$$

$$Q_{km} = Q_{km_0} + Q_{km_{SC}} = -(b_T + b_{km}^{sh}) V_k^2 - g_T V_k V_m sen \theta_{km}$$

$$+ b_T V_k V_m cos \theta_{km} + g_T V_k V_{SC} sen \theta_{k\beta} - b_T V_k V_{SC} cos \theta_{k\beta}$$

$$(1)$$

Onde  $\tilde{V}_k$  é o fasor tensão da barra k,  $y_T = g_T + jb_T$  é a admitância total da linha k-m, e  $\tilde{V}_{SC}$  é o fasor tensão injetado pelo SSSC. Considerando que o SSSC não injeta potência ativa em regime permanente ao SEP, deste conceito resulta a expressão de  $PE_{SC}$  (*Power Exchange*), como em (2).

$$PE_{SC} = Real \left[ \vec{V}_{SC} \cdot \vec{I}_{km}^* \right] = 0$$

$$PE_{SC} = g_T V_{SC} \left( V_{SC} + V_k \cos\theta_{k\beta} - V_m \cos\theta_{m\beta} \right)$$

$$-b_T V_{SC} \left( V_k \sin\theta_{k\beta} - V_m \sin\theta_{m\beta} \right) - b_{km}^{sh} V_k V_{SC} \sin\theta_{k\beta}$$
(2)

No Apêndice, estão as expressões resultantes das linearizações de (1) e (2), para a correta inserção do efeito do SSSC na matriz Jacobiana do fluxo de potência (Zhang, 2003; Radman & Raje, 2007).

O SSSC pode controlar o fluxo de potência ativa ou reativa na linha de transmissão que se encontra instalado. Considerando um controlador Proporcional Integral (PI) atuando na malha de controle do SSSC, conforme o diagrama de blocos da Figura 2, para o controle de fluxo de potência ativo (Zhang, 2008).



Figura 2. Dinâmica do SSSC e controlador PI.

A modelagem da malha de controle de tensão do SSSC é dada em (3) e (4), que são linearizadas, com os resultados no Apêndice.

$$\dot{W}_{P} = \frac{P_{km}^{Esp} - P_{km}^{Calc}}{T_{PI_{sc}}}$$
(3)

$$\dot{V}_{SC} = \frac{K_{PI_{SC}} \left( P_{km}^{Esp} - P_{km}^{Calc} \right)}{T_{SSSC}} + \frac{W_{P}}{T_{SSSC}} - \frac{V_{SC}}{T_{SSSC}}$$
(4)

O mesmo diagrama de blocos da Figura 2 é utilizado para apresentar as expressões de controle de potência reativa (5 e 6). Para tanto basta alterar o sinal de entrada, e redefinir a grandeza W.

$$\dot{W}_{\varrho} = \frac{Q_{km}^{Esp} - Q_{km}^{Calc}}{T_{PI_{sc}}}$$
(5)

$$\dot{V}_{SC} = \frac{K_{PI_{SC}} \left( Q_{km}^{Esp} - Q_{km}^{Calc} \right)}{T_{SSSC}} + \frac{W_Q}{T_{SSSC}} - \frac{V_{SC}}{T_{SSSC}}$$
(6)

Com a definição da intensidade e do tipo de controle no fluxo de potência, pode-se obter qual o módulo e ângulo da tensão  $\tilde{V}_{SC}$  inserida pelo SSSC para atingir o valor especificado ( $P_{km}^{Esp}$  ou  $Q_{km}^{Esp}$ ).

A simbologia representa a derivada primeira do valor absoluto da grandeza, enquanto que o fasor analógico. No Apêndice todas as derivadas das expressões necessárias para montar a matriz Jacobiana.

# 3 Fluxo de Potência com os FACTS

Por considerar a atuação do SSSC no fluxo de potência, acrescenta-se na Jacobiana (8) as expressões do obtidas do modelo do SSSC, permitindo determinar os fasores tensão das barras e dos dispositivos (10). Considerando o SSSC entre as barras k e mcontrolando o fluxo ativo.

$$\underline{x} = \left[\Delta\underline{\theta}, \Delta\underline{V}, \Delta\beta, \Delta V_{sc}, \Delta W\right]^{t}$$
(10)

A rotina para solução do fluxo de potência pelo método de Newton não sofre alterações.

#### 4 Controlador POD

O controlador POD é capaz de ajustar ganho e fase de um sinal de entrada e assim, gerando um sinal de saída aplicado na malha de controle do FACTS,

capaz de inserir amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência. A estrutura utilizada para este controlador é apresentada na Figura 3 (Kundur, 1994; deMello & Concordia, 1969).



Figura 3. Malha de controle do ESP e POD.

O POD insere sinal suplementar de amortecimento na malha de controle dos FACTS ( $\Delta V_{POD}$  – Figura 2), a partir das variações da potência ativa. Para o SSSC  $\Delta in_{POD} = \Delta P_{km}$ .

