

---

# ESTUDO DAS LIMITAÇÕES IMPOSTAS AO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS PELOS ZEROS DA FTMA DE CONTROLADORES SUPLEMENTARES

**Ricardo Frangiosi de Moura\***  
ricardo@ifto.edu.br

**Marcos Amorielle Furini†**  
marcos.furini@ifsp.edu.br

**Percival Bueno de Araujo‡**  
percival@dee.feis.unesp.br

\*Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas - IFTO  
AE 310 Sul, Avenida LO 05, s/n, 77021-090, Palmas - TO

†Instituto Federal de São Paulo - Campus Votuporanga - IFSP  
Av. Jerônimo Figueira da Costa, n. 3014, 15503-110, Votuporanga - SP

‡DEE - FEIS - UNESP  
Av. José Carlos Rossi 1370, 15385-000, Ilha Solteira - SP

---

## ABSTRACT

### Study of the Limitations Imposed by the Zeros of the OLTF of Supplementary Controllers on the Damping of Electromechanic Oscillations

The main objective of this work is to analyze the influence of different input signals for supplementary damping controller (POD - Power Oscillation Damping) on the location and control of FACTS devices UPFC (Unified Power Flow Controller), in order to damp low frequency oscillations in Electric Power System (EPS). Will analyze three input signals, two signals available locally (electric current and power flow in UPFC line installation) and a remote signal (angular velocity). To this purpose, the Power Sensitivity Model (PSM) is used to represent the EPS. In the usual way, a sensitivity analysis, using the residue method, provides the location for installation of the UPFC/POD and the procedure for setting the parameters of the controller to damp a pole of interest. However, it will be shown in this work due to the proximity of a zero to an eigenvalue of interest, the largest residue

does not necessarily provide the best location for all UPFC / POD, as observed more frequently in local signals. Comparative analyses of efficiency of input signals to the POD are presented to the New England system with 10 generators, 39 buses and 46 transmission lines.

**KEYWORDS:** Small-signal Stability, Supplementary Stabilizers, FACTS, Electric Power System, UPFC, Zeros.

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é analisar a influência de diferentes sinais de entrada para controladores suplementares de amortecimento (POD - Power Oscillation Damping) na localização e controle de dispositivos FACTS UPFC (Unified Power Flow Controller), visando o amortecimento de oscilações de baixa frequência no Sistema Elétrico de Potência (SEP). Serão analisados três sinais de entrada, sendo dois sinais localmente disponíveis (corrente elétrica e fluxo de potência ativa na linha de instalação do UPFC) e um sinal remoto (velocidade angular). Para este fim, o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) é utilizado para a representação do SEP. De maneira usual, uma análise de sensibilidade, atra-

---

Artigo submetido em 23/09/2010 (Id.: 1195)

Revisado em 25/11/2010, 14/04/2011, 09/06/2011

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Luís Fernando C. Alberto

vés do método dos resíduos, fornece a localização para instalação do conjunto UPFC/POD e o procedimento para ajuste dos parâmetros do controlador para o amortecimento de um polo de interesse. Entretanto, será mostrado neste trabalho que devido à proximidade de algum zero ao polo de interesse, o maior resíduo não necessariamente fornecerá a melhor localização para o conjunto UPFC/POD, fato verificado com maior incidência quando da utilização de sinais locais para a entrada dos controladores. Análises comparativas da eficiência dos sinais de entrada para o POD são apresentadas para o sistema New England composto por 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade a Pequenas Perturbações, Estabilizadores Suplementares, FACTS, Sistemas Elétricos de Potência, UPFC, Zeros.

## 1 INTRODUÇÃO

A análise do comportamento das oscilações eletromecânicas (baixa frequência) de um SEP pode ser realizada através do estudo da estabilidade a pequenas perturbações. A utilização de Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP) é realizada de maneira eficaz, econômica e confiável há várias décadas (?). Sua localização (malha de controle da tensão do gerador) e filosofia de aplicação evidenciam que sua principal atuação é no amortecimento das oscilações de modo local, ou seja, associadas aos geradores eletricamente próximos. Quando ajustados para amortecer oscilações do tipo interárea (grupo de geradores de uma área, oscilando contra geradores de outra área) seu desempenho não é tão bom, podendo vir a prejudicar modos locais antes estáveis.

Entretanto, com o avanço da tecnologia empregada na eletrônica de potência, dispositivos automáticos de compensação foram desenvolvidos, os quais receberam o nome de FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) que podem introduzir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas (?). Para que ocorra a adição de amortecimento de maneira efetiva, é necessária a introdução de um controlador adicional (por exemplo, do tipo POD) à malha de controle dos dispositivos FACTS (Noroozian and Andersson, 1995). Além disso, para que o controlador POD introduza amortecimento aos modos eletromecânicos problemáticos, deve-se instalá-lo em locais onde possa fornecer o maior amortecimento para o modo oscilatório considerado sem que haja prejuízo aos outros modos estáveis. Nesse contexto, a escolha do sinal de entrada para o conjunto FACTS/POD é de suma importância para a eficiência de sua atuação.

A escolha do sinal de entrada deve ser realizada de forma que este tenha grande observabilidade do modo oscilatório a ser amortecido e que seja localmente disponível (Watanabe

et al., 1998). Neste trabalho serão analisados três sinais: corrente elétrica, fluxo de potência ativa e velocidade angular.

A melhor localização para instalação de dispositivos FACTS pode ser obtida da análise dos resíduos da função de transferência em malha aberta (FTMA) do FACTS a ser inserido no sistema (Martins and Lima, 1990). O resíduo obtido para cada localização possível do controlador fornece informações sobre a controlabilidade e observabilidade do conjunto entrada-saída para o controlador em um determinado autovalor. Portanto, o maior resíduo fornecerá maior amortecimento ao modo de oscilação selecionado (Chang and Xu, 2007). Entretanto, a utilização do resíduo como único índice para localização de controladores em sistemas elétricos pode não ser eficaz.

Desta forma, destaca-se que além da análise dos polos da FTMA do controlador é necessária a análise dos zeros desta mesma FTMA, os quais estão intimamente relacionados ao sinal de entrada utilizado e conseqüentemente, à possibilidade de inclusão de amortecimento (Jones and Andersson, 1998; Mhaskar and Kulkarni, 2006). Portanto, uma má localização dos zeros da FTMA (i.e., proximidade ao polo de interesse) limita a possibilidade de controle do polo de interesse em malha fechada, mesmo que o resíduo obtido para este controlador seja o de maior magnitude (Martins and Lima, 1990).

