

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM CONTROLADOR FOPID APLICADO EM UM REGULADOR DE VELOCIDADE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA DE 10 KVA.

FLORINDO A. DE C. AYRES JR.¹, MARCUS C. M. GOMES¹, ERICK M. ROCHA¹, WALTER BARRA JR.¹,
JOSE A. L. BARREIROS¹

1. *Laboratório de Controle de Sistemas de Potência, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará*

Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Caixa postal 479

E-mails: florindoayres@yahoo.com, marcuscmg@ufpa.br, erickrocha@ufpa.br, walbarra@ufpa.br, barreiro@ufpa.br

Abstract— This paper presents an experimental the performance evaluation of a Fractional order based in a digital PID speed governor controller (FOPID). The performance of FOPID controller was assessed by carrying out a set of tests in a small-scaled Generation System of 10 KVA located in Federal University of Pará, Brazil. A conventional speed governor controller, designed by using classical frequency response methods, was also implemented and its obtained performance was compared to the obtained by using the proposed FOPID Speed Governor. The experimental results, for tracking as well as disturbance rejection capability, have shown the improved performance of the FOPID speed controller.

Keywords— FOPID, Frequency Response, PID Control, Small-scaled Generation System.

Resumo— Este trabalho apresenta a avaliação de desempenho de um controlador PID digital de ordem fracionária (FOPID) em um regulador de velocidade. O desempenho do controlador FOPID foi avaliada a partir de um conjunto de testes em um sistema de geração em escala reduzida, localizada na Universidade Federal do Pará, Brasil. Um regulador de velocidade convencional, parametrizado utilizando o método clássico de resposta em frequência, foi implementado para comparação de desempenho com o controlador FOPID proposto para o regulador de velocidade. Os resultados experimentais, para rastreamento além de capacidade de rejeição a distúrbios, mostram um desempenho dinâmico melhor do controlador FOPID do regulador de velocidade.

Palavras-chave— FOPID, Resposta em Frequência, Controle PID, Sistema de Geração em Escala Reduzida.

1 Introdução

Devido a crescente demanda energética no país, houve a necessidade de modernização dos processos produtivos de energia elétrica e, com isso, fazem-se necessários estudos para melhorar a eficiência dos equipamentos que compõem as usinas geradoras. Dentre as principais máquinas primárias utilizadas no processo de geração de energia elétrica estão as turbinas hidráulicas, que convertem a energia cinética da água em energia mecânica para acionamento de máquinas síncronas conforme (Kundur, 1994). Uma das necessidades que se faz presente é o controle da velocidade por meio de um dispositivo denominado regulador de velocidade (RV), o qual atua na abertura do sistema distribuidor da turbina de modo a manter regulada a velocidade angular do rotor, independentemente das variações de carga que ocorrem durante a operação desses geradores. Neste trabalho, é apresentado o desempenho dinâmico do sistema com a inserção de um controlador digital sintonizado pelo método clássico de Resposta em Frequência, e de um controlador do tipo FOPID (Fractional Order Proportional Integral Derivative), sintonizado pelo método baseado em margens de ganho, e margens de fase, sendo a técnica de controle fracionário um método de sintonia de controladores PID não convencional (Vinagre & Monje, 2012).

2 Descrição do Sistema de Estudo

O Laboratório de Controle de Sistema de Potência (LACSPOT), da faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará (UFPA), apresenta um sistema de geração em escala reduzida de 10kVA, a qual é constituída por um conjunto gerador síncrono de polos salientes acionados por um motor CC de 9kW. As máquinas são acopladas por um volante de Inércia, (Faria *et al*, 2012). Um circuito indutivo é usado para simular uma linha de transmissão. O sistema dispõe de um painel que contém toda instrumentação de automação, de controle e de acionamento do gerador. Tal planta didática foi dimensionada de forma que seus parâmetros elétricos e mecânicos, em valores percentuais unitários (p.u.) fossem similares aos valores de um sistema de grande porte. Neste trabalho o conjunto motor Gerador será denominado de Micromáquina (Faria *et al*, 2012) e (Moraes, 2011). A Figura 1 apresenta uma fotografia do sistema, e na Tabela 1 estão contidas as informações dos dados de placa do gerador síncrono e do motor C.C. que compõe a gerador. De acordo com Kundur (1994), a dinâmica linearizada de uma turbina hidráulica do tipo Francis pode ser descrita a partir do balanço dos torques atuando no eixo do gerador. $\Delta \bar{P}_m(s)$ é o valor desviado da potência mecânica (em p.u.) suprida pela turbina, $\Delta \bar{\omega}_r(s)$ na equação