O conjunto SSSC/POD é capaz de inserir amortecimento, mas deve ser ajustado para atuarem diretamente no modo oscilatório de interesse. Mesmo assim este dispositivo influenciam os demais modos oscilatórios, podendo melhorar ou prejudicar o desempenho do SEP (Larsen & Swann, 1981; Yang et al, 1998). Dentre as diversas técnicas de ajuste dos controladores, neste trabalho se utiliza o método dos resíduos.

### 5 Modelagem para Estudos de Estabilidade

O Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), é utilizado para avaliar os transitórios do SEP. Baseado no balanço de potências ativa e reativa em todas as barras que o constituem (Deckmann & Costa, 1994). No diagrama unifilar da Figura 4, a potência ativa injetada  $P_{Gk}$  na barra k deve ser igual a absorvida pelas barras m e l ( $P_{km} + P_{kl}$ ), pela carga  $P_{Lk}$ , com o SSSC instalado na linha k-m, trocando a potência  $S_{SSSC}$ . O mesmo conceito é aplicado aos reativos.



Figura 4. Balanço e fluxos de potência nas linhas.

Em qualquer situação operacional o balanço de potência deve ser válido. O MSP preserva todo o sistema de potência, facilitando a expansão para sistemas multimáquinas e a inclusão de novos dispositivos. Em (11) o modelo resultante.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix}$$
(11)

Em (11) o vetor  $\Delta x = [\Delta \omega \Delta \delta \Delta E'_q \Delta E_{fd} \Delta POD]^t$  é composto por variáveis de estado  $\Delta \omega$  (variação da velocidade angular do gerador),  $\Delta \delta$  (variação do ân-

gulo interno do gerador),  $\Delta E'_q$  (variação da tensão interna do gerador),  $\Delta E_{fd}$  (variação da tensão de campo do gerador) e  $\Delta POD$ . O vetor  $\Delta z$  é composto pelas variáveis algébricas  $\Delta \theta$  (ângulo da tensão de cada barra) e  $\Delta V$  (variação do valor absoluto da tensão de cada barra), inclusive do SSSC. O vetor de entradas é  $\Delta u = [\Delta P_{mec} \ \Delta V_{ref} \ \Delta P_{load} \ \Delta Q_{load}]^t$ , composto por  $\Delta P_{mec}$  (variação no torque mecânico do gerador),  $\Delta V_{ref}$  (variação da tensão de referência do regulador de tensão), e de  $\Delta P_{load} \ \Delta Q_{load}$  que representam as variações de potência ativa e reativa das cargas.

A representação no espaço de estados (12) é obtida pela eliminação das variáveis algébricas.

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$
(12)

### 6 Método dos Resíduos

Conforme (Pagola et al., 1989) e (Yang et al., 1998), os resíduos obtidos da função de transferência de malha aberta entre o sinal de entrada e de saída do controlador, fornecem informações da sua controlabilidade de especifico modo oscilatório. Essas informações são uteis para ajustar os parâmetros do controlador e identificar uma boa localização para instalação dos FACTS com seu controlador POD.

A função de transferência de malha fechada G(s) (13), representa a dinâmica de todo o SEP, obtida da representação de espaço de estados em (12) (Yang et al., 1998).

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = C \frac{adj(sI - A)}{det(sI - A)}B + D$$
(13)

Em específico, determina-se o resíduo ( $R_{ijp}$ ) associado ao *i*th modo oscilante (autovalor  $\lambda_i$ ), obtido considerando o *j*th sinal de entrada do controlador, fornecendo a *p*th sinal de saída.

$$R_{ijp} = C_j t_i v_i B_p \tag{14}$$

O módulo do resíduo também pode ser obtido a partir da controlabilidade e observabilidade do controlador para determinados sinais de entrada e saída. Para o POD o sinal de entrada é  $\Delta P_{km}$ , e  $\Delta V_{POD}$  o sinal de saída. Em (15)  $t_i$  e  $v_i$  representam os autovetores direito e esquerdo associados ao autovalor *i*th,  $C_p$  é a *p*th linha da matriz C, e  $B_j$  a *j*th coluna de B. A regra de formação de  $B \in C$  são descritas detalhadamente em (Yang et al., 1998).

$$\left|R_{ijp}\right| = obsv_{ip}. contr_{ij} = \left|C_{p}t_{i}\right| \cdot \left|v_{i}B_{j}\right|$$
(15)

Quanto maior o módulo do resíduo (15), melhor é a localização para instalação do controlador. Enquanto que, com o resíduo (14), pode-se determinar os parâmetros do controlador (K,  $T_1$  e  $T_2$ ) suficientes para deslocar um autovalor para a esquerda, em um plano complexo, garantindo maior amortecimento ao correspondente modo oscilatório. Em (16) como o controlador desloca o autovalor com uso dos resíduos.

$$\Delta \lambda_i = R_{iip}.CONTROL(\lambda_i) \tag{16}$$

Onde *CONTROL* é a função de transferência do controlador POD que atua no autovalor  $\lambda_i$ .

