

# LOCALIZAÇÃO E AJUSTE COORDENADO DE PARÂMETROS EM DISPOSITIVOS ESP E TCSC-POD

MAXWELL MARTINS DE MENEZES\*, DANILO BASSETO DO VALLE†, PERCIVAL BUENO DE ARAUJO†

*\*Rua Getúlio Vargas, 2125  
89600-000  
Joaçaba, Santa Catarina, Brasil*

*†Avenida Prof. José Carlos Rossi, 1370  
15385-000  
Ilha Solteira, São Paulo, Brasil*

Emails: maxwell.menezes@unoesc.edu.br, danilodovalle@gmail.com,  
percival@dee.feis.unesp.br

**Abstract**— This paper presents one alternative method for localization and adjustment parameters of Power System Stabilizers and Flexible Alternating Current Transmission System devices added to Power Oscillation Damping controllers in the power system. The goal is to increase the damping of small frequency oscillations, thereby improving the small-signal stability. The locations of the devices in the power system influence the adjustment, therefore it is necessary to study and do simulations for the ideal placement of these devices. After finding the place of the devices an adjustment process is made that will be able to obtain the parameters of the controllers. Artificial Neural Network is used as an additional tool to the Decentralized Modal Control algorithm to do the adjustment. For verifying the efficiency of the devices localization and adjustments, one test system is simulated, containing 10 generators, 39 bus and 46 transmissions lines.

**Keywords**— FACTS, Power System, Stability, ANN, Control devices

**Resumo**— Este trabalho apresenta um método alternativo para localização e ajuste de parâmetros de estabilizadores de sistema de potência e de dispositivos Flexible Alternating Current Transmission Systems com controladores Power Oscillation Damping no sistema de potência. O objetivo é aumentar o amortecimento das oscilações de baixa frequência, melhorando assim a estabilidade de pequenas perturbações. A localização dos dispositivos no sistema de potência influencia no ajuste, por isso, é necessário estudar e realizar simulações para a localização ideal destes dispositivos. Após encontrar o local de instalação um processo de ajuste é realizado, capaz de obter parâmetros dos controladores. Redes neurais artificiais são utilizadas como ferramenta adicional ao algoritmo de controle modal descentralizado para ajuste dos parâmetros. Para verificar a eficiência dos dispositivos em relação à sua localização e ajuste é simulado um sistema teste, contendo 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão.

**Palavras-chave**— FACTS, Sistema de Potência, Estabilidade, RNA, Controle de dispositivos

## 1 Introdução

A operação de unidades geradoras com diferentes características, pode ser um dos agravantes para interrupções no fornecimento de energia elétrica. Devido a este fato é imprescindível realizar análises e simulações para evitar a instabilidade (ocasionada por oscilações de baixa frequência) do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Para auxiliar no amortecimento das oscilações de baixa frequência é inserido os Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP), que são comumente utilizados para adicionar amortecimento às oscilações de modos locais de forma eficaz, podendo contribuir com amortecimento para as oscilações de modo interarea e em alguns casos de forma insatisfatória (Kundur, 1994).

Os dispositivos Flexible Alternating Current Systems (FACTS) (Song and Johns, 1999) também são utilizados para influenciar positivamente no SEP, porém em menor escala devido ao seu alto custo financeiro. Os FACTS em geral se mostram eficazes e adicionados de controladores Power Oscillation Damping

(POD) (Hingorani and Costa, 1999) são capazes de introduzir amortecimento às oscilações de modos interarea. Entre os dispositivos FACTS existentes, neste trabalho optou-se por utilizar o Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC).

Para analisar e simular os dispositivos inseridos no SEP é necessário descrever seu comportamento através de equações. Estas equações podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio por se tratar de um estudo relacionado a pequenas perturbações. Neste trabalho utiliza-se o Modelo Sensibilidade de Potência (MSP) (Deckmann and Costa, 1994).

