

IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	Artigo: 21
	Páginas: 150 - 156

**INVESTIGAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE ORDEM
FRACIONÁRIA, APLICADAS Á REGULAÇÃO DE TENSÃO E
ESTABILIDADE DINÂMICA A PEQUENOS SINAIS**

Helen Cristina Gomes dos Reis
Florindo Antônio de Carvalho Ayres Junior
Renan Landau Paiva de Medeiros

Departamento de Eletricidade - Campus Manaus
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

helengomes.reis@gmail.com*, florindoayres@ufam.edu.br, renanlandau@ufam.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma investigação utilizando técnicas de controle fracionário aplicado a sintonia de um Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP). O projeto foi aplicado em um modelo de um sistema elétrico de potência em escala reduzida, utilizando o software MATLAB/SIMULINK. Visando comparar o desempenho dinâmico do controlador fracionário sintonizado, o mesmo foi comparado com um controlador ESP sintonizado por uma metodologia clássica de controle.

Palavras Chaves: *Controle de Ordem Fracionária, Sistema em Escala Reduzida, Estabilizador de Sistema de Potência, Controle Clássico.*

Abstract: This work presents an investigation using fractional control techniques applied to the tuning of a Power System Stabilizer (PSS). The design was applied in a model of a small scale electric power system using MATLAB / SIMULINK software. In order to compare the dynamic performance of the tuned fractional controller, it was compared with an ESP controller tuned by a classical control methodology.

Key-words: *Fractional order Control, Small-scale system, Power System Stabilizer, Classical Control.*

INTRODUÇÃO

O regulador automático de tensão (RAT) é um dos componentes importantes do sistema de excitação, este forma a realimentação de controle entre o gerador principal e os elementos que controlam a excitação do gerador. Os componentes eletrônicos requerem baixos níveis de potência e observam se a tensão terminal do gerador está de acordo com a referência desejada, e caso haja variação, é porque a potência ativa e a corrente de saída do gerador estão variando, assim, o RAT atua aumentando ou diminuindo a corrente de campo do gerador [1]. Outro controlador componente do sistema elétrico de potência é o Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP), que é um controlador auxiliar que é inserido na malha de regulação de tensão, atua enviando um sinal auxiliar para o amortecimento de oscilações quando ocorrem variações na potência elétrica do gerador síncrono conectado ao sistema elétrico [1]. Este trabalho, visa realizar em ambiente computacional para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de um gerador síncrono apresentado em [2], utilizando controladores ESP projetado a partir de metodologias de ordem fracionária, também denominado FOPSS (Fractional Order Power System Stabilizer), que será sintonizado baseado no modelo de um sistema de potência em escala reduzida apresentado em [3]. Os resultados da inserção do FOPSS serão comparados a uma técnica clássica de sintonia de controladores ESP apresentado no artigo seminal de Larsen e Swann (1981) [4].

14 e 15 de março de 2019
Curitiba - Paraná

METODOLOGIA

A estabilidade a pequenos sinais está relacionada ao comportamento da trajetória do sistema em uma vizinhança do ponto de equilíbrio [1]. As perturbações consideradas são pequenas e as equações do sistema podem ser linearizadas. Para fazer isso, a função de transferência do estabilizador deve compensar as características de ganho e fase do sistema de excitação, gerador e sistema de potência. A função de transferência que inclui o gerador, sistema de excitação e sistema de potência será denotada por $GEP(s)$.

Para o projeto deste controlador aplicado em um sistema do tipo máquina-barras infinita, as equações de estado que o representam podem ser linearizadas em torno de um ponto de operação, resultando em um modelo denominado de modelo de Heffron-Phillips [1].

