

Implementação de um FOPSS via Alocação de Polos de Ordem Fracionária ao Problema de Amortecimento das Oscilações Eletromecânicas de um Sistema em Escala Reduzida

Claudia Sabrina M. da Silva * Florindo A. de C. Ayres Junior *
Renan L. P. de Medeiros * João Edgar Chaves Filho *
Vicente F. de Lucena Junior * Jerônimo X. do Prado Neto *

* Departamento de Eletricidade, Faculdade de Tecnologia,
Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM, Brasil.
(sabrinam.901@gmail.com, florindoayres@yahoo.com,
renanlandau@ufam.edu.br, joaoedgarc@gmail.com,
vicente@ufam.edu.br, jeronimo.ximenes.prado@gmail.com)

Abstract:

In this paper, a new automatic control technique based on fractional-order systems is investigated to improve the performance of the Power Systems Stabilizer (PSS), making the Electric Power System (EPS) most efficient. For this, we used the dynamic model of the 10 kVA scaled-down generation system. Initially, two power system stabilizers are tuned and then, a methodology for the design of stabilizers is proposed, based on the fractional-order pole placement (FOPP). The behavior of the lead-lag compensators is performed through simulations, using MATLAB/Simulink. Therefore, we sought to compare the performance of conventional and fractional PSS and, analyzing the results obtained, the system with PSS via fractional pole placement was the one that best dampened the electromechanical oscillations and presented the lowest control effort.

Resumo: Neste trabalho, é implementada uma técnica de controle automático de ordem fracionária que visa melhorar o desempenho do Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP), tornando o Sistema Elétrico de Potência (SEP) mais eficiente. Da qual, utilizou-se o modelo dinâmico do sistema de geração de energia em escala reduzida de 10 kVA. Inicialmente, sintonizam-se dois estabilizadores de sistemas de potência e, em seguida, propõe-se uma metodologia de projeto fundamentada no método de alocação de polos de ordem fracionário (FOPP, do inglês *Fractional Order Pole Placement*). O comportamento dos compensadores de avanço e atraso de fase são avaliados através de simulações, por intermédio do *MATLAB/Simulink*. Logo, buscou-se equiparar o desempenho do ESP convencional e dos ESPs fracionários e, analisando os resultados obtidos, o sistema com o ESP via alocação de polos de ordem fracionária foi o que melhor amorteceu as oscilações eletromecânicas e apresentou o menor esforço de controle.

Keywords: Automatic Control; Electric Power System; Power Systems Stabilizer; Lead-Lag Compensator; Fractional Order Pole Placement.

Palavras-chaves: Controle Automático; Sistema Elétrico de Potência; Estabilizador de Sistemas de Potência; Compensador de Avanço e Atraso de Fase; Alocação de Polos de Ordem Fracionária.

1. INTRODUÇÃO

Devido a crescente demanda energética na atualidade, é necessário que os sistemas de geração de energia elétrica sejam constantemente estudados com a finalidade de mantê-los com um certo grau de confiabilidade, qualidade e eficiência, para que eles funcionem de maneira preferencialmente ininterrupta. Logo, é essencial realizar a modernização dos equipamentos que compõem o sistema elétrico de potência (SEP) (Ayres Junior et al., 2018).

Entre os problemas estudados na área de SEP, destacam-se as perturbações decorrentes do mal amortecimento das

oscilações eletromecânicas de baixa frequências. Pois, as oscilações eletromecânicas podem limitar a quantidade de potência transmitida, diminuir a vida útil das máquinas do sistema e reduzir a margem de estabilidade do sistema de potência. Sendo assim, para mitigar a falta de amortecimento desses modos de oscilação, um controlador auxiliar denominado ESP (Estabilizador de Sistemas de Potência) é conectado ao sistema de excitação dos geradores síncronos (Kundur (1994); Nogueira et al. (2014)).

Com a finalidade de tornar o ESP cada vez mais eficiente, diversas metodologias de projeto já foram estudadas, como por exemplo, em Devarapalli and Bhattacharyya (2020),

onde propõe-se uma nova abordagem de algoritmo de otimização seno cosseno modificado híbrido lobo-cinzento para realizar o ajuste dos parâmetros do ESP de um sistema de energia multimáquina interconectado.

Em Du et al. (2021), a sintonia de ESP é realizada com base em um modelo de sistema único máquina-barramento-infinito (SMIB, do inglês *Single-Machine Infinite Bus*), para atenuar o risco de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em um sistema de potência com N máquinas. Já em Peres et al. (2020), utiliza-se modelo de Heffron-Phillips do SMIB para a sintonia dos ESPs de sistemas de potência multibanda através de uma abordagem de alocação de polos baseada no método de Newton-Raphson e, em seguida, aplicam-se esses estabilizadores em um sistemas de potência multimáquinas.

Em Nangrani (2019), usa-se o modelo de Heffron-Phillips para sintonizar um controlador de ordem fracionária semelhante a um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para a estabilização do sistema de potência. Além disso, projetaram outros dois estabilizadores, um pelo método convencional e um baseado na lógica *Fuzzy* e, analisando as respostas obtidas através de simulações computacionais concluiu-se que o ESP fracionário apresentou um desempenho melhor que os outros dois estabilizadores.

Enquanto isso, em Ayres Junior et al. (2018), foi desenvolvida uma nova metodologia de projeto do ESP baseado no compensador com estrutura de avanço e atraso de ordem fracionária. Sendo que, para avaliar o desempenho do ESP fracionário (FOPSS, do inglês *Fractional Order Power Systems Stabilizer*), foi realizada a sintonia de um ESP pelo método convencional, e ambos foram aplicados em um sistema de geração de energia em escala reduzida de 10 kVA.

De acordo com Faieghi and Nemati (2011), o cálculo de ordem fracionária é uma área de análise matemática que estuda a relação com termos integrais e derivativos de ordem não racionais (Ayres Junior et al. (2018)). Portanto, os controladores fracionários vêm ganhando impulso por causa da sua flexibilidade e eficácia resultante de altos graus de liberdade para a realização de projetos, ou seja, no ajuste das características de ganho e fase destes controladores (Pullaguram et al., 2018).