Como o ESP e POD se tratam de controladores é fundamental que o ajuste de seus parâmetros seja realizado de forma correta e em alguns casos, de acordo com o ponto de operação do SEP, caso contrário poderá contribuir negativamente nos níveis de amortecimento e em alguns casos levar o SEP para a instabilidade.

Este trabalho tem como objetivo buscar alternativas no ajuste de parâmetros dos controladores ESP e POD, e em vista das

constantes mudanças do ponto de operação do SEP, necessita-se de um ajuste que se adapta a essas mudanças. Como solução é apresentada as Redes Neurais Artificiais (RNA) (Haykin, 1994), (Nguyen and Gianto, 2008) que tem como vantagens sua habilidade de aprendizagem e generalização. Para realizar a aprendizagem da RNA (dependendo do tipo de rede considerada) é necessário de um par treinado (conjunto de saída relacionado a um conjunto de entrada) e para este fim é utilizado o controle modal descentralizado (DMC - Decentralized Modal Control) (Furini et al., 2011), (Araujo and Zaneta, 2001), (Chen and Hsu, 1987).

Além do ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e POD, este trabalho tem o objetivo analisar a localização ideal para atuação destes dispositivos no SEP. Para o ESP é utilizado o fator de participação de cada gerador e para o TCSC-POD o método utilizado se baseia na posição dos polos e zeros da função de transferência de malha aberta (FTMA) do controlador (Chen and Hsu, 1987).

## 2 Sistema Elétrico de Potência

O MSP (Deckmann and Costa, 1994) é utilizado para verificar o comportamento do dispositivo TCSC adicionado do controlador POD (TCSC-POD) e do controlador ESP quando inclusos no sistema de potência. Com esta ferramenta é possível linearizar as equações dos dispositivos capazes de representar o comportamento dinâmico frente às oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Como característica principal destaca-se a manutenção da integridade do SEP, o que facilita a inclusão de novos dispositivos na modelagem.

O sistema de potência escolhido para o estudo deste trabalho possui duas áreas, sendo a primeira área representada somente por 1 gerador (gerador 10) e a segunda área por 9 geradores (gerador 1 ao gerador 9) (Araujo and Zaneta, 2001). O diagrama unifilar do sistema teste está ilustrado na Figura 1 e seu equivalente completo é composto por 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão. Este sistema teste foi escolhido para o estudo por apresentar modos oscilatórios com baixo amortecimento e instáveis, de origem local e interarea.

Na Tabela 1 são mostrados os autovalores de interesse, bem como o coeficiente de amortecimento ( $\xi$ ) e a frequência natural ( $\omega_n$ ) a eles associados, considerando o caso base (sistema sem atuação de nenhum ESP e/ou TCSC-POD). A análise dos dados mostrados permite concluir que a instabilidade do SEP é causada por 3 modos locais (modos 6, 7 e 8) e 1 modo interarea de oscilação (modo 9), reconhecidos pelas suas frequências naturais típicas (Kundur, 1994).

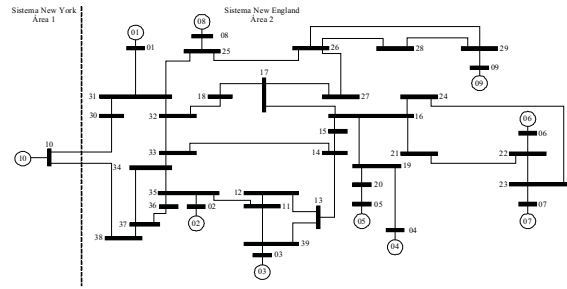


Figura 1: Sistema Teste

Tabela 1: Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural (caso base)