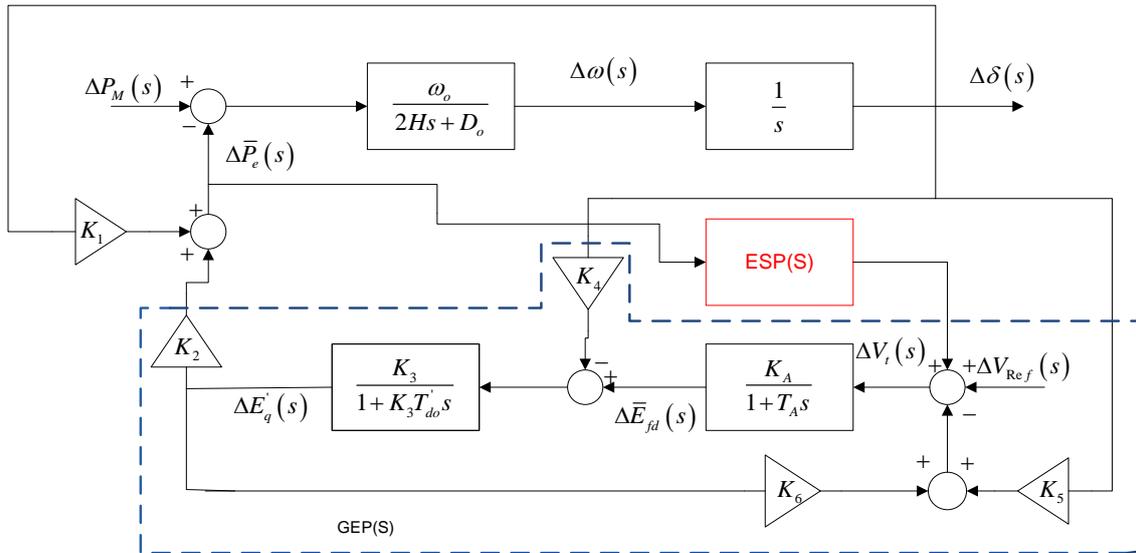


Figura 1 - Modelo linearizado máquina-barras infinita ESP.

O ESP é um controlador suplementar que atua sobre a malha de controle de tensão do gerador visando amortecer as oscilações eletromecânicas através de um sinal de baixa amplitude que é somado ao sinal de referência desta malha de controle [1]. O efeito do RAT sobre a estabilidade dinâmica torna a contribuição de torque através de K_5 , desprezível, ou seja, o efeito de $\Delta\delta$ sobre ΔVt pode ser desconsiderado em uma análise simplificada, para projetos de ESP, no entanto, os efeitos de K_4 e K_5 devem ser sempre considerados no modelo, para fins de análise do comportamento em malha fechada, com o ESP já projetado. De acordo com sistema acima, observe que o ESP encontra-se fechando a malha dessa forma ele vai compensar os erros, desvios e oscilações de potência que podem vir ocorrer no sistema. A equação dessa malha é dada pela Equação (1):

$$L(s) = ESP(s) \cdot GEP(s) \quad (1)$$

A função de transferência do ESP(s) e GEP(s), são dadas pelas Equações (2) e (3):

$$ESP(s) = K_{ESP} \frac{(T_1 s + 1)^\alpha}{(T_2 s + 1)^\beta} \quad (2)$$

$$GEP(s) = \frac{K_2 K_3 K_4}{K_A K_3 K_6 + (1 + s K_3 T'_{do})(1 + s T'_A)} \frac{\omega_0}{s} \quad (3)$$

Em fase, a defasagem entre $ESP(j\omega_n)$ e $GEP(j\omega_n)$ será 0° , deste modo temos:

$$\angle GEP(j\omega_n) + \angle ESP(j\omega_n) = 0^\circ \quad (4)$$

Para a sintonia do controlador ESP de ordem fracionária, será apresentado uma sequência de passos.

Passo 1: Tendo a frequência natural ($\omega_n = 7,86$ rad/s) de oscilação como apresentado em [11], e escolhendo valores para os expoentes fracionários α e β , encontrar parâmetros T_1 e T_2 da Equação (2), utilizando um método numérico, no presente trabalho foi aplicado o método de Newton-Raphson como em [5], utilizando as Equações (5) e (6).

