

## 12º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2021

### ESTUDO DA ESTABILIDADE À PEQUENOS SINAIS DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO A ATUAÇÃO DO ESP

ARTHUR ALVES CYRIACO DA SILVA<sup>1</sup>, DANILO BASSETO DO VALLE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, arthur.cyriaco@aluno.ifsp.edu.br

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, IFSP-GPAI, Câmpus Votuporanga, danilo.valle@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.03.03.04-9 Sistema Elétrico de Potência

**RESUMO:** O principal objetivo deste artigo foi o estudo e o desenvolvimento de um programa computacional para a análise da estabilidade à pequenos sinais de um sistema de energia elétrica (SEE). O modelo linear de Heffron e Phillips (MHP) foi utilizado para representar o sistema elétrico de potência (SEP), sendo este composto por uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma impedância equivalente. Um Estabilizador de Sistemas Elétricos de Potência (ESP), composto por um ganho estático, um filtro de *washout* e dois blocos de compensação de fase foi incluído na malha de controle do Regulador Automático de Tensão (RAT) do gerador síncrono. Foram analisados os autovalores obtidos a partir da matriz de estados de um SEP teste conhecido, sendo possível verificar a influência positiva da inclusão do ESP no amortecimento das oscilações eletromecânicas locais do sistema. O programa foi desenvolvido utilizando o software GNU Octave, por ser livre e compatível com muitos scripts do Matlab®.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade à Pequenos Sinais, Sistema Elétrico de Potência; Modelo linear de Heffron-Phillips; Regulador Automático de tensão; Estabilizador de Sistema de Potência (ESP).

#### SMALL-SIGNAL STABILITY STUDY OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM CONSIDERING THE PSS PERFORMANCE

**ABSTRACT:** The main objective of this paper was to study and develop a computational program for the small-signal stability analysis of an electric power system (EPS). The Heffron-Phillips model (HPM) was used to represent the electrical power system, which is composed of a synchronous machine connected to an infinite bus through an external equivalent impedance. A Power System Stabilizer (PSS), composed of a static gain, a washout filter and two-phase compensation blocks was included in the control loop of the Automatic Voltage Regulator (AVR) of the synchronous generator. The eigenvalues obtained from the state matrix of a known test EPS were analyzed, and it was possible to verify the positive influence of the inclusion of the PSS on the damping of the local electromechanical oscillations of the system. The program was developed using the GNU Octave software, for being free and compatible with many Matlab® scripts.

**KEYWORDS:** Automatic Voltage Regulator (AVR); Electric Power System; Heffron-Phillips Model; Power System Stabilizer (PSS); Small-Signal Stability

#### INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas que envolvem a operação segura e confiável de um SEE está relacionado a instabilidade oscilatória, que é causada por uma deficiência no amortecimento natural do sistema (ANDERSON, 2003; KUNDUR, 1994).

O problema do déficit de amortecimento no SEP deve-se a inúmeros fatores, dentre os quais é possível citar: o grande número de elementos conectados com características dinâmicas totalmente diferentes; o aumento na demanda de energia elétrica, associado a uma grande morosidade na construção de novas unidades geradoras e/ou linhas de transmissão; o baixo investimento em novas tecnologias pelos agentes operantes do SEP; as perturbações que ocorrem a todo momento, como os curtos-circuitos, as perdas de linhas de transmissão e/ou unidades geradoras, as linhas de transmissão fracas, ou seja, aquelas com potenciais muito inferiores às capacidades dos sistemas que elas interligam, entre outros (VALLE, 2014).

As oscilações eletromecânicas causadas pelos problemas apontados podem ser do tipo local, cuja frequência encontra-se na faixa de 0,8 a 2,0 Hz (e que são objeto de estudo deste trabalho), do tipo interárea (faixa de frequência entre 0,1 e 0,8 Hz) ou inter-planta (frequências entre 1,5 e 3,0 Hz). Tais oscilações quando mal amortecidas podem tornar o sistema inoperante, devido à instabilidade.

De modo a solucionar o problema da instabilidade oscilatória de baixa frequência do SEP, DeMello e Concordia (1969) propuseram a utilização de ESPs nas malhas de controle dos RATs dos geradores síncronos. Com o intuito de entender o fenômeno das oscilações eletromecânicas de baixa frequência, o princípio de funcionamento dos ESPs e futuramente utilizar técnicas de metaheurística para a parametrização destes controladores, o presente artigo foi arquitetado (UMANS, 2014).

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a análise da estabilidade à pequenos sinais é fundamental modelar os principais componentes do SEP. Diferentes modelos são descritos na literatura para representação do sistema, como por exemplo, o MHP, o MSP e o MSC (SILVA, 2008).