O estudo sobre a influência dos zeros na localização e controle do dispositivo FACTS UPFC equipado com controlador POD para diferentes sinais de entrada é o foco deste trabalho, onde o SEP foi representado pelo MSP (Deckmann and da Costa, 1994) e todas as simulações e resultados foram obtidos através de implementações utilizando-se o software MATLAB<sup>®</sup>.

## 2 MODELO DE SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA

O MSP é uma ferramenta de análise linear do comportamento dinâmico de sistemas elétricos de potência e possui uma característica importante que é a preservação de todas as barras do sistema elétrico no modelo, não ocorrendo a redução às barras internas dos geradores. Como consequência, há a manutenção da integridade da estrutura do sistema elétrico de potência (Deckmann and da Costa, 1994).

Neste modelo, o comportamento dinâmico do sistema elétrico de potência pode ser descrito em função das variáveis de estado ( $\Delta x$ ), algébricas ( $\Delta z$ ) e de entradas ( $\Delta u$ ) de acordo com (1) onde  $\Delta y$  é um conjunto de saídas desejadas.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta u] \quad (1)$$

$$[\Delta y] = \begin{bmatrix} C1 & C2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$$

Na equação (1),  $J1$ ,  $J2$ ,  $J3$  e  $J4$  são submatrizes que relacionam as variáveis de estado (velocidade angular do rotor ( $\Delta\omega$ ), o ângulo interno do rotor ( $\Delta\delta$ ), a tensão interna de eixo em quadratura ( $\Delta E'_q$ ) e a tensão de campo ( $\Delta E_{fd}$ ) com as variáveis algébricas (módulo ( $\Delta V$ ) e o ângulo ( $\Delta\theta$ ) da tensão terminal das barras do sistema). As entradas do sistema linearizado são a potência mecânica da turbina ( $\Delta P_m$ ), a tensão de referência ( $\Delta V_{ref}$ ) do regulador automático de tensão de cada gerador e as cargas ativa ( $\Delta P_L$ ) e reativa ( $\Delta Q_L$ ), relacionadas através das submatrizes  $B1$  e  $B2$ . As submatrizes  $C1$  e  $C2$  fornecem as saídas desejadas. Nota-se de (1) que o MSP realiza uma representação completa das variáveis envolvidas na modelagem do SEP. Desta forma, a inclusão de novos dispositivos tais como os FACTS ou POD é facilitada.

### 3 CONTROLADOR FACTS UPFC

O UPFC pode ser considerado um controlador de representação genérica das funções dos controladores FACTS, pois é capaz de atuar de forma simultânea ou seletiva sobre todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência em uma linha de transmissão (ângulo, tensão e impedância) (Gyugyi, 1992).

#### 3.1 Inclusão do UPFC no SEP

A inclusão do UPFC no sistema elétrico de potência pode ser feita através de um circuito equivalente composto por uma fonte de tensão ( $\bar{V}_s$ ) ideal e uma fonte de corrente ( $\bar{I}_{sh}$ ) ideal, representando, respectivamente, o conversor em série e o conversor em derivação (Meng and So, 2000).

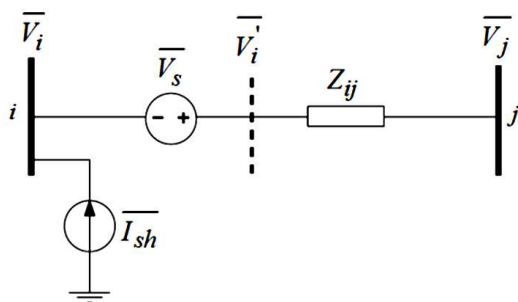


Figura 1: Esquema Básico do UPFC.

O controle do fluxo de potência na linha de transmissão pode ser feito através do controle da magnitude e do ângulo da tensão série injetada, através dos parâmetros  $r$  e  $\gamma$ , respectivamente. Assim, a tensão  $\bar{V}_s$  pode ser expressa conforme descrito em (2).

$$\bar{V}_s = r\bar{V}_i e^{j\gamma} = rV_i e^{j(\theta_i + \gamma)} \quad (2)$$

A tensão série injetada pelo UPFC pode ser decomposta em duas parcelas, uma em fase ( $v_p$ ) e outra em quadratura ( $v_q$ ) com a corrente da linha de transmissão. A atuação do conversor em derivação é representada pelo controle do nível da tensão pela injeção de uma corrente elétrica em quadratura com a tensão da barra inicial ( $i$ ) de instalação (representada por  $i_q$ , também mostrada na Fig. 2).

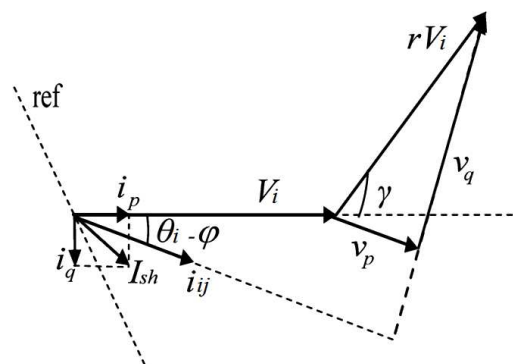


Figura 2: Inclusão do UPFC - Diagrama Fasorial.

Portanto, a inclusão deste dispositivo pode ser feita considerando três variáveis de controle ( $v_p$ ,  $v_q$  e  $i_q$ ), as quais são adicionadas às variáveis de estado e, através da linearização das equações que as definem, gera o modelo dinâmico linearizado do UPFC conforme mostrado em (3) (Meng and So, 2000).

$$\begin{aligned} \Delta \dot{v}_p &= \frac{1}{T_{vp}} (\Delta v_{pref} - \Delta v_p) \\ \Delta \dot{v}_q &= \frac{1}{T_{vp}} (\Delta v_{pref} - \Delta v_q + \Delta V_s) \\ \Delta \dot{i}_q &= \frac{K_{iq}}{T_{iq}} (\Delta V_{ref} - \Delta V_k) - \Delta i_q \end{aligned} \quad (3)$$

As constantes de tempo  $T_{vp}$ ,  $T_{vq}$  e  $T_{iq}$  representam o atraso inerente do dispositivo de controle.

De acordo com o conjunto de equações (3) nota-se que o UPFC irá operar no modo de compensação reativa, modulando as variações da tensão  $v_q$ , através do POD (Moura et al., 2010).

Os controladores ESP e POD utilizados neste trabalho possuem estrutura idêntica e na Fig. 3 é mostrada sua estrutura básica.

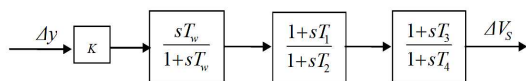


Figura 3: Estrutura Básica do ESP e do POD.