(1) o desvio da velocidade angular de rotação do rotor, H é a constante de inércia do gerador, e B é o coeficiente de atrito viscoso. A dinâmica linearizada da turbina é descrita pela equação (2), onde $\Delta \bar{G}(s)$ é o desvio na abertura do distribuidor. $\Delta \bar{G}(s)$ é relacionado com o sinal de comando para o servoposicionador, u Equação (4), através da equação (3). Substituindo-se (2) e (3) em (1), obtém-se então a função de transferência relacionando os desvios de $\Delta \bar{\omega}_r(s)$ ao sinal de comando do servoposicionador, u equação (4).



Figura 1. Laboratório de Controle e sistemas de Potência.

Tabela 1. Dados de placa do Gerador Síncrono e do Motor C.C. presentes no Sistema de Geração em escala reduzida.

Gerador Síncrono	
Potência	10kVA
Frequência	60Hz
Tensão Terminal	220V
Corrente de Estator	22,1A
Tensão de Campo	150V
Corrente de Campo	3,8A
Número de Fases	3
Número de Pólos	6
Fator de Potência	0,8
Momento de Inércia Total	3,861kg.m ²
Motor C.C.	
Potência	9kVA
Velocidade	1200rpm
Rendimento	9/11
Tensão de Armadura	400V
Corrente de Armadura	27,5A
Tensão de Campo	300V
Corrente de Campo	1,5A

Para emular o comportamento de uma turbina hidráulica, o valor da corrente aplicada a armadura do motor C.C. foi controlado de modo a rastrear um modelo dinâmico de referência, dado pela equação (4). Este controle para emulação de uma turbina hidráulica foi embarcado em um sistema digital baseado em microcontrolador dsPIC (Nascimento Filho, 2011). Os valores dos parâmetros utilizados na emulação da turbina hidráulica são fornecidas na Tabela 2. Após substituição dos valores numéricos dos parâmetros na equação (4), obtém-se a seguinte função de transferência

para uso no projeto do regulador de velocidade Equação (5).

$$2Hs \Delta \bar{\omega}_r(s) = \bar{P}_m(s) - B \Delta \bar{\omega}_r(s) \quad (1)$$

$$\Delta \bar{P}_m(s) = \frac{1-t_w s}{1+0,5t_w s} \bar{G}(s) \quad (2)$$

$$\Delta \bar{G}(s) = \left(\frac{1}{t_g s + 1} \right) u(s) \quad (3)$$

$$\Delta \bar{\omega}_r(s) = \left(\frac{1}{2Hs + B} \right) \left(\frac{1-t_w s}{1+0,5t_w s} \right) \left(\frac{1}{t_g s + 1} \right) u(s) \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{-0.0833s + 0.0541}{s^3 + 1.663s^2 + 0.475s + 0.003} \quad (5)$$

Tabela 2. Valores dos Parâmetros Físicos

Parâmetro Físico	Valor do Parâmetro
t_w	1,54s
H	4,29V
t_g	2,8s
B	0,03482N.m/rad/s

3 Sintonia dos parâmetros dos controladores.

Esta seção tem como propósito apresentar dois métodos de sintonia de parâmetros de controladores: Um controlador FOPID projetado pelo método analítico de sintonia de controladores baseado em margens de ganho e fase, e outro controlador por avanço e atraso de fase clássico (*LeadLag*), ambos pelo método de resposta em frequência. O objetivo dos controladores é regular a velocidade de uma turbina hidráulica emulada por um motor CC de 9kW com o intuito de controle de potência. O projeto dos controladores será baseado no modelo matemático da planta mostrada na Equação (5). Uma vez obtidos os ganhos do controlador, o método de discretização selecionado para se obter a lei de controle digital foi o método de Tustin (Landau & Zito, 2006), baseado na seguinte aproximação para mapeamento entre os Planos S e Z.