Visando o atual contexto de estudos relacionados à aplicação de controladores fracionários, neste trabalho, é realizada a sintonia de um estabilizador de sistemas de potência (PSS, do inglês *Power System Stabilizer*) por um método de alocação de polos de ordem fracionária (FOPP, do inglês *Fractional Order Pole Placement*) com o propósito deste apresentar um melhor desempenho quando comparado com os elaborados por outros métodos.

O desempenho dinâmico do sistema com a inserção do ESP fracionário via alocação de polos foi validado comparando-o com os comportamentos dinâmicos obtidos pelos sistemas que utilizaram estabilizadores sintonizados pela técnica convencional de Sauer and Pai (2018) e, pelo método de avanço e atraso de fase de ordem fracionária desenvolvido por Ayres Junior et al. (2018).

A análise da performance dos estabilizadores foi realizada através de testes desenvolvido em um ambiente compu-

tacional, por meio da ferramenta *Matlab/Simulink*, que simula uma possível falta e uma variação instantânea da tensão de entrada de um sistema de geração em escala reduzida de 10 kVA. Os resultados foram avaliados de modo qualitativo, através das respostas temporais da variação de potência elétrica e do sinal de controle e, de forma quantitativa por meio dos índices de desempenho.

2. ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

No sistema de geração de energia existe o sistema de excitação, que é responsável por controlar a corrente contínua que passa pelo enrolamento de campo do gerador síncrono, mantendo as tensões terminais dentro da faixa de tolerância aceitável (Moura et al. (2019); Sousa Neto (2013)).

Geralmente, um sistema de excitação é constituído por uma excitatriz, que fornece a energia de corrente contínua para o enrolamento de campo do gerador; por sensores, que medem as grandezas de saída do gerador; pelo dispositivo RAT (Regulador Automático de Tensão), que processa e amplifica os sinais de entrada utilizados no controle do sistema de excitação e; pelo ESP, que fornece um sinal adicional para o RAT, amortecendo as oscilações eletromecânicas de baixa frequência do SEP (Sousa Neto, 2013).

Enquanto isso, a estabilidade eletromecânica é determinada como sendo a propriedade do SEP em manter suas unidades geradoras operando em condições de sincronismo (Kundur, 1994). As análises dos estudos de estabilidade pode ser angular, a pequenas perturbações, e angular transitória, quando o sistema é sujeito a grandes perturbações (Ayres Junior et al., 2018). Como na estabilidade angular os impactos são pequenos, as equações linearizadas podem ser utilizadas na análise deste caso (Ayres Junior et al. (2018); Kundur (1994)).

2.1 Modelo Linearizado de Heffron-Phillips

Para realizar o estudo do desempenho de pequenos sinais de uma única máquina conectada a um grande sistema por meio de linhas de transmissão, o sistema com configuração geral pode ser reduzido à um sistema simples de baixa ordem (Kundur, 1994).

Dentre os modelos existentes, o modelo de decaimento de fluxo com um excitador rápido, é amplamente utilizado na sintonia de estabilizadores de sistemas de potência, sendo a sua estrutura de rede preservada (Sauer and Pai, 2018). Portanto, o modelo utilizado para realização da sintonia dos ESP é o modelo linearizado proposto por Heffron-Phillips (1952), apresentado na Figura 1.

Logo, por meio do diagrama de blocos apresentado na Figura 1, obtém-se a função de transferência por espaço de estados da planta linearizada (1 e 2) em relação a entrada (desvio de tensão) e a saída (desvio de potência elétrica).

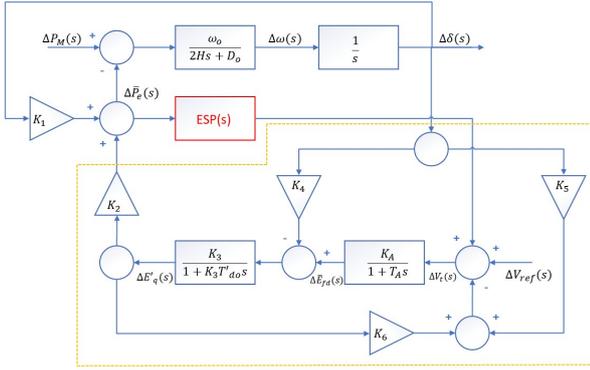


Figura 1. Modelo linearizado máquina-barras infinita de Heffron-Phillips com ESP.

Fonte: Adaptado de Ayres Junior et al. (2018)

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1 \omega_o}{2Hs + D_o} & -\frac{D_o \omega_o}{2H} & -\frac{K_2 \omega_o}{2H} & 0 \\ \frac{T'}{K_A K_5} & 0 & -\frac{K_3 T'_{do}}{K_A K_6} & \frac{T'_{d1}}{1} \\ -\frac{1}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & -\frac{d\phi}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta V_{ref} \quad (1)$$

$$\Delta P_e = [K_1 \ 0 \ K_2 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} + [0] \Delta V_{ref} \quad (2)$$

Sendo as equações dos ganhos K_i , para $i = 1, 2, \dots, 6$ apresentados no livro de Sauer and Pai (2018).

Para os valores de constantes geralmente utilizados na planta do sistema de potência, necessita-se que o torque de amortecimento puro seja:

$$\Delta T_{ESP}(s) = GEP(s)ESP(s)\Delta\omega(s) \quad (3)$$

Para isso, assume-se que $\Delta V_{REF}(s) = 0$ e $\Delta\delta(s) = 0$.

Para que uma componente de torque de amortecimento puro seja produzida, precisa-se que o ESP compense a defasagem gerada por um conjunto conhecido como *GEP*, formado pelo sistema de excitação, pelo gerador e pelo restante do sistema de potência. Sendo esta compensação efetuada por meio de técnicas de avanço-atraso de fase (Ayres Junior et al., 2018). Geralmente, um estabilizador de sistema de potência é constituído por quatro etapas: pelo filtro *Washout*, pelo compensador de avanço e atraso de fase, pelo ganho e pelo limitador.