Estes controladores são compostos por um ganho estático  $K$  (ajustável para fornecer o amortecimento desejado); um bloco “washout” (definido pela constante de tempo  $T_w$ ) e as constantes de tempo  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$  (responsáveis pela compensação de fase necessária do sinal de entrada escolhido para gerar torque de amortecimento) (Kundur, 1994).

### 3.2 Localização e Projeto dos Controladores ESP E POD

O correto funcionamento dos controladores é extremamente dependente da localização e do ajuste dos parâmetros para uma determinada condição de operação. Desta forma, o valor dos resíduos das funções de transferência entre a entrada e a saída do controlador (para um determinado modo oscilatório de interesse), é utilizado para se definir a sua localização no sistema elétrico de modo a proporcionar uma contribuição efetiva de amortecimento a modos oscilatórios instáveis ou fracamente amortecidos.

O resíduo  $R_{ijk}$  (equação (4)) fornece informações sobre a controlabilidade e observabilidade do conjunto entrada-saída ( $C_j - B_k$ ) para o controlador em um determinado autovalor ( $\lambda_i$ ) de acordo com os autovetores direito ( $\phi_i$ ) e esquerdo ( $\psi_i$ ) obtidos da matriz de estados. Portanto, o maior resíduo fornecerá maior amortecimento ao modo de oscilação selecionado e consequentemente dará a melhor localização para o controlador.

$$R_{ijk} = C_j \phi_i \psi_i B_k \quad (4)$$

O projeto do controlador se resume a calcular as constantes de tempo  $T_1 = T_3$ ,  $T_2 = T_4$  e o ganho  $K$  de forma a introduzir a compensação de fase necessária ao deslocamento do autovalor de interesse. Esse processo é descrito em Aboul-Ela et al. (1996) para controladores ESP, sendo que este mesmo procedimento é aplicável para controladores de dispositivos FACTS (Chang and Xu, 2007). Para isso considere que o ângulo a ser compensado pelo controlador seja  $\beta$ ,  $\omega_i$  seja a frequência em rad/s do modo oscilatório de interesse e que  $\lambda_{ides}$  é a posição desejada para o autovalor. Com estas definições, o conjunto de equações (5) fornece o procedimento

para a obtenção dos parâmetros dos controladores ESP e POD.

$$\begin{aligned} \beta &= 180^\circ - \arg(R_{ijk}) \\ \alpha &= \frac{1 - \sin(\beta/2)}{1 + \sin(\beta/2)} \\ T_2 &= \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \\ T_1 &= \alpha T_2 \\ K &= \left| \frac{\lambda_{ides} - \lambda_i}{R_{ijk} H(\lambda_i)} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.3 Influência dos Zeros no Projeto do Controlador

A localização dos zeros da FTMA de um controlador é determinante no comportamento do polo da função de transferência em malha fechada (FTMF) do sistema a ser controlado. Desta forma a localização dos zeros da FTMA de um controlador está intimamente relacionada à facilidade ou dificuldade de controle sobre um sistema (Martins et al., 1992).

Como os polos da FTMF tendem a se deslocar para os zeros da FTMA quando o ganho tende ao infinito, é importante que haja uma boa distância entre os polos críticos e os zeros a fim de se obter um movimento adequado do autovalor de interesse com o aumento do ganho (Martins and Lima, 1990).

Se para uma dada localização do controlador no sistema, o conjunto entrada-saída fornecer boas condições de controlabilidade e observabilidade para o polo de interesse, esta posição será eficiente no amortecimento deste polo de acordo com o método dos resíduos. Observe que neste método foca-se o projeto no polo de interesse e nenhuma informação é obtida em relação aos zeros da FTMA. Em vista disso, em alguns casos, uma posição satisfatória obtida pelo método dos resíduos pode não fornecer amortecimento adequado devido à má localização dos zeros da FTMA.

Portanto, a localização de zeros em uma determinada região do plano complexo pode limitar a eficácia do controlador projetado pelo método dos resíduos, ou seja, o amortecimento desejado poderá não ser obtido. Assim, a escolha do sinal de entrada do controlador é extremamente importante pois pode fornecer zeros mal localizados.

Neste trabalho, os zeros são obtidos através das funções disponíveis na biblioteca do software MATLAB<sup>®</sup>, sendo que o algoritmo utilizado é apresentado de maneira completa em (Emami-Naeini and Dooren, 1982).

### 3.4 Sinais de Entrada para o Controlador POD

Neste trabalho são analisados três sinais de entrada para o controlador para se verificar qual fornece a melhor atuação com menor valor de ganho e boa separação entre polos e zeros. A corrente elétrica e o fluxo de potência ativa na linha entre as barras  $i$  e  $j$  (de impedância  $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ ) (linha onde está instalado o UPFC) serão considerados (equações (6) e (7), respectivamente). Note que estes sinais estão disponíveis localmente.

$$|\bar{I}_{ij}| = \left| \frac{(\bar{V}_i - \bar{V}_j)}{Z_{ij}} \right| \quad (6)$$

$$P_{ij} = \frac{R_{ij}}{|Z_{ij}|^2} (V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_{ij})) + \frac{X_{ij}}{|Z_{ij}|^2} (V_i V_j \sin(\theta_{ij})) \quad (7)$$

Também será utilizada a velocidade angular como sinal de entrada para o POD, sendo que pelo fato desta grandeza ser uma variável de estado, este sinal já está disponível na formulação apresentada na equação (1) e pode ser prontamente utilizado, ao contrário dos sinais anteriores que são dependentes da combinação das variáveis algébricas do modelo.

## 4 SISTEMA MULTIMÁQUINAS UTILIZADO

O sistema teste utilizado é conhecido como New England e seus dados completos podem ser encontrados em (Araujo and Zanetta Jr., 2001). A partir do diagrama unifilar apresentado na Fig. 4 pode-se afirmar que neste sistema existem duas áreas, sendo que o sistema New York (área 1) é representado de maneira compacta pelo gerador 10.

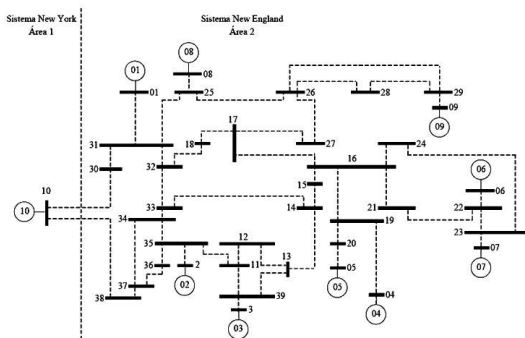


Figura 4: Diagrama Unifilar: Sistema New England.

