DOI: 10.48011/asba.v2i1.1044

Proposta para o Refinamento de Ganhos do Estabilizador de Potência de uma Unidade de Geração Hidrelétrica

Disnei R. dos Reis * **Pedro H. B. Ferreira** *
Vitor G. del Vecchio Reche * **Francisco J. Triveno Vargas** *

* *Engenharia Elétrica, Universidade de Araraquara, SP (e-mail: disneireis, phbferreira, vgdvreche, fjtvargas@uniara.edu.br)*

Abstract: The Bolivian Energy Company has requested a proposal for the revision and refinement of the control systems of its generating units geographically located in the region subtropical west of Bolivia. In this sense, this work contains the review of mathematical modelling for generators, the description of the Heffron-Phillips model, the presentation of the algorithm based on the frequency domain and the algorithms of optimization for determining the time constants of the filters lead-lag of PSS. Emphasize that the techniques proposed for the design of the power system stabilizers aim to minimize the oscillations of the power system after disturbances, in order to improve the stability of the Bolivian interconnected system.

Resumo:
A Companhia Boliviana de Energia requisitou uma proposta para a revisão e refinamento dos sistemas de controle de suas unidades geradoras localizadas geograficamente na região subtropical oeste da Bolívia. Neste sentido este trabalho contém a revisão da modelagem matemática para geradores, a descrição do modelo de Heffron-Phillips, a apresentação do algoritmo baseado no domínio da frequência e dos algoritmos de otimização para a determinação das constantes de tempo dos filtros de avanço e atraso (lead-lag) dos PSS. Vale Ressaltar que as técnicas propostas para o projeto dos estabilizadores de potência visam minimizar as oscilações do sistema de energia após perturbações, a fim de melhorar a estabilidade do sistema interligado.

Keywords: Power System Stabilizer, Voltage and Speed Regulators, Generator, Optimization.

Palavras-chaves: Estabilizador sistema de potência, reguladores tensão e velocidade, geradores, otimização.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de energia é um sistema multivariável não linear que opera em um ambiente sujeito a mudanças contínuas, variações de carga, saídas e entradas de geradores, alterações na topologia e nos parâmetros operacionais. Quando o sistema sofre perturbações, ele deve ser capaz de responder satisfatoriamente e cobrir com sucesso as variações de carga, suportar distúrbios, como curtos-circuitos nas linhas de transmissão ou a saída de geradores Pota (2018), Kundur (1993).

A resposta do sistema a uma perturbação pode comprometer várias instalações do mesmo. Por exemplo, a falha de um elemento crítico seguido de seu isolamento pela ação dos relés de proteção trará variações nos fluxos de potência, nas tensões e na frequência da rede. As variações de tensão atuam os reguladores de tensão (AVR) e os estabilizadores do sistema de potência (PSS); e variações de frequência farão com que o regulador de velocidade seja acionado. Por outro lado, é função do sistema de energia fornecê-la continuamente, respeitando níveis de qualidade, isto é, deve manter a frequência e a tensão dentro de limites preestabelecidos Development and Committee (2006), Development and Committee (2014).

Considerando o exposto, a Companhia Boliviana de Energia requisitou uma proposta para a revisão e refinamento dos sistemas de controle de suas unidades geradoras localizadas geograficamente na região sub-tropical do oeste da Bolívia entre os departamentos de La Paz e Oruro. Estas unidades são todas hidrelétricas e fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A proposta elaborada apresenta uma revisão teórica dos reguladores de tensão, dos reguladores de velocidade e dos PSSs, no entanto, este trabalho contém apenas a revisão teórica e os resultados de simulação obtidos para os PSS. É importante destacar que as técnicas propostas para o projeto dos estabilizadores visa minimizar as oscilações do sistema de energia após perturbações, a fim de melhorar a estabilidade do SIN.

Embora exista uma pesquisa considerável para o projeto de PSS em sistemas multi máquina Theja et al. (2013), Tavakoli et al. (2015), Ferdoush and Rabbani (2014), Hammer (2011), Kamwa et al. (2005), dos Santos Mota (2010), Padiyar (2008), Mengjing et al. (2016) Machowski et al. (2008),Barik (2014), Banna et al. (2014) nenhum resultado definitivo foi aplicado em campo. Neste sentido este trabalho contém a revisão da modelagem matemática para geradores, a descrição do modelo de **Heffron-**

Phillips, a apresentação do algoritmo baseado no domínio da frequência e dos algoritmos de otimização para a determinação das constantes de tempo dos filtros de avanço e atraso (*lead-lag*) dos PSS. Os algoritmos de otimização são aplicados para o refinamento destes parâmetros. Por fim são apresentados os resultados obtidos, algumas conclusões e considerações.