Neste artigo optou-se pelo primeiro e para tal feito, o MHP foi modelado conforme a literatura de estabilidade, ou seja, fora considerado um diagrama unifilar de um sistema MBI, onde o gerador foi representado por um modelo de terceira ordem e o regulador automático de tensão por um modelo de primeira ordem (Heffron e Phillips, 1952).

As equações que relacionam os fenômenos físicos, mecânicos e elétricos do gerador síncrono são obtidas a partir da equação de *swing* da máquina. Esta equação de segundo grau foi decomposta em duas equações de primeira ordem, sendo a variação da velocidade síncrona do gerador ( $\Delta\omega$ ) e do ângulo de carga ( $\Delta\delta$ ) da máquina. Tais equações, linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, são descritas conforme o estabelecido em (1) e (2).

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{D}{M}\Delta\omega - \frac{k_1}{M}\Delta\delta - \frac{k_2}{M}\Delta e'_q + \frac{1}{M}\Delta P_m \quad (1)$$

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2),  $D$  representa o coeficiente de torque de amortecimento intrínseco do sistema, sendo este torque formado pelas inércias de carga, linha de distribuição e atritos não considerados, possuindo componentes contrárias as oscilações do rotor,  $M = 2H$ , sendo  $H$  a constante de inércia das máquinas síncronas e  $\Delta P_m$  a variação da potência mecânica (ANDERSON, 2003; KUNDUR, 1994).

A variação da tensão interna de um gerador síncrono é definida pela equação (3), que tem como objetivo implementar a dinâmica do circuito de campo da máquina síncrona. Nesta equação linearizada,  $T'_{d0}$  e  $e_{fd}$ , representam, respectivamente, a constante de tempo transitória de eixo direto do gerador em circuito aberto e a tensão de campo da máquina síncrona (KUNDUR, 1994; VALLE, 2014).

$$\Delta\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}\Delta e_{fd} - \frac{1}{T'_{d0}k_3}\Delta e'_q - \frac{k_4}{T'_{d0}}\Delta\delta \quad (3)$$

A estrutura do regulador automático de tensão de primeira ordem é formada por um ganho  $k_r$  e por uma constante de tempo  $t_r$ . Trabalhando com as equações da tensão terminal e tensão interna do sistema MBI e as substituindo na equação característica do RAT, chegou-se na equação (4).

$$\Delta \dot{e}_{fd} = -\frac{k_r k_5}{t_r} \Delta \delta - \frac{k_r k_6}{t_r} e'_q - \frac{1}{t_r} \Delta e_{fd} + \frac{k_r}{t_r} \Delta v_{ref} \quad (4)$$

Na equação (4),  $\Delta v_{ref}$  é a tensão de referência especificada para o sistema e  $e_{fd}$  é a tensão de excitação regulada da máquina síncrona. Considerando o RAT de ação rápida, o SEP passa a ter uma representação mais fidedigna. Todas as equações foram linearizadas baseando na expansão por série de Taylor (retendo-se somente os termos das derivadas parciais de primeira ordem), pois no estudo da estabilidade à pequenos sinais é possível linearizar o sistema e manter as suas principais informações, conseguindo assim utilizar os princípios de controle clássico (OGATA, 2011).

Compactando as informações que descrevem o sistema e organizando essas quatro equações diferenciais de primeira ordem obtidas no modelamento, é possível representá-las em matrizes, formando o modelo do sistema no espaço de estados, sendo uma representação importante e comum do MHP, como mostra a equação (5).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{e}'_q \\ \Delta \dot{e}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{k_1}{M} & -\frac{k_2}{M} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_4}{T'_{d0}} & -\frac{1}{T'_{d0} k_3} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & -\frac{k_r k_5}{t_r} & -\frac{k_r k_6}{t_r} & -\frac{1}{t_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta e'_q \\ \Delta e_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta v_{ref} \end{bmatrix} \quad (5)$$

No conjunto de equações (5),  $k_1$  a  $k_6$ , são os coeficientes do MHP. Este conjunto de equações representa o modelo linear de Heffron e Philips na sua forma clássica. Todos os significados físicos das constantes apresentadas e as equações que representam os coeficientes do MHP podem ser encontrados com detalhes em (SILVA, 2008; ANDERSON, 2003; KUNDUR, 1994; DEMELLO e CONCORDIA, 1969)

Para a implementação do estabilizador de sistema de potência (ESP) no modelo do MHP, é necessário utilizar a sua estrutura de controle conforme o demonstrado pela figura (1).

