



GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

**Ajuste Coordenado de Estabilizadores em Sistemas Elétricos de Grande Porte
Considerando Múltiplos Pontos de Operação**

Júlio César Rezende Ferraz (*)

Nelson Martins

Glauco Nery Taranto

ANEEL

CEPEL

COPPE/UFRJ

RESUMO

Este artigo apresenta uma nova metodologia para obtenção do ajuste coordenado dos ganhos de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) considerando múltiplos pontos de operação. O posicionamento parcial simultâneo de pólos através dos estabilizadores é formulado como um problema de mínimos quadrados não linear, cuja solução é obtida através do método de Newton com controle de passo, conceitos de método de continuação e de matriz inversa generalizada, além de algumas heurísticas e a informação fornecida pelos resíduos da função de transferência da malha de controle do ESP ($\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}$) associada aos autovalores críticos. Os resultados mostram o ajuste coordenado para vários pontos de operação aplicado a uma configuração-teste do sistema Sul-Sudeste Brasileiro: são ajustados simultaneamente 36 ESPs para 11 cenários.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade, resíduos de função de transferência, projeto coordenado, análise modal, estabilizadores.

1.0 - INTRODUÇÃO

O ajuste coordenado de estabilizadores é tema que tem sido bastante investigado [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. O interesse prático aumenta bastante quando o ajuste leva em consideração múltiplos pontos de operação [10, 11, 12, 13]. Este artigo trata deste último problema, descrevendo algoritmo simples e que se mostrou eficiente para sistemas de grande porte. Em [14] é mostrado que um dos problemas inerentes à utilização de posicionamento de pólos é exatamente a definição adequada da localização destes pólos: um posicionamento de pólos pode exigir valores muito elevados de ganhos, o que corresponde a uma solução sem viabilidade prática. Por outro lado, alterações nas posições dos pólos alocados, que em nada comprometem o desempenho dinâmico do sistema, podem resolver a questão. O problema inadequado, portanto, pode ser bem resolvido se for conhecido a priori qual o melhor local para posicionar os pólos do sistema. Desta forma cria-se um dilema: como saber qual a melhor solução de um problema antes de resolvê-lo? O posicionamento dos pólos críticos do sistema deve obedecer a critérios que levem em consideração a natureza de cada pólo e a sua sensibilidade ao aumento do ganho dos controladores. Os deslocamentos dos pólos devem ser estimados levando-se em consideração o efeito combinado das alterações paramétricas dos diversos estabilizadores.

2.0 - POSICIONAMENTO DE PÓLOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

O problema de posicionamento apresentado em [14] estabelecia como objetivo o posicionamento da parte real dos pólos através da variação do ganho (K) do ESP (1). Para calcular o incremento de ganho a cada iteração do algoritmo de Newton, utiliza-se a relação descrita em (2) e (3). Onde o resíduo da função de transferência ($\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}$) associada ao autovalor λ é dado por (4), sendo V_{ESP} o sinal de saída do ESP e V_{REF} a referência de tensão do sistema de excitação.

$$f(K) = \text{Re}[\lambda(K)] - \sigma_d \quad (1) \quad \Delta \text{Re}[\lambda] = \frac{d \text{Re}[\lambda]}{dK} \Delta K \quad (2)$$

$$\frac{d \text{Re}[\lambda]}{dK} = \text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \right] \quad (3) \quad R \left(\frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta V_{REF}}, \lambda \right) \quad (4)$$

Outra maneira de formular o problema é apresentada em (5), onde λ é o pólo de interesse para o valor corrente de ganho (K) e λ_d o seu valor desejado. Neste caso, o objetivo é calcular iterativamente o valor do ganho do ESP de forma que a posição do pólo seja a especificada, utilizando para isto as equações (6) e (7). A igualdade apresentada em (7) foi demonstrada em [23] sendo hoje bastante utilizada quando conveniente [14, 22, 24]. Desta forma, a equação a ser resolvida a cada iteração para o cálculo da variação de ganho ΔK é complexa, possuindo portanto parte real e parte imaginária. Como a compensação de fase é considerada constante e o ganho K é escalar real, a equação a ser resolvida não permite solução exata, sendo apresentada em (8).

$$f(K) = \lambda(K) - \lambda_d \quad (5) \quad \Delta\lambda = \frac{d\lambda}{dK} \Delta K \quad (6)$$

$$\frac{d\lambda}{dK} = R\left(\frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta V_{REF}}, \lambda\right) \quad (7) \quad \begin{bmatrix} \text{Re}[\Delta\lambda] \\ \text{Im}[\Delta\lambda] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \\ \text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \end{bmatrix} \Delta K \quad (8)$$

Isto significa dizer que não é possível, variando-se o ganho de apenas um ESP, garantir que o pólo λ tenha exatamente o valor desejado λ_d . Uma forma de tratar este problema é utilizar o conceito de matriz inversa generalizada [15, 16, 17]. O problema de especificação da posição do pólo pode ainda ser formulado de forma ligeiramente diferente. Reescrevendo a equação (6), onde λ_0 é o valor inicial do pólo λ , temos (9) e (10). Expandindo a equação (10) em parte real e parte imaginária, temos (11). Uma equação adicional, equação (12), surge pela imposição de um fator de amortecimento desejado ξ_d para o modo λ_d . Agregando as equações (11) e (12), e escrevendo-as em forma matricial, temos (13). Finalmente, substituindo a equação (7) em (13), temos o sistema apresentado em (14). O problema a ser resolvido é formulado em (15).