2. MODELO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

A proposta é baseada em uma única máquina conectada a um barramento infinito (SMIB)[1]. O modelo apresentado com as adequações necessárias foi extraído de Sauer and Pai (1997) e Yu (1983). A Fig. 1 ilustra o sistema em questão.

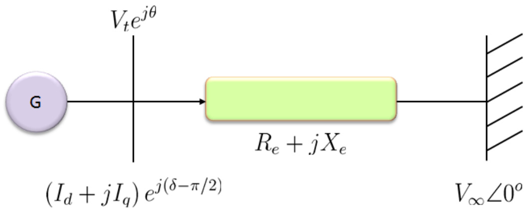


Figura 1. Sistema barra infinita

As equações de uma única maquina com decaimento, onde E_{fd} é a entrada são:

$$\dot{E}_q^{'} = -\frac{1}{T_{do}^{'}}\left(E_q^{'} + (X_d - X_d^{'})I_d - E_{fd}\right) \quad (1)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_s}{2H}\left[T_m - \left(E_q^{'} I_q + I_d I_q \ldots (X_q - X_d^{'}) + D(\omega - \omega_s)\right)\right] \quad (3)$$

Considerando V_t como a magnitude da tensão terminal do gerador, as equações do estator com $R_s = 0$ são:

$$XqI_q - V_t \sin(\delta - \theta) = 0 \quad (4)$$

$$E_q^{'} - V_t \cos(\delta - \theta) - X_d^{'} I_d = 0 \quad (5)$$

com

$$(V_d + jV_q)\, e^{j(\delta - \pi/2)} = V_t e^{j\theta} \quad (6)$$

Expandindo a equação (6) e substituindo-a nas Equações (4) e (5) é obtido:

$$X_q I_q - V_d = 0 \quad (7)$$

$$E_q^{'} - V_q - X_d^{'} I_d = 0 \quad (8)$$

Acrescentando as equações de rede (para a barra infinita com fase zero):

$$R_e I_d - X_e I_q = V_d - V_\infty \sin\delta \quad (9)$$

$$X_e I_d + R_e I_q = V_q - V_\infty \cos\delta \quad (10)$$

[1] Permite analisar o modo local de oscilação da planta na faixa de 1 a 3 Hz.

e uma excitatriz de ação rápida regida pela equação a seguir:

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{E_{fd}}{T_A} + \frac{K_A}{T_A}(V_{ref} - V_t) \quad (11)$$

As equações (1)-(3) e (11) assim como as equações (7), (8), (9) e (10) são as que regem o sistema de barra infinita. Linearizando ao redor de um ponto de operação, e eliminando as variáveis I_d, I_q, θ, V_d e V_q é obtido o diagrama de blocos ilustrado na Fig. 2, onde as constantes $K_1 - K_6$ são calculadas a partir das equações apresentadas no Apêndice A.

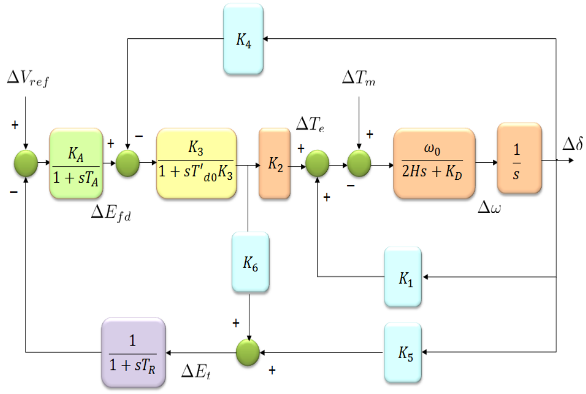


Figura 2. Modelo de Heffron-Phillips

A Fig. 2 em variáveis de estado é representada por[2]:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 T_{do}^{'}} & -\frac{K_4}{T_{do}^{'}} & 0 & \frac{1}{T_{do}^{'}} \\ 0 & 0 & \omega_s & 0 \\ -K_2/2H & -K_1/2H & D\omega_s/2H & 0 \\ -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}^T \Delta V_{ref} \quad (13)$$

onde os estados são:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_q^{'} & \Delta\delta & \Delta\omega & \Delta E_{fd} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