Os parâmetros do controlador são obtidos a partir da especificação do amortecimento desejado ( $\xi_{des}$ ), e consequente posição do autovalor ( $\lambda_{ides}$ ) correspondente ao modo oscilatório que se deseja amortecer.

O controlador atrasa ou adianta a fase do sinal de saída conforme o correspondente sinal de entrada, deslocando o autovalor no plano complexo. Com o sinal de entrada do POD, definidos como anteriormente, as expressões que permitem a determinação dos parâmetros do controlador conforme (17).

$$F = 180 - arg(R_{ijp})$$

$$K = \left| \frac{\lambda_{ides} - \lambda_r}{R_{ijp} \cdot H(\lambda_i)} \right|$$

$$\alpha = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1 \cdot sen(\frac{\beta_2}{2})}{1 + sen(\frac{\beta_2}{2})}$$

$$T_2 = \frac{1}{\alpha \sqrt{\alpha}}$$
(17)

Dentre as diferentes técnicas de ajustes de controladores, inclusive metaheuristicas, técnicas coordenadas e de visão global do SEP, opta-se pelo método dos resíduos, por permitir avaliar como o tipo de controle de fluxo de potência exercido pelo SSSC influenciará no amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

#### 7 Resultados e Discussão

Com o intuito de apresentar os resultados da modelagem e técnicas propostas, são realizadas simulações em ambiente Matlab em um sistema multimáquinas simétrico (Sauer & Pai, 1998; Kundur, 1994), composto por 4 geradores, 10 barras e 2 cargas distribuídos em duas áreas, conforme Figura 5.



Figura 5. Diagrama unifilar: SEP simétrico.

Definindo inicialmente como Caso Base, conforme dados de (Sauer & Pai, 1998), sem nenhum dispositivo atuando no controle do SEP, são apresentados os resultados do fluxo de potência e os autovalores da matriz de estados *A*, para o estudo da estabilidade.

Na Tabela 1 as tensões, os fluxos de potência na Tabela 2. Os modos oscilatórios de baixa frequência (autovalores dominantes), as frequências de oscilação ( $\omega_n$ ) e seus amortecimento ( $\xi$ ) na Tabela 3.

Analisando os valores da Tabela 3 conclui-se que este SEP apresenta no ponto de operação original três modos oscilatórios. Dois deles são classificados como modos locais e possuem parte real negativa. O modo interárea possui parte real positiva e é o responsável pela instabilidade do SEP (primeiro método de *Lyapunov*).

Tabela 1. Tensões e injeções de potência para solução do fluxo de potência no caso base.

# Barra	Tensões (pu)	Potência Injetada (pu)
01	1,0000 ≰ +8,6831°	7,0000 + j1,9597
02	1,0000 ≰ −2,0881°	7,0000 + j5,0525
03	1,0000 ≰ −11,9243°	7,0000 + j6,0155
04	1,0000 ≰ −0,0000°	7,4369 + j2,3608
05	0,9729 <b>≰</b> +3,8461°	-
06	0,9357 ≰ –6,9280°	-
07	0,8863 ∡ -16,1618°	-11,59 - j2,1200
08	0,8646 ∡ −26,5749°	-15,75 – j2,8800
09	0,9241 ≰ −16,7652°	-
10	0,9681 <b>4</b> -5,1487°	-

Tabela 2. Informações do SEP e resultado do fluxo de potência.

#Da	#Para	Caso Base (pu)							
Barra	Barra	$R_{km}$	$X_{km}$	$B_{km}^{sh}$ $P_{km}$		$P_{mk}$	$Q_{km}$	$Q_{mk}$	
01	05	0,001	0,012	-	7,000	-6,947	1,960	-1,326	
02	06	0,001	0,012	-	7,000	-6,925	5,053	-4,158	
07	08	0,022	0,22	0,33	0,638	-0,626	-0,308	-0,335	
07	08	0,022	0,22	0,33	0,638 -0,626 -0,		-0,308	-0,335	
07	08	0,022	0,22	0,33	0,638	-0,626	-0,308	-0,335	
06	07	0,002	0,02	0,03	6,870	-6,752	2,134	-0,999	
06	07	0,002	0,02	0,03	6,870	-6,752	2,134	-0,999	
04	10	0,001	0,012	-	7,437	-7,376	2,361	-1,630	
03	- 09	0,001	0,012	-	7,000	7,000 -6,915 6		-4,993	
09	08	0,002	0,02	0,03	7,069	69 -6,936 2,602		-1,318	
09	08	0,002	0,02	0,03	7,069	-6,936	2,602	-1,318	
05	06	0,005	0,05	0,075	3,474	-3,407	0,627	-0,101	
05	06	0,005	0,05	0,075	3,474	-3,407	0,627	-0,101	
10	09	0,005	0,05	0,075	3,688	-3,612	0,780	-0,150	
10	09	0,005	0,05	0,075	3,688	-3,612	0,780	-0,150	

Tabela 3. Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento no caso base.