A partir de um ponto de operação considerado caso base são calculados os autovalores da matriz de estados e os de maior interesse (dominantes) são mostrados na Tabela 1, bem como

a frequência de oscilação e o coeficiente de amortecimento ( $\xi$ ) associados. Dos valores apresentados pode-se afirmar que este sistema possui 4 modos eletromecânicos instáveis, sendo 3 do tipo local e 1 do tipo interárea (conforme se pode concluir a partir das frequências típicas associadas a estes autovalores).

Tabela 1: Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ).

Autovalores	Frequência (Hz)	$\xi$
$0,05796 \pm j 6,8626$ (Local 1)	1,0922	-0,00844
$0,16931 \pm j 5,9126$ (Local 2)	0,9414	-0,02862
$0,09009 \pm j 6,3175$ (Local 3)	1,0056	-0,01426
$0,00149 \pm j 3,5348$ (Interárea)	0,5625	-0,00042

Desta maneira, medidas devem ser tomadas para se tentar estabilizar o sistema de potência. Neste trabalho, a solução para se fornecer amortecimento suplementar ao modo interárea será através da inclusão do conjunto UPFC/POD no sistema. Para os modos locais será a inclusão dos dispositivos ESPs.

## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

### 5.1 Projeto dos ESPs

A alocação dos controladores ESPs pode ser feita a partir dos resíduos da FTMA. Na Tabela 2 são mostrados os módulos dos resíduos associados às possíveis localizações dos controladores ESPs e aos modos instáveis descritos na Tabela 1, excetuando a máquina geradora 10, que representa a área vizinha.

Os geradores 9 e 5 possuem grande participação na formação de todos os modos locais instáveis, conforme mostrado na Tabela 2, sendo portanto as melhores localizações para instalação dos ESPs.

Na Tabela 3 tem-se os parâmetros dos ESPs instalados nas máquinas geradoras 9 e 5, projetados de acordo com a técnica apresentada na seção 3.2.

Após a inclusão dos ESPs, os 3 modos locais antes instáveis são amortecidos (conforme apresentado na Tabela 4), bem como o modo interárea. Mas, ainda assim, o modo local 1 e o modo interárea são fracamente amortecidos. Para melhorar o desempenho do sistema será incluído o conjunto UPFC/POD para se obter maior amortecimento.

Tabela 2: Módulo dos Resíduos - ESP.

ESP	Resíduos		
	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Gerador 1	0,000999	6,74E-005	9,72E-005
Gerador 2	0,000394	0,000260	0,002281
Gerador 3	0,000312	0,000273	0,002383
Gerador 4	0,000287	0,000334	5,24E-005
<b>Gerador 5</b>	<b>0,000287</b>	<b>0,035796</b>	<b>0,015053</b>
Gerador 6	0,000368	1,61E-005	0,000715
Gerador 7	0,002666	0,000200	0,00522
Gerador 8	0,000784	0,000784	0,000160
<b>Gerador 9</b>	<b>0,016612</b>	<b>0,021521</b>	<b>0,040841</b>

Tabela 3: Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ).

Controlador	$T_w$ (s)	$T_1 = T_2$ (s)	$T_3 = T_4$ (s)	K (pu)
ESP - Gerador 9	10	0,25722	0,09739	6,6890
ESP - Gerador 5	10	0,36902	0,07745	4,4570

Tabela 4: Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ) com ESPs.

Autovalores	Frequência (Hz)	$\xi$
$-0.14607 \pm j 6.8445$ (Local 1)	1.0896	0.02134
$-0.91171 \pm j 5.6616$ (Local 2)	0.9127	0.15899
$-0.69509 \pm j 6.2533$ (Local 3)	1.0014	0.11048
$-0.08673 \pm j 3.4845$ (Interárea)	0,5551	0,02517

## 5.2 Projeto do Controlador POD

Nesta seção serão apresentados os ajustes do controlador POD para cada um dos sinais de entrada considerados e o objetivo é que o autovalor de interesse (interárea) possua coeficiente de amortecimento igual a 0,1 pu. É importante destacar que o projeto do controlador POD e as análises sobre os efeitos dos zeros no comportamento dinâmico do SEP foram realizadas considerando-se os ESPs em atuação no sistema elétrico de potência.

### 5.2.1 Sinal de Entrada - Velocidade Angular

O amortecimento de oscilações eletromecânicas do tipo interárea pode ser realizado através de sinais remotos, como a velocidade angular. Porém, para que esse amortecimento seja efetivo é necessário que o sinal carregue informações sobre ambas as áreas e, portanto a utilização da diferença entre a velocidade angular de dois geradores (um em cada área) é prática comum (Klein et al., 1991). Para o sistema New England foi considerada a diferença entre a velocidade angular do gerador 10 (área 1) e o gerador 6 (área 2) que possui maior participação no modo interárea, obtido a partir do cálculo dos fatores de participação, conforme a Fig. 5.

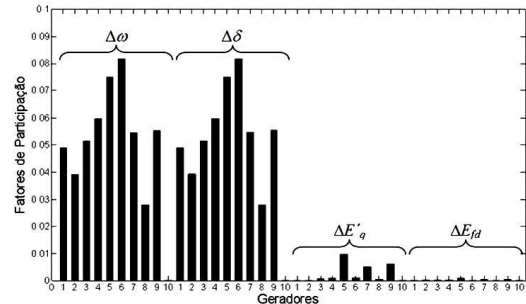


Figura 5: Fatores de Participação: Modo Interárea.

Na Tabela 5 é mostrado o módulo dos resíduos associados às possíveis, e mais significativas localizações do conjunto UPFC/POD no sistema de transmissão.

Tabela 5: Módulo dos Resíduos - Velocidade Angular.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
<b>Resíduos</b>	0,0096	0,0081	0,0060	0,0032

Dos dados mostrados na Tabela 5 conclui-se que a linha de interligação entre as barras 30 e 10 é a melhor localização para o conjunto UPFC/POD. Em vista disso realiza-se o projeto do controlador POD conforme apresentado na seção 3.2, onde os parâmetros obtidos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros POD - Velocidade Angular.

L.T.	$T_w$ (s)	$T_1 = T_3$ (s)	$T_2 = T_4$ (s)	$K_{POD}$
<b>30-10</b>	10	0,30591	0,26587	23,768
<b>30-31</b>	10	0,29136	0,27671	30,648
<b>38-10</b>	10	0,28919	0,28172	42,330
<b>37-38</b>	10	0,32948	0,24602	60,753

Como esperado a compensação de fase exigida para o sinal de velocidade é pequena, pois o amortecimento de oscilações eletromecânicas é obtido por torques elétricos em fase com esse sinal. Observe que o ganho necessário ao amortecimento aumenta com a diminuição do módulo do resíduo.