2.1 Considerações de projeto

Para propósitos de projeto, as seguintes considerações são necessárias:

(1) A função de transferência da relação entrada-saída $-\dfrac{\Delta\delta}{\Delta T_e}$ é ilustrada na Fig. 3

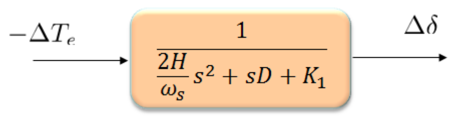


Figura 3. Relação ângulo torque

[2] A função de transferência do sensor não é considerada.

Fazendo $\Delta T_m = 0$, a frequência subamortecida ($D = 0$) é obtida a partir das raízes da equação característica:

$$\frac{2H}{\omega_s}s^2 + K_1 = 0$$

$$s_{1,2} = \pm j\sqrt{\frac{K_1\omega_s}{2H}} \tag{15}$$

(2) O estabilizador do sistema de potência (PSS) cuja entrada corresponde à frequência ω conectado à entrada da excitatriz é representado pela função de transferência $G(s)$ tal como ilustrado na Fig. 4.

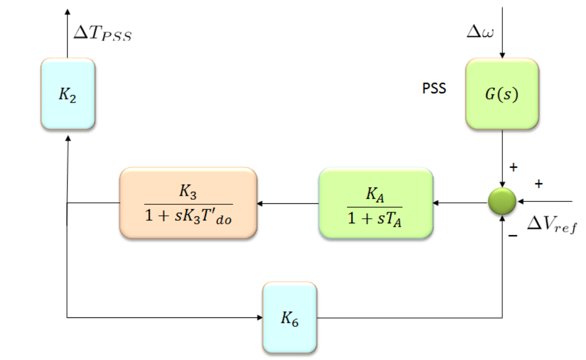


Figura 4. Entrada do PSS

Assumindo a variação da referência ΔV_{ref} e a variação do ângulo da máquina $\Delta\delta$ iguais a zero, a contribuição do PSS à relação torque ângulo é dada por:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta T_{PSS}}{\Delta\omega} &= \frac{G(s)K_2K_AK_3}{K_AK_3K_6 + (1+sK_3T'_{do})(1+sT_A)} \\ &= G(s)GEP(s)\end{aligned} \tag{16}$$

3. ESTABILIZADOR DO SISTEMA DE POTÊNCIA

A Fig. 5 ilustra a forma generalizada de um estabilizador do sistema de potência com uma única entrada [3]. Os blocos de atraso e avanço são representados pelas constantes de tempo T_1 a T_4. O ganho do estabilizador é definido pelo termo K_c e o filtro passa-alta (*washout*) é dado pela constante de tempo, T_w [4].

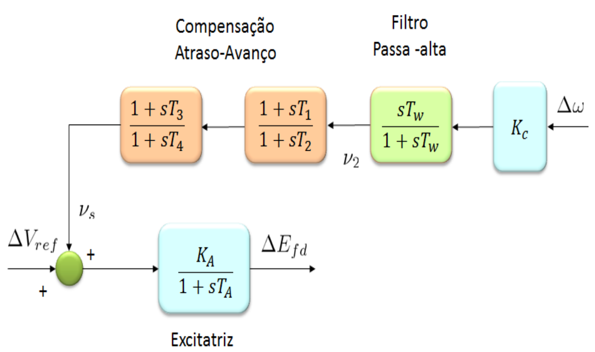


Figura 5. Estabilizador de potência clássico

[3] Sinais de entrada comuns são a velocidade angular e a potência elétrica.

[4] Filtro que rejeita entradas de estado estacionário, enquanto deixa passar entradas transitórias.

4. ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

Os algoritmos apresentados neste trabalho correspondem ao algoritmo baseado no *domínio da frequência* proposto por Yu (1983) e Sauer and Pai (1997), aos algoritmos de otimização dos *mínimos quadrados não lineares* e a *programação quadrática sequencial* do Matlab-Simulink®Gilat (2006), embora os algoritmos não sejam proprietários, as aplicações apresentadas pertencem aos autores. A função objetivo empregada pelos algoritmos de otimização corresponde à integral do módulo do erro de tensão vezes o tempo Wilson (2015):

$$\int_0^t |e(t)| \cdot t dt \tag{17}$$

É importante ressaltar que a referência de entrada empregada pelos algoritmos de otimização é um degrau.