2.2 Modelo para Projeto dos ESPs

Neste trabalho, assim como em Ayres Junior et al. (2018), utiliza-se a realimentação por meio do desvio de potência elétrica $\Delta P_e(s)$. Sendo que, para a análise das contribuições de torque de amortecimento, são desconsideradas as contribuições das constantes K_4 e K_5 referentes a variação do ângulo de potência do gerador $\Delta\delta(s)$.

O modelo linearizado do SMIB, pode ser dividido em 3 partes, o sistema $G(s)$ (equação (4)) que representa a inércia das massas girantes, o sistema $GEP(s)$ (equação (5)) que retrata a dinâmica elétrica do gerador e o sistema $ESP(s)$,

sintonizado para amortecer as oscilações eletromecânicas do SEP.

$$G(s) = \frac{-2Hs}{\omega_o} \quad (4)$$

$$Gep(s) = \frac{K_2 K_3 K_4}{K_A K_3 K_6 (1 + s K_3 T'_{do})(1 + s T_A)} \quad (5)$$

2.3 Ambiente de Simulação

O grupo gerador com uma potência de 10 kVA usado nesta pesquisa é referenciado no trabalho de Ayres Junior et al. (2018), sendo o seu modelo constituído no *software* Matlab/Simulink versão 2021.b. Para o projeto dos compensadores *Lead-Lag* usou-se o modelo linearizado de Heffron-Phillips. Porém, nos testes simulados, utilizou-se o modelo matemático não linear que retrata o comportamento dinâmico do sistema, representado na Figura 2.

Os parâmetros do sistema em escala reduzida são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do Sistema.

Fonte: Adaptado de Ayres Junior et al. (2018)

Parâmetro		Valor
Velocidade síncrona	ω_0 (rad/s)	377
Tensão terminal	V_t (p.u.)	1,04
Tensão do barramento infinito	V_∞ (p.u.)	1,0
Resistência da linha	R_L (p.u.)	0,049
Reatância da linha	X_L (p.u.)	0,197
Resistência dos transformadores	R_t (p.u.)	0
Reatância dos transformadores	X_t (p.u.)	0,08
Ganho do RAT	K_A	2,5
Constante de tempo do RAT	T_A (s)	0,105
Constante de amortecimento natural	D_0 (N/m)	0,01
Tempo de inércia	H (s)	3,861
Reatância de eixo de q	X_q (p.u.)	0,693
Reatância de eixo de d	X_d (p.u.)	1,058
Reatância transitória de eixo de d	X'_d (p.u.)	0,169
Constante de tempo transitória	T'_{d0} (s)	0,4133

Os compensadores *Lead-Lag* foram sintonizados para dois pontos de operação de potência elétrica ativa distintas ($P_e = 0,5$ p.u. e $P_e = 0,8$ p.u.). No ponto de operação 0,5 p.u., obtém-se a função de transferência da equação (6) e, para $P_e = 0,8$ p.u. a função de transferência (7).

$$GepG_{0,5}(s) = \frac{36,49s^2 + 17,81s}{s^4 + 17,23s^3 + 179,3s^2 + 1.115s + 6.339} \quad (6)$$

$$GepG_{0,8}(s) = \frac{60,77s^2 + 29,67s}{s^4 + 17,23s^3 + 184,3s^2 + 1.133s + 5.973} \quad (7)$$

3. CÁLCULO DE ORDEM FRACIONÁRIA

O cálculo de ordem fracionária, é uma área da matemática que lida com derivadas e integrais de ordens não inteiras, ou seja, é uma generalização do cálculo tradicional que possui conceitos e ferramentas parecidas, porém, com uma aplicabilidade muito mais ampla. O cálculo fracionário originou-se no ano de 1695 em uma troca de cartas, onde L'Hospital perguntou à Leibniz o que ocorreria caso o fator n da derivada de uma função fosse um valor fracionário (Camargo and Oliveira, 2015).

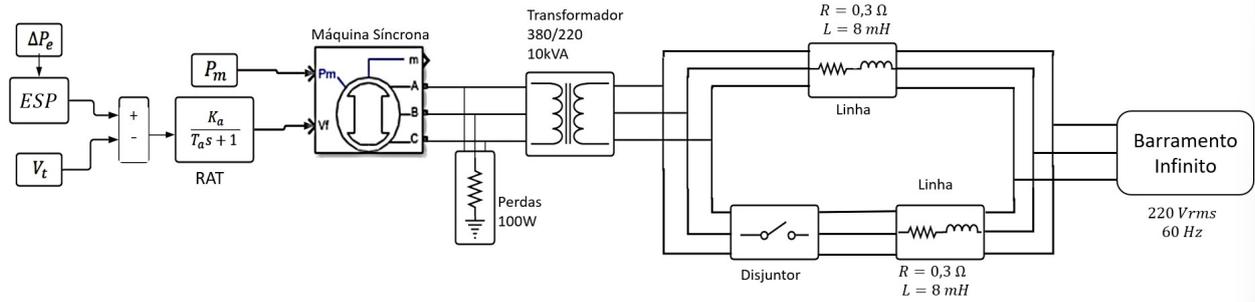


Figura 2. Diagrama em blocos do sistema simulado.

Nas últimas duas décadas, o cálculo fracionário foi redescoberto por cientistas e engenheiros e aplicado em diversas áreas, principalmente em teoria de controle, tornando-se um sucesso (Faieghi and Nemati, 2011).

Muitas equações diferenciais de ordem fracionária são resolvidas por meio de soluções analíticas. Logo, é comum aplicar métodos de aproximações numéricas para obtenção de soluções aproximadas, pois, é mais fácil e barato implementar funções de transferência de número inteiro em alguns *softwares* e *hardwares* (Ayres Junior et al. (2018); Faieghi and Nemati (2011); Valério and Costa (2013)).

O método de aproximação de s^α mais usado é o de **Oustaloup**. Neste método, a derivada de ordem fracionária é aproximada, no domínio da frequência, por uma função de transferência racional (Valério and Costa, 2013).

4. SINTONIA DOS ESPS

Nesta seção, são apresentadas as sintonias dos estabilizadores convencional e de ordem fracionária.

