

## PROJETO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIASPELO MÉTODO DE POSICIONAMENTO REGIONAL DOS POLOS MODIFICADO

**Brunalice M. Mercer    Jonas R. Pesente**

**Unioeste    Itaipu    FPTI\***

**Brasil**

### RESUMO

O estudo da estabilidade à pequenas perturbações visa analisar a presença de oscilações pouco amortecidas, (relacionadas às baixas frequências em Sistemas de Energia Elétrica), e corrigi-las por meio da inserção de sinais estabilizadores no sistema. Para este cenário, o desenvolvimento de técnicas para o projeto de controladores que amortecem estas oscilações é constantemente estudado em sistemas elétricos de potência. Entre as técnicas normalmente utilizadas, pode-se citar o método do lugar das raízes, a compensação de fase no domínio da frequência, e o posicionamento regional de pólos no espaço de estados. Neste trabalho, uma versão modificada do método de posicionamento regional dos polos para a modelagem do Estabilizador do Sistema de Potência – ESP, (também referido como PSS, do inglês *Power System Stabilizer*) é desenvolvida. A modelagem do sistema foi realizada considerando a compatibilização das equações do modelo de estados gerado pelo aplicativo de análise à pequenas perturbações do CEPEL (PacDyn), para que os ajustes obtidos fossem testados no aplicativo de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM), também do CEPEL. Tal compatibilização foi feita implementando algoritmos que permitissem a representação do modelo no aplicativo MatLab<sup>TM</sup>. O sistema em questão representa as máquinas síncronas pelo modelo de 5ª ordem, incluindo as equações diferenciais dos enrolamentos amortecedores, de forma a adicionar precisão às análises realizadas. O modelo das unidades de Itaipu foi inserido em uma topologia de um sistema máquina barra infinita, suficiente para a análise dos modos de interesse. A metodologia proposta é baseada no método numérico de Newton Raphson e na propriedade da sensibilidade dos autovalores, de onde foi possível desenvolver algoritmos para a parametrização do ESP. Diferente da metodologia tradicional, não foi estabelecido o valor específico para o modo crítico do sistema. Em contrapartida, o método realiza a maximização da parte real do modo crítico na direção do semiplano esquerdo. Para encontrar os parâmetros do ganho e do zero do estabilizador, foi inicialmente considerado o universo de valores industrialmente adotados. A busca do valor ótimo do ganho e do zero considera a direção obtida da função da sensibilidade do autovalor crítico baseada no método de Newton Raphson. Por fim, foi realizada a avaliação dos valores finais dos parâmetros de forma a atestar o amortecimento do modo crítico. É válido ressaltar que um equacionamento adicional é inserido no algoritmo principal para que a avaliação destes parâmetros possa ser realizada para diferentes condições operativas do sistema.

### PALAVRAS CHAVES

Estabilizadores de Sistemas de Potência; Estabilidade à Pequenas Perturbações; Sensibilidade dos Autovalores; Posicionamento regional de polos

\*Este trabalho foi apoiado pela Universidade Corporativa Itaipu (UCI), através da Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI)

## 1. INTRODUÇÃO

Diversas metodologias de projeto podem ser aplicadas para a sintonia do estabilizador do sistema de potência, comumente derivados dos métodos de compensação de fase, LQR (*Linear Quadratic Regulator*), LMI (*Linear Matrix Inequality*). Neste trabalho aborda-se o método de posicionamento regional de polos, que pode ser desenvolvido tanto no domínio da frequência quanto no espaço de estados. A segunda abordagem, fazendo uso da sensibilidade, foi discutida em [1,2,3], e tem, como ideia principal, definir os parâmetros do controlador de forma que o valor da parcela real do modo controlado atinja amortecimento superior a 5%.

Neste trabalho, a metodologia de posicionamento de polos foi modificada para obtenção de uma melhor resposta dinâmica do modo crítico, ou seja, para que o maior fator de amortecimento fosse obtido. Para atingir este objetivo um algoritmo foi desenvolvido combinando técnicas de sensibilidade dos autovalores e Newton Raphson para encontrar os parâmetros do ESP através de um processo iterativo.