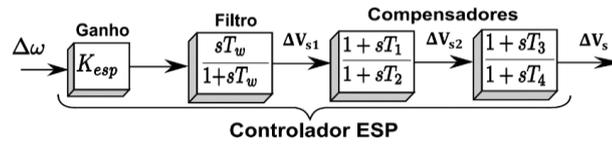


FIGURA 1. Estrutura do ESP

Com base na figura (1), foi obtido a equação característica do ESP. Desta forma, o sistema foi remodelado e assim uma outra representação do sistema no espaço de estado pode ser formada já com a inclusão do ESP, conforme apresenta a equação (6).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{e}'_q \\ \Delta \dot{e}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_s \\ \Delta \dot{V}_{s1} \\ \Delta \dot{V}_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{k_1}{M} & -\frac{k_2}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_4}{T'_{d0}} & -\frac{1}{k_3 T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_r k_5}{t_r} & -\frac{k_r k_6}{t_r} & -\frac{1}{t_r} & \frac{k_r}{T_r} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{esp} D T_1 T_3}{T_2 T_4 M} & -\frac{K_{esp} k_1 T_1 T_3}{T_2 T_4 M} & -\frac{K_{esp} k_2 T_1 T_3}{T_2 T_4 M} & 0 & -\frac{1}{T_4} & \left( \frac{T_3 T_\omega - T_1 T_3}{T_2 T_4 T_\omega} \right) & \left( \frac{T_2 - T_3}{T_2 T_4} \right) \\ -\frac{K_{esp} D}{M} & -\frac{K_{esp} k_1}{M} & -\frac{K_{esp} k_2}{M} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\omega} & 0 \\ -\frac{K_{esp} D T_1}{T_2 M} & -\frac{K_{esp} k_1 T_1}{T_2 M} & -\frac{K_{esp} k_2 T_1}{T_2 M} & 0 & 0 & \left( \frac{T_\omega - T_1}{T_2 T_\omega} \right) & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta e'_q \\ \Delta e_{fd} \\ \Delta V_s \\ \Delta V_{s1} \\ \Delta V_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_{esp} T_1 T_3}{T_2 T_4 M} \\ \frac{K_{esp}}{M} \\ \frac{K_{esp} T_1}{T_2 M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta v_{ref} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Na equação (6),  $\Delta V_s$ ,  $\Delta V_{s1}$  e  $\Delta V_{s2}$  são os sinais suplementares da malha de controle do ESP,  $k_{esp}$  é o ganho do estabilizador de sistema de potência,  $T_\omega$  é a constante de tempo do filtro de washout do ESP

e, por fim,  $T_1$  a  $T_4$  são as constantes de tempo do estabilizador do sistema elétrico de potência.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados do sistema teste considerado neste trabalho podem ser encontrados no exemplo 5.1 do livro de Gibbard (2015). Considerando o ponto de operação de 0,9 pu de potência ativa e 0,2 pu de potência reativa na saída do gerador síncrono, obteve-se os dados apresentados na tabela 1.

TABELA 1. Autovalor dominante, frequência de oscilação e coeficiente de amortecimento do sistema.

Tipo do Modo	Autovalor	$\omega_n$ (Hz)	$\xi$ (pu)
Local	$0,2673 \pm j8,2458$	1,3124	-0,0324

A partir da tabela 1 é possível validar o programa desenvolvido, uma vez que os resultados obtidos são exatamente iguais aos que foram apresentados por Gibbard (2015). Verifica-se também pela tabela 1 que o modo eletromecânico de oscilação do sistema é do tipo local, uma vez que sua frequência típica de oscilação é de 1,3124 Hz.

Na figura 2 é apresentado a posição dos autovalores e a curva de resposta do ângulo do rotor da máquina ( $\Delta\delta$ ), considerando uma perturbação do tipo degrau positivo de 5% na potência mecânica do gerador (o barramento infinito foi tomado como referência angular para o sistema).

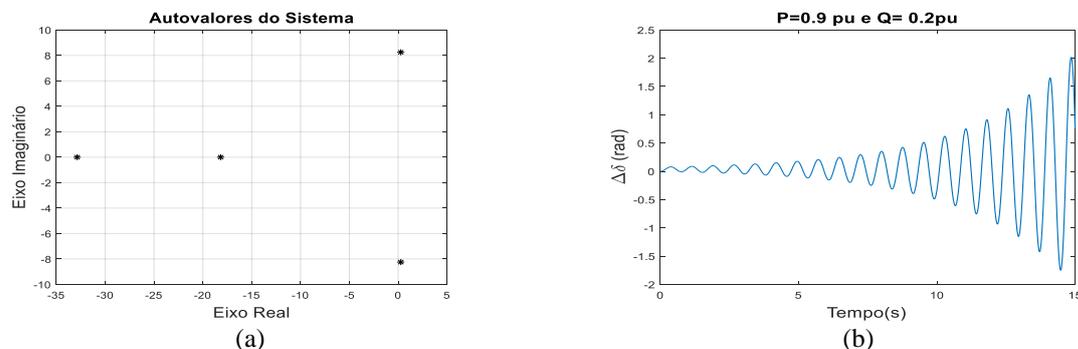


FIGURA 2. (a) Autovalores do sistema e (b) desvio angular do ângulo do rotor da máquina.