Modos	Autovalores	$\xi$	$\omega_n$
1	$-0,2432 \pm j 8,3145$	0,0292	8,3181
2	$-0,1956 \pm j 8,2569$	0,0237	8,2592
3	$-0,2694 \pm j 8,0989$	0,0332	8,1033
4	$-0,2079 \pm j 7,2578$	0,0286	7,2608
5	$-0,1139 \pm j 6,4738$	0,0176	6,4748
6	$0,0580 \pm j 6,8626$	-0,0084	6,8628
7	$0,1693 \pm j 5,9126$	-0,0286	5,9151
8	$0,0901 \pm j 6,3175$	-0,0143	6,3182
9	$0,0015 \pm j 3,5348$	-0,0004	3,5348

Pela análise dos amortecimento apresentados na Tabela 1, conclui-se que é necessário inserir amortecimento adicional para as condições de carregamento consideradas (Araujo and Zaneta, 2001) justificando a inclusão do dispositivo TCSC-POD e do controlador ESP.

## 3 Modelos Dinâmicos para ESP e TCSC-POD

### 3.1 ESP

O ESP é uma malha de controle adicional ao regulador automático de tensão (RAT) do gerador síncrono, que tem como objetivo inserir torque elétrico às oscilações eletromecânicas de baixa frequência (Kundur, 1994).

A ilustração da Figura 2 representa o modelo dinâmico do ESP, que é ajustado pela constante K de forma a obter um amortecimento desejado, um bloco washout definido pela constante Tw e bloco de avanço e atraso de fase representados pelas constantes  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ .

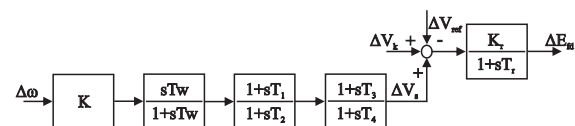


Figura 2: Modelo dinâmico utilizado para o controlador ESP

Como entrada são consideradas as variações da velocidade angular do rotor ( $\Delta\omega$ ) do gerador síncrono e o sinal  $\Delta V_S$  é a saída do ESP e aplicado diretamente a uma malha de controle do

RAT, definido por um bloco de primeira ordem composto de um ganho  $K_r$  e uma constante de tempo  $T_r$  (Kundur, 1994).

### 3.2 TCSC-POD

O dispositivo FACTS TCSC pode ser interpretado como uma impedância capacitiva variável, capaz de aumentar os limites de estabilidade e controlar o fluxo de potência na linha de transmissão no qual é inserido.

Complementar aos dispositivos FACTS podem-se utilizar controladores suplementares POD, que possibilitam inserir significativamente torque de amortecimento no SEP (Yang et al., 1998).

Na Figura 3 é ilustrado um modelo dinâmico do TCSC-POD. Como entrada são consideradas as variações de fluxo de potência ( $\Delta P_{km}$ ) no local de instalação. Sua saída é representada pela variável de controle do TCSC ( $\Delta X_{TCSC}$ ), já o sinal  $\Delta X_{ref}$  é o desvio do valor de referência em regime permanente (Furini et al., 2011), (Sadikovic, 2004).

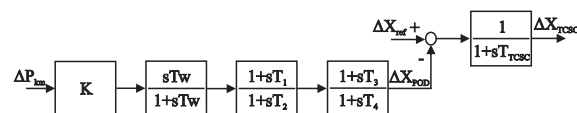


Figura 3: Modelo dinâmico utilizado para o conjunto TCSC-POD

## 4 Localização do TCSC-POD e ESP

A localização do controlador ESP é definida neste trabalho através do fator de participação, que consiste na participação efetiva de cada gerador ao respectivo modo de oscilação.

Na Tabela 2 são mostradas as participações do gerador 1 (G-1), gerador 5 (G-5) e gerador 9 (G-9) em relação às variações da velocidade angular ( $\Delta\omega$ ) e às variações do ângulo interno ( $\Delta\delta$ ). A partir da análise dos níveis de participação de cada gerador, concluiu-se que o G-5 e G-9 são os mais participativos para deslocar os polos relacionados aos modos locais instáveis (modos 6, 7 e 8) para o semiplano esquerdo do plano complexo.