Caso	Modo	Autovalor	$\omega_{n}\left(Hz\right)$	<b>ξ</b> (pu)	
Caso Base	Local 1	$-0,2351 \pm j6,2944$	1,0025	0,0373	
	Local 2	$\textbf{-0,}1576 \pm \textbf{j5,}8769$	0,9357	0,0268	
	Interárea	0,0468 ± j4,1404	0,6590	-0,0113	

Para tornar o SEP estável é proposta a inclusão do conjunto SSSC/POD em uma das linhas de transmissão com os maiores módulos de resíduos.

Como o SSSC pode controlar de diferentes formas o fluxo de potência do SEP, são apresentados na Tabela 4 os resultados do conjunto SSSC/POD instalado em diferentes linhas de transmissão, controlando a potência ativa ou reativa em cinco diferentes intensidades de controle (0%,  $\pm 1\%$  ou  $\pm 2\%$  do caso base). Devido à grande quantidade de valores, somente são apresentados na tabela os resultados para as linhas de transmissão que apresentam os maiores resíduos.

Descrevendo a Tabela 4, na coluna de  $\tilde{V}_{SC}$  o fasor tensão que deve ser aplicado pelo SSSC para que seja atingido o controle de fluxo conforme especificado. Na coluna  $\tilde{S}_{SSSC}$  a potência complexa trocada entre o FACTS e a linha, e a direita a corrente na linha de instalação ( $\tilde{I}_{km}$ ). Nas colunas seguintes, os resíduos para a referida forma de atuação do SSSC, e os parâmetros de ajuste do controlador POD (K,  $T_1$ , e  $T_2$ ). Finalizando, o autovalor e o amortecimento que corresponde ao modo oscilatório interárea, com a atuação do SSSC e POD ajustados conforme valores apresentados na correspondente linha.

Pode-se tecer algumas discussões dos resultados da Tabela 4, iniciando pela dificuldade em convergência do método de Newton para solução do fluxo de potência neste SEP teste. Devido a distribuição simétrica dos elementos em duas áreas, pode-se afirmar que os geradores 1 e 2 alimentam a carga da barra 7, enquanto que os geradores 3 e 4 a carga 8. A distribuição dos fluxos é similar a dois sistemas de características radial, sem rotas alternativas para redistribuição do fluxo de potência. Impedindo o fluxo de potência ativa convergir quando se desejava aumentar (+1% e +2%) o fluxo da barra 6 para a barra 7. Fato este esperado, pois o SSSC não deve inserir ativos  $(PE_{SC}=0)$ , e o fornecimento de ativos dos geradores 1 e 2 são fixados na definição do SEP (barra de geração), não existindo outra fonte de fluxo ativo. Analise análoga se faz ao controle de ativos da barra 9 para a barra 8. Estes resultados garantem a correta modelagem desenvolvida do fluxo de potência, por não resultar em condições operacionais impossíveis.

O elevado fluxo de potência e corrente que flui nas linhas de transmissão 6-7 e 9-8 dificultam a consideração das não idealidades do SSSC, que é uma impedância inserida em série a da linha de transmissão, por menor que seja  $z_{SSSC}$  (0,0001+j0,01 pu), há grande influência na capacidade de troca de potência entre as barras, exigindo valores impraticáveis de  $\tilde{V}_k$ ,  $\tilde{V}_m$ e  $\tilde{V}_{SC}$ , o que instabilizou de forma aperiódica o SEP.

O FACTS SSSC apresenta maiores esforços em controlar o fluxo de potência ativo em relação ao reativo, isso pode ser verificado analisando  $\tilde{V}_{SC}$  e a troca de reativos ( $\tilde{S}_{SSSC}$ ) do FACTS com a linha de instalação. Controlando reativos, o aumento da intensidade de controle em pouco altera a magnitude de  $\tilde{V}_{SC}$ .

A intensidade de controle definida para o fluxo de potência resultou em sutis diferenças no resultado dos resíduos e consequentemente nos parâmetros de ajuste do controlador POD ao controlar o fluxo reativo, no controle de ativos são maiores as diferenças.

Da análise da estabilidade, após a substituição dos parâmetros do POD, nota-se que em quase todas as condições avaliadas, o amortecimento obtido para o modo oscilatório interárea é muito próximo ao desejado, principalmente quando o SSSC controla o fluxo reativo. Já o fluxo ativo só apresentou bons resultados para a linha 7-8, nas cinco diferentes intensidades de controle, sendo que para as linhas 6-7 e 9-8, somente houve estabilidade do SEP para as condições do caso base, atingindo o amortecimento desejado de 0,1 pu. Nas demais intensidades, o amortecimento desejado é atingido, mas surge um autovalor real

×10<sup>-3</sup> Ângulo 15 ο (rad) in the second 0 0 1 2 3 4 10 tempo (s) 6 ×10<sup>-3</sup> Tensão Interna 1  $E_{k}^{E'}(\mathrm{pu})$ -2 0 2 4 tempo (s) 9 10 1 3 6 7 8

Figura 6. Variações do ângulo e tensão interna do gerador 1 e 3, com SSSC controlando fluxo de potência ativo.