4.1 Método Clássico de Sauer e Pai

Para a sintonia do ESP convencional, usa-se a metodologia de domínio da frequência de Sauer e Pai (2018).

$$PSS(s) = K_{PSS} \left(\frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \right)^2 \quad (8)$$

Inicialmente, encontra-se a frequência natural não amortecida ω_n através da equação (9).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1 \omega_0}{2H}} \text{ (rad/s)} \quad (9)$$

Em seguida, obtém-se o valor da fase a ser compensada substituindo o ESP da equação (8), na equação (10) e ignorando o filtro *Washout* cuja contribuição de fase é aproximadamente zero.

$$\angle GEP(s) |_{s=j\omega_n} + \angle ESP(s) |_{s=j\omega_n} + \angle G(s) |_{s=j\omega_n} = 0 \quad (10)$$

Escolhe-se o valor da constante de tempo T_1 e obtém-se o valor da constante T_2 do compensador através da equação (11), de modo que $T_1 > T_2$.

$$T_2 = \frac{1}{\omega_n} \left(\arctan(\omega_n T_1) - \left(\frac{\angle GEP(j\omega_n)}{2} + \frac{\angle G(j\omega_n)}{2} \right) \right) \quad (11)$$

Para obter o ganho do PSS (K_{PSS}), escolhe-se o fator de amortecimento (ζ) desejado e calcula-se o valor da contribuição de torque amortecedor D_{PSS} utilizando a equação (12) e por fim, calcula-se o ganho do estabilizador através da equação (13).

$$D_{PSS} = 2\zeta_d \omega_n \frac{2H}{\omega_0} \quad (12)$$

$$K_{PSS} = \frac{D_{PSS}}{|\angle GEP(j\omega_n)| |\angle ESP(j\omega_n)| |G(j\omega_n)|} \quad (13)$$

Portanto, considerando um tempo de acomodação de ($t_s = 2,0$ s) e um fator de amortecimento de ($\zeta = 0,2$), determinam-se os PSS das equações (14), para o ponto de operação de 0,5 p.u., e (15) para $P_e = 0,8$ p.u.

$$PSS_{0,5}(s) = 4,0006 \left(\frac{1 + 0,2500s}{1 + 0,1231s} \right)^{-2} \quad (14)$$

$$PSS_{0,8}(s) = 2,5109 \left(\frac{1 + 0,2500s}{1 + 0,1246s} \right)^{-2} \quad (15)$$

4.2 Método Fracionário de Ayres Junior

Em Ayres Junior et al. (2018) foi desenvolvida uma metodologia para projeto do ESP baseado no cálculo de ordem fracionária (FOPSS).

$$FOPSS_1(s) = K_{FOPSS} \left(\frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \right)^\alpha \quad (16)$$

Inicialmente, calcula-se ω_n através da equação (9) e, obtém-se o valor da fase a ser compensada. Depois escolhe-se o valor da constante de tempo T_1 e calcular a constante T_2 através da equação (17).

$$T_2 = \frac{1}{T_1 \omega_n^2} \quad (17)$$

O calculo do valor do expoente fracionário é realizado aplicando a equação (18).

$$\alpha = \frac{\angle ESP(j\omega_n)}{(\angle 1 + j\omega_n T_1 - \angle 1 + j\omega_n T_2)} \quad (18)$$

A contribuição de torque de amortecimento é obtida conforme a equação (12) e o ganho do ESP de ordem fracionária K_{FOPSS} de maneira semelhante ao da equação (13). Dessa forma, aplicam-se os valores obtidos na estrutura do compensador fracionário da equação (16).

Na sintonia dos FOPSS usando o método de Ayres Júnior et al. (2018), considerou-se $t_s = 2,0$ (s) e $\zeta = 0,2$, obtendo-se as funções de transferências (19) e (20) a seguir.

$$FOPSS_{10,5}(s) = 3,2515 \left(\frac{1 + 0,3000s}{1 + 0,0499s} \right)^{-0,8224} \quad (19)$$

$$FOPSS_{10,8}(s) = 1,9772 \left(\frac{1 + 0,3000s}{1 + 0,0456s} \right)^{-0,7639} \quad (20)$$

Após o projeto dos FOPSS foi realizada a conversão da função de transferência de ordem fracionária para um sistema de ordem 2. Para isso, usaram-se os comandos **frd** e **invfreqs** do Matlab.

5. MÉTODO FRACIONÁRIO VIA ALOCAÇÃO DE POLOS

Em Ayres Junior et al. (2020) foi apresentada uma nova técnica de sintonia de controladores de ordem fracionária baseada em um método de alocação de polos de ordem fracionária. Esta metodologia consiste em determinar os coeficientes do controlador através de igualdades polinômiais entre o polinômio desejado que contém as especificações de projeto almejadas e, o polinômio característico do SMIB em malha fechada.

Para a sintonia do FOPSS via alocação de polos de ordem fracionária, em primeiro lugar, é necessário determinar-se os valores das especificações de projeto desejadas, tais como, a frequência natural ω_n , que é calculada conforme a equação (9), o fator de amortecimento ζ e o expoente fracionário α .

Em seguida, aplica-se a equação diofantina. Para isso, considere a função de transferência (22) do sistema em malha fechada com o FOPSS na malha de realimentação, sendo o *Lead-Lag* fracionário definido pela equação (21), com $\alpha = 0,25$ (Bazanella and Silva Junior, 2017).

$$FOPSS_2(s) = \frac{d_{15}s^{3,75} + d_{14}s^{3,5} + \dots + d_1s^{0,25} + d_0}{s^3 + c_{11}s^{2,75} + \dots + c_1s^{0,25} + c_0} \quad (21)$$

$$T(s) = \frac{Q_n(s)}{Q_d(s)} = \frac{GepG(s)}{1 + GepG(s)FOPSS_2(s)} \quad (22)$$

Sendo p_1, p_2, \dots, p_n , s valores dos polos desejados em malha fechada, a equação (23) representa o polinômio desejado com os valores de ζ desejado, da frequência natural ω_n e dos polos auxiliares.

$$P_d(s) = (s^{2\alpha} + 2\zeta\omega_n^\alpha s^\alpha + \omega_n^{2\alpha})(s^\alpha + p_1)(s^\alpha + p_2)\dots(s^\alpha + p_n) \quad (23)$$

Como $\alpha = 0,25$, então o polinômio desejado será dado por:

$$P_d(s) = s^7 + q_2s^{6,75} + q_3 + s^{6,5} + \dots + q_{28}s^{0,25} + q_{29}s^0 \quad (24)$$

Igualando os coeficientes do polinômio característico $Q_d(s)$ do sistema em malha fechada e do polinômio desejado (equação (24)) e solucionando a equação linear existente, encontram-se os coeficientes do FOPSS via FOPP, mostrado na equação (21).