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{d\lambda}{dK} \Delta K \quad (9) \quad \sigma + j\omega = \sigma_0 + j\omega_0 + \text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K + \text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 + \text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K \\ \omega = \omega_0 + \text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \Delta K \end{cases} \quad (11) \quad \sigma + \frac{\xi_d}{\sqrt{1-\xi_d^2}} \omega = 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{Re}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \\ 0 & 1 & -\text{Im}\left[\frac{d\lambda}{dK}\right] \\ 1 & \frac{\xi_d}{\sqrt{1-\xi_d^2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ \omega \\ \Delta K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \omega_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13) \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{Re}\left[R\left(\frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta V_{REF}}, \lambda\right)\right] \\ 0 & 1 & -\text{Im}\left[R\left(\frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta V_{REF}}, \lambda\right)\right] \\ 1 & \frac{\xi_d}{\sqrt{1-\xi_d^2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ \omega \\ \Delta K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \omega_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$f(K, \lambda) = \xi(K, \lambda) - \xi_d \quad (15)$$

O cálculo da variação do ganho ΔK a cada iteração de Newton é feito utilizando (14), a partir da posição inicial do pólo e do valor desejado para o fator de amortecimento (ξ_d). A convergência ocorre quando o incremento de ganho ΔK causa uma variação no fator de amortecimento menor que uma tolerância especificada. Normalmente, deseja-se atender um determinado critério de fator mínimo de amortecimento, variando o mínimo possível a frequência do modo de oscilação. A seguir, é apresentado o algoritmo de Newton para o posicionamento de um pólo, através da variação do ganho de um ESP, sobre a reta de fator de amortecimento especificado.

ENTRADA: Sistema (A, B, C, D), valor inicial K do ganho do ESP e o amortecimento desejado ξ_d

SAÍDA: Valor final K do ganho do ESP

i. Inicia contador $i = 1$;

ii. **enquanto** ($\xi - \xi_d > \text{tolerância}$) **faça**

a. Calcule λ^i e o resíduo R^i da função de transferência $[\Delta V_{PSS}/\Delta V_{REF}]$ associado a λ^i para K^i ;

b. Calcule $K^{i+1} = K^i + \Delta K$ usando (14);

c. Faça $i = i + 1$

iii. **fim enquanto**

Existindo solução, será encontrado o ganho que impõe o fator de amortecimento ξ_d ao pólo crítico (Figura 1). A Figura 1 mostra a trajetória hipotética de convergência, mostrando a evolução da posição do pólo ao longo de 4 estágios.

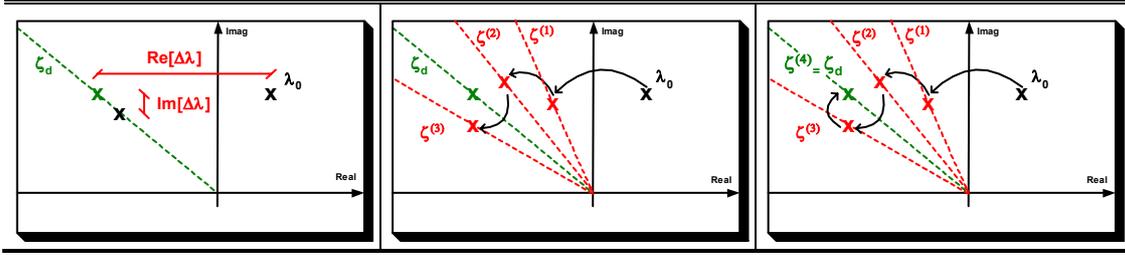


Figura 1 – Trajetória de convergência hipotética considerando 4 estágios.

O algoritmo não se altera para o caso onde existam mais ESPs e/ou pólos. Para o caso onde dois ESPs são utilizados para posicionar dois pólos sobre as retas de amortecimento constante ξ_1 e ξ_2 , o sistema de equações a ser resolvido para a obtenção do vetor de variação dos ganhos dos ESPs ($\underline{\Delta K}$) é mostrado em (16). Reescrevendo (16) na forma, temos(17).

$$\begin{cases}
 \sigma_1 - \left[\text{Re} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \text{Re} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \sigma_1^0 \\
 \omega_1 - \left[\text{Im} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \text{Im} \left[\frac{d\lambda_1}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \omega_1^0 \\
 \sigma_1 + \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} \omega_1 = 0 \\
 \sigma_2 - \left[\text{Re} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \text{Re} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \sigma_2^0 \\
 \omega_2 - \left[\text{Im} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_1} \right] \Delta K_1 + \text{Im} \left[\frac{d\lambda_2}{dK_2} \right] \Delta K_2 \right] = \omega_2^0 \\
 \sigma_2 + \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} \omega_2 = 0
 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & -\text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & -\text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \right] \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -\text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & -\text{Re} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \right] \\
 0 & 0 & 1 & 0 & -\text{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_1 \right) \right] & -\text{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_1 \right) \right] \\
 0 & 0 & 0 & 1 & -\text{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS1}}{\Delta V_{REF1}}, \lambda_2 \right) \right] & -\text{Im} \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS2}}{\Delta V_{REF2}}, \lambda_2 \right) \right] \\
 \hline
 1 & 0 & \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \sigma_1 \\
 \sigma_2 \\
 \omega_1 \\
 \omega_2 \\
 \frac{\Delta K_1}{\Delta K_2} \\
 0
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sigma_1^0 \\
 \sigma_2^0 \\
 \omega_1^0 \\
 \omega_2^0 \\
 \frac{\omega_2^0}{\Delta K_1} \\
 \frac{\omega_1^0}{\Delta K_2} \\
 0
 \end{bmatrix} \quad (17)$$

O sistema de equações em (17) apresenta matriz de coeficientes quadrada, mas o problema permite generalização para o caso retangular, expresso em (18), envolvendo m pólos a serem posicionados pela variação dos ganhos de n ESPs. A matriz de resíduos das funções de transferência $[\Delta V_{ESP}/\Delta V_{REF}]$ de cada ESP associadas aos pólos λ é representada por R .