A partir da figura 2 é possível verificar que, para o ponto de operação considerado, o sistema é instável, ou seja, possui autovalores que se encontram à direita no semiplano complexo (figura 2(a)) e amortecimento negativo, mostrando assim concordância com a tabela 1, o que caracteriza as oscilações de amplitudes crescentes, conforme ilustra a figura 2(b).

Com o objetivo de levar o sistema à estabilidade, foi incluído na malha de controle do RAT do gerador o ESP. Os dados das constantes de tempo do ESP estão apresentados na tabela 2

TABELA 2. Valores de ganho e constantes de tempo do controlador ESP.

$k_{esp}$	$T_w$	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$
1,85	10	0,12	0,043

Após a inclusão deste controlador, considerando as constantes apresentadas na tabela 1, obteve-se os dados apresentados na tabela 3.

TABELA 3. Autovalor dominante, frequência de oscilação e coeficiente de amortecimento do sistema.

Tipo do Modo	Autovalor	$\omega_n$ (Hz)	$\xi$ (pu)
Local	$-1,6673 \pm j8,2708$	1,3163	0,1976

Analisando a tabela 3, verifica-se que o ESP forneceu amortecimento positivo ao sistema, levando os autovalores do sistema à esquerda do semiplano complexo, conforme pode ser observado pela figura 3(a). Verifica-se também pela tabela 3 que mesmo após a inclusão do ESP a frequência de oscilação pouco se alterou, mostrando que o ESP direcionou os autovalores para o semiplano negativo sem afetar de forma significativa a frequência dos autovalores.

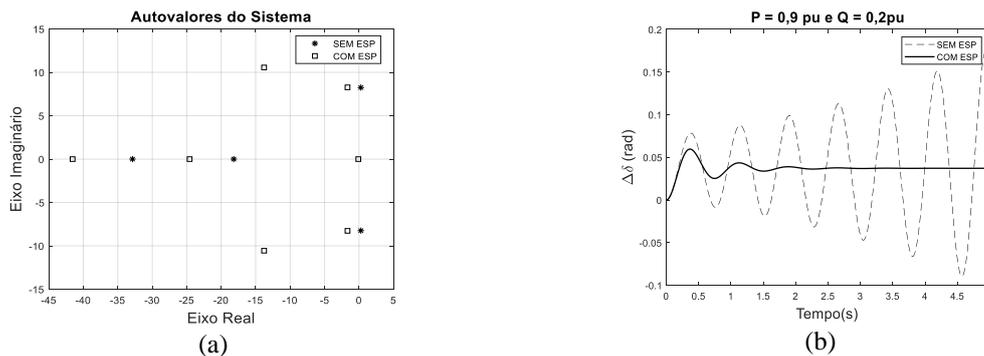


FIGURA 3. (a) Autovalores do sistema e (b) desvio angular do ângulo do rotor da máquina.

Verifica-se pela figura 3(b) que o controlador ESP proporcionou o efetivo amortecimento das oscilações, as quais foram extintas em menos de 3 segundos, mostrando a eficácia deste tipo de controlador para solucionar este tipo de problema danoso à operação segura e confiável do SEP.

## CONCLUSÕES

Conclui-se que o programa desenvolvido foi capaz de simular as diferentes condições impostas, estando apto a sofrer as modificações para a inclusão de distintas técnicas de metaheurística para a parametrização do controlador ESP. Verificou-se que, para a condição de carregamento adotada o sistema era instável, sendo este caracterizado por falta de amortecimento. Foi possível observar que, após a inclusão do ESP, o dispositivo conseguiu de forma satisfatória fornecer amortecimento suplementar ao sistema, levando-o a estabilidade.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, ao PIBIFSP, ao meu orientador e ao grupo de pesquisa GPAI, por todo apoio e comprometimento comigo e com este projeto, sou muito grato a todos.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. **Power System Control and Stability**. Piscataway, N.J: IEEE Press Wiley-Interscience, 2003.
- DEMELLO, F.; CONCORDIA, C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-88, p. 316–329, abr. 1969.
- GIBBARD, M. J.; POURBEIK, P.; VOWLES, D. J. **Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems**. [S.l.]: The University of Adelaide, 2015.
- HEFFRON, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators [includes discussion]. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, v. 71, p. 692–697, ago. 1952.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill Education - Europe, 1994.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- SILVA, M. S. **Estudo Comparativo do Modelo Linear de Heffron e Phillips e Modelo de Sensibilidade de Potência com a Inclusão dos Dispositivos FACTS SVC e TCSC**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2008.
- UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley - 7.ed.** Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.
- VALLE, D. B. D. V. **A Influência do Controlador GUPFC no Sistema Elétrico de Potência Visando a Estabilidade à Pequenas Perturbações**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2014.