Tabela 2: Fator de participação dos geradores mais influentes

Modos		6	7	8	9
$\Delta\omega$	G-1	0,3842	0,0407	0,0578	0,0490
	G-5	0,0038	0,2967	0,1221	0,0750
	G-9	0,0953	0,1552	0,2688	0,0554
$\Delta\delta$	G-1	0,3842	0,0407	0,0578	0,0490
	G-5	0,0038	0,2968	0,1221	0,0751
	G-9	0,0954	0,1555	0,2691	0,0555

A localização do dispositivo TCSC-POD é definida pela análise da posição do polo relacionado ao zero do modo de oscilação de interesse (modo interarea) da FTMA do controlador POD. Pode-se afirmar que quanto maior a distância entre o polo e o zero melhor será a localização do dispositivo FACTS (Moura et al., 2012). Para análise da distância entre polo e zero, obrigatoriamente é considerado as seguintes condições: i) controlador ESP instalado e devidamente ajustado. ii) TCSC-POD atuante e com ganho de controlador nulo.

Na Tabela 3 é mostrado o polo ( $\lambda$ ), zero ( $z$ ) e suas respectivas diferenças  $|\lambda - z|$ , relacionado ao modo interarea com o TCSC-POD instalado nas respectivas linhas de transmissão. Analisando a Tabela 3, conclui-se que a linha de transmissão 30-31 possui a maior distância entre polo e zero relacionado ao modo interarea, portanto é a melhor opção para instalação do TCSC-POD.

Nas linhas de transmissão 38-10, 37-38 e 16-17 o zero relacionado ao modo interarea está posicionado no semiplano direito do plano complexo. Este zero poderá atrair o polo associado a ele dificultando seu deslocamento (Mhaskar and Kulkarni, 2006).

Tabela 3: Polos, zeros e suas respectivas diferenças relacionadas ao modo interarea do controlador POD

LT	$\lambda$	$z$	$ \lambda - z $
30-10	$-0,0397 \pm j 3,5214$	$-0,0652 \pm j 2,5724$	0,9709
30-31	$-0,0391 \pm j 3,5584$	$-0,0398 \pm j 2,5707$	0,9877
38-10	$-0,0394 \pm j 3,5401$	$0,0090 \pm j 2,6692$	0,8722
37-38	$-0,0392 \pm j 3,5494$	$0,1162 \pm j 2,6438$	0,9188
16-17	$-0,0403 \pm j 3,5236$	$0,0049 \pm j 3,3033$	0,2249

Nas Figuras 4 e 5 são ilustradas as trajetórias do polo relacionado ao modo interarea de oscilação nas linhas de transmissão 30-10 e 30-31. É evidente que há uma atração do polo para seu respectivo zero quando há alteração no ganho do controlador POD, o que influencia diretamente na manutenção da estabilidade do modo interarea de oscilação. Observa-se também que há uma atração do zero em relação ao polo associado com o aumento do ganho do controlador POD. Como o zero está posicionado do lado esquerdo do plano complexo pode-se afirmar que o modo interarea de oscilação não tornará instável com a variação de ganho do controlador POD.

Na Figura 6 é ilustrado comportamento similar a das Figuras 4 e 5 no que se trata de deslocamento do polo relacionado ao modo interarea de oscilação. Porém, o zero está posicionado do lado direito do semiplano complexo, o que pode ocasionar uma instabilidade do modo interarea de oscilação com a variação de ganho do controlador POD.