Após a obtenção dos coeficientes do compensador, realiza-se a aproximação da função fracionária para o seu equivalente de ordem inteira através do Método de Aproximação de Oustaloup. Para isso, utilizou-se uma ordem de aproximação de $N = 4$ para uma banda de frequência compreendida entre $[(1/2n)\omega_n, 2n\omega_n]$, sendo $n = 3$.

Portanto, realiza-se a aproximação dos derivadores fracionários $s^{0,75}$, $s^{0,5}$ e $s^{0,25}$, e multiplicam-se os resultados obtidos, de acordo com equação (25).

$$FOPSS_2(s) = \frac{d_{15}s^3g_3(s) + d_{14}s^3g_2(s) + \dots + d_1g_1(s) + d_0}{s^3 + c_{11}s^2g_3(s) + c_{10}s^2g_2(s)\dots + c_1g_1(s) + c_0} \quad (25)$$

onde $g_3(s)$ é a aproximação de $s^{0,75}$, $g_2(s)$ de $s^{0,5}$ e $g_1(s)$ de $s^{0,25}$, para o seu equivalente de ordem inteira.

Como a ordem da função de transferência do compensador FOPSS será muito alta, opta-se por reduzir a ordem deste controlador para uma ordem quatro (ordem 4) através do comando *reduce* do programa computacional *Matlab*.

Portanto, utilizando um fator de amortecimento de $\zeta = -0,17$ para o ponto de operação de 0,5 p.u. e, de $-0,18$ p.u. em $P_e = 0,8$ p.u., para um tempo de acomodação de $t_s = 2,0$ segundos, obtiveram-se os FOPSS via alocação de polos apresentados nas equações (26) e (27).

$$FOPSS_{20,5} = \frac{2,771s^4 + 65,83s^3 + 644,3s^2 + 1.275s + 3.931}{s^4 + 58,27s^3 + 293,6s^2 + 770,4s + 828,5} \quad (26)$$

$$FOPSS_{20,8} = \frac{2,22s^4 + 9,67 \cdot 10^4 s^3 + 1,71 \cdot 10^6 s^2 + 1,75 \cdot 10^7 s + 1,19 \cdot 10^7}{s^4 + 4,34 \cdot 10^4 s^3 + 2,77 \cdot 10^6 s^2 + 1,10^7 s + 1,2 \cdot 10^7} \quad (27)$$

Em todos os estabilizadores, foi realizada a discretização pelo Método de Tustin para que fosse aplicado ao sistema não linear projetado na plataforma *Simulink*, considerando um tempo de amostragem $T_s = 0,06$ (s), sendo esse tempo baseado no artigo de Ayres Junior et al. (2018).

6. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados simulados dos dois testes efetuados. No primeiro teste realiza o desligamento de uma das linhas de transmissão do sistema elétrico de potência, que é acionada novamente alguns segundos depois. No segundo teste é inserido um impulso com uma amplitude de 0,1 p.u. no sinal de referência V_{ref} existente na entrada do regulador automático de tensão.

Inicialmente, os testes foram efetuados com uma potência elétrica média de $P_e = 0,5$ p.u., posteriormente, os mesmos testes foram simulados com $P_e = 0,8$ p.u..

6.1 Resultados para uma Potência Elétrica de 0,5 p.u.

Na inicialização do sistema, o sistema desenvolve o desempenho dinâmico mostrado na Figura 3. Neste caso, os sistemas compensados atingem um valor de pico máximo de 0,511 p.u. de ΔP_e (p.u.) após $t = 0,12$ s. Os sistemas com o ESP convencional e fracionário de Ayres Junior apresentam valores de variação de potência mínima semelhantes de 0,490 p.u. Enquanto FOPSS via alocação de polos, obteve um valor de pico mínimo de 0,492 p.u. Por fim, os sistemas se estabilizam em torno do ponto de operação em aproximadamente $t = 2,0$ s, exceto o sistema e FOPSS-FOPP que precisou de $t = 1,7$ segundos.

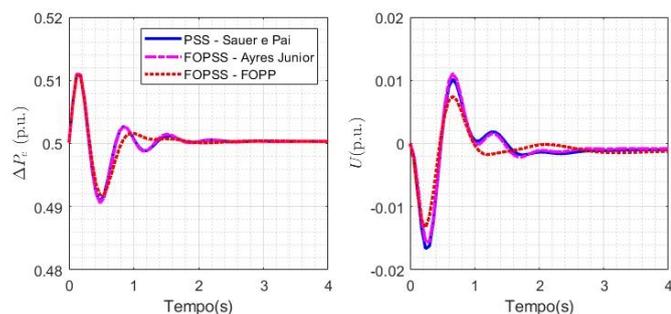


Figura 3. Variação de potência e Sinal de Controle na Inicialização do Sistema - $P_e = 0,5$ p.u.

Analisando o sinal de controle, note que o sistema com o FOPSS-FOPP apresentou picos de oscilação menores, com o mínimo de $-0,0133$ p.u. e o máximo de $0,0075$ p.u..

Após a estabilização dos sistemas, desliga-se uma das linhas de transmissão e o sistema passa a operar com apenas uma, sendo o comportamento dinâmico do sistema representado através da Figura 4.

No instante em que a linha é desligada, os sistemas atingem um pico máximo de 0,702 p.u. de potência. Em seguida, os sistemas com os compensadores de Sauer e Pai e Ayres Junior alcançam um valor mínimo de 0,383 p.u. após $t = 0,26$ s, porém, no mesmo momento, o ESP sintonizado pelo método de alocação de polos fracionário atinge uma potência mínima de 0,40 p.u..