Outro aspecto importante do trabalho é o desenvolvimento de um modelo em MatLab<sup>TM</sup> compatibilizado ao modelo correspondente do sistema elétrico em PacDyn. Este modelo possibilita a parametrização do ESP aplicável às ferramentas do CEPEL para análises mais específicas do sistema elétrico analisado.

Para comprovar a eficiência da metodologia proposta e do modelo reproduzido em MatLab<sup>TM</sup>, são apresentados os resultados estáticos e dinâmicos do sistema modelado com a inserção do ESP devidamente parametrizado no ANATEM e no PacDyn. Para tal é utilizada a topologia máquina barra-infinita com características elétricas semelhantes às das máquinas de Itaipu.

## 2. COMPATIBILIZAÇÃO DO MODELO EM PACDYN E MATLAB<sup>TM</sup>

A metodologia de posicionamento de polos para o projeto do ESP desenvolvida foi implementada e testada em MatLab<sup>TM</sup>. Contudo, a ferramenta acreditada para avaliação da estabilidade à pequenas perturbações nas empresas do setor elétrico brasileiro é o PacDyn, de forma que demandou-se a compatibilização do equacionamento nos dois aplicativos.

Para o caso base do PacDyn, no qual está inserido o modelo de unidade geradora de 5ª ordem e do sistema de excitação contendo o regulador automático de tensão (RAT) e o ESP, o sistema resultante é composto por oito equações, cinco da máquina, uma do RAT, e duas do ESP, que contém o seguinte conjunto de variáveis de estados:

- $E_q''$  - Tensão sub-transitória no eixo de quadratura do rotor;
- $E_d''$  - Tensão sub-transitória no eixo direto do rotor;
- $E_q'$  - Tensão transitória no eixo de quadratura do rotor;
- $\omega$  - Velocidade angular do rotor
- $\delta$  - Ângulo interno do rotor;
- $E_{fd}$  - Tensão de campo da máquina;
- $x_{0002}$  - Variável auxiliar de saída do *Washout*; e
- $x_{0003}$  - Variável auxiliar de saída do bloco de compensação do ESP.

As Equações (1) à (8) definem as oito equações linearizadas, incluindo-se a incorporação das variáveis algébricas correspondentes às condições de fronteira. A obtenção da matriz de estados demanda a eliminação de tais variáveis algébricas. É importante citar que o processo de linearização, necessário às

análises de pequenas perturbações, é implicitamente aplicado à elas, e seu desenvolvimento não será abordado no escopo deste trabalho.

$$\Delta \dot{E}_q'' = \frac{1}{T_{d0}''} [-\Delta E_q'' + \Delta E_q' - (X_d' - X_d'')\Delta I_d] + \frac{X_d'' - X_l}{X_d' - X_l} \times \Delta \frac{dE_q'}{dt} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{E}_d'' = \frac{1}{T_{d0}''} [-\Delta E_d'' + (X_q - X_q'')\Delta I_q] \quad (2)$$

$$\Delta \dot{E}_q' = \frac{1}{T_{d0}'} \left[ \Delta E_{fd} + \frac{X_d - X_d'}{X_d' - X_l} \Delta E_q'' - \frac{X_d - X_l}{X_d' - X_l} \Delta E_q' - \frac{(X_d - X_d')(X_d'' - X_l)}{X_d' - X_l} \Delta I_d - B \times \text{SAT} \right] \quad (3)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{2H} (-\Delta P_e + D \cdot \Delta \omega) \quad (4)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_s \cdot \Delta \omega \quad (5)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{\Delta E_{fd}}{T_a} - \frac{K_a}{T_a} \Delta V_t + \frac{K_a}{T_a} V_{\text{sad}} \quad (6)$$

$$\Delta \dot{X}_{0002} = \left( -K_{\text{PSS}} \frac{T_{w1}}{T_{w2}^2} B \right) \Delta \omega - \left( \frac{1}{T_{w2}} \right) \Delta X_{0002} \quad (7)$$

$$\Delta \dot{X}_{0003} = \left\{ \frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right\} \left[ \left( K_{\text{PSS}} \frac{T_{w1}}{T_{w2}} \right) \Delta \omega + \Delta X_{0002} \right] - \frac{\Delta X_{0003}}{T_2} \quad (8)$$

A matriz de estados A que descreve a dinâmica linearizada do sistema é obtida através da Equação (9), que representa o processo de eliminação das variáveis algébricas das n equações diferenciais.

$$A = (J_1 - J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot J_3) \quad (9)$$

Para resolver (9), é necessário construir a matriz Jacobiana do sistema e relacionar as equações das variáveis algébricas com as equações das variáveis de estados da forma explicitada na Equação (10).