Através da análise realizada anteriormente, pode-se definir a localização do dispositivos TCSC-POD e do controlador ESP. É definido

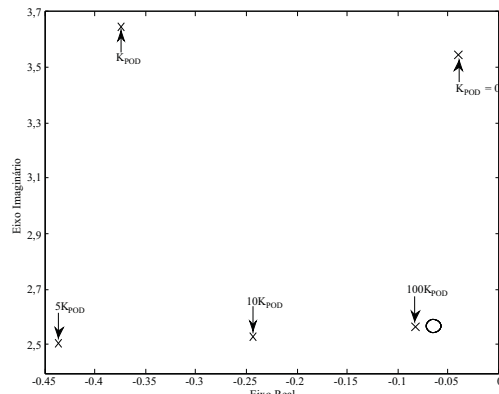


Figura 4: Trajetória do polo relacionado ao modo interarea: TCSC-POD instalado na linha de transmissão 30-10

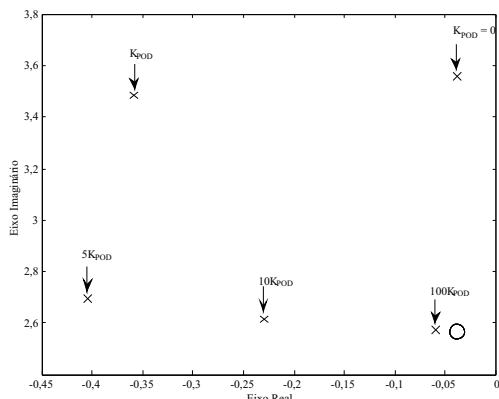


Figura 5: Trajetória do polo relacionado ao modo interarea: TCSC-POD instalado na linha de transmissão 30-31

neste trabalho que serão instalados dois controladores ESP (G-5 e G-9) e um dispositivo TCSC-POD (na linha de transmissão 30-31).

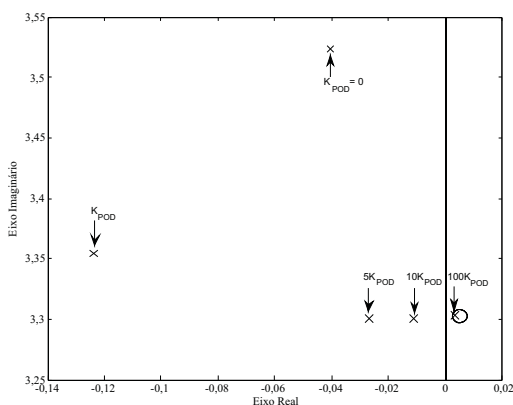


Figura 6: Trajetória do polo relacionado ao modo interarea: TCSC-POD instalado na linha de transmissão 16-17

## 5 Ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e POD

De forma a acompanhar as variações de carregamento impostas constantemente pelo SEP

é proposto neste trabalho o ajuste de parâmetros dos controladores ESP e POD através das RNAs. Neste trabalho é considerada a RNA Perceptron Multicamadas (PMC). Essas redes possuem obrigatoriamente uma camada de entrada e uma camada de saída, sendo opcional o uso de camadas intermediárias (Haykin, 1994).

Para treinamento da RNA PMC é utilizado o algoritmo Levenberg-Marquardt (Hagan and Menhaj, 1994). Esse algoritmo de treinamento tem como característica a necessidade de conter 01 conjunto de padrões de saída relacionado a 01 conjunto de padrões de entrada (padrões de treinamento).

É considerado como entrada as variações da potência ativa ( $\Delta P_G$ ) e reativa ( $\Delta Q_G$ ) do gerador 2 (G-2) e as variações do fluxo de potência ativa da linha de transmissão de instalação do dispositivo ( $\Delta P_{30-31}$ ). As constantes de avanço e atraso de fase ( $T_1$  e  $T_2$ ) dos controladores ESP e POD, além dos ganhos ( $K$ ) de cada um deles são considerados como saída da RNA PMC.