Por fim, os sistemas compensados passam a oscilar até acomodarem-se em torno do ponto de operação após $t = 2,2$ s, no caso do PSS e do FOPSS de Ayres Junior e, $t = 1,6$ s do FOPSS-FOPP. Sendo que, o estabilizador sintonizado via alocação de polos desenvolveu oscilações com amplitudes menores.

Analisando o esforço de controle (5), temos que o sinal de controle do ESP fracionário projetado por alocação de polos apresenta uma resposta mínima de $-0,139$ p.u. e uma máxima de $0,075$ p.u., acomodando-se após $t = 2,0$ s. Os sinais de controle dos compensadores PSS de Sauer e Pai atingiu uma máxima de $0,108$ p.u. e um pico mínimo de $-0,155$ p.u., enquanto o FOPSS de Ayres Junior um valor máximo de $0,116$ p.u. e mínimo de $-0,147$ p.u., estabilizando-se após $t = 2,0$ segundos.

Após o assentamento dos sistemas, realiza-se o acionamento da linha de transmissão, sendo o desempenho dinâmico representado pelo segundo sinal da Figura 4.

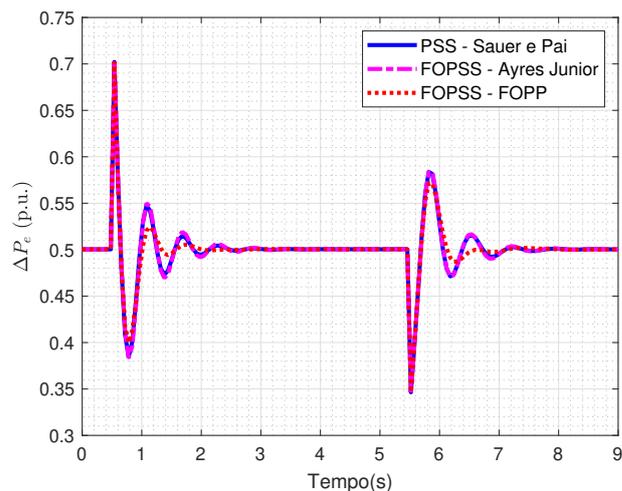


Figura 4. Variação de potência no desligamento e acionamento da linha de transmissão - $P_e = 0,5$ p.u.

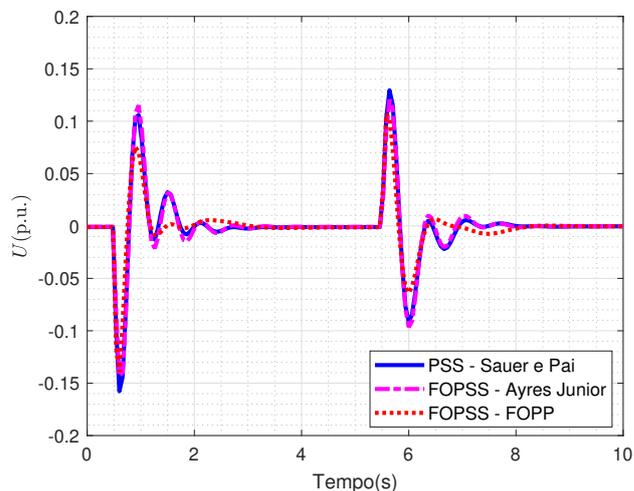


Figura 5. Sinal de controle no desligamento e acionamento da linha de transmissão - $P_e = 0,5$ p.u.

Após $t = 0,4$ s, os sistemas oscilam e atingem uma potência elétrica mínima de 0,346 p.u. e os sistemas com ESP convencional de Sauer e Pai e fracionário pelo método de Ayres Junior apresentam um pico máximo de 0,584 p.u. em $t = 0,34$ s, sendo este valor maior que o pico do FOPSS-FOPP, que foi de 0,571 p.u.. Em seguida, os sistemas oscilam e acomodam-se em torno da potência de 0,5 p.u. em $t = 2,0$ s.

O esforço de controle desenvolvido para se obter esta resposta é mostrado no segundo sinal da Figura 5. O sinal de controle do FOPSS sintonizado pelo método de FOPP apresenta um pico oscilatório que atinge uma amplitude de 0,107 p.u. Já os valores alcançados pelo FOPSS de Ayres Junior que foi de 0,120 p.u. após $t = 0,14$ s e do convencional de Sauer e Pai foi de 0,130 p.u.. O FOPSS-FOPP atinge um valor mínimo de $-0,064$ p.u. e os outros dois compensadores, PSS de Sauer e Pai e FOPSS de Ayres Junior, possuem sinais oscilatórios com valor mínimo de aproximadamente $-0,096$ p.u. após $t = 0,5$ s.

No segundo teste é realizada a inserção de um impulso com amplitude de 0,1 p.u. na entrada do sinal de referência, sendo o seu comportamento mostrado na Figura 6.

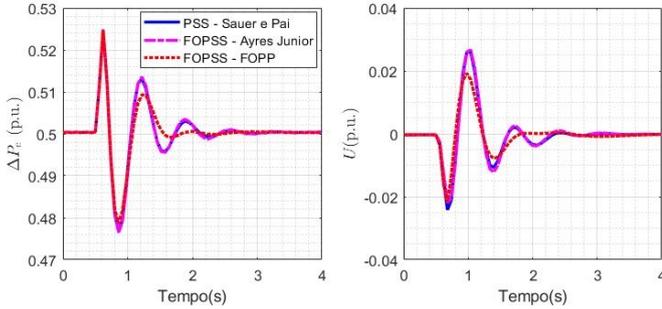


Figura 6. Variação de potência e Sinal de Controle ao inserirmos um impulso no sinal de referência - $P_e = 0,5$ p.u.