4.1 Algoritmo no domínio da frequência

(1) Encontrar a frequência natural não amortecida ω_n em rad/s da malha $-\dfrac{\Delta\delta}{\Delta T_e}$ como:

$$\frac{2H}{\omega_s}s^2 + K_1 = 0, \text{ i.e., } s_{1,2} = \pm j\omega_n \tag{18}$$

onde

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1\omega_s}{2H}} \tag{19}$$

(2) Determinar o atraso de fase de $GEP(s)$ em $s = j\omega_n$,

(3) Determinar o avanço de fase de $G(s)$ tal que:

$$\angle G(s)|_{s=j\omega_n} + \angle GEP(s)|_{s=j\omega_n} = 0 \tag{20}$$

onde

$$G(s) = K_c\left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2}\right)^k \tag{21}$$

k é igual a 1 ou 2 com $T_1 > T_2$. Conhecendo o valor de ω_n e a $\angle GEP(s)|_{s=j\omega_n}$ T_1, pode ser determinado ao tempo que T_2 pode variar entre 0.02 e 0.15.

(4) Determinar o ganho do PSS como:

$$K_c = \frac{4\zeta_n\omega_n H}{K_2|G(s)||GEP(s)|} \tag{22}$$

um valor padrão de amortecimento ζ é 0.3.

(5) Determinar o filtro passa-alta.

$$G_f = \frac{sT_w}{1+sT_w} \tag{23}$$

tal que, T_w varia entre 3 e 10.

4.2 Mínimos quadrados não lineares

Este método minimiza a norma da função objetivo de acordo com:

$$\begin{aligned}&\min_x ||f_i(x)||_2^2 = \min_x \left(f_1(x)^2 + \cdots + f_n(x)^2\right) \\ &\text{tal que:} \quad l_b \geq x \geq u_b\end{aligned} \tag{24}$$

onde l_b e u_b correspondem aos limites de busca inferior e superior. A função objetivo corresponde à Equação (17) e seus limites de busca são:

$$0.01 \leq T_k \leq 6 \quad \text{tal que:} \quad k = 1 \dots 4 \tag{25}$$

O fluxograma do método é ilustrado na Fig. 6.

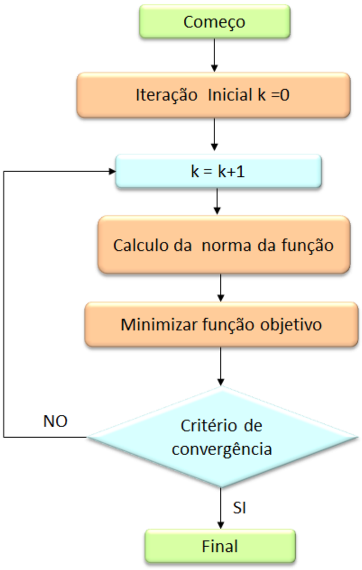


Figura 6. Mínimos quadrados não lineares

4.3 Programação Quadrática Sequencial

Este método faz a busca de um ponto que minimize o máximo de um conjunto de funções objetivo, sujeitas a vários tipos de restrição, ou seja:

$$\min_x \max_i F_i(x)$$
$$\text{tal que:} \begin{cases} c(x) & \leq & 0 \\ c_{eq}(x) & = & 0 \\ A \cdot x & \geq & b \\ A_{eq} \cdot x & = & b_{eq} \\ l_b \geq x & \geq & u_b \end{cases} \tag{26}$$

onde b e b_{eq} são vetores, A e A_{eq} são matrizes e $c(s)$, $c_{eq}(x)$ e $F(x)$ são funções que retornam vetores não lineares. Finalmente l_b e u_b são os limites de busca inferior e superior, estes limites estão dados pela equação (25). Igual ao método anterior a função objetivo é a equação (17) e inicialmente as restrições não são consideradas. Seu fluxograma é ilustrado na Fig. 7.