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial r} \\ \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta r \end{bmatrix} \quad (10)$$

O processo de construção da Jacobiana resulta em todo o conjunto de equações para as variáveis de estado e variáveis algébricas do modelo. O sistema de equações representado por (11) a (14), no qual  $V_r$ ,  $V_m$ ,  $I_d$  e  $I_q$  compreendem o conjunto de variáveis algébricas, deve ser solucionado para a construção da matriz de estados A em MatLab<sup>TM</sup>.

$$0 = -\Delta E_q'' + (-V_{r0} \cdot \text{sen} \delta_0 + V_{m0} \cdot \text{cos} \delta_0) \Delta \delta + X_d'' \cdot \Delta I_d + \text{cos} \delta_0 \cdot \Delta V_r + \text{sen} \delta_0 \cdot \Delta V_m \quad (11)$$

$$0 = -\Delta E_d'' + (V_{r0} \cdot \text{cos} \delta_0 + V_{m0} \cdot \text{sen} \delta_0) \Delta \delta - X_q'' \Delta I_q + \text{sen} \delta_0 \cdot \Delta V_r - \text{cos} \delta_0 \cdot \Delta V_m \quad (12)$$

$$0 = (I_{d0} \cdot \text{sen} \delta_0 + I_{q0} \cdot \text{cos} \delta_0) \Delta \delta - \text{cos} \delta_0 \cdot \Delta I_d + \text{sen} \delta_0 \cdot \Delta I_q + B_{ik} \cdot \Delta V_r \quad (13)$$

$$0 = (I_{d0} \cdot \text{cos} \delta_0 - I_{q0} \cdot \text{sen} \delta_0) \Delta \delta + \text{sen} \delta_0 \cdot \Delta I_d + \text{cos} \delta_0 \cdot \Delta I_q - B_{ik} \cdot \Delta V_m \quad (14)$$

O sistema de equações algébricas é então resolvido para o ponto de operação e substituído nas equações diferenciais originais, o que resulta na matriz de estados, que é comparada àquela proveniente do PacDyn.

### 3. PROJETO DO ESP PELO MÉTODO DE POSICIONAMENTO DE POLOS MODIFICADO

O método de posicionamento regional de polos modificado foi elaborado com base nos desenvolvimentos de [2] e [3], e tem por objetivo obter a melhor localização do modo crítico com relação ao maior fator de amortecimento apresentado por ele. De fato, o fator de amortecimento apresenta uma região considerada crítica para valores abaixo de 5%. O posicionamento regional do modo crítico é feito com base na localização e na restrição de uma região “aceitável” de valores do modo, por meio dos métodos de sensibilidade de autovalores e de Newton Raphson. A faixa de variação aceitável para o autovalor crítico implica somente em variações negativas de sua parte real, tal que aumentem sua estabilidade.

#### 3.1 Sensibilidade dos autovalores

A análise da sensibilidade dos autovalores é comumente aplicada em estudos de estabilidade a pequenas perturbações e de tensão [4]. Tal análise pode ser compreendida como a variação de cada autovalor com relação a um parâmetro pré-estabelecido, que no caso do ESP compreende o ganho e o zero de seu compensador. Para esta análise é necessário o uso da matriz de estados A obtida na Seção 2, e dos autovalores e autovetores do sistema em malha fechada.