$$\begin{bmatrix}
 \mathbf{I}_{(2^*m) \times (2^*m)} & \begin{bmatrix} \text{Re}[R]_{m \times n} \\ \text{Im}[R]_{m \times n} \end{bmatrix} \\
 \hline
 \mathbf{I}_{m \times m} & \text{diag}(\xi_{id})_{m \times m} \quad \mathbf{0}_{m \times n}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \text{Re}[\underline{\lambda}_m] \\
 \text{Im}[\underline{\lambda}_m] \\
 \underline{\Delta K}_n \\
 \mathbf{0}_m
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \text{Re}[\underline{\lambda}_m^0] \\
 \text{Im}[\underline{\lambda}_m^0] \\
 \mathbf{0}_m
 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{diag}(\xi_{id})_{m \times m} = \begin{bmatrix}
 \frac{\xi_{1d}}{\sqrt{1-\xi_{1d}^2}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\xi_{2d}}{\sqrt{1-\xi_{2d}^2}} & & \ddots & 0 \\
 \vdots & & \ddots & & \vdots \\
 0 & \dots & & \frac{\xi_{(m-1)d}}{\sqrt{1-\xi_{(m-1)d}^2}} & 0 \\
 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\xi_{md}}{\sqrt{1-\xi_{md}^2}}
 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Caso o número de ESPs seja diferente do número de pólos, faz-se uso da matriz inversa generalizada para o cálculo do vetor de variação de ganhos em (18). Desta forma, o vetor $\underline{\Delta K}$ terá norma mínima no caso de sistemas sub-determinados, onde há um número infinito de soluções. No caso de sistemas sobre-determinados, não há solução exata para $\underline{\Delta K}$, mas a norma do vetor de erro será a menor possível visto ser este um problema de mínimos quadrados.

3.0 - AJUSTE COORDENADO DE ESPs CONSIDERANDO MÚLTIPLOS CENÁRIOS

O algoritmo descrito na Seção II pode ser usado também no ajuste coordenado considerando múltiplos cenários. O objetivo é ajustar os ganhos dos ESPs do sistema de forma que os pólos críticos, em todos os pontos de operação, possuam fator de amortecimento adequado. O sistema (20) pode ser reduzido para o sistema expresso por (22), com uma matriz cheia de $(2m')$ linhas e (n) colunas. No cálculo do vetor de variação de ganhos $\underline{\Delta K}$ faz-se uso da matriz inversa generalizada [15, 16, 17].

$$\begin{bmatrix}
 \mathbf{I}_{(2^*m') \times (2^*m')} & \begin{bmatrix} \text{Re}[R]_{m' \times n} \\ \text{Im}[R]_{m' \times n} \end{bmatrix} \\
 \hline
 \mathbf{I}_{m' \times m'} & \text{diag}(\xi_{id})_{m' \times m'} \quad \mathbf{0}_{m' \times n}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \text{Re}[\underline{\lambda}_{m'}] \\
 \text{Im}[\underline{\lambda}_{m'}] \\
 \underline{\Delta K}_n \\
 \mathbf{0}_{m'}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \text{Re}[\underline{\lambda}_{m'}^0] \\
 \text{Im}[\underline{\lambda}_{m'}^0] \\
 \mathbf{0}_{m'}
 \end{bmatrix} \quad (20) \quad m' = m \cdot q \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix}
 \text{Re}[R]_{m' \times n} \\
 \text{diag}(\xi_{id})_{m' \times m'} \quad \text{Im}[R]_{m' \times n}
 \end{bmatrix}
 \underline{\Delta K}_n
 =
 \begin{bmatrix}
 \text{Re}[\underline{\lambda}_{m'}^0] \\
 \text{diag}(\xi_{id})_{m' \times m'} \quad \text{Im}[\underline{\lambda}_{m'}^0]
 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Os algoritmos apresentados até aqui têm como objetivo o posicionamento dos pólos de interesse de forma que seus fatores de amortecimento sejam aproximadamente iguais aos especificados. Como já apontado, o desconhecimento do melhor local para posicionamento pode levar ao projeto de controladores inviáveis (ganhos extremamente elevados). Nesta seção é apresentada, como forma mais eficiente de coordenação, a divisão em múltiplos sub-problemas de alocação, cada qual com fator de amortecimento crescente e sendo o último sub-problema (aqui também denominado estágio) com o vetor de fatores de amortecimento desejados. Ao invés de se especificar o local desejado para cada um dos pólos críticos e em seguida efetuar o posicionamento destes pólos, os ganhos de todos os ESPs são inicialmente aumentados de acordo com incrementos pré-especificados. Inicialmente, para uma variação específica nos ganhos dos ESPs (por exemplo, $\Delta K_1 = \Delta K_2 = \dots = \Delta K_n = 1$), estima-se a variação de posição dos pólos do sistema utilizando (23) e armazena-se o fator de amortecimento de cada um deles. Este vetor de fatores de amortecimento passa a ser a função objetivo do método de Newton naquele estágio.

$$\underline{\Delta\lambda} = \left[R \left(\frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta V_{REF}}, \underline{\lambda} \right) \right] [\underline{\Delta K}] \quad (23)$$

A estimativa de posição dos múltiplos pólos calculada desta forma matricial leva em consideração as influências dos diversos ESPs. Esta estimativa linear é adotada como a alocação desejada pelo algoritmo de Newton aplicado à solução da equação normal do problema retangular descrito em (22), para posicionamento parcial de múltiplos pólos, e que produz um novo conjunto de ganhos para os ESPs. Concluído este primeiro estágio de cálculo de ganhos, estes são novamente acrescidos dos incrementos pré-especificados, iniciando-se assim o segundo estágio, ou seja, a solução do segundo sub-problema. Uma nova variação de todos os ganhos é feita, em seguida é estimada uma nova posição e assim por diante. Este processo, do tipo estimativa-correção, é análogo ao realizado por um método de continuação [19], sendo repetido diversas vezes até que os modos de interesse tenham todos um fator de amortecimento mínimo ou até que os ganhos dos ESPs atinjam o valor máximo (Figura 2).