Avaliando os sinais desenvolvidos nota-se que todos os sistemas atingiram um valor máximo de 0,525 p.u., entretanto, o sistema com o FOPSS via FOPP apresentou um valor de pico mínimo de 0,479 p.u. estabilizando-se após 1,8 segundos. Nos demais sistemas, nota-se que o compensador convencional de Sauer e Pai e fracionário de Ayres Junior possuem respostas semelhantes, atingindo um valor de variação de potência elétrica mínimo de 0,477 p.u., estabilizando-se após $t = 2,1$ s.

Em relação ao esforço de controle necessário para adquirirmos tal resposta, o sistema que apresentou um dos melhores resultados foi o com o estabilizador fracionário sintonizado através do método FOPP, com valores de pico que vão de $-0,021$ p.u a $-0,019$ p.u., com um tempo de acomodação de aproximadamente $t = 1,3$ s. Enquanto os demais sistemas compensados apresentaram um valor mínimo de $-0,024$ p.u. e máximo de $0,027$ p.u., estabilizando-se após $t = 2,0$ segundos.

Para quantificar o erro da resposta do sistema em função da variação de potência elétrica, utilizam-se os critérios baseados na integral do erro, sendo eles: ISE (integral dos erros ao quadrado) e ITAE (integral do módulo do erro vezes o tempo) e, com a finalidade de avaliar o esforço sobre os elementos atuadores, usa-se a integral quadrática do sinal de controle (ISC) e a integral do módulo do sinal de controle vezes o tempo (ITAC), mostrados a seguir.

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (28)$$

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (29)$$

$$ISC = \int_0^T u^2(t)dt \quad (30)$$

$$ITAC = \int_0^T t|u(t)|dt \quad (31)$$

Na Tabela 2, os valores da primeira linha representam a inicialização do sistema, os segundos o desligamento da linha de transmissão, os terceiros o acionamento e os

últimos valores representam a inserção do impulso de 0,1 p.u. de amplitude no sinal de referência de entrada.

Inicialmente, nota-se que o sistema com o compensador convencional e com o ESP fracionário de Ayres Junior apresentam resultados muito próximos. Nos testes, com o desligamento e acionamento da linha de transmissão e inserção de uma variação, o sistema com o FOPSS via alocação de polos apresentou os menores índice de desempenho, um menor erro e um menor esforço de controle.

Tabela 2. Índices de Desempenho ao Erro e ao Sinal de Controle - $P_e = 0,5$ p.u.

ISE			ITAE		
S. e P.	A. Jr.	FOPP	S. e P.	A. Jr.	FOPP
$3,658.10^{-5}$	$3,809.10^{-5}$	$3,468.10^{-5}$	0,0050	0,0051	0,0048
$2,774.10^{-3}$	$2,972.10^{-3}$	$1,994.10^{-3}$	0,0264	0,0309	0,0160
$1,926.10^{-3}$	$1,996.10^{-3}$	$1,542.10^{-3}$	0,0218	0,0234	0,0148
$1,805.10^{-4}$	$1,851.10^{-4}$	$1,506.10^{-5}$	0,0103	0,0107	0,0082
ISC			ITAC		
S. e P.	A. Jr.	FOPP	S. e P.	A. Jr.	FOPP
$0,863.10^{-4}$	$0,824.10^{-4}$	$5,311.10^{-5}$	0,0122	0,0108	0,0107
$4,705.10^{-3}$	$4,912.10^{-3}$	$2,319.10^{-3}$	0,0363	0,0384	0,0268
$4,307.10^{-3}$	$4,255.10^{-3}$	$2,369.10^{-3}$	0,0314	0,0330	0,0276
$2,424.10^{-4}$	$2,409.10^{-4}$	$1,452.10^{-4}$	0,0107	0,0112	0,0088

6.2 Resultados para uma Potência Elétrica de 0,8 p.u.

No segundo caso, os compensadores foram sintonizados e testados com uma potência elétrica de 0,8 p.u. Sendo os resultados qualitativos, mostrados na Figura 7, e quantitativos, contidos na Tabela 3.

Analisando os desempenhos, nota-se que os resultados foram semelhantes aos obtidos pelo sistema no ponto de operação de 0,5 p.u.. Portanto, mais uma vez os melhores resultados foram alcançados pelos sistemas controlados pelo FOPSS via alocação de polos de ordem fracionária.

Tabela 3. Índices de Desempenho ao Erro e ao Sinal de Controle - $P_e = 0,8$ p.u.

ISE			ITAE		
S. e P.	A. Jr.	FOPP	S. e P.	A. Jr.	FOPP
$7,423.10^{-5}$	$7,723.10^{-5}$	$7,448.10^{-5}$	0,0112	0,0113	0,0113
$9,249.10^{-3}$	$9,787.10^{-3}$	$7,504.10^{-3}$	0,0607	0,0663	0,0523
$5,110.10^{-3}$	$5,179.10^{-3}$	$4,513.10^{-3}$	0,0371	0,0375	0,0353
$3,251.10^{-4}$	$3,308.10^{-4}$	$2,943.10^{-4}$	0,0205	0,0208	0,0194
ISC			ITAC		
S. e P.	A. Jr.	FOPP	S. e P.	A. Jr.	FOPP
$8,299.10^{-5}$	$7,489.10^{-5}$	$5,324.10^{-5}$	0,0191	0,0163	0,0109
$6,286.10^{-3}$	$6,481.10^{-3}$	$3,301.10^{-3}$	0,0636	0,0608	0,0394
$4,975.10^{-3}$	$4,805.10^{-3}$	$3,135.10^{-3}$	0,0327	0,0323	0,0297
$1,901.10^{-4}$	$1,853.10^{-4}$	$1,174.10^{-4}$	0,0087	0,0090	0,0072

7. CONCLUSÃO

Neste artigo, foram apresentados os resultados de um estudo que objetivou diminuir os problemas relacionados às pequenas perturbações que muitas das vezes levam à instabilidade do sistema de potência.

Por meio dos testes simulados, pôde-se perceber que os estabilizadores convencional e fracionário de Ayres Junior et al. (2018) apresentaram respostas semelhantes em ambos os testes.