Nas Figuras 6 e 7 as variações do ângulo interno e da tensão interna dos geradores 1 (linha contínua) e 3

(linha pontilhada), para o SSSC controlando o fluxo ativo sem alterações do caso base (0%) na Figura 6, e na Figura 7 controlando o fluxo reativo. As curvas em azul correspondem ao SSSC instalado na L.T 6-7, em vermelho na L.T. 7-8 e em preto na L.T. 9-8.



Figura 7. Variações do ângulo e tensão interna do gerador 1 e 3, com SSSC controlando fluxo de potência reativo.

ιт	Tipo de	Intensidade de	$ ilde{V}_{SC}\left(\mathbf{pu} ight)$	$ ilde{S}_{SSSC}\left(\mathbf{pu} ight)$	$\tilde{I}_{c}$ (nu)	Resíduos	Parâmetros POD			Autovalor do	Amort <u>e</u>
L. I.	controle	controle (pu)					K	$T_1$	$T_2$	interárea	cimento
06-07		-2% = 13,465	0,2784∡–108,6594°	0 + j0,0893	22,5310 - j7,6521	30,230	474,194	0,002	18,019	_ <sup>a</sup>	_ <sup>a</sup>
		-1% = 13,603	0,2496 <b>4</b> –108,4463°	0 + j0,0676	18,9655 - j6,3749	18,382	0,188	0,128	0,745	_a	_ <sup>a</sup>
	P. Ativa $P_{06,07} = 13,740$	0% = 13,740	0,0381 <b>4</b> +65,6747°	0-j0,0080	14,0195 - j6,3932	11,056	0,230	0,104	0,573	-0,407±j4,054	0,1000
	1 06-07 - 13,740	+1% = 13,877	_b	_b	_b	_ <sup>b</sup>	_b	_b	_b	_b	_ <sup>b</sup>
		+2% = 14,015	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b
		-2% = 4,183	0,04614+65,5375	0-j0,0097	13,9556 - j6,4046	10,954	0,232	0,103	0,571	-0,408±j4,062	0,1000
		-1% = 4,225	0,04314+65,5892	0-j0,0090	13,9795 - j6,4003	10,993	0,231	0,104	0,572	-0,408±j4,059	0,1000
	P. Reativa	0% = 4,268	0,04014+65,6410	0-j0,0084	14,0037 - j6,3960	11,031	0,231	0,104	0,572	-0,408±j4,056	0,1000
	200-07 - 4,200	+1% = 4,311	0,03714+65,6927	0-j0,0078	14,0279 - j6,3917	11,070	0,230	0,104	0,573	-0,407±j4,053	0,1000
		+2% = 4,353	0,03414+65,7445	0-j0,0072	14,0523 - j6,3875	11,108	0,229	0,104	0,573	-0,407±j4,050	0,1000
		-2% = 1,875	0,60604–85,9440°	0 + j0,0759	2,4068 - j0,5710	9,247	0,253	0,123	0,638	-0,357±j3,509	0,1013
		-1% = 1,894	0,31424–95,8368°	0 + j0,0399	2,2089 - j1,0842	10,592	0,238	0,108	0,587	-0,400±j3,938	0,1011
	P. Ativa $P_{1} = 1.013$	0% = 1,913	0,0012 <b>4</b> +78,2827°	0-j0,0001	2,1196 - j1,2828	10,844	0,257	0,098	0,596	-0,416±j4,128	0,1002
	<i>F</i> <sub>07-08</sub> – 1,915	+1% = 1,932	0,1659 <b>4</b> +85,9335°	0-j0,0203	2,3086 - j0,9645	10,037	0,355	0,094	0,561	-0,437±j4,337	0,1002
07		+2% = 1,951	0,2575 <b>4</b> +99,3116°	0-j0,0299	2,6923 - j0,3502	9,507	0,485	0,092	0,403	-0,248±j4,642	0,0533
-08	P. Reativa Q <sub>07-08</sub> = - 0,923	-2% = -0,905	0,1816 <b>4</b> +87,9327°	0-j0,0220	2,3590 - j0,8826	9,859	0,393	0,092	0,545	-0,444±j4,412	0,1000
		-1% = -0,914	0,1829 <b>4</b> +88,0977°	0-j0,0221	2,3632 - j0,8757	9,844	0,396	0,092	0,544	-0,444±j4,412	0,1000
		0% = -0,923	0,1841 <b>4</b> +88,2626°	0-j0,0223	2,3674 - j0,8688	9,829	0,399	0,092	0,542	-0,445±j4,425	0,0999
		+1% = -0,932	0,1853 <b>4</b> +88,4277°	0-j0,0224	2,3717 - j0,8619	9,815	0,402	0,092	0,541	-0,445±j4,431	0,0999
		+2% = -0,941	0,1865 <b>4</b> +88,5927°	0-j0,0225	2,3760 - j0,8550	9,800	0,405	0,092	0,539	-0,446±j4,437	0,0999
80-60	P. Ativa P <sub>09-08</sub> = 14,138	-2% = 13,855	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b
		-1% = 13,997	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b	_b
		0% = 14,138	0,0589 <b>4</b> +53,9874°	0-j0,0130	13,0693 - j9,5530	8,389	0,325	0,099	0,590	-0,414±j4,137	0,0996
		+1% = 14,279	0,11854–138,1965°	0 + j0,0300	12,4323 - j13,9538	10,339	0,259	0,105	0,619	_a	_a
		+2% = 14,421	0,17954–145,1238°	0 + j0,0506	11,9131 – j17,1410	11,745	0,258	0,104	0,687	_a	_a
	P. Reativa <i>Q</i> <sub>09-08</sub> = 5,204	-2% = 5,100	0,0491 <b>4</b> +53,4165°	0-j0,0109	13,0439 - j9,7346	8,484	0,321	0,100	0,591	-0,414±j4,128	0,0997
		-1% = 5,152	0,0457 <b>4</b> +53,2193°	0 – j0,0101	13,0351 - j9,7978	8,517	0,320	0,100	0,591	-0,413±j4,125	0,0997
		0% = 5,204	0,0424 <b>4</b> +53,0224°	0-j0,0094	13,0262 - j9,8611	8,550	0,318	0,100	0,591	-0,413±j4,122	0,0998
		+1% = 5,256	0,0391 <b>4</b> +52,8260°	0-j0,0087	13,0174 - j9,9245	8,583	0,317	0,100	0,592	-0,413±j4,119	0,0998
		+2% = 5,308	0,0358 <b>4</b> +52,6300°	0-j0,0080	13,0085 - j9,9880	8,615	0,316	0,100	0,592	-0,413±j4,116	0,0999
	I		a O SEP apresentou insta	bilidade aperiódi	ca devido surgimento de :	autovalor real	positivo b	Não ho	uve conv	ergência do fluxo d	e potência