Segundo [3], a sensibilidade do autovalor pode ser obtida do quociente dos produtos do autovetor à esquerda  $w_i$  pela derivada da matriz de estados A (com relação ao parâmetro em questão) e pelo autovetor à direita  $v_i$ , pelo produto dos autovalores à esquerda e à direita, o que resulta na Equação (15).

$$\frac{d\lambda_i}{dk} = \frac{w_i^T \frac{dA}{dk} v_i}{w_i^T v_i} \quad \dots \quad (15)$$

O conjunto de sensibilidades do autovalor com diversos parâmetros variáveis é compreendido como o gradiente do autovalor, que contém a distribuição espacial ou trajetória apresentada por ele. Para um dado sistema elétrico com um autovalor crítico  $\lambda_c$ , o gradiente pode ser descrito em função do ESP através da equação (16).

$$\nabla f(K_{pss}, T_1) \approx \left( \frac{\Delta\lambda}{\Delta K_{pss}}, \frac{\Delta\lambda}{\Delta T_1}, \frac{\Delta\lambda}{\Delta T_2} \right) \quad \dots \quad (16)$$

A Equação (16) indica que para cada parâmetro selecionado do estabilizador é obtida uma trajetória diferente para o autovalor. Esta trajetória será a responsável pela obtenção da distribuição (localização) da região do autovalor.

Combinada à técnica de sensibilidade, foi elaborado um processo de resolução iterativo baseado no método de Newton Raphson para restringir a faixa do conjunto de valores dos parâmetros do ESP que atendem aos requisitos dinâmicos dos modos eletromecânicos.

#### 3.2 Algoritmo de solução para alocação do modo crítico

O procedimento de solução para a parametrização do ESP foi desenvolvido com o objetivo de alocar o modo crítico do sistema a partir da avaliação dos diferentes valores possíveis para os parâmetros do ESP.

O método prevê a localização e a restrição de uma região “aceitável” para o autovalor. O seguinte algoritmo apresenta o procedimento de solução desenvolvido:

- Estabelecer os limites práticos para os parâmetros  $K_{pss}$  e  $T_1$  do ESP;
- Estabelecer um intervalo de variação dos parâmetros para cada iteração;

- Para cada iteração  $i$ :

i)  $k_{i+1} = k_i + \Delta k$

ii) Calcular a sensibilidade do autovalor crítico  $\lambda_i$  para  $k_i$ ;

iii) Caso o resultado da sensibilidade seja negativo, voltar para (i); Caso contrário restringir o limite superior do parâmetro para  $k_i$  e diminuir o intervalo de variação do parâmetro para as iterações seguintes. Esse novo limite do parâmetro de  $k_i$  representa toda a faixa na qual a variação do parâmetro aumenta negativamente o autovalor, ou seja, sua faixa aceitável.

#### 4. RESULTADOS

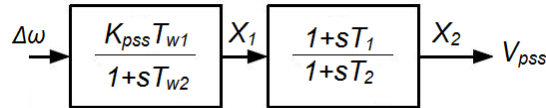
Todos os resultados contidos neste artigo foram obtidos através de simulações feitas nos aplicativos MatLab™, ANATEM e PacDyn. Para fins de comparação, foi verificado que o amortecimento do modo crítico para o caso base era de cerca de 4% na presença do ESP original, e de cerca de 5% sem ele, o que demonstrou sintonia inadequada do ESP no caso base.

Inicialmente foi necessária a conferência do modelo equacionado em MatLab™ com o modelo original do PacDyn. Neste sentido, os conjuntos de autovalores obtidos de cada aplicativo foram comparados. Uma vez que ambos estudos são feitos através da análise modal, caso os modos sejam semelhantes, os sistemas podem ser considerados equivalentes, e a representação em MatLab™ validada. A Tabela 1 apresenta o conjunto de modos obtidos para os dois casos e seus respectivos fatores de amortecimento (representado por  $\zeta$ ).