A utilização deste sinal remoto é eficiente para todas as localizações analisadas, pois em todos os casos o amortecimento obtido é bem próximo do desejado, de acordo com o apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ) do Modo Interárea - Velocidade Angular.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
$\xi$	0,1005	0,0997	0,0988	0,0929

O alto desempenho deste sinal é explicado pela boa separação entre o polo ( $\lambda$ ) de interesse (interárea) e os zeros ( $z$ ) associados à FTMA do controlador conforme a Tabela 8, favorecendo seu deslocamento para o semiplano esquerdo do plano complexo.

Tabela 8: Distância entre o Polo e o Zero da FTMA: Velocidade Angular.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
$ \lambda - z $	2,195	2,191	2,255	2,399

Na Fig. 6 é mostrado o comportamento dos polos e do zero para o UPFC/POD instalado na linha 30 - 10 para o ganho do controlador em  $0, 0,5K_{POD}, K_{POD}, 2K_{POD}$  e  $3K_{POD}$  ( $K_{POD}$  o ganho determinado pelo projeto).

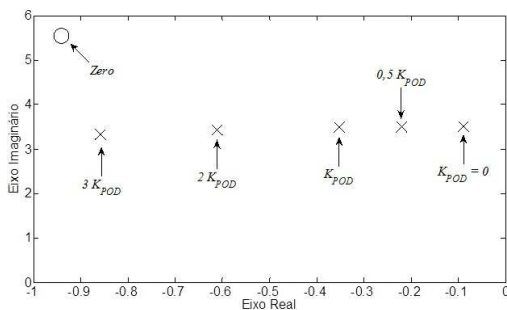


Figura 6: Localização do Polo e Zero do Sistema com POD Na Linha 30 - 10 (Modo Interárea): Velocidade Angular.

Através do gráfico é possível visualizar que o zero está inicialmente bem distante do polo obtido para ganho nulo, ou

seja, o polo da FTMA do controlador. Para os polos obtidos em malha fechada, nota-se que para cada aumento de ganho o polo se desloca ainda mais para o semi-plano esquerdo do plano complexo, inserindo assim maior amortecimento ao sistema. O comportamento para as demais linhas é análogo ao da linha 30 - 10.

Simulações extras permitiram concluir que o amortecimento inserido ao modo interárea fica limitado pela ocorrência de uma bifurcação do tipo sela do modo oscilatório relacionado ao controlador, causando instabilidade do tipo monotônica.

## 5.2.2 Sinal de Entrada - Fluxo de Potência Ativa

Realizando um procedimento semelhante ao adotado para a velocidade angular, são calculados os módulos dos resíduos associados às possíveis e mais significantes localizações do conjunto UPFC/POD no sistema, considerando o fluxo de potência ativa na linha de instalação do controlador como sinal de entrada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Módulo dos Resíduos - Fluxo de Potência Ativa.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
Resíduos	7,9274	7,357	4,3726	2,5946

Comparando os dados das Tabelas 5 e 9 conclui-se que para ambos os sinais o ranking de classificação das localizações para o conjunto UPFC/POD é o mesmo. Entretanto, o módulo dos resíduos referentes ao sinal fluxo de potência ativa é muito maior quando comparado ao sinal velocidade angular. Esse fato é explicado pela alta observabilidade do modo interárea nesse sinal de entrada, o que ocasiona um menor valor de ganho para os controladores que utilizam o fluxo de potência ativa como entrada, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros POD - Fluxo de Potência Ativa.

L.T.	$T_w$ (s)	$T_1 = T_3$ (s)	$T_2 = T_4$ (s)	$K_{POD}$
30-10	10	0,78073	0,10540	0,0044
30-31	10	0,74948	0,10959	0,0052
38-10	10	0,68967	0,11882	0,0103
37-38	10	0,58741	0,13612	0,0240

Outro fato importante é que a compensação de fase exigida com este sinal é muito maior quando comparada à exigida pela velocidade angular. Desta forma, com o conjunto UPFC/POD atuando, foram obtidos os coeficientes de amortecimento nas respectivas linhas do SEP para um coeficiente

desejado de 0,1 pu. Observou-se que os melhores coeficientes de amortecimento ocorrem nas linhas de transmissão 30 - 31 e 37 - 38, conforme a Tabela 11.

Tabela 11: Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ) do Modo Interárea - Fluxo de Potência Ativa

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
$\xi$	0,0632	0,0910	0,0590	0,0815

Observa-se dos dados da Tabela 11 que apesar da linha 30 - 10 possuir o maior resíduo não se obteve o amortecimento desejado, ficando abaixo do coeficiente obtido pela linha 37 - 38 que foi classificada como a quarta opção pelo método dos resíduos. Este fato é explicado pela existência de um zero mal posicionado da FTMA do controlador associado ao polo de interesse, atraindo-o e dificultando o seu deslocamento.

Na Tabela 12 são apresentadas as distâncias entre o polo ( $\lambda$ ) de interesse e o zero ( $z$ ) da FTMA e conclui-se que as linhas 30 - 31 e 37 - 38 possuem as duas maiores distâncias ( $|\lambda - z|$ ).

Tabela 12: Distância entre o Polo e o Zero da FTMA: Fluxo de Potência Ativa.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
$ \lambda - z $	0,254	0,529	0,229	0,529

Na Fig. 7 é mostrado o comportamento dos polos e do zero na linha de transmissão 30 - 10. A distância entre o polo e o zero para o ganho nulo é de praticamente a metade em relação às duas maiores distâncias obtidas para o sistema. Para o ganho de projeto  $K_{POD}$  o polo sofre um pequeno deslocamento no semiplano esquerdo do plano complexo, porém, esse deslocamento não é suficiente para inserir a quantidade de amortecimento desejada ao sistema.

Analisando o sistema apenas pela teoria dos resíduos (Tabela 9), a linha 37 - 38 não deveria fornecer o coeficiente de amortecimento mostrado na Tabela 11 já que o seu resíduo é bem menor que o da linha 30 - 10. Para se compreender este fato considere a Fig. 8 onde é mostrado o deslocamento do polo em função da variação de  $K_{POD}$  para a linha 37 - 38.

Observa-se que a distância do zero ao polo de interesse é bem maior quando comparada com a da linha 30 - 10. A maior distância e o fato de o zero estar localizado no semiplano esquerdo do plano complexo é que faz com que sua força de atração traga o polo ainda mais para o semiplano esquerdo, inserindo assim uma quantidade de amortecimento

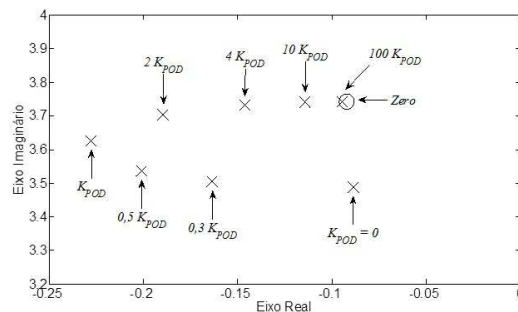


Figura 7: Localização do Polo e Zero para a Linha 30 - 10 (Modo Interárea): Fluxo de Potência Ativa.