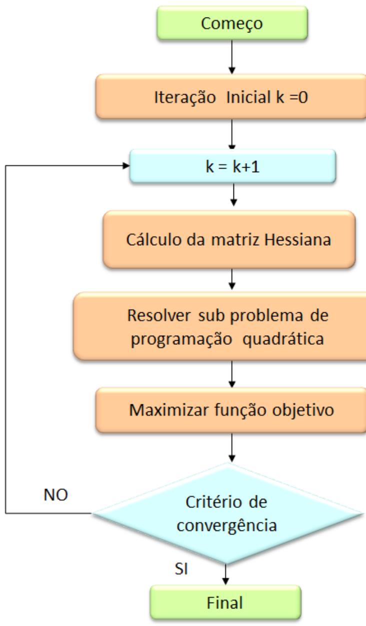


Figura 7. Programação quadrática sequencial

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos estão baseados no sistema de barra infinita apresentado em Yu (1983) e Sauer and Pai (1997). A Tabela 1 contém os dados da máquina.

Tabela 1. **Dados da máquina em p.u**

Gerador	Excitação	Linha e carga	Potência e tensão inicial
$H = 4.63$ $T'_{do} = 7.76$ $X_d = 0.973$ $X'_d = 0.190$ $X_q = 0.550$	$K_A = 50$ $T_A = 0.05$	$R = -0.034$ $X = 0.997$ $G = 0.249$ $B = 0.262$	$P_{e0} = 1$ $Q_{e0} = 0.015$ $v_{t0} = 1.05$

As condições iniciais obtidas são apresentadas na Tabela 2, estes valores foram determinados com as equações apresentadas no apêndice A:

Tabela 2. **Condições iniciais**

Variáveis	Valores
v_{d0}	0.4659
v_{q0}	0.9410
i_{d0}	0.4354
i_{q0}	0.8471
e'_{q0}	1.0240
v_0	1.0510
δ_0	68.01^o

As constantes de **Heffron-Phillips** são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. **Constantes Heffron-Phillips**

Constantes	Valores
K_1	0.5441
K_2	1.2067
K_3	0.6584
K_4	0.6981
K_5	-0.0955
K_6	0.8159

O resultado de simulação obtido para uma variação de carga sem o PSS é ilustrado na Fig. 8. Neste resultado verifica-se que o sistema é instável.

A Tabela 4 confirma a instabilidade com a presença de raízes no semi plano direito.

5.1 Sistema com PSS

A Tabela 5 apresenta os parâmetros obtidos com as três técnicas para a finalização dos projetos.

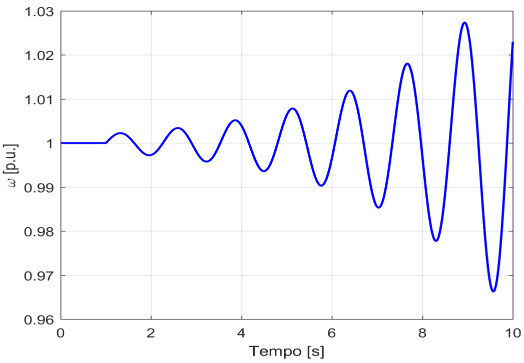


Figura 8. Velocidade ω sem PSS

Tabela 4. **Autovalores sem PSS**

Valores
-10.3930 + 3.2837i
-10.3930 - 3.2837i
0.2951 + 4.9596i
0.2951 - 4.9596i

Tabela 5. **Parâmetros de projeto**

Parâmetro	Algoritmo 1	Algoritmo 2	Algoritmo 3
T_1	0.3537	1.4642	0.1336
T_2	0.1500	0.2329	0.5916
T_3	0.3537	0.1994	3.1967
T_4	0.1500	0.2328	0.0755
K_c	5.6572	5.0	5.0

As Tabelas 6 e 7 contém os autovalores com os PSSs projetados e o amortecimento atingido pelo sistema aumentado.