Tabla I: Comparação dos modos do sistema gerados em Pacdyn e Matlab

Modos (Pacdyn)	$\xi$ (%)	Modos (Matlab)	$\xi$ (%)
-28,8249	100	-28,8216	100
-0,4958 +12,8265i	3,86	-0,4858 +12,8248i	3,79
-0,4958 -12,8265i	3,86	-0,4858 -12,8248i	3,79
-17,6952	100	-17,6969	100
-10,4586 + 1,7377i	98,65	-10,4612 + 1,7337i	98,65
-10,4586 - 1,7377i	98,65	-10,4612 - 1,7337i	98,65
-2,5121	100	-2,4917	100
-0,3608	100	-0,3611	100

Com a compatibilização realizada, o algoritmo da Seção 3 foi desenvolvido em MatLab™ e aplicado ao sistema dinâmico equacionado na seção 2. O sistema analisado apresenta uma estrutura máquina barra-infinita na qual estava inserido um estabilizador com apenas um bloco de compensação e um filtro *washout*, com a estrutura similar à da Fig. 1, e que teve seus valores pré-definidos com os parâmetros de  $K_{pss}=15, T_1=0,1$ , e  $T_2 = 0,04$  obtidos de [5]. Com relação ao filtro *washout*, que tem por função anular a atuação do ESP em regime permanente, seus valores de  $T_{w1}$  e  $T_{w2}$  foram definidos como 3s, valor recomendado na literatura.

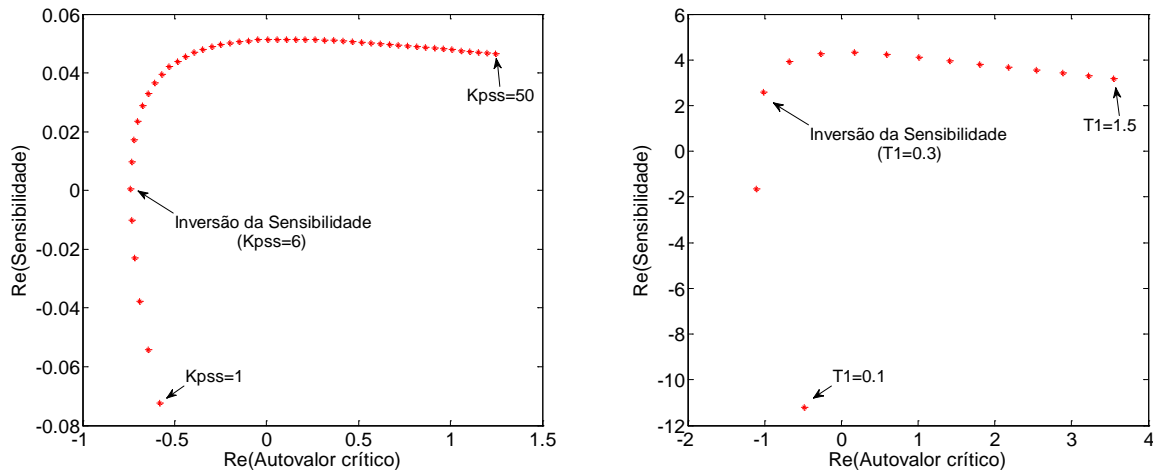


**Figura 1: Modelo de ESP com suas estruturas de Washout e compensação**

Durante as simulações apenas os valores de  $K_{pss}$  e  $T_1$  foram variados para a obtenção da parametrização do ESP. De acordo com [6] é prática comum supor conhecido o valor de  $T_2$  e mantê-lo constante. Além disso, quanto aos modos do sistema, devido à própria topologia, apenas os modos locais foram considerados nas análises.

Por questão de simplicidade, e para a melhor observação da influência da sensibilidade sobre o autovalor, inicialmente cada parâmetro do ESP foi variado separadamente, mantendo o outro com o valor original do ANATEM. Para complementar a análise inicial, ambos os parâmetros foram em seguida variados simultaneamente. A Faixa de valores para as duas variáveis do estabilizador foram baseadas em [7] e definidas a princípio como  $1pu \leq K_{pss} \leq 50pu$  e  $0,1s \leq T_1 \leq 1,5s$ .

Na primeira etapa de resultados, foram obtidos os dados acerca das faixas aceitáveis de sensibilidade. A Fig. 2 apresenta o comportamento da parte real do autovalor crítico para a faixa de sensibilidade alcançada com as variações de  $K_{pss}$  e  $T_1$ , respectivamente. A partir das figuras constatou-se que a partir do ponto no qual a sensibilidade tem seu valor invertido, ocorre o aumento da parte real do autovalor em direção ao semiplano direito do plano complexo. Isso implica em diminuição contínua do fator de amortecimento do modo em questão.