A estrutura utilizada neste trabalho consiste em 01 camada de entrada (com 03 variáveis -  $\Delta P_{G-2}$ ,  $\Delta Q_{G-2}$  e  $\Delta P_{30-31}$ ), 01 camada de saída (com 06 variáveis -  $T_{1i}$  e  $T_{2i}$  e  $K_i$ ) onde  $i$  é relacionado aos controladores utilizados (ESP: G-5 e G-9 e TCSC-POD: LT 30-31) e 03 camadas intermediárias (com 06, 10 e 08 neurônios cada).

A seleção dos padrões de treinamento foi realizada através do DMC (Furini et al., 2011), (Araujo and Zaneta, 2001), (Chen and Hsu, 1987). Foram selecionados 90 padrões de treinamento, capazes de reproduzir o comportamento do SEP, sendo que 90% utilizados para o treinamento e os outros 10% padrões para validação da RNA.

Com a combinação das RNAs (ajuste dos parâmetros) com o DMC (coleta dos padrões de treinamento) é possível obter um ajuste coordenado entre os controladores ESP e POD, e a cada mudança do ponto de operação o ajuste é capaz de obter novos parâmetros dos controladores ESP e POD para continuar inserindo o amortecimento desejado ao SEP.

O ajuste realizado pela RNA PMC, com estrutura apresentada anteriormente, após o treinamento foi capaz reconhecer situações obtendo parâmetros na qual foi treinada (situações utilizadas nos padrões de treinamento) e também nas situações desconhecidas (situações não utilizadas nos padrões de treinamento).

Os parâmetros dos controladores ESP e POD (ajustados pela RNA PMC), para tornar o sistema teste estável no caso base nas condições apresentadas da Tabela 1, são mostrados na Tabela 4.

Realizado o ajuste de parâmetros do ESP (G-5 e G-9) e do TCSC-POD (instalado na linha de transmissão 30-31) é possível verificar sua eficácia. Para demonstrar o sucesso do ajuste

Tabela 4: Parâmetros dos ESP e POD (situação conhecida pela RNA PMC)

Parâmetros	ESP G-5	ESP G-9	POD
$T_1$	0,3547	0,2377	0,1248
$T_2$	0,0770	0,0970	0,8250
K	3,0250	7,2690	0,1494

são mostrados os autovalores de interesse e seus respectivos  $\xi$  e  $\omega_n$  na Tabela 5.

Tabela 5: Autovalores dominantes, coeficiente de amortecimento e frequência natural (caso conhecido pela RNA)

Modos	Autovalores	$\xi$	$\omega_n$
1	$-0,3083 \pm j 8,2938$	0,0371	8,2996
2	$-0,2725 \pm j 8,2583$	0,0330	8,2628
3	$-0,3036 \pm j 8,1088$	0,0374	8,1145
4	$-0,2080 \pm j 7,2578$	0,0286	7,2608
5	$-0,2348 \pm j 6,4495$	0,0364	6,4537
6	$-0,1972 \pm j 6,8720$	0,0287	6,8748
7	$-0,5925 \pm j 5,8915$	0,1001	5,9212
8	$-0,6324 \pm j 6,2822$	0,1002	6,3139
9	$-0,3613 \pm j 3,5537$	0,1012	3,5720

Os modos locais de oscilação (modo 7 e 8) e o modo interarea de oscilação (modo 9) apresentam o  $\xi$  próximo ao estipulado de 0,1. Nas condições apresentadas na Tabela 1, o ajuste realizado pela RNA PMC concluiu com sucesso a introdução de amortecimento adicional de forma coordenada.

Verificada a integridade do ajuste e das condições de estabilidade do SEP, é aplicado uma perturbação degrau de 0,05 pu na potência mecânica do gerador 2 (pertencente à área 2 e referência do sistema) para realizar uma análise temporal do SEP. Na Figura 7 são analisados os comportamentos, após aplicar a perturbação, dos ângulos internos do G-5, G-9 e G-10, ambos em relação ao ângulo interno do G-2.