Tabela 6. **Autovalores com PSS**

Algoritmo 1	Algoritmo 2	Algoritmo 3
-16.9640	-11.6506	-17.2512
-3.4119 + 9.3160i	-2.0079 + 6.0830i	-2.8124 + 6.9876i
-3.4119 - 9.3160i	-2.0079 - 6.0830i	-2.8124 - 6.9876i
-1.1194 + 3.8709i	-2.4317 + 3.7951i	-3.1877 + 3.5179i
-1.1194 - 3.8709i	-2.4317 - 3.7951i	-3.1877 - 3.5179i
-4.4404	-5.2197	-2.8007
-0.3400	-0.3352	-0.3331

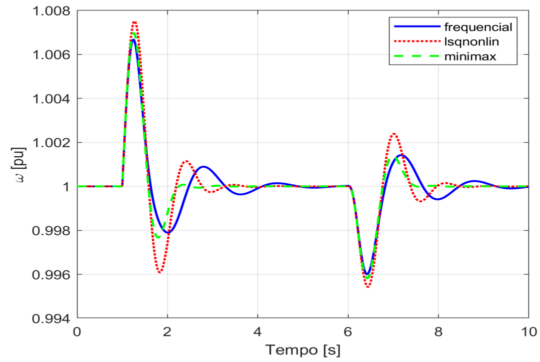
Em relação aos autovalores é verificado que as três técnicas levam os pólos do semiplano direito para o semiplano esquerdo quando incluídos os PSSs. Em termos de amortecimento verifica-se que ele também é melhorado, sendo a técnica de *programação sequencial* que tem os pólos com valores de ζ próximos a 0.4 (normas exigem este valor para os sistemas de malha fechada) Kundur (1993).

As características mencionadas também são verificadas nos resultados de simulação das Figs. 9(a) e 9(b) onde observa-se a velocidade angular ω e o delta de tensão do PSS Δ_{pss} em pu. Estes resultados foram obtidos simulando as variações de tensão e carga ilustradas nas Figs. 10(a) e 10(b).

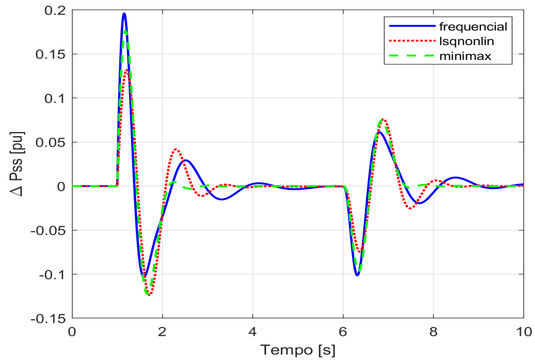
As Figs. 11(a) e 11(b) ilustram a quantidade de iterações necessárias até os algoritmos de otimização convergirem.

Tabela 7. **Amortecimento ζ**

Algoritmo 1	Algoritmo 2	Algoritmo 3
0.2778	0.5395	1.0000
0.2778	0.5395	0.6715
1.0000	1.0000	0.6715
0.3439	0.3134	0.3734
0.3439	0.3134	0.3734
1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000