**Figura 2: Variação da parte real do modo crítico com a Sensibilidade influenciada por  $K_{pss}$  e  $T_1$**

De acordo com a rotina de simulações pré-estabelecida, a partir do ponto no qual a sensibilidade inverte seu sinal a região de parâmetros restante é descartada, e um novo intervalo de variação do parâmetro é estabelecido. A Tabela II apresenta os valores de amortecimento do modo crítico dentro da faixa restrita pelas simulações de sensibilidade. Com as variações do ganho e do zero feitas separadamente os valores que apresentaram maior amortecimento do modo crítico foram 4pu para  $K_{pss}$  e 0,2s para  $T_1$ .

Tabla II: Factores de amortecimiento dentro da faixa delimitada pela Sensibilidade

<b>K<sub>pss</sub></b>	<b>ξ do modo crítico</b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>ξ do modo crítico</b>
1,0000	6,2184	0,1000	3,7854
1,5000	6,4792	0,1200	5,1915
2,0000	6,6851	0,1400	6,1948
2,5000	6,8407	0,1600	6,8327
3,0000	6,9505	0,1800	7,1659
3,5000	7,0190	0,2000	7,2609
4,0000	7,0506	-	-
4,5000	7,0492	-	-
5,0000	7,0187	-	-

Um resultado mais completo pôde ser alcançado com a análise do gradiente do modo crítico, ou seja, sua resposta à variação simultânea dos dois parâmetros do ESP.

A Tabela III apresenta o conjunto de valores dos dois parâmetros (dentro das faixas permitidas) que apresentaram o maior amortecimento do modo crítico. De fato, os valores para T<sub>1</sub> maior que 0,4s não podem ser aplicados na prática devido à restrição da compensação de fase do sistema, e seus resultados não são exibidos na Tabela. Segundo [8] e [9], a compensação de fase deve ser menor que 55°, o que conduz à relação apresentada na Equação (17). Esta restrição não foi necessária no caso de análise isolada dos parâmetros pois o maior valor de amortecimento estava incluído na faixa adequada.

Contudo, a partir dos resultados obtidos do gradiente do modo crítico (variação simultânea em ambos parâmetros) apresentados na Tabela III é notado que o crescente aumento no fator de amortecimento do modo é acompanhado do crescimento proibitivo de T<sub>1</sub> (valores superiores à 0,4s).

$$\frac{T_1}{T_2} < 10 \quad (17)$$

Tabla III: Fator de amortecimento máximo do modo crítico para diferentes parâmetros do ESP

<b>T<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>pss</sub></b>	<b>ξ do modo crítico</b>
0,1	4,0	7,0506
0,2	5,2	12,8594
0,3	4,0	16,0978
0,4	3,0	17,9250

Ao fim, os valores resultantes do método da sensibilidade para a sintonia do ESP são K<sub>pss</sub>=3pu e T<sub>1</sub>=0,4s. A Tabela IV apresenta as grandezas de interesse dos modos com a nova parametrização do ESP.

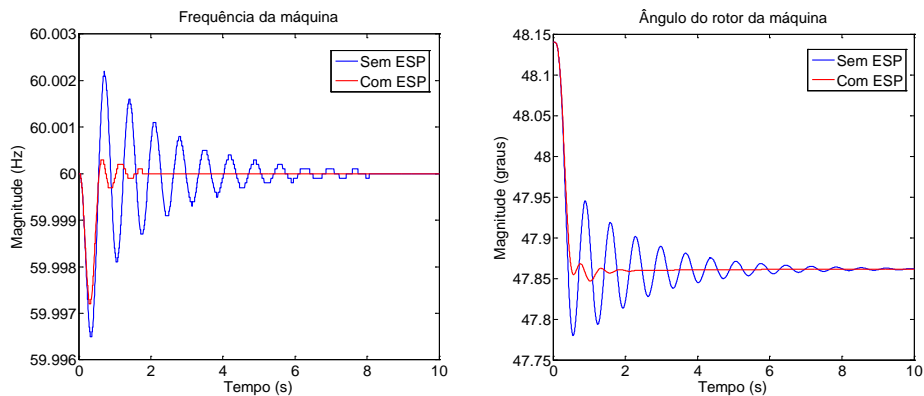
Tabla IV: Fator de amortecimento máximo do modo crítico para diferentes parâmetros do ESP