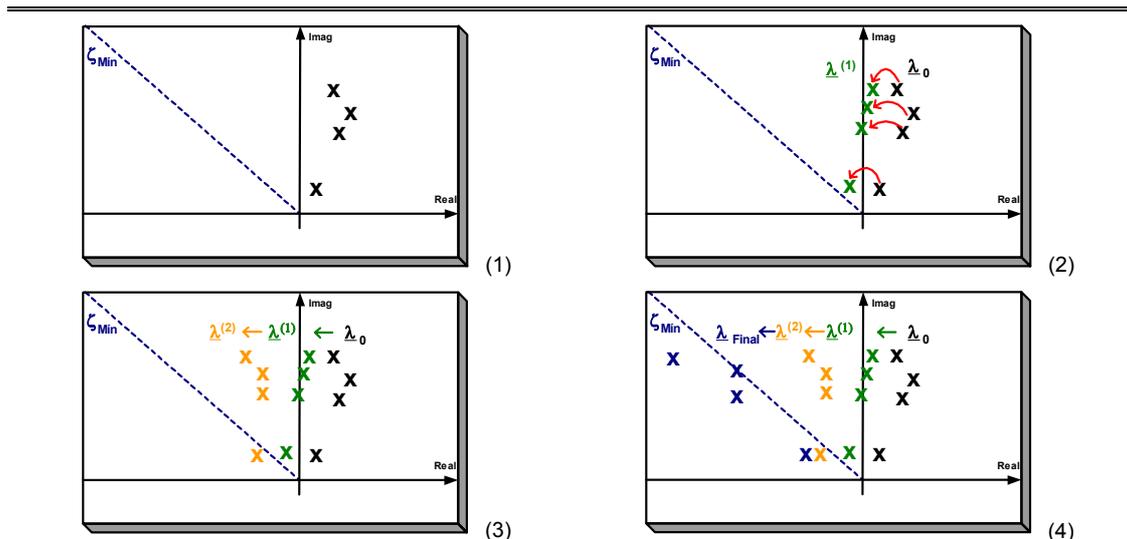


Figura 2 – Posicionamento utilizando resíduo de funções de transferência.

A utilização do procedimento descrito anteriormente exige que sejam estipulados o mínimo fator de amortecimento dos pólos de interesse (não necessariamente igual para todos os pólos) e o valor máximo para os ganhos dos ESPs (não necessariamente igual para todos os ESPs). Além destes, é necessária ainda a determinação de alguns parâmetros:

1. **Valor inicial dos ganhos:** Um valor inicial muito pequeno acarreta num maior número de estimativas e posicionamentos para que se obtenha o fator de amortecimento desejado (ζ_{Min}) para todos os pólos.
2. **Valor do incremento nos ganhos:** Este valor determina o quão distante da posição inicial estará a estimativa para posicionamento. Para valores elevados de incrementos, as estimativas estarão mais afastadas das posições iniciais e o número de estágios tende a ser menor. Por outro lado, o posicionamento dos pólos é dificultado pelo fato da estimativa estar muito afastada do valor inicial. Uma solução de compromisso seria alterar o valor do incremento ao longo do processo: valores maiores no início e menores a medida que o menor fator de amortecimento do sistema esteja próximo do valor final desejado.
3. **Quantos e quais os pólos a serem monitorados/posicionados:** A seleção dos pólos de interesse é feita no início de cada estágio: verifica-se quais os n pólos com menor fator de amortecimento em cada ponto de operação. É dado início ao processo de posicionamento caso o menor fator de amortecimento verificado esteja abaixo do mínimo estipulado. Após cada variação de ganho

os novos pólos são calculados através de métodos de solução parcial (por exemplo, utilizando os métodos SADPA [20], SAMDP [21] ou Rayleigh Quotient Iteration [18]). A solução completa do problema de autovalores é realizada após um determinado número de incremento dos ganhos (estágios), de forma a assegurar o monitoramento dos modos com menor fator de amortecimento.

É importante notar que quanto maior o número de pólos a serem posicionados, maior será o sistema a ser resolvido na etapa de posicionamento. Por outro lado, se poucos pólos são monitorados será necessário um número maior de cálculo de todos os pólos para se certificar que os aqueles escolhidos são efetivamente os mais críticos. Outro fato a ser levado em consideração é o tratamento dado a pólos que já tem fator de amortecimento acima do mínimo. Se, por exemplo, são monitorados dez pólos e dois deles atingem um fator de amortecimento acima de 30 %, torna-se desnecessário posicioná-los de forma a aumentar seu fator de amortecimento. Pode ser utilizada, para este caso, como estimativa de posicionamento a própria posição atual (o que tende a deixar pólo na mesma posição). Outra estratégia que se provou adequada é deixar de monitorar os pólos com fator de amortecimento maior que, por exemplo, 30 %. Os algoritmos apresentados neste artigo baseiam-se fundamentalmente nos resíduos para determinar como os pólos serão movidos de forma a aumentar o amortecimento das oscilações. O esforço de controle é dividido entre os controladores instalados no sistema, de forma que aqueles com maior capacidade de amortecer as oscilações têm maiores ganhos. Caso alguns dos ESPs fiquem com ganhos máximos, e que necessitem ser reduzidos, pode-se usar mínimos quadrados ponderados, aumentando a ponderação naqueles estabilizadores aos quais deseja-se elevar o ganho. Outra possibilidade é reduzir os limites máximos de ganho destes ESPs, o que fará com que o algoritmo de mínimos quadrados não linear acabe por elevar o ganho médio dos demais ESPs. Os fatores citados anteriormente influenciam a resposta final do processo por serem determinantes no cálculo dos resíduos. Por exemplo, para diferentes valores de ganhos iniciais, diferentes resíduos serão obtidos e conseqüentemente diferentes ganhos serão obtidos. A diferença depende do sistema e é definida pela forma como os resíduos variam de um ponto de operação para outro. O sistema admite inúmeras soluções, uma boa parte das quais apresentam viabilidade prática. Investigação adicional é necessária para a inclusão de índices de desempenho que considerem robustez a perturbações diversas, sem elevação excessiva do custo computacional.