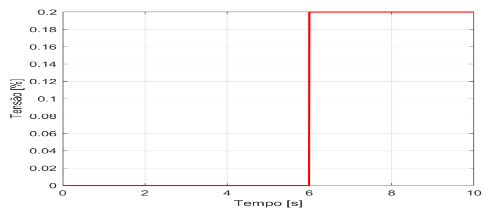


(a) ω

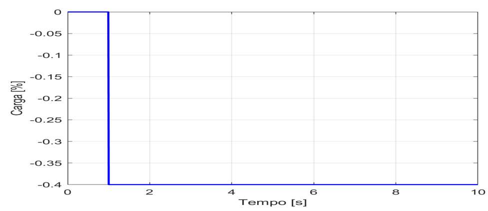


(b) Δ_{pss}

Figura 9. Velocidade ω e delta de tensão Δ_{pss}

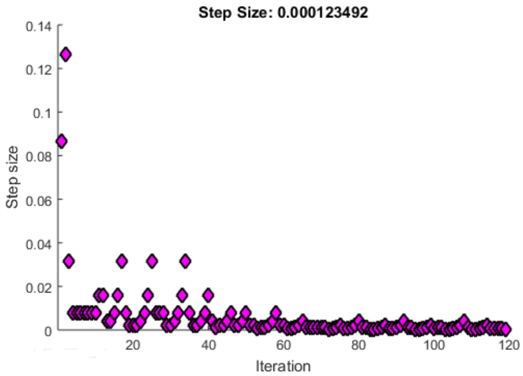


(a) Perfil de tensão

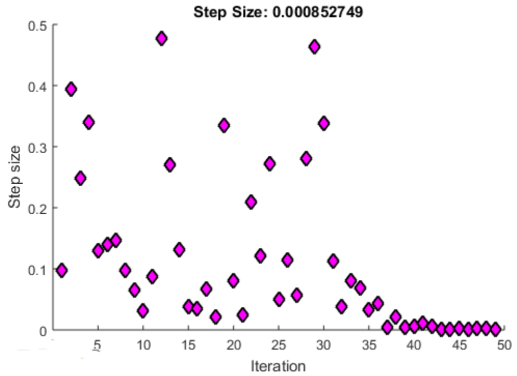


(b) Perfil de carga

Figura 10. Variações de tensão e carga



(a) Mínimos quadrados não linear



(b) Programação quadrática seqüencial

Figura 11. Características de convergência

Nestes resultados verifica-se que a quantidade de iterações do algoritmo de *programação sequencial* corresponde à metade das iterações do algoritmo de *mínimos quadrados não lineares*.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho as seguintes atividades foram executadas: uma adequada revisão bibliográfica em relação ao controle de sistemas de potência, incluindo o controle de velocidade, o controle de tensão e o PSS. Teve a necessidade de se aprofundar na modelagem dos reguladores e gerador, para chegar ao modelo de barra infinita. Foi apresentada a estrutura genérica do PSS e empregados três algoritmos para a determinação das constantes de tempo do filtro de avanço-atraso. O primeiro algoritmo corresponde ao método baseado no domínio da frequência. Para os outros dois algoritmos foi necessária a familiarização com assuntos de otimização do toolbox em Matlab-Simulink®. Foi destacado que os algoritmos apresentados vem de uma bibliografia consagrada, no entanto os autores deste trabalho são proprietários de todas as implementações. Foram projetados os PSS, implementadas as estruturas de controle e executadas as simulações. As simulações foram feitas incluindo variações de carga e tensão e também foram obtidos os resultados e as tabelas comparativas. Os resultados são considerados altamente satisfatórios e fazem parte do pacote enviado à Companhia Boliviana de Energia como resposta à requisição feita por eles.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Boliviana de Energia e a Universidade de Araraquara (UNIARA) pelo apoio.

REFERÊNCIAS

Banna, H.U., Luna, A., Rodriguez, P., Cabrera, A., Ghorbani, H., and Ying, S. (2014). Performance analysis of conventional pss and fuzzy controller for damping power system oscillations. In *3th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 229–234. IEEE.

Barik, S. (2014). *Design of Power System Stabilizer Using Robust Control Techniques.* National Institute of Technology Calicut, first edition.

Development, E. and Committee, P.G. (2006). Ieee recommended practice for excitation system models for power system stability studies. Technical report, IEEE Power Engineering Society.

Development, E. and Committee, P.G. (2014). Ieee guide for the preparation of excitation system specifications. Technical report, IEEE Power and Energy Society.

dos Santos Mota, D. (2010). *Tecnicas de Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potencia.* Universidade de São Paulo, first edition.

Ferdoush, A. and Rabbani, M.G. (2014). Power system stabilizer tuning based on frequency response method. In *8th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 536–539. IEEE.

Gilat, A. (2006). *Matlab com Aplicações em Engenharia.* Bookman.

Hammer, A. (2011). *Analysis of IEEE Power System Stabilizer Models.* Norwegian University of Science and Technology, first edition.

Kamwa, I., Grondin, R., and Trudel, G. (2005). Ieee pss2b versus pss4b: The limits of performance of modern power system stabilizers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 903–915.

Kundur, P. (1993). *Power System Stability and Control.* McGraw-Hill, first edition.

Machowski, J., Bialek, J., and Bumby, J. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control.* Wiley and Sons, first edition.

Mengjing, F., Jianfen, Z., and Kewen, W. (2016). Parameters setting of power system stabilizer pss2b. In *Advances in Engineering Research*, volume 112, 63–69. 4th International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology, Atlantis Press.

Padiyar, K. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control.* BS Publications, second edition.

Pota, H.R. (2018). *The Essentials of Power System Dynamics and Control.* Springer, first edition.

Sauer, P.W. and Pai, M.A. (1997). *Power System Dynamics and Stability.* The University of Illinois at Urbana-Champaign.