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T_s(1+z^{-1})}, \quad (6)$$

onde T_s é o período de amostragem que é selecionado de acordo com a largura de banda de malha fechada do sistema (Landau & Zito, 2006).

$$6F_{LB}^{MF} \leq F_s \leq 25F_{LB}^{MF}, \quad (7)$$

onde F_s a frequência de amostragem e F_{LB}^{MF} a frequência de largura de banda de malha fechada. O controlador digital, sob a forma de uma estrutura canônica RST, mostrada na Figura 2 (Landau, 1995), pode ser expresso pelas Equações (8), (9), (10) e (11):

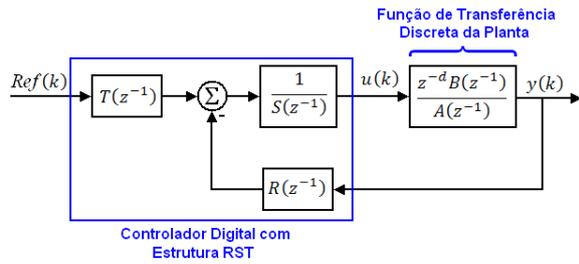


Figura 2. Controlador na estrutura RST.

$$u(k) = -\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} y(k) + \frac{T(q^{-1})}{S(q^{-1})} R_{ef}(k) \quad (8)$$

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + \dots + r_{nr} z^{-nr} \quad (9)$$

$$S(z^{-1}) = 1 + s_1 z^{-1} + \dots + s_{ns} z^{-ns} \quad (10)$$

$$T(z^{-1}) = R(1) \quad (11)$$

3.1 Controladores FOPID

Possivelmente, o conceito de cálculo de ordem fracionária começou a ser delineado quando em uma carta em 1695, L'Hopital perguntou a Leibniz o que aconteceria se, ao invés de se utilizar um valor n inteiro, fosse utilizado um valor fracionário definido na forma da Equação (12) conforme (Caponetto *et al*, 2010).

$$D^n = \frac{d^n f(x)}{dx^n} \quad (12)$$

A transformada de Laplace da derivada de ordem fracionária, pela definição de Caputo é definida pela Equação (13), conforme (Caponetto *et al*, 2010).

$$L\{ {}_0^q D_t^\alpha f(t) \} = s^\alpha F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{-(q-k-1)} f^{(k)}(0), \quad (13)$$

onde $k = 0, 1, \dots, (n-1)$, $n \in \mathbb{N}$ e $q \in \mathbb{R} / n-1 < q < n$.

Para condições iniciais nulas a Equação (13) é reduzida para forma dada pela Equação (14).

$$L\{ {}_0^q D_t^\alpha f(t) \} = s^\alpha F(s) \quad (14)$$

A solução de uma equação diferencial de ordem fracionária é mais complexa que a resolução de uma equação diferencial ordinária de ordem inteira, sendo que muitas equações diferenciais de ordem fracionária nem mesmo possuem solução analítica. Dessa forma, métodos de aproximações numéricas são geralmente empregados para obtenção de soluções aproximadas. Grande parte dos métodos de aproximações de operadores de ordem fracionária para sistemas de ordem inteira foram obtidos a partir de estudos do comportamento das funções no domínio da frequência (Faieghi & Nemati, 2011). A aproximação de Oustaloup (15), uma das técnicas de aproximação é válida para uma determinada banda de frequências $[\omega_l, \omega_h]$, onde o ganho k é ajustado para que a aproximação possua ganho unitário na frequência de 1 rad/s conforme (Faieghi & Nemati, 2011).