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{T_1 T_2}} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\alpha} \tan^{-1}(T_1 \omega_n) - \frac{1}{\beta} \tan^{-1}(T_2 \omega_n) = -\angle GEP(j\omega_n) \quad (6)$$

Passo 2: Obter a contribuição de torque de amortecimento que o controlador deve somar ao sistema ξ_d :

$$\frac{2H}{\omega_0} s^2 + D_o s + K_1 = 0 \quad (7)$$

$$D_{ESP} = \frac{4H\omega_n \xi_d}{\omega_0} \quad (8)$$

Passo 3: Encontra-se o valor do ganho do compensador aplicando as Equações (9) e (10).

$$D_{ESP} = K_{ESP} |GEP(j\omega_n)| |ESP(j\omega_n)| \quad (9)$$

$$K_{ESP} = \frac{D_{ESP}}{|GEP(j\omega_n)| |ESP(j\omega_n)|} \quad (10)$$

Passo 4: Para obter o equivalente contínuo a ser aplicado no sistema, utilizou a aproximação de Charef [14] definida pela Equação (11):

$$H(s) = \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{p_r}\right)^\alpha} \quad (11)$$

Visando comparar o compensador fracionário sintonizado pelo método de sintonia de ordem fracionária, foi sintonizado um controlador de ordem inteira utilizando o método proposto por Larsen e Swann (1981) [4]. O amortecimento desejado utilizado no projeto foi de $\xi_d = 0.2$. Os valores dos controladores obtidos neste trabalho são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros dos controladores Fracionário e Convencional

Parâmetros	α	β	T_1	T_2	K_{ESP}
Fracionário	0,5	0,2	0,2258 s	0,0716 s	2,5289
Convencional	2	2	0,1411 s	0,3 s	5,3776

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar o comportamento dos controladores, é necessário primeiramente fazer um estudo a partir de ambiente de simulação construído em *Matlab/Simulink/Mathworks 2015*, o diagrama na Figura 2 ilustra o sistema de geração, bem como a posição dos controladores.

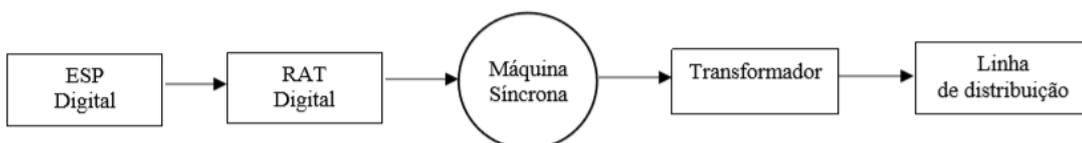


Figura 2 - Diagrama Sistema de Geração

Os parâmetros do simulador do sistema de potência encontram-se na Tabela 2. Os testes foram realizados mantendo-se o valor da tensão terminal do gerador em 1 p.u., e aplicando uma perturbação do tipo impulso na referência de tensão de 0,01 p.u. São apresentados os testes relacionados a potência ativa, e esforço de controle nos pontos de operação de 0,1 p.u., e 0,7 p.u, respectivamente.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo de um gerador síncrono
(Fonte: Manual Equatorial, 1984)

Nome		Valor	Nome		Valor
Velocidade Síncrona	ω_0	377 rad/s	Reatância dos transformadores	X_T	0.08p.u
Potência Terminal	P_t	0.7p.u	Ganho RAT	K_a	2.67
Tensão Terminal	V_t	1.05p.u	Constante de tempo do RAT	T_a	0.0975s
Tensão no Barramento infinito	V_∞	1.0p.u	Constante de Amortecimento Natural	D_0	0.01 N/m
Resistência da Linha	R_L	0.049p.u	Tempo de Inércia	H	3.861 s
Reatância da Linha	X_L	0.197p.u	Reatância de Eixo de q	X_q	0.693 p.u
Resistência dos transformadores	R_T	0	Reatância de Eixo de d	X_d	1.058 p.u
Constante de Tempo Transitória	T'_{do}	0.4133 s	Reatância transitória de Eixo de q	X'_d	0.169 p.u