4.0 - RESULTADOS (SISTEMA TESTE COM 616 BARRAS – 11 CENÁRIOS)

O sistema teste é uma configuração do sistema interligado Sul-Sudeste com 616 barras, 995 circuitos e 50 geradores [24]. Outros 49 geradores de menor porte foram modelados como impedâncias negativas. O caso base corresponde a situação de carga pesada de 1987, com valor alto de fluxo de potência do Sul para o Sudeste. Foram modelados reguladores automáticos de tensão em todos os geradores do sistema com os parâmetros descritos na Tabela 1. Esta é uma representação simplificada, de primeira ordem, de excitatrizes estáticas com ganho moderado. Este sistema é instável, possuindo oscilações eletromecânicas sustentadas em seu caso base e crescentes nos outros pontos de operação.

Os resultados apresentados mostram a capacidade do método proposto em lidar com sistemas de grande porte em múltiplos cenários. Foi definido um critério de instalação de ESPs levando em consideração inicialmente o tamanho da máquina. Assim, foram instalados ESPs em todas as máquinas com potência superior a 250 MVA (cerca de 50 % do total). Em seguida foram instalados ESPs nas máquinas indicadas pelos resíduos associados aos modos de oscilação com fator de amortecimento inferior a 10 %. Desta forma chegou-se ao número de 36 ESPs instalados, ou seja, aproximadamente 70 % das máquinas têm estabilizadores. Vale notar que este número foi encontrado com o interesse maior de obter um problema de grande porte e de difícil solução, para avaliar com mais rigor o método proposto. Sem dúvida, a instalação de mais estabilizadores traria ainda maior facilidade na obtenção da solução. Com a utilização de excitatrizes estáticas, parâmetros típicos para o ajuste de fase do ESP são usados (Tabela 2).

Tabela 1 – Parâmetros dos reguladores de tensão.

Ta (s)	Ka (pu/pu)
0,050	$\frac{T'_{d0}}{2T_a}$

Tabela 2 – Parâmetros relativos ao ajuste de fase dos ESPs.

Nº de blocos	Tw (s)	Tn (s)	Td (s)
2	3	0,100	0,010

Tabela 3 – Pontos de operação analisados.

Caso	Descrição	Caso	Descrição
1	Caso Base	6	Retirada de 5 circuitos da malha de 138 kV no RJ
2	Aumento de 5 % na carga	7	Retirada de 5 circuitos da malha de 230 kV no RS
3	Redução de 5 % na carga	8	Retirada de 5 circuitos da malha de 345 kV em São Paulo
4	Aumento de 10 % na carga	9	Retirada de 5 circuitos da malha de 500 kV no Sudeste
5	Redução de 10 % na carga	10	Retirada de 5 circuitos da malha de 440 kV em São Paulo
		11	Retirada de 10 circuitos da malha de 440 kV em São Paulo

As cargas são representadas por impedâncias constantes. O sistema será avaliado em 11 pontos de operação distintos (Tabela 3). Os pontos de operação foram definidos de forma a proporcionarem modos de oscilação eletromecânica de mesma natureza com diferentes valores de um ponto de operação para outro. Desta forma, foram realizadas 4 alterações de carregamento em todo o sistema e diversos desligamentos de circuitos. Foi retirado um número elevado de circuitos (5 ou 10) da região Sul-Sudeste. A intenção não foi simular casos reais, mas produzir casos de estabilização difícil. Por isso, não foram verificadas eventuais violações de tensão ou fluxo em linhas nos casos de contingência.

A Figura 3 mostra o mapa de pólos e zeros para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$ para todos os 11 pontos de operação. A Figura 4 mostra o menor fator de amortecimento no sistema supondo que os ganhos de todos os ESPs são iguais. Variando os ganhos dos ESPs desde zero (malha aberta) até 75 pu/pu, pode ser verificado que apenas uma pequena faixa de valores permite que o sistema tenha o desempenho desejado (de 19 pu/pu a 33 pu/pu). Deve-se notar, entretanto, que o valor de 19 pu/pu está muito próximo dos valores máximos utilizados na prática para o conjunto RAT-ESP utilizado. Quanto maior o valor do ganho, maior propensão a problemas relacionados a transitórios adversos e maior a possibilidade de problemas relacionados com dinâmicas não modeladas, por isso, um ajuste com todos os ganhos no máximo é indesejado.

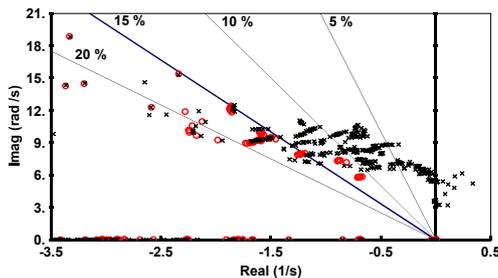


Figura 3 – Mapa de pólos (x) e zeros (o) para a função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$ para os 11 pontos de operação.

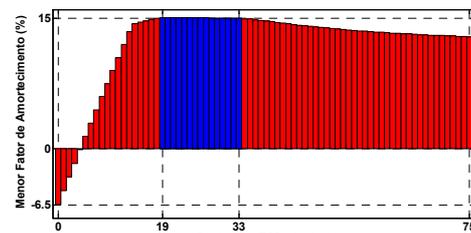


Figura 4 – Relação entre ganho nos ESPs e menor fator de amortecimento.