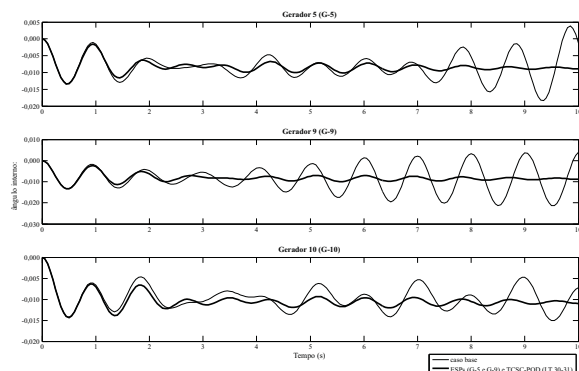


Figura 7: Ângulo interno das Máquinas Geradoras 5, 9 e 10:  $\Delta\delta_5 - \Delta\delta_2$ ,  $\Delta\delta_9 - \Delta\delta_2$  e  $\Delta\delta_{10} - \Delta\delta_2$

Em situações conhecidas a RNA foi capaz de obter parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD para introduzir amortecimento ao SEP de

forma coordenada. Uma das vantagens da RNA é sua capacidade de aprendizagem e generalização. Estas características são exploradas para este trabalho para obter parâmetros dos controladores ESP e POD para situações não utilizadas no treinamento da RNA PMC.

Para exemplificar esta capacidade foi considerado um aumento de 25%, 55% e 50%, consequentemente nas barras 20, 33 e 37. Essas condições não foram utilizadas para treinamento da RNA PMC. Com a nova configuração de carregamento do sistema o ajuste coordenado adaptativo é capaz de obter parâmetros dos controladores ESP e POD de forma a acompanham essas alterações. Os resultados fornecidos na Tabela 6 são os novos valores processados pela RNA PMC para os parâmetros dos controladores ESP e POD.

Tabela 6: Parâmetros dos ESP e POD (situação não conhecida pela RNA PMC)

Parâmetros	ESP G-5	ESP G-9	POD
$T_1$	1,9012	0,3633	0,1139
$T_2$	0,0770	0,0970	0,8250
K	0,2319	4,6205	0,2830

Para estabelecer a validação do ajuste coordenado adaptativo (para as condições de carregamento citadas acima) se considera os resultados obtidos na Tabela 4 para o ajuste dos controladores ESP e POD (parâmetros fixos), comparando com os resultados obtidos na Tabela 6 para o ajuste dos controladores ESP e POD (parâmetros adaptativos). Na Tabela 7 são mostrados os resultados dos coeficientes de amortecimento quando os controladores são ajustados com os parâmetros fixos e os parâmetros adaptativos (para as condições de carregamento citadas anteriormente).

Tabela 7: Comparação dos  $\xi$  utilizando os ajustes dos parâmetros dos ESPs e TCSC-POD fixo e adaptativo

Modos	Ajuste Fixo	Ajuste Adaptativo
1	0,0353	0,0324
2	0,0319	0,0310
3	0,0382	0,0409
4	0,0278	0,0265
5	0,0245	0,0218
6	0,0102	0,0138
7	0,1162	0,0997
8	0,0873	0,1079
9	0,0560	0,1094

Os resultados obtidos na Tabela 7 mostram que a RNA PMC consegue manter o amortecimento desejado para os modos oscilatórios de interesse, o que não se consegue



com o ajuste fixo. A variação de carregamento pode afetar a operação do SEP e a RNA PMC se mostra eficaz para alterar os parâmetros mantendo o ajuste coordenado.

## 6 Conclusões

A partir de problemas identificados neste trabalho, foi possível verificar métodos de localização e ajuste de controladores ESP e dispositivos TCSC-POD. Os métodos de localização foram determinados primeiramente, uma vez que dependendo da localização haverá variação no ajuste dos controladores ESP e POD.