3.1.1 Estrutura de um controlador FOPID.

A estrutura do controlador investigado neste trabalho, FOPID, é também citada na literatura como $P^\lambda I^\mu D^\mu$, por possuir expoentes fracionários ajustáveis, sendo que o expoente é λ referente a parte integral, e o expoente μ referente parte derivativa do controle

FOPID. Os expoentes μ e λ podem assumir valores reais. A função de transferência desse tipo de controlador é dada na equação (19).

$$s^q = k \prod_{n=1}^{n=k} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{zn}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{pn}}\right)}, \quad \text{para } q > 0 \quad (15)$$

$$\alpha = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{q/N}, \quad \eta = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{(1-q)/N}, \quad \omega_{z1} = \omega_l \sqrt{\eta} \quad (16)$$

$$\omega_{zn} = \omega_{p,n-1} \eta, \quad \text{para } n = 2, \dots, N. \quad (17)$$

$$\omega_{pn} = \omega_{z,n-1} \alpha, \quad \text{para } n = 1, \dots, N. \quad (18)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_I \frac{1}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (19)$$

3.1.2 Sintonia do Controlador FOPID.

Dadas as margens de ganho e de fase desejadas para o sistema em malha fechada, o projeto consiste em calcular os correspondentes valores para os parâmetros do controlador FOPID, K_p , K_I , K_D , λ e μ . A fim de se obter um sistema onde o número de equações seja igual ao número de incógnitas, neste trabalho é utilizado o método proposto em (Vinagre & Monje, 2012), onde considera-se o caso particular onde $\lambda = \mu$, resultando em um sistema de equações composto de quatro incógnitas (K_p , K_I , K_D e λ) e quatro equações não-lineares. Para a resolução do sistema de equações não lineares, o método numérico utilizado neste trabalho é o método de Newton-Raphson (Cunha, 2009), os valores iniciais escolhidos para os parâmetros são pequenos de modo que a ação de controle venha a convergir adequadamente e o valor de lambda foi selecionado próximo de 1, o que representa um comportamento inicialmente próximo de um controlador de ordem inteira (Faieghi & Nemati, 2011). Para isso, um programa, para ambiente *Matlab*, utilizando o referido método para resolução das equações relacionadas à obtenção dos parâmetros para o controlador de ordem fracionária. O fluxograma do programa desenvolvido para o cálculo dos parâmetros do controlador PID de ordem fracionária está representado na Figura 3. Inicialmente, o projetista deverá fornecer as margens de ganho e de fase desejados, bem como os valores iniciais para iniciar o processo de solução iterativa pelo método de Newton-Raphson utilizando quatro equações não lineares conforme (Vinagre & Monje, 2011). Após ocorrer a convergência, dentro de uma tolerância especificada, os valores dos parâmetros K_p , K_I , K_D e $\lambda = \mu$ são fornecidos como saída do programa. Caso não ocorra a

convergência, o programa é finalizado após um determinado número de iterações (Ayres Júnior, 2013).

Para a sintonia de controladores FOPID é utilizada a toolbox *NINTEGER*, uma ferramenta desenvolvida para auxiliar o desenvolvimento de controladores de ordem fracionária e avaliar seu desempenho, conforme (Valério & Costa, 2004). A Tabela 3 apresenta os valores das margens utilizadas no projeto do controlador.

Tabela 3. Parâmetros de projeto do Controlador FOPID.

Parâmetros de Projeto FOPID	Valores dos Parâmetros de Projeto
K	3,5
ω_{cg}	0,09177 rad/s
ω_{cp}	0,4409 rad/s
φ_m	35°
G_m	4,0dB

Os valores das estimativas iniciais dos parâmetros do controlador FOPID foram $K_p = 0,1$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0,1$ e $\lambda = 1,2$. A função de transferência obtida do controlador FOPID é dada pela equação (20).

$$C(s) = \left(0,5691 + \frac{0,0230}{s^{0,9996}} + 0,4176s^{0,9996} \right) \quad (20)$$

Aplicando-se a aproximação de Oustaloup apresentada na equação conforme (Faieghi & Nemat, 2011), e utilizando os valores da Tabela 4 temos a realização de ordem inteira, dado pela Equação (21).

$$C(s) = \frac{537,1s^3 + 1056s^2 + 472,9s + 17,89}{s^3 + 366,7s^2 + 222,3s} \quad (21)$$

Tabela 4. Parâmetros para aproximação de Oustaloup.