Potência ativa de 0.1 p.u

A Figura 3 apresenta o desempenho do sistema com a inserção dos controladores ESP convencional (azul), ESP fracionário (vermelho), e o sistema operando em malha aberta, no ponto de operação 0,1 p.u.. Observa-se que com a inserção de ambos os controladores, o sistema apresentou uma melhoria no amortecimento relacionado ao despacho de potência ativa, sendo que com a inserção do controlador projetado pela metodologia de ordem fracionária, o sistema apresentou mais amortecimento, em comparação a inserção do controlador convencional.

A Figura 4 apresenta o esforço de controle dos compensadores, no ponto de operação 0,1 p.u.. Com a inserção dos compensadores ele apresentou uma melhoria no amortecimento das oscilações eletromecânicas, sendo que o controlador de ordem fracionária apresentou um esforço de controle ligeiramente maior se comparado com o compensador convencional.

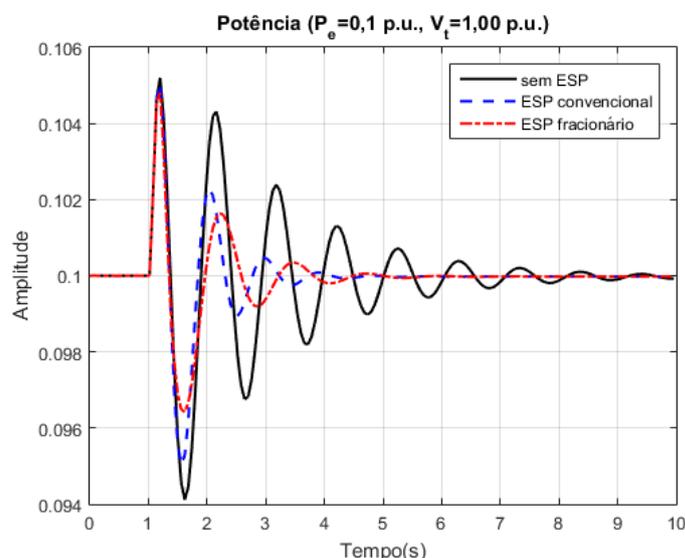


Figura 3 - Desvio de Potência Ativa Ponto de Operação 0.1 p.u.

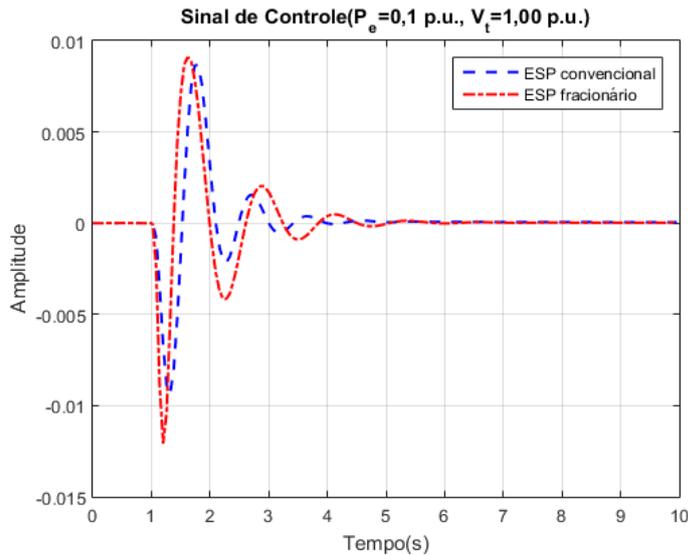


Figura 4 - Esforço de Controle dos compensadores ponto de operação 0.1 p.u de Potência Ativa

Potência ativa de 0.7 p.u

A Figura 9 apresenta o desempenho dinâmico, em malha aberta em cor magenta, com o sistema em malha fechada com a inserção do compensador convencional em cor preta e com o sistema em malha fechada com a inserção do compensador fracionário em cor vermelha. Com a inserção dos compensadores o sistema apresentou uma melhoria no amortecimento das oscilações eletromecânicas, sendo que o desempenho dinâmico de ambos os controladores foi semelhante neste ponto de operação e esforço de controle também.