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os dados relativos ao ajuste coordenado. São monitorados 36 pólos (número igual ao de ESPs) para cada ponto de operação. O valor máximo admitido de ganho é 20 pu/pu e adota-se um ganho inicial de 5 pu/pu para todos os ESPs. Após 7 incrementos de ganho (7 estágios do processo de ajuste coordenado), pode-se afirmar que nenhum modo de oscilação no sistema, para os 11 pontos de operação, tem fator de amortecimento inferior a 15 %. A Figura 5 apresenta o menor fator de amortecimento em cada uma dos estágios do processo. Em malha aberta (ponto 1), há um modo de oscilação eletromecânica com fator de amortecimento igual a $-6,4\%$ (o ponto 1 corresponde ao caso em que todos os ESPs têm ganho nulo). O ponto 2, onde todos os ESPs têm o ganho inicial de 5 pu/pu, apresenta um modo oscilação com fator de amortecimento igual a $1,4\%$. No ponto 9, no fim do ajuste, o modo menos amortecido apresenta $\xi = 15,1\%$ (considerando-se todos os cenários). A Figura 6 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs durante a coordenação dos ganhos.

Tabela 4 – Parâmetros para ajuste coordenado de ganhos dos ESPs.

ξ_{MIN}	K_{MAX}	Pólos Monitorados em Cada Cenário	K_{INI}	ΔK para Estimativa de Posicionamento	Estágios
15 %	20 pu/pu	36	5	2 pu/pu	7

Tabela 5 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ	Caso
Sem ESPs	0,8294	-6,4	4
Com ESPs	1,2112	15,1	4

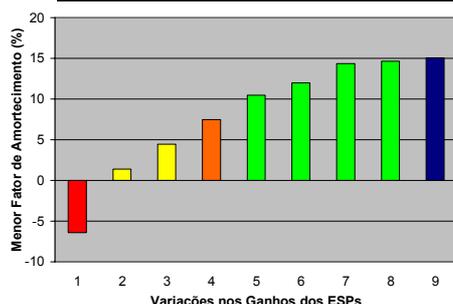


Figura 5 – Evolução do menor fator de amortecimento.

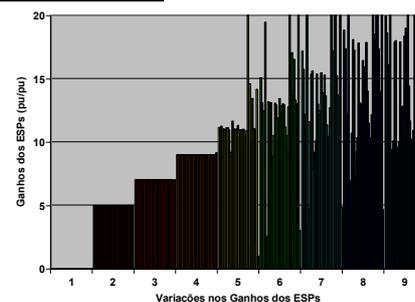


Figura 6 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

Os resultados são apresentados também para o caso em que se reduz drasticamente o número de pólos monitorados (de 36 para 3). Adota-se os valores iniciais dos ganhos iguais a 90 % dos valores daqueles ganhos obtidos no ajuste coordenado de apenas um cenário: o caso base (Tabela 3 e Tabela 6). Após 3 variações de ganho (estágios) pode-se garantir que nenhum modo de oscilação no sistema tem fator de amortecimento inferior a 15 % (Tabela 7).

Tabela 6 – Parâmetros para ajuste coordenado de ganhos dos ESPs.

ξ_{MIN}	K_{MAX}	Pólos Monitorados em Cada Cenário	K_{INI}	ΔK para Estimativa de Posicionamento	Estágios
15 %	20 pu/pu	3	90 % dos valores obtidos na solução para o Caso Base	2 pu/pu	3

Tabela 7 – Oscilação com menor fator de amortecimento.

	Modo Com Menor Fator de Amortecimento		
	Freq. (Hz)	ξ	Caso
Sem ESPs	0,8294	- 6,4	4
Com ESPs	0,8150	15,1	4

A Figura 7 apresenta a evolução do menor fator de amortecimento verificado em cada um dos estágios do processo. No ponto 5, ao final do ajuste, o menor fator de amortecimento é 15,1 %. A Figura 8 mostra a evolução dos ganhos dos ESPs durante a coordenação dos ganhos. Neste novo ajuste os ganhos variam de 10 pu/pu a 20 pu/pu; o ajuste obtido anteriormente tinha ganhos entre 6 pu/pu e 20 pu/pu. Os ganhos obtidos neste ajuste são distintos daqueles obtidos para o caso considerando 36 pólos monitorados, entretanto, o desempenho desejado é alcançado da mesma forma.

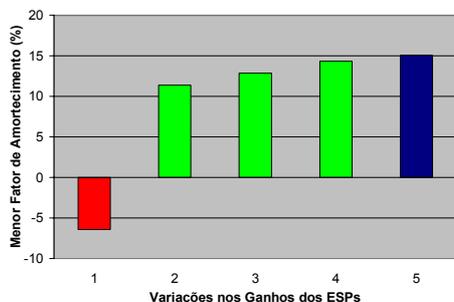


Figura 7 – Evolução do menor fator de amortecimento.

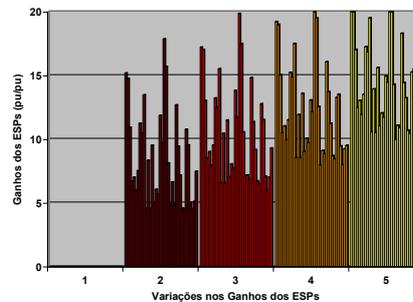


Figura 8 – Evolução dos ganhos dos ESPs.

A Figura 9 mostra, em ordem crescente, os ganhos obtidos em cada ajuste: todos os ganhos iguais a 19 pu/pu e ajuste coordenado monitorando 3, 10 ou 36 pólos por cenário. A descrição dos parâmetros adotados para o ajuste coordenado com 10 pólos monitorados é omitido por limitação de espaço. A Figura 10 mostra o ganho médio de cada ajuste. Nos três ajustes realizados os ganhos médios foram menores que a solução sem coordenação, com a vantagem de apenas alguns ESPs terem ganho alto (20 pu/pu). O objetivo do ajuste coordenado proposto não é encontrar a solução com o menor ganho médio. O esforço computacional para isso, envolvendo intensiva utilização de técnicas de otimização, seria muito grande. Encontrar uma solução robusta, ou seja, que garanta o desempenho em múltiplos pontos de operação, com os ganhos tendo valores menores que o máximo, é suficiente.