Dois métodos distintos determinaram a localização: Fator de participação e a diferença entre o polo e zero, respectivamente para o ESP e TCSC-POD. Com as localizações determinadas foi possível obter parâmetros dos controladores ESP e POD de forma satisfatória.

O ajuste é realizado de forma coordenada através da RNA PMC, utilizando o DMC para obter os padrões de entrada e saída. Após o processamento da RNA PMC ela foi capaz de obter parâmetros para situações conhecidas e não conhecidas. Como a proposta do trabalho é manter o amortecimento de forma coordenada, mesmo para situações não conhecidas, a RNA PMC conseguiu manter o ajuste coordenado com as variações de carregamento do SEP.

Uma das dificuldades encontradas para o ajuste foi a seleção de dados para realizar o treinamento da RNA PMC. Considerando algumas situações o entendimento da RNA PMC era prejudicado em seu treinamento e após este processo a RNA PMC não reconhecia situações desconhecidas. Uma solução proposta para trabalhos futuros é a utilização de RNAs mais sofisticadas ou até mesmo a utilização de técnicas de otimização.

## Referências

- Araujo, P. B. and Zaneta, L. C. (2001). Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity, *International Journal of Electric Power and Energy Systems* **23**(3): 173–178. DOI: [10.1016/S0142-0615\(00\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(00)00055-7)
- Chen, C. L. and Hsu, Y. Y. (1987). Coordinated synthesis of multimachine Power System Stabilizer using an efficient Decentralized Modal Control (DMC) algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* **2**(3): 543–550. DOI: [10.1109/TPWRS.1987.4335165](https://doi.org/10.1109/TPWRS.1987.4335165)
- Deckmann, S. M. and Costa, V. F. (1994). A Power Sensitivity Model for electromechanical oscillation studies, *Wiley-IEEE Press* **9**(2): 965–971.
- Furini, M. A., Pereira, A. L. S. and Araujo, P. B. (2011). Pole placement by coordinated tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD stabilizers, *International Journal of Electric Power System and Energy Systems* **33**(3): 615–622. DOI: [10.1016/j.ijepes.2010.12.019](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.019)
- Hagan, M. T. and Menhaj, M. B. (1994). Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks* **5**(6): 989–993. DOI: [10.1109/72.329697](https://doi.org/10.1109/72.329697)
- Haykin, S. (1994). *Neural Networks: A comprehensive Foundation, Upper Saddle River*, New Jersey.
- Hingorani, S. M. and Costa, V. F. (1999). *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system*, United Kingdom.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, New York.
- Mhaskar, U. P. and Kulkarni, A. M. (2006). Power oscillation damping using FACTS devices: modal controllability, observability in local signals, and location of transfer function zeros, *IEEE Transactions on Power System* **21**(1): 285–294. DOI: [10.1109/TPWRS.2005.856983](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.856983)
- Moura, R. F., Furini, M. A. and Araujo, P. B. (2012). Estudo das limitações impostas ao amortecimento de oscilações eletromecânicas pelos zeros da FTMA de controladores suplementares, *Revista Automacao e Controle* **23**(1): 190–201. DOI: [10.1590/S0103-17592012000200006](https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000200006)
- Nguyen, T. T. and Gianto, R. (2008). Neural networks for adaptive control coordination of ESPs and FACTS devices multimachine power system, *IET Generation, Transmission and Distribution* **2**(3): 355–372. DOI: [10.1049/iet-gtd:20070125](https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070125)
- Sadikovic, R. (2004). Damping controller design for power system oscillations, *Technical report*, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Song, Y. H. and Johns, A. T. (1999). *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, United Kingdom. DOI: [10.1049/PBPO030E](https://doi.org/10.1049/PBPO030E)
- Yang, N., Liu, Q. and McIlley, J. D. (1998). TCSC controller design for damping interarea oscillations, *IEEE Transactions on Power System* **13**(14): 1304–1310. DOI: [10.1109/59.736269](https://doi.org/10.1109/59.736269)