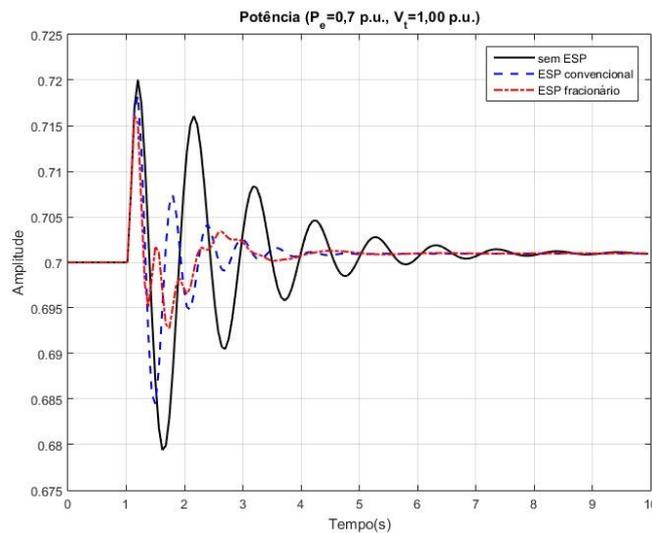


Figura 5 - Desvio de Potência Ativa Ponto de Operação 0.7 p.u.

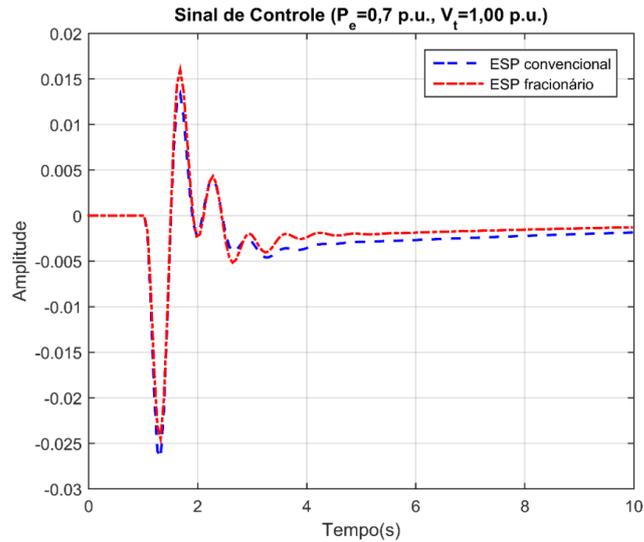


Figura 6-Esforço de Controle dos compensadores ponto de operação 0.7 p.u de Potência Ativa

A Figura 7 apresenta a função custo do desvio de potência ativa para os seis pontos de operação, em azul apresenta o desvio de potência elétrica do compensador convencional e em vermelho do compensador fracionário. O compensador convencional apresentou uma variação no seu índice de desempenho maior que o do controlador fracionário.