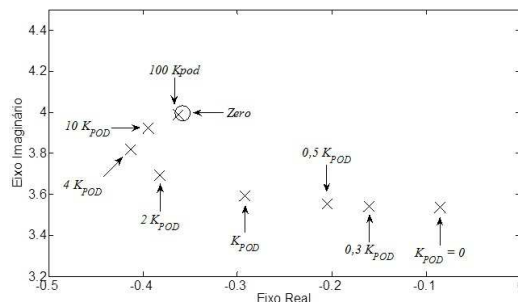


Figura 8: Localização do Polo e Zero para a Linha 37 - 38 (Modo Interárea): Fluxo de Potência Ativa.

maior ao sistema. Daí, conclui-se que a localização dos zeros influencia diretamente na maior ou menor facilidade que o controlador tem de inserir amortecimento às oscilações do SEP.

### 5.2.3 Sinal de Entrada - Corrente Elétrica

Na Tabela 13 é apresentado o módulo dos resíduos associados às melhores localizações do UPFC/POD quando da utilização do módulo da corrente elétrica na linha de instalação como sinal de entrada

Tabela 13: Módulo dos Resíduos - Corrente Elétrica.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
Resíduos	0,3933	0,5573	0,1991	0,1070

Comparando-se os dados da Tabela 13 com os da Tabela 9 nota-se que a classificação é alterada para a linha 30 - 31 mas a magnitude dos resíduos para este sinal local é muito menor quando comparada ao obtido com o fluxo de potência ativa.



Tabela 14: Parâmetros POD - Corrente Elétrica.

L.T.	$T_w$ (s)	$T_1 = T_3$ (s)	$T_2 = T_4$ (s)	$K_{POD}$
30-10	10	0,78066	0,10542	0,0898
30-31	10	0,73485	0,11194	0,0713
38-10	10	0,69435	0,11850	0,2243
37-38	10	0,58779	0,14004	0,5823

De maneira análoga realiza-se o projeto dos controladores através dos resíduos mostrados na Tabela 13 e os respectivos parâmetros são apresentados na Tabela 14.

Os coeficientes de amortecimento obtidos para o modo inter-área com a atuação dos controladores cujos parâmetros são apresentados na Tabela 14 para um coeficiente desejado de 0,1 pu são mostrados na Tabela 15, de onde se conclui que a linha 30 - 31 forneceu o melhor amortecimento, fato já evidenciado para o sinal fluxo de potência ativa. Entretanto, neste caso o resíduo forneceu a localização corretamente. Observa-se também que a localização nas demais linhas não foi eficiente na obtenção do amortecimento desejado. Isto se deve a uma má separação entre o polo de interesse e o zero associado, conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 15: Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ) do Modo Inter-área - Corrente Elétrica.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
$\xi$	0,0628	0,0866	0,0428	0,0374

Tabela 16: Distância entre o Polo e o Zero da FTMA: Corrente Elétrica.

L.T.	30-10	30-31	38-10	37-38
$ \lambda - z $	0,253	0,434	0,134	0,084

Dos dados da Tabela 16 conclui-se que a separação entre o polo e o zero da FTMA para a linha 30 - 31 é praticamente o dobro da separação para a linha 30 - 10, fato já observado para o sinal fluxo de potência. Portanto, o descolamento do polo de interesse (modo inter-área) é favorecido na linha 30 - 31.

Na Fig. 9 é apresentado o comportamento dos polos e do zero para a linha 30 - 31. Verifica-se claramente através do deslocamento dos polos que, aumentando-se o ganho do controlador o polo de interesse caminha em direção ao zero.

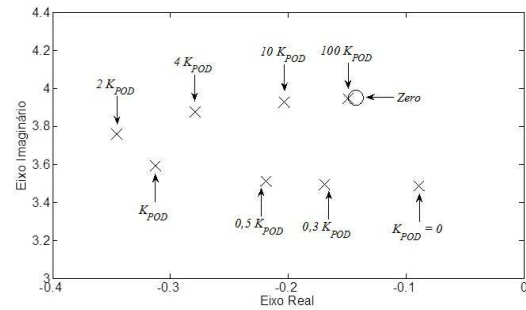


Figura 9: Localização do Polo e Zero para a Linha 30 - 31 (Modo Interárea): Corrente Elétrica.

### 5.3 Efeitos Sobre o Comportamento Dinâmico do SEP

O sistema de energia elétrica é continuamente submetido a pequenas variações de cargas, com os consequentes ajustes na geração, através da variação da abertura do dispositivo de captação de água (no caso de usinas hidrelétricas), ocasionando um aumento ou diminuição da potência mecânica de entrada dos geradores (Kundur, 1994). Em vista disso, para a análise do desempenho dinâmico do sistema elétrico frente a uma pequena perturbação, considerou-se que para um pequeno aumento na carga do sistema, corresponderá um pequeno ajuste na geração. Este ajuste será aqui representado por um degrau de 0,05 pu na potência mecânica de entrada da unidade geradora 1. Além disso, os geradores 9 e 5 estão equipados com ESPs ajustados com os parâmetros mostrados na Tabela 3.

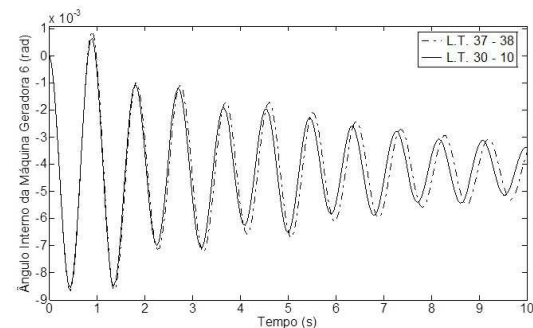


Figura 10: Comportamento Dinâmico do Ângulo Interno do Gerador 6 para o UPFC/POD instalado nas Linhas 30 - 10 e 37 - 38.