Tabela 4. Resultados do fluxo de potência e estabilidade com SSSC instalado em diferentes linhas, para diferentes controles.

positivo, representativo de uma exponencial crescente, e consequente instabilidade aperiódica no SEP. Os parâmetros utilizados para o SSSC/POD e demais elementos para simulação e obtenção dos resultados são:  $z_{sssc} = 0,0001+j0,01$  pu,  $T_{sssc} = 0,001$  s,  $K_{PI} = 1,0, T_{PI} = 0,01$  s,  $\xi_{des} = 0,10$  pu,  $T_w = 10$  s.

#### 8 Conclusão

No modelo proposto é possível simular a instalação do SSSC em uma linha de transmissão e definir o tipo de controle aplicado, obtendo como resultado o fasor tensão  $\tilde{V}_{SC}$  do dispositivo suficiente para obter o controle conforme intensidade definida.

Conforme o tipo de controle e intensidade nota-se a partir dos resíduos da função de transferência como é a influência do SSSC na estabilidade do SEP. Quando controlando o fluxo reativo, o valor de amortecimento atingido foi o desejado, já no controle de fluxo ativo, é atingido o amortecimento desejado nos casos base, com pequenas variações de maior amortecimento para a linha 7-8, já para as demais linhas (6-7 e 9-8), nota-se a pequena flexibilidade operativa deste SEP, com dificuldades de convergência do fluxo de potência, e na ocorrência desta, os resultados atingidos para os fasores tensão, acarretam instabilidade dinâmica.

Dos resultados dos resíduos e amortecimentos obtidos, conclui-se que neste SEP, a instalação do SSSC nas linhas 6-7, 7-8 ou 9-8 são suficientes para amortecer o modo interárea e estabilizar o SEP, mas a linha 7-8 é a que garante maior flexibilidade no controle do fluxo de potência.

Como conclusão final deste trabalho, deve-se atentar como os FACTS são aplicados aos sistemas de potência, pois sua influência pode instabilizar o SEP, mas quando aplicados corretamente propiciam o controle do fluxo e melhoram a estabilidade com uso dos controladores POD.

### Apêndice

Para a solução do fluxo de potência, deve-se montar a matriz Jacobiana com a inclusão das derivadas parciais descritas neste Apêndice, iniciando pela linearização de  $P_{km}$ .

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta \theta_m$$

$$+ A4_{km} \Delta V_m + A5_{km} \Delta \beta + A6_{km} \Delta V_{SC}$$
(18)

$$A1_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = g_T V_k \left( V_m sen \theta_{km} - V_{SC} sen \theta_{k\beta} \right) - b_T V_k \left( V_m cos \theta_{km} + V_{SC} cos \theta_{k\beta} \right)$$
(19)

$$A2_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2g_T V_k - g_T V_m cos\theta_{km} + g_T V_{SC} cos\theta_{k\beta} -b_T V_m sen\theta_{km} + b_T V_{SC} sen\theta_{k\beta}$$
(20)

$$A3_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = -g_T V_k V_m sen\theta_{km} + b_T V_k V_m cos\theta_{km}$$
(21)

$$A4_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -g_T V_k \cos\theta_{km} - b_T V_k \sin\theta_{km}$$
(22)

$$A5_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \beta} = g_T V_k V_{SC} sen \theta_{k\beta} - b_T V_k V_{SC} cos \theta_{k\beta}$$
(23)

$$A6_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_{SC}} = g_T V_k \cos\theta_{k\beta} + b_T V_k \sin\theta_{k\beta}$$
(24)

Linearização de  $Q_{km}$ .