Polos	$\xi(\%)$	Frequência (Hz)
-29,140	100	0
-	17,9	1,8429
2,1186+11,5791i		
-2,1186-11,5791i	17,9	1,8429
-17,461	100	0
-11,077	100	0
-4,5242+3,4642i	79,4	0,5513
-4,5242+3,4642i	79,4	0,5513
-0,3376	100	0

Ao comparar o amortecimento do modo crítico do sistema sintonizado com o não sintonizado, ou sem ESP, é constatado o aumento do amortecimento em mais de 300%.

O resultado da sintonia na resposta temporal dos estados do sistema é apresentado, de forma comparativa nas Fig.3, considerando o degrau de 0,01pu na referência do regulador de tensão, de onde se atesta o bom desempenho da metodologia proposta. São exibidas na figura duas grandezas elétricas do sistema, a frequência elétrica e o ângulo interno da máquina para as condições com e sem o ESP. Ambas apresentam nítida melhora no comportamento oscilatório com a adição do ESP.

Quanto ao pico de oscilações, a que apresenta maior valor percentual com relação ao valor de regime é o do ângulo da máquina (0.0058% para a frequência e 0.167% para o ângulo). Para valores de sobrecarga no sistema, foram avaliadas situações com carga até 50% maior do que o caso base, e essas grandezas não sofreram muita variação do apresentado na Fig. 3. Quanto ao modo crítico do sistema, ele também não apresentou grande variação de oscilação, mantendo seu amortecimento em aproximadamente 14%.



**Figura 3: Grandezas do sistema com o ESP sintonizado pelo método da sensibilidade dos autovalores**



## 5. CONCLUSÕES

A metodologia de projeto, incluindo a etapa previa de modelagem do sistema, apresentou resultados considerados satisfatórios. Na etapa de modelagem todos os valores apresentaram variação menor que 1% entre o modelo original e o reproduzido em Matlab, dessa forma foram considerados equivalentes. Quanto aos valores dos parâmetros encontrados para o ESP, houve aumento considerável no amortecimento do modo crítico do sistema, e significativa melhora no comportamento oscilatório das principais grandezas elétricas do sistema, o que comprova a eficiência do método para a parametrização do ESP, mesmo para casos de carga diferente do caso base.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Rommes, N. Martins, “Computing large-scale system eigenvalues most sensitives to parameter changes, with application to power system small-signal stability”, Junho 2007.
- [2] J.C.R. Ferraz, N. Martins, G.N. Taranto, “Simultaneous Partial Pole Placement for Power System Oscillation Damping Control”, IEEE Trans., 2001, páginas 1154-1159.
- [3] E.E.S. Lima, “A Sensitivity analysis of eigenstructures”, IEEE Transactions on Power Systems, Agosto 1997, páginas 1393-1399.
- [4] H.K. Nam, Y.K. Kim, K.S. Shim, K.Y. Lee, “A New Eigen-Sensitivity Theory of Augmented Matrix and its Applications to Power Systems Stability Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Fevereiro 2000, páginas 363-369.
- [5] CEPEL, Manual do usuário do ANATEM. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [6] F.D. Freitas, *Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência Via Controle Ótimo Com Restrições Estruturais*, tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- [7] P.W. Sauer, M.A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall, 1998.
- [8] A.A. Zea, *Power systems Stabilizers for the Synchronous Generator*, tese de mestrado, Suécia 2013.
- [9] D.S. Mota, *Técnicas de Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência*, tese de mestrado, São Paulo, 2010.
- [10] Kundur, P., *Power System Stability and Control*. New York, NY: Mc-Graw Hill, 1994. 1176p.
- [11] CEPEL, Manual do usuário do PacDyn. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.