Na Fig. 10 é mostrado o comportamento do ângulo interno da máquina geradora 6 (pertencente à área 2), em relação ao ângulo interno da unidade geradora 10 (pertencente à área 1),  $\Delta\delta_6 - \Delta\delta_{10}$ . As diferentes curvas se referem ao conjunto UPFC/POD instalado nas linhas 30 - 10 e 37 - 38,

considerando-se o fluxo de potência ativa como entrada para o controlador onde ele encontra-se instalado, pois se enquadra na filosofia de utilização de sinais locais (Aboul-Ela et al., 1996). As linhas em questão possuem o maior e o menor resíduo, respectivamente, conforme dados apresentados na Tabela 9. Analisando as curvas mostradas conclui-se que os comportamentos são semelhantes e que o sistema para os dois casos obtém um bom amortecimento. Através da análise apenas dos resíduos não seria possível chegar a esta conclusão já que a linha 37 - 38 possui um resíduo praticamente 3 vezes menor que o resíduo da linha 30 - 10. Assim, não basta apenas que para um dado sinal de entrada do controlador, este seja instalado no local de maior resíduo. É desejável que o zero possua uma boa separação do polo obtido a partir da FTMA e que este zero esteja bem localizado no plano complexo.

Nos gráficos da Fig. 11 é mostrado o comportamento dinâmico do ângulo interno do gerador 6 ( $\Delta\delta_6 - \Delta\delta_{10}$ ) considerando-se o conjunto UPFC/POD instalado nas melhores posições, as quais foram obtidas pelas análises dos resíduos e zeros da FTMA do controlador POD (para os sinais fluxo de potência ativa e corrente elétrica instalação na L.T. 30 - 31; para o sinal velocidade angular instalação na L.T. 30 - 10). Assim, é possível analisar para qual sinal de entrada do controlador o sistema apresentou um amortecimento global mais significativo.

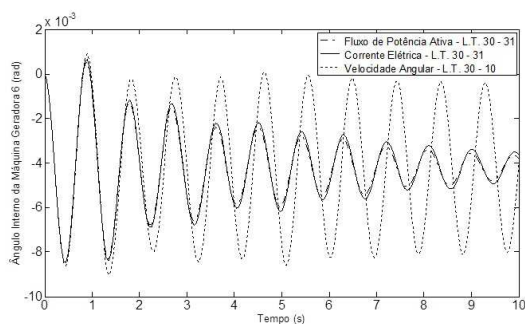


Figura 11: Comportamento Dinâmico do Ângulo Interno do Gerador 6 do Sistema New England.

A corrente elétrica e o fluxo de potência ativa (sinais disponíveis no local de instalação do conjunto UPFC/POD) apresentam curvas muito semelhantes, demonstrando que para estas condições, o amortecimento fornecido foi suficiente para que se obtivesse um bom desempenho do sistema elétrico de potência quando submetido a uma pequena perturbação. No caso do uso da velocidade angular como sinal de entrada do controlador, esperava-se um desempenho melhor do SEP quando comparado com os obtidos para os outros dois sinais de entrada. Isto porque o coeficiente de amortecimento fornecido ao modo interárea com o sinal velocidade angular foi o maior obtido conforme apresentado na Tabela 17. Porém, a

curva relativa ao sinal da velocidade angular apresentado na Fig. 11 tem o pior comportamento para os 3 sinais de entrada utilizados. Isto pode ser explicado analisando-se os dados mostrados nas Tabelas 17, 18 e 19, nas quais são apresentados os quatro modos oscilatórios de interesse considerando-se a inclusão dos ESPs e do conjunto UPFC/POD para cada um dos sinais de entrada sob análise, ajustados com os parâmetros mostrados nas Tabelas 6, 10 e 14.

Tabela 17: Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ) - Velocidade Angular.

Autovalores	Frequência (Hz)	$\xi$
$-0,01845 \pm j 6,7508$ (Local 1)	1,0744	0,00273
$-0,94187 \pm j 5,6587$ (Local 2)	0,9130	0,16419
$-0,68206 \pm j 6,3261$ (Local 3)	1,0127	0,10720
$0,35145 \pm j 3,4781$ (Interárea)	0,5563	0,10053

Tabela 18: Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ) - Fluxo de Potência.

Autovalores	Frequência (Hz)	$\xi$
$-0,20806 \pm j 7,2578$ (Local 1)	1,1556	0,02865
$-0,97083 \pm j 5,6823$ (Local 2)	0,9175	0,16841
$-0,66479 \pm j 6,2283$ (Local 3)	0,9969	0,10613
$-0,32660 \pm j 3,5723$ (Interárea)	0,5709	0,09104

Analisando-se os autovalores mostrados na Tabela 17 pode-se afirmar que o conjunto UPFC/POD forneceu um ótimo coeficiente de amortecimento ao modo interárea mas prejudicou o amortecimento do modo local 1, que passou a ter um coeficiente de amortecimento associado menor que o mostrado na Tabela 4 (atuação apenas dos ESPs). Isto não ocorre para os outros sinais utilizados pois o maior amortecimento inserido ao modo interárea não prejudicou os modos locais, conforme atestam os valores mostrados nas Tabelas 18 e 19.

Assim, conclui-se que analisando-se apenas o amortecimento do modo interárea, a velocidade angular é um ótimo sinal de

Tabela 19: Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficiente de Amortecimento ( $\xi$ ) - Corrente Elétrica.

Autovalores	Frequência (Hz)	$\xi$
$-0,20817 \pm j 7,2578$ (Local 1)	1,1556	0,02867
$-0,96139 \pm j 5,6847$ (Local 2)	0,9176	0,16675
$-0,66731 \pm j 6,2263$ (Local 3)	0,9966	0,10657
$-0,31139 \pm j 3,5787$ (Interárea)	0,5717	0,08668

entrada para o controlador mas para o comportamento global do sistema ele não é eficaz pois dificulta o amortecimento dos modos oscilatórios restantes e consequentemente afeta a estabilidade do sistema elétrico. Desta maneira os sinais de entrada potência ativa e corrente elétrica são escolhas melhores pois além de inserir amortecimento ao modo interárea não deteriora em demasia os demais modos de oscilação.

A dificuldade observada para o amortecimento do modo local 1 devido a aplicação do UPFC/POD com sinal de entrada velocidade angular, é melhor compreendida analisando-se a localização dos zeros e dos polos relacionados a este modo, obtidos através da FTMA do controlador, considerando os 3 sinais de entrada (Fig. 12).

Observa-se que o zero relacionado ao modo local 1 obtido para a FTMA do UPFC/POD utilizando a velocidade angular como sinal de entrada está localizado no semiplano direito do plano complexo. Esta má localização faz com que para este sinal de entrada, o polo relacionado ao modo local 1 será atraído pelo zero e consequentemente ocorrerá a instabilidade na medida em que se aumenta o ganho do controlador. Assim, para o ganho de projeto obtido com a velocidade angular como entrada do controlador, obtém-se um ótimo coeficiente de amortecimento em relação ao modo interárea, porém, o modo local 1 é bastante afetado, prejudicando o comportamento dinâmico do sistema como um todo.