Parâmetros da Aproximação	Valores dos Parâmetros
N	2
ω_l	0,001 rad/s
ω_h	367 rad/s

3.2 Método de Resposta em Frequência Clássica.

Conforme (Costa *et al*, 2012) e (Ayres Júnior, 2013) o projeto do controlador Avanço e atraso de Fase (Lead Lag) é apresentado em uma sequência de passos. Os parâmetros do controlador obtidos, de acordo com o método de sintonia de resposta em frequência proposto, são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros do Controlador *Lead-Lag*.

	K	B	T1	T2
LeadLag	20	16	0,290	0,0917

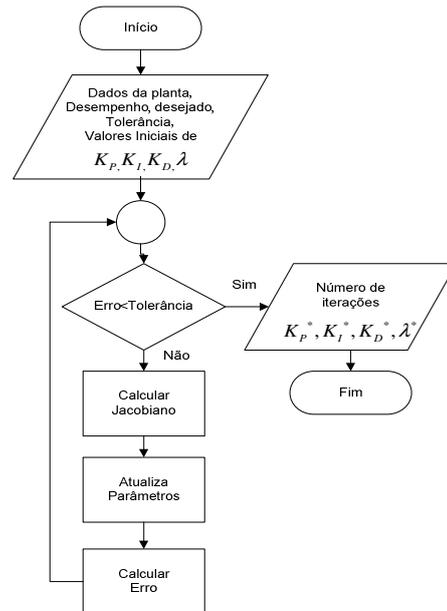


Figura 3. Fluxograma do método de Newton utilizado para obtenção dos parâmetros do Controlador FOPID.

4 Regulador de Velocidade

Neste trabalho, foram projetados dois tipos de controladores, um PID e um compensador por atraso e avanço de fase para o regulador de velocidade. Porém neste trabalho será abordado apenas o sistema operando em carga isolada, sem a conexão do sistema na rede.

Na Tabela 6, apresenta-se os valores dos parâmetros dos controladores digitais PID e *LeadLag*, projetados neste trabalho, o valor do período de amostragem utilizado para a discretização dos controladores foi de 1,2 s.

Tabela 6. Parâmetros dos controladores digitais.

Parâmetros	FOPID	Lead-Lag
r_0	4.4646	6.5572
r_1	-6.8450	-10.4865
r_2	2.7139	4.1321
r_3	-0.2306	0
s_1	-0.4745	-0.5293
s_2	-0.9867	-0.4706
s_3	0.4612	0
T	0.1028	0.2028
s_p	0.005143473	0.010141927

5 Resultados experimentais:

A seguir, são apresentados os resultados experimentais obtidos pelos controladores implementados para a regulação de velocidade do sistema de geração em escala reduzida de 10 kVA. Dois tipos de testes foram realizados para este trabalho. Primeiramente

apresenta-se o experimento de inserção e retirada de carga. Em segundo um teste de resposta ao degrau é aplicado na referência de velocidade do regulador de velocidade. Os resultados apresentados são corroborados por uma análise dos índices de desempenho do tipo integral do erro quadrático (ISE) calculados a partir dos sinais de respostas dinâmicas de velocidade e sinal de controle no domínio do tempo para ambos os controladores, segundo a equação (22).

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (22)$$

5.1 Testes de Injeção e Rejeição de Carga.

Neste teste foi realizada de inserção de carga de 0,12 p.u. (1200 W, figura 4a) e posterior retirada (figura 4b) para o sistema de geração em pequena escala operando de forma isolada alimentado unicamente a carga nos terminais do gerador síncrono de 10 kVA. As respostas do regulador de velocidade, sinal de controle juntamente com abertura do distribuidor emulada (Nascimento Filho. 2011) com o controlador PID clássico e FOPID são apresentados na Figura 4a, 4b, 4c e 4d.