Tavakoli, M.R., Rasouli, V., and Allahkaram, S. (2015). A new design of double input power system stabilizers using sqp for interconnected power systems. *Modern Electric Power Systems (MEPS), Wroclaw*, 1–6.

Theja, B.S., Rajasekhar, A., Kothari, D.P., and Das, S. (2013). Design of pid controller based power system stabilizer using modified philip-heffron's model: An artificial bee colony approach. *IEEE Symposium on Swarm Intelligence (SIS), Singapore*, 228–234.

Wilson, D.I. (2015). *Advanced Control Using Matlab.* Auckland University of Technology.

Yu, Y.N. (1983). *Electric Power System.* Academic Press.

Apêndice A. CONDIÇÕES INICIAIS E CONSTANTES K

As condições iniciais e as constantes do modelo de **Heffron-Phillips** são calculadas na Fig. A.1.

```
close all,

P0  = 1.0; Q0 = 0.015; Vt0 = 1.05;

H = 9.26/2; Tdprim0 = 7.76; D = 0;
Xd = 0.973; Xprimd = 0.190; Xq = 0.550;
R = -0.034; X =  0.997; G =  0.249; B =  0.262;

 Z = R + 1j*X;   Y = G + 1j*B;
C1 = 1+R*G-X*B; C2 = B*R+X*G;

R1 = R - C2*Xprimd; R2 = R - C2*Xq;
X1 = X + C1*Xq;     X2 = X + C1*Xprimd;

Ze2 = R1*R2+X1*X2;
Yd = (C1*X1-C2*R2)/Ze2; Yq = (C1*R1+C2*X2)/Ze2;

omega0 = 2*pi*60; Ka = 50; Ta = 0.05;

 Vd0 = (P0*Vt0)*(P0^2+(Q0+Vt0^2/Xq)^2)^-.5;
 Vq0 = sqrt(Vt0^2-Vd0^2);
 Iq0 = Vd0/Xq;
 Id0 = (P0-Iq0*Vq0)/Vd0;
 Eq0 = Vq0+Xprimd*Id0;
 vd0 = C1*Vd0-C2*Vq0-R*Id0+X*Iq0;
 vq0 = C2*Vd0+C1*Vq0-X*Id0-R*Iq0;
  E0 = sqrt(vd0^2+vq0^2); % Some books V_infty
del0 = atand(vd0/vq0);

F = E0/Ze2*[-R2 X1;X2 R1]*[cosd(del0);sind(del0)];
Fd = F(1); Fq = F(2);

 K = [0;Iq0]+[Fd Fq;Yd Yq]*[(Xq-Xprimd)*Iq0;Eq0+(Xq-
     Xprimd)*Id0];
K1 = K(1); K2 = K(2); K3 = 1/(1+(Xd-Xprimd)*Yd); K4 = (
     Xd-Xprimd)*Fd;
Ks = [0;Vq0/Vt0]+[Fd Fq;Yd Yq]*[-Xprimd*Vq0/Vt0;Xq*Vd0/
     Vt0];
K5 = Ks(1); K6 = Ks(2);

A = [-1/(K3*Tdprim0) -K4/Tdprim0 0 1/Tdprim0
     0 0 omega0 0;
    -K2/(2*H) -K1/(2*H) -(D*omega0)/(2*H) 0;
    -(Ka*K6)/Ta -(Ka*K5)/Ta 0 -1/Ta];

 GEP = tf(K2*Ka*K3,[Tdprim0*K3*Ta Ta+(Tdprim0*K3) (Ka*K6
     *K3)+1]);

W_n = sqrt((K1*omega0)/(2*H));% Natural freq

 [M_n,PH_n] = bode(GEP,W_n);

T2 = .15;  % 0.02 < T2 < 0.15

fun = @(x) atand(W_n*x)-atand(W_n*T2)+atand(W_n*x)-atand
     (W_n*T2)+PH_n;
options = optimoptions('fsolve','PlotFcn',
     @optimplotfirstorderopt,...
'StepTolerance',1e-4,'OptimalityTolerance',1e-4)

x = fsolve(fun,0.08,options); T1 = x; zeta = .3;

Gfil = tf([T1 1],[T2 1]);

[M_f,PH_f] = bode(Gfil,W_n);

Kc = (2*zeta*W_n*2*H)/(K2*M_n*M_f);
Tw = 3.0;
```

Figura A.1. Condições iniciais e constantes $K_1 - K_6$