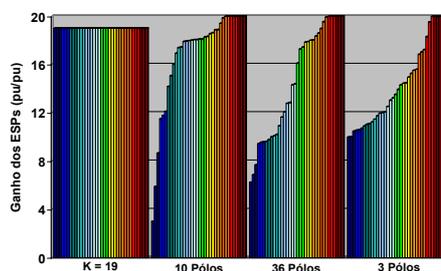


Figura 9 – Ganhos dos ESPs em cada análise para obtenção de fator de amortecimento Mínimo de 15 %.

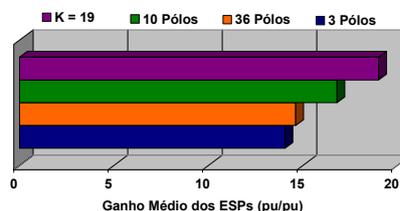


Figura 10 – Ganho médio dos ESPs para cada análise.

Este sistema teste foi avaliado numa implementação da metodologia proposta em Matlab e executada num microcomputador Pentium 4 de 3GHz com 512 MB de memória RAM. Cada solução completa do problema de autovalores para cada cenário (o sistema possui 408 estados) utilizando QR é obtida em cerca de 4,5 segundos. O sistema resolvido durante processo de posicionamento simultâneo de múltiplos pólos em diversos cenários, equação (23), possui ordem 792x36 (36 pólos, 11 cenários, 36 ESPs), 220x36 (10 pólos, 11 cenários, 36 ESPs) ou 66x36 (3 pólos, 11 cenários, 36 ESPs). Cada solução deste sistema utilizando matriz inversa generalizada foi obtida em menos de 0,1 segundo (para

o caso de maior dimensão). Por outro lado, o armazenamento e a manipulação das matrizes associadas aos diversos cenários não foi feito com o objetivo de alcançar eficiência computacional, levando o tempo total das simulações durar, em ambiente Matlab, de 1 hora (3 pólos monitorados) até 6,5 horas (36 pólos monitorados). Apesar da diferença entre os ganhos médios e o tempo de processamento, o desempenho dos quatro ajustes é similar quanto ao posicionamento dos pólos, como pode ser visto nas Figuras que seguem (Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14). Desta forma, três ajustes obtidos de forma coordenada conseguem desempenho equivalente com um esforço menor de controle (ganhos menores). A Figura 15 mostra os pólos de malha aberta, os pólos com ESPs (ajuste monitorando 3 pólos) e os zeros da função de transferência matricial $[\Delta\omega/\Delta V_{REF}]_{36 \times 36}$. A Figura 16 apresenta comparação do comportamento da potência ativa terminal em Itaipu após distúrbio em degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão, na ausência de ESPs. O ponto de operação é o número 4 e o ajuste dos ESPs é o de menor ganho médio (ajuste monitorando 3 pólos por ponto de operação).

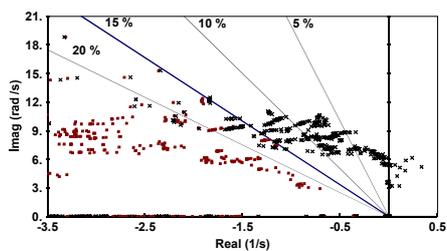


Figura 11 – Sistema com malha aberta (preto) e com todos os ganhos iguais a 19 pu/pu (marrom).

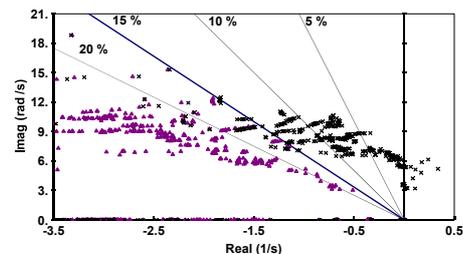


Figura 12 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 36 pólos em cada ponto de operação (roxo).

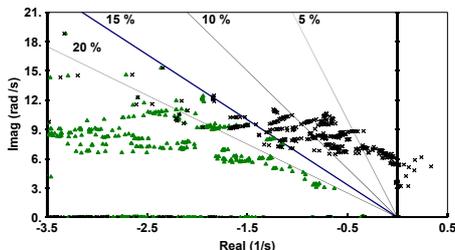


Figura 13 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 10 pólos em cada ponto de operação (verde).

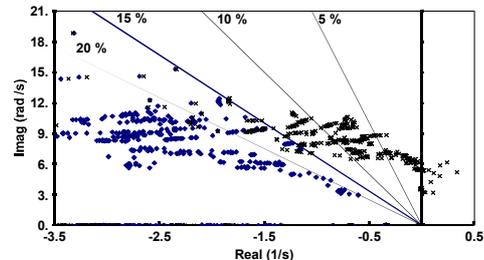


Figura 14 – Sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 3 pólos em cada ponto de operação (azul).

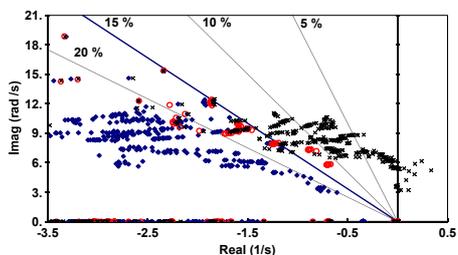


Figura 15 – Pólos do sistema com malha aberta (preto) e com ajuste coordenado monitorando 3 pólos (azul) e os zeros (vermelho).

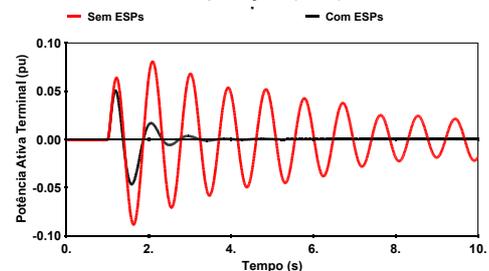


Figura 16 – Variação de potência ativa terminal em Itaipu após degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão.