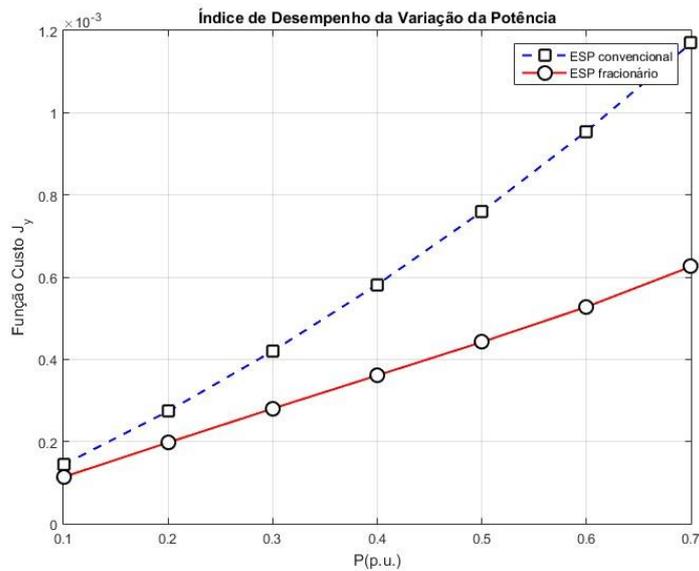


Figura 7 - Índice de Desempenho da Variação de Potência Ativa

A Figura 8 apresenta a função custo do esforço de controle para seis pontos de operação, em azul apresenta o esforço de controle do compensador convencional e em vermelho do compensador fracionário. No gráfico é possível observar que o compensador fracionário apresentou menor esforço de controle que o do compensador convencional para altos carregamentos em 0.7 p.u.

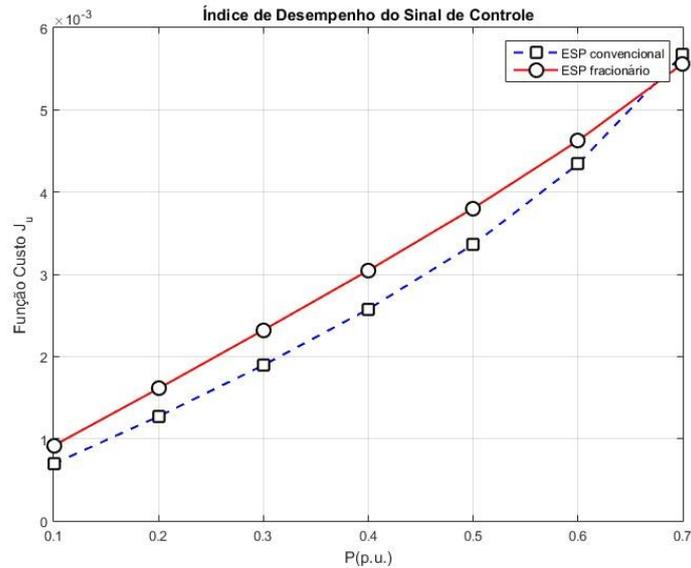


Figura 8 - Índice do desempenho do sinal de controle.

CONCLUSÃO

No estudo das técnicas de controle simuladas que foram projetados e aplicados em um sistema de micromáquinas de dois compensadores, um sintonizado utilizando a técnica clássica de controle e as técnicas avançadas de controle fracionário. Pode-se perceber que a resposta dinâmica do sistema, nos testes práticos aos quais ambos compensadores projetados foram submetidos, que o ESP desenvolvido pela metodologia de controle de ordem fracionária apresentou resposta dinâmica satisfatória.

REFERÊNCIAS

- [1] KUNDUR, P. – Power System Stability and Control – McGraw-Hill, 1994.
- [2] AYRES JÚNIOR, F. A. C – Estratégia de Controle de Ordem Fracionária Aplicadas ao Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência – Dissertação de Mestrado UFPA, 2014.
- [3] AYRES JÚNIOR, F.A.C.; COSTA JÚNIOR, C.T.; MEDEIROS, R.L.P.; BARRA JÚNIOR, W.; NEVES, C.C.; LENZI, M.K.; VERONEZE, G.M. A Fractional Order Power System Stabilizer Applied on a Small-Scale Generation System. *Energies* 2018, 11, 2052. <https://doi.org/10.3390/en11082052>.
- [4] LARSEN, E.V.; SWANN, D. A. Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts. *IEEE Trans. on Power Delivery* 1981, PAS-100, 3025–3033.
- [5] AYRES JÚNIOR, F. A. C. – Projeto e Testes Experimentais de um Regulador de Velocidade baseado em Lei de Controle de Ordem Fracionária em um Sistema de Geração em Escala Reduzida de 10kVa. – Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, 2013.