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta \theta_k + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta \theta_m$$

$$+ R4_{km} \Delta V_m + R5_{km} \Delta \beta + R6_{km} \Delta V_{sc}$$
(25)

$$Rl_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = -g_T V_k \left( V_m \cos\theta_{km} - V_{SC} \cos\theta_{k\beta} \right) -b_T V_k \left( V_m \sin\theta_{km} - V_{SC} \sin\theta_{k\beta} \right)$$
(26)

$$R2_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = -2(b_T + b_{km}^{sh})V_k - g_T V_m sen\theta_{km} + g_T V_{sc} sen\theta_{k\beta}$$
(27)  
+ b\_V cos \u03cb\_k - b\_V cos \u03cb\_k -

$$R3_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} = -g_T V_k V_m \cos\theta_{km} + b_T V_k V_m \sin\theta_{km}$$
(28)

$$R4_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = -g_T V_k sen\theta_{km} + b_T V_k cos\theta_{km}$$
(29)

$$R5_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \beta} = -g_T V_k V_{SC} cos \theta_{k\beta} - b_T V_k V_{SC} sen \theta_{k\beta}$$
(30)

$$R6_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_{sc}} = g_T V_k sen\theta_{k\beta} - b_T V_k cos\theta_{k\beta}$$
(31)

Linearização de PEsc.

200

$$\Delta PE_{sc} = PE_{sc1} \Delta \theta_k + PE_{sc2} \Delta V_k + PE_{sc3} \Delta \theta_m + PE_{sc4} \Delta V_m + PE_{sc5} \Delta \beta + PE_{sc6} \Delta V_{sc}$$
(32)

$$PE_{SC1} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \theta_k} = -g_T V_k V_{SC} sen \theta_{k\beta} - (b_T + b_{km}^{sh}) V_k V_{SC} cos \theta_{k\beta}$$
(33)

$$PE_{SC2} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_k} = g_T V_{SC} cos\theta_{k\beta} - (b_{ST} + b_{km}^{sh}) V_{SC} sen\theta_{k\beta}$$
(34)

$$PE_{SC3} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \theta_m} = g_T V_m V_{SC} sen\theta_{m\beta} + b_T V_m V_{SC} cos\theta_{m\beta}$$
(35)

$$PE_{SC4} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_m} = -g_T V_{SC} cos\theta_{m\beta} + b_T V_{SC} sen\theta_{m\beta}$$
(36)

$$PE_{sc5} = \frac{CPE_{sc}}{\partial \beta} = g_T V_{sc} \left( V_k sen \theta_{k\beta} - V_m sen \theta_{m\beta} \right) + \left( b_T + b_{km}^{sh} \right) V_k V_{sc} cos \theta_{k\beta} - b_T V_m V_{sc} cos \theta_{m\beta}$$
(37)

$$PE_{sC6} = \frac{\partial PE_{sC}}{\partial V_{sC}} = 2g_T V_{sC} + g_T \left( V_k \cos\theta_{k\beta} - V_m \cos\theta_{m\beta} \right) - \left( b_T + b_{km}^{sh} \right) V_k V_{sC} sen\theta_{k\beta} + b_T V_m V_{sC} sen\theta_{m\beta}$$
(38)

Linearização de  $W_P$  e  $W_Q V_{SC}$  (dinâmica do SSSC).

$$\frac{\partial \dot{W}_{P}}{\partial \theta_{k}} = -\frac{A I_{km}}{T_{PI_{SC}}}$$
(39)

$$\frac{\partial \dot{W}_{p}}{\partial V_{k}} = -\frac{A2_{km}}{T_{PL_{m}}} \tag{40}$$

$$\frac{\partial \dot{W}_{P}}{\partial \theta_{m}} = -\frac{A3_{km}}{T_{PI_{SC}}}$$
(41)

$$\frac{\partial \dot{W}_{p}}{\partial V_{m}} = -\frac{A4_{km}}{T_{PI_{sc}}}$$
(42)

$$\frac{\partial \dot{W}_{p}}{\partial \beta} = -\frac{A5_{km}}{T_{PI_{sc}}}$$
(43)

$$\frac{\partial \dot{W}_{P}}{\partial V_{SC}} = -\frac{A6_{km}}{T_{PI_{SC}}}$$
(44)

$$\frac{\partial \dot{W}_{o}}{\partial \theta_{k}} = -\frac{R \mathbf{1}_{km}}{T_{PI_{sc}}}$$
(45)

$$\frac{\partial \dot{W}_{Q}}{\partial V_{k}} = -\frac{R2_{km}}{T_{PI_{sc}}}$$
(46)