5.0 - CONCLUSÕES

A metodologia descrita neste artigo mostrou-se eficiente na coordenação dos ganhos dos ESPs do sistema. Como vários cenários operativos são considerados simultaneamente, a estabilização obtida é robusta. Os resultados obtidos indicam que a duração de um estudo de coordenação para estudos de sistemas de grande porte pode ser drasticamente reduzida utilizando a metodologia proposta. No ajuste convencional, os ESPs são ajustados de forma seqüencial para cada ponto de operação. Por outro lado, no método proposto, todos os ESPs são ajustados simultaneamente levando em consideração vários pontos de operação. O objetivo do ajuste coordenado proposto não é encontrar uma solução ótima, que seria computacionalmente cara. Encontrar uma solução robusta, ou seja, que garanta o desempenho em múltiplos pontos de operação, com os ganhos tendo valores menores que o máximo, é suficiente na prática. A solução final é obtida através de melhorias sucessivas de soluções anteriores, utilizando uma direção de avanço que leva em consideração a influência de cada controlador na variação da posição de cada um dos pólos. Esta direção é obtida através da informação de sensibilidade modal, contida nos resíduos da função de transferência da malha de controle associados aos pólos de interesse. O método proposto, portanto, extrai informações relevantes do sistema durante todo o processo. Os resultados apresentados envolveram somente ESPs, mas a metodologia é genérica, permitindo o ajuste

coordenado e simultâneo de ESPs e PODs de equipamentos FACTS e elos CCAT. A melhor adequação do ajuste de fase de cada ESP (baseado no GEP do gerador associado) certamente resultaria numa redução do ganho médio dos ESPs, para os diversos casos analisados. O uso de ponderação traria também benefícios de redução de ganho ao se especificar amortecimentos menores para os pólos relativos às condições de contingência (por exemplo, contingência N-1 com $\zeta_{Min} = 10\%$, contingência N-1 com $\zeta_{Min} = 10\%$, etc.). A utilização de ponderação dentro de um mesmo cenário faria com os ganhos dos ESPs ficassem mais próximos ao valor médio.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) H. B. Gooi, E. F. Hill, M. A. Mobarek, D. H. Thorne and T. H. Lee, "Coordinated Multi-machine Stabilizer Settings without Eigenvalue Drift", In: *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, USA, 1981.
- (2) A. Doi and S. Abe, "Coordinated Synthesis of Power System Stabilizers in Multi-machine Power Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 103, no. 6, pp. 1473-1479, 1984.
- (3) S. Elangovan and C. M. Lim, "Efficient Pole-Assignment Method for Designing Stabilizers in Multi-machine Power Systems". In: *IEE Proceedings*, vol. 134, no. 6, pp. 383-384, 1987.
- (4) J. H. Chow and J. J. Sanchez-Gasca, "Pole Placement Designs of Power System Stabilizers", In: *Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting*, Portland, USA, 1988.
- (5) A. S. Costa, F. D. Freitas and A. S. Silva, "Design of Decentralized Controllers for Large Power Systems Considering Sparsity", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 144-152, 1997.
- (6) P. Pourbeik and M. J. Gibbard, "Simultaneous Coordination of Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in a Multi-machine Power System for Enhancing Dynamic Performance", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 473-479, 1998.
- (7) J. J. Sanchez-Gasca, "Coordinated Control of Two FACTS Devices for Damping Interarea Oscillations", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 428-434, 1998.
- (8) M. J. Gibbard, D. J. Vowles and P. Pourbeik, "Interactions between, and Effectiveness of, Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in Multi-machine Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 748-755, 1999.
- (9) CIGRE Task Force 38.02.16 – Impact of Interactions Among Power System Controls. CIGRE Technical Brochure no. 166, Paris, August 2000.
- (10) M. J. Gibbard, "Robust Design of Fixed-Parameter Power Stabilizers Over a Wide Range of Operating Conditions", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 794-800, 1991.
- (11) K. Yoshimura and N. Uchida, "Multi Input ESP Optimization Method For Practical Use by Considering Several Operating Conditions", In: *Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting*, New York, USA 1999.
- (12) A. L. B. Bomfim, G. N. Taranto and D. M. Falcão, "Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 163-176, 2000.
- (13) L. C. Zanetta Jr., J. J. Da Cruz, "An Incremental Approach To The Coordinated Tuning of Power Systems Stabilizers Using Mathematical Programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 895-902, 2005.
- (14) J. C. R. Ferraz, N. Martins, G. N. Taranto, "Simultaneous Partial Pole Placement for Power System Oscillation Damping Control". In: *Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting 2001*, Columbus, USA, January 2001.
- (15) R. Penrose, "A Generalized Inverse for Matrices", In: *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 51, part 3, pp. 406-413, 1955.
- (16) C. L. Lawson and R. J. Hanson, *Solving Least Squares Problems*, 1st ed. USA, Prentice-Hall Inc., 1974.
- (17) W. L. Brogan, *Modern Control Theory*. Prentice Hall, 1991.
- (18) G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 2nd Edition, The John Hopkins University Press, USA, 1989.
- (19) R. Seydel, *From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis*. 2 ed. New York, NY, Elsevier Science Publishing Co., 1988.
- (20) J. Rommes, N. Martins, "Efficient Computation of Transfer Function Dominant Poles Using Subspace Acceleration", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1218-1226, 2006.
- (21) J. Rommes, N. Martins, "Efficient Computation of Multivariable Transfer Function Dominant Poles Using Subspace Acceleration", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1471-1483, 2006.
- (22) F. L. Pagola, I. J. Pérez-Arriaga and G. C. Verghese, "On Sensitivities, Residues and Participations: Applications to Oscillatory Stability Analysis and Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 278-285, 1989.
- (23) V. Arcidiacono, E. Ferrari, R. Marconato, J. Dos Ghali and D. Grandez, "Evaluation and Improvement of Electromechanical Oscillation Damping by Means of Eigenvalue-Eigenvector Analysis: Practical Results in the Central Peru Power System", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, pp. 769-778, 1980.
- (24) N. Martins and L. T. G. Lima, "Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small Signal Electromechanical Stability Problems", *IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, Publication 90 TH 029203 PWR no.4, 1989.