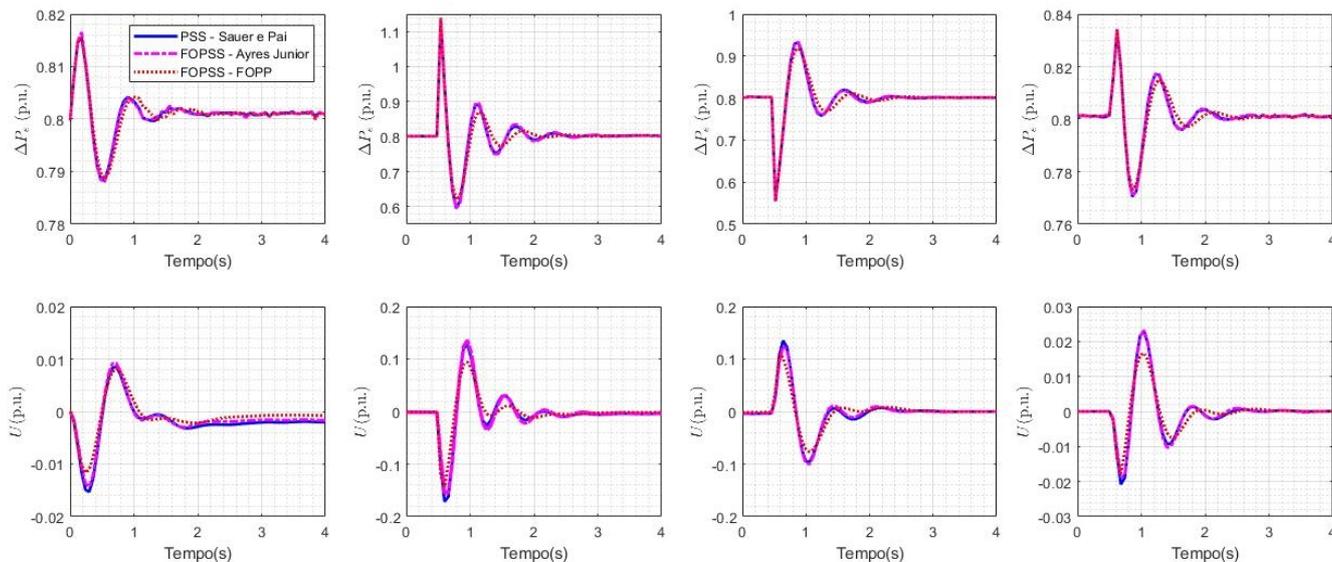


Figura 7. Resultados dos testes para um ponto de operação de 0,8 p.u.

O sistema com o FOPSS via FOPP foi o que apresentou o melhor desempenho ao amortecer as oscilações eletromecânicas, ou seja, menores amplitudes de variações de potência, menor tempo de acomodação e, menor esforço de controle sobre os atuadores, sendo que estas afirmações confirmadas ao analisarmos os índices de desempenho ao erro e ao sinal de controle.

Sendo assim, a realização deste trabalho foi importante para que uma nova técnica de sintonia de compensadores fosse aplicada na estabilização do sistema de potência, com o objetivo de tornar o SEP cada vez mais eficiente, mitigando as perturbações de baixas frequências.

REFERÊNCIAS

- Ayres Junior, F.A.D.C., Bessa, I.V., Pereira, V.M.B., Silva Farias, N. J. and Menezes, A.R., Medeiros, R.L.P., and Costa, C.T. (2020). Fractional order pole placement for a buck converter based on commensurable transfer function. *ISA Transactions*. doi:10.1016/j.isatra.2020.07.034.
- Ayres Junior, F., Costa Junior, C., Medeiros, R., Barra Junior, W., Neves, C., Lenzi, M., and Veroneze, G. (2018). A fractional order power system stabilizer applied on a small-scale generation system. *Energies*, 11. doi: 10.3390/en11082052.
- Bazanella, A.S. and Silva Junior, J.M.G. (2017). *Sistema de Controle: Princípios de Controle*. UFRGS EDITORA, Porto Alegre.
- Camargo, R.F. and Oliveira, E.C. (2015). *Cálculo Fracionário*. LF Editora.
- Devarapalli, R. and Bhattacharyya, B. (2020). A hybrid modified grey wolf optimization-sine cosine algorithm-based power system stabilizer parameter tuning in a multimachine power system. *in Optimal Control Applications and Methods*. doi:10.1002/oca.2591.
- Du, W., Dong, W., Wang, Y., and Wang, H. (2021). Ma method to design power system stabilizers in a multi-machine power system based on single-machine infinite-bus system model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36, 3475–3486. doi:10.1109/TPWRS.2020.3041037.
- Faieghi, M.R. and Nemati, A. (2011). *On Fractional-Order PID Design, Applications of MATLAB in Science and Engineering*. INTECH.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill Professional Publishing, London.
- Moura, A.P., Moura, A.A.F., and Rocha, E.P. (2019). *Engenharia de Sistemas de Potência: Geração Hidroelétrica e Eólioelétrica*. Edições UFC, Fortaleza - CE.
- Nangrani, S.P. (2019). State of art fractional order controller for power system stabilizer. *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, 36, 2165–2173. doi:10.3233/jifs-169928.
- Nogueira, F., Barra, W., Costa, C., Moraes, A., Gomes, M.C.M., and Lana, J. (2014). Design and experimental evaluation tests of a takagi-sugeno power system stabilizer. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8, 451–462. doi:10.1049/iet-gtd.2013.0099.
- Peres, W., Coelho, F.C.R., and Costa, J.N.N. (2020). A pole placement approach for multi-band power system stabilizer tuning. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. doi:10.1002/2050-7038.12548.
- Pullaguram, D., Mishra, S., N., S., and Mukherjee, M. (2018). Design and tuning of robust fractional order controller for autonomous microgrid vsc system. *J. Brit. Med. Assoc.*, 54, 91–101. doi:10.1109/TIA.2017.2758755.
- Sauer, P.W. and Pai, M.A. (2018). *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox*. Wiley-IEEE Press.
- Sousa Neto, C.M. (2013). *Estabilizador de Sistema de Potência para Máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFRN, Natal, RN.
- Valério, D. and Costa, J.S. (2013). *Introduction to Fractional Control*. The Institution of Engineering and Technology - IET, London.