$$\frac{\partial \dot{W}_{o}}{\partial \theta_{m}} = -\frac{R3_{km}}{T_{PI_{sc}}}$$
(47)

$$\frac{\partial W_o}{\partial V_m} = -\frac{R4_{km}}{T_{PI_{sc}}}$$
(48)

$$\frac{\partial W_{Q}}{\partial \beta} = -\frac{R5_{km}}{T_{PI_{sc}}}$$
(49)

$$\frac{\partial W_Q}{\partial V_{SC}} = -\frac{R6_{km}}{T_{PI_{SC}}}$$
(50)

$$\frac{\partial V_{sc}}{\partial \theta_k} = -\frac{K_{Pl_{sc}}A1_{km}}{T_{SSSC}}$$
(51)

$$\frac{\partial V_{sC}}{\partial V_k} = -\frac{K_{PI_{sC}}A2_{km}}{T_{SSSC}}$$
(52)

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_m} = -\frac{K_{PI_{SC}}A_{3_{km}}}{T_{SSSC}}$$
(53)

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_m} = -\frac{K_{PI_{SC}}A4_{km}}{T_{SSSC}}$$
(54)

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \beta} = -\frac{K_{PI_{SC}}A5_{km}}{T_{SSSC}}$$
(55)

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_{SC}} = -\frac{K_{PI_{SC}}A6_{km}}{T_{SSSC}} - \frac{1}{T_{SSSC}}$$
(56)

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial W_P} = \frac{1}{T_{SSSC}}$$
(57)

Linearização das expressões de injeções de potência do SSSC na barra k e m.

$$\frac{\partial P_k}{\partial \beta} = -g_T V_k V_{SC} sen \theta_{k\beta} + b_T V_k V_{SC} cos \theta_{k\beta}$$
(58)

$$\frac{\partial P_m}{\partial \beta} = g_T V_m V_{SC} sen \theta_{m\beta} - b_T V_m V_{SC} cos \theta_{m\beta}$$
(59)

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{sc}} = -g_T V_k \cos\theta_{k\beta} - b_T V_k \sin\theta_{k\beta} \tag{60}$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial V_{SC}} = g_T V_m cos \theta_{m\beta} + b_T V_m sen \theta_{m\beta}$$
(61)

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \beta} = g_T V_k V_{SC} \cos \theta_{k\beta} + b_T V_k V_{SC} \sin \theta_{k\beta}$$
(62)

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \beta} = -g_T V_m V_{SC} cos \theta_{m\beta} - b_T V_m V_{SC} sen \theta_{m\beta}$$
(63)

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{sc}} = -g_T V_k sen \theta_{k\beta} + b_T V_k cos \theta_{k\beta}$$
(64)

$$\frac{\partial Q_m}{\partial V_{sc}} = g_T V_m sen \theta_{m\beta} - b_T V_m cos \theta_{m\beta}$$
(65)

#### **Referências Bibliográficas**

- Deckmann, S. M. and Costa, V. F. (1994). A Power sensitivity model for electromechanical oscillation studies, *IEEE Press-John Wiley* 9(2): 965– 971.
- deMello, F. P. and Concordia, C. (1969). Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **88**(4): 316–329.

- Hingorani, S. M. and Gyugyi, L. (1999). Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system, IEEE Press-John Wiley, United Kingdom.
- Radman, G. and Raje, R. S. (2007). Power flow model/calculation for power systems with multiple facts controllers, *Electric Power Systems Research* **77**(12): 1521 – 1531.
- Yang, N., Liu, Q. and McClley, J. D. (1998). TCSC controller design for damping interarea oscillations, *IEEE Transactions on Power System* **13**(14): 1304–1310.
- Zhang, J., Yokoyama, A. and Ide, T. (2008). Application of interline power flow controller IPFC to power oscillation damping, *IEEJ Trans. Power* & Energy **128**(10): 1252–1258.
- Zhang, X.-P. (2003). Advanced modeling of the multicontrol functional static synchronous series compensator (sssc) in newton power flow, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(4): 1410– 1416.
- Kundur, P. (1994). *Power System stability and control*, MacGraw-Hill, New York.
- Larsen, E. V. and Swann, D. A. (1981). Applying power system stabilizers, Part I: General concepts, Part II: Performance objectives and tuning concepts, Part III: Practical considerations, *IEEE Power Apparatus and Systems* **PAS-100**(12): 3017–3046.
- Mathur, R. M. and Varma, R. K. (2002). Thyristor based FACTS controllers for electrical transmission systems, IEEE Press-John Wiley, New York.
- Monticelli, A. (1983). Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Edgar Blucher, Rio de Janeiro - RJ.
- Pagola, F. L., Perez-Arriaga, I. J. and Verghese, G. C. (1989). On sensitivities, residues and participations: applications to oscillatory stability analysis and control, *IEEE Transactions on Power Systems* 4(1): 278–285.
- Sauer, P. W. and Pai, M. A. (1998). *Power system dynamics and stability*, Prentice Hall, New Jersey.