Na Fig. 13 pode ser melhor observada a atração que o zero exerce sobre o polo relacionado ao modo local 1, com o aumento do ganho do controlador que utiliza como sinal de entrada a velocidade angular.

Observe que variando-se o ganho do controlador de 0 a 1000 vezes o valor do ganho de projeto ( $K_{POD}$ ), é possível visualizar o deslocamento do polo em direção ao zero. Portanto, para que um determinado modo de oscilação não seja negati-

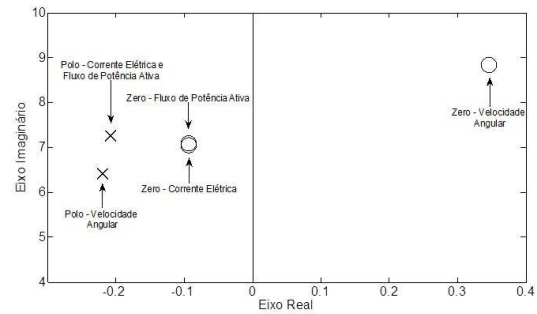


Figura 12: Localização do Polo e Zeros para os 3 Sinais de Entrada (Modo Local 1).

vamente afetado pelo ganho do controlador, é desejável que todos os zeros das FTMA estejam localizados no semiplano esquerdo do plano complexo ou o mais próximo deste.

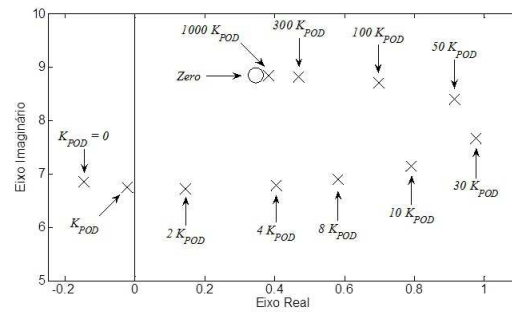


Figura 13: Localização do Polo e Zero (Modo Local 1): Sinal de Entrada: Velocidade Angular.

## 6 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência de três sinais de entrada para controladores suplementares de amortecimento, acoplados ao dispositivo FACTS UPFC para o amortecimento das oscilações eletromecânicas de modo interárea.

Concluiu-se das simulações realizadas e resultados obtidos que índices como os resíduos das funções de transferência fornecem informações extremamente valiosas, tanto para se averiguar as ações a ser tomadas para estabilização do sistema, quanto para se verificar a atuação das ações adotadas em cada modo oscilatório. Os resíduos podem determinar a melhor localização do dispositivo FACTS no sistema elétrico de potência, inserindo alto nível de amortecimento às oscilações eletromecânicas do sistema elétrico de potência, porém não é sensível à presença de zeros.

Constatou-se também que quanto mais à esquerda do semi-plano esquerdo o zero estiver localizado, melhor para a inserção de amortecimento, pois este zero vai atrair o polo como foi verificado através dos resultados apresentados. Assim, a introdução do amortecimento desejado depende da localização dos zeros da função de transferência em malha aberta do conjunto UPFC/POD. Quanto maior a distância entre o polo de interesse e o zero relacionado a ele, melhor a eficiência do controlador.

Dos sinais analisados, a velocidade angular (sinal remoto) apresentou resultados satisfatórios quanto ao amortecimento inserido ao modo interárea mas retirou amortecimento do modo local 1, prejudicando o comportamento dinâmico global do sistema. A corrente elétrica e o fluxo de potência ativa são sinais locais, mas ocorrem zeros próximos ao polo de interesse, limitando a inserção de amortecimento e, neste caso, uma localização fornecida pelo método dos resíduos pode não ser eficaz.

Portanto, conclui-se que a localização, o sinal de entrada e o ajuste dos parâmetros de controladores POD no sistema elétrico de potência são tarefas complexas que exigem alto grau de conhecimento do sistema a ser controlado e que o estudo do posicionamento e deslocamento dos polos e zeros da FTMA e da FTMF dos controladores fornecem informações valiosas para o controle do sistema elétrico de potência.

Dever ser ressaltado que os estudos aqui apresentados utilizando-se o dispositivo UPFC também são válidos para controladores ESPs e os demais FACTS existentes.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o suporte financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) no desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

Aboul-Ela, M., Sallam, A., McCalley, J. and Fouad, A. (1996). Damping controller design for power system oscillations using global signals, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**(2): 767–773.

Araujo, P. and Zanetta Jr., L. (2001). Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity, *International Journal of Electrical Power Energy Systems* **23**(3): 173–178.

Chang, Y. and Xu, Z. (2007). A novel svc supplementary controller based on wide area signals, *Electric Power Systems Research* **77**(12): 1569–1574.

Deckmann, S. and da Costa, V. (1994). A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**(2): 965–971.

Emami-Naeini, A. and Dooren, P. V. (1982). Computation of zeros of linear multivariable systems, *Automatica* **18**(4): 415–430.

Gyugyi, L. (1992). Unified power-flow control concept for flexible ac transmission systems, *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution* **139**(4): 323–331.

Jones, L. E. and Andersson, G. (1998). Application of modal analysis of zeros to power systems control and stability, *Electric Power Systems Research* **46**(3): 205–211.

Klein, M., Rogers, G. and Kundur, P. (1991). A fundamental study of inter-area oscillations in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **6**(3): 914–921.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill.

Martins, N. and Lima, L. (1990). 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* **5**(4): 1455–1469.

Martins, N., Pinto, H. and Lima, L. (1992). Efficient methods for finding transfer function zeros of power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **7**(3): 1350–1361.

Meng, Z. and So, P. (2000). A current injection upfc model for enhancing power system dynamic performance, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000.*, Vol. 2, pp. 1544–1549.

Mhaskar, U. and Kulkarni, A. (2006). Power oscillation damping using facts devices: modal controllability, observability in local signals, and location of transfer function zeros, *IEEE Transactions on Power Systems* **21**(1): 285–294.

Moura, R. F., Furini, M. A. and Araujo, P. B. (2010). Análise de resíduos e zeros da função de transferência de controladores suplementares de dispositivos facts upfc para diferentes sinais de entrada, *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito/MS, pp. 3369–3375.

Noroozian, N. and Andersson, G. (1995). Damping of inter-area and local modes by use of controllable components, *IEEE Transactions on Power Delivery* **10**(4): 2007–2012.

Watanabe, E. H., Barbosa, P. G., Almeida, K. C. and Taranto, G. N. (1998). Tecnologia facts- tutorial, *SBA Controle & Automação* **9**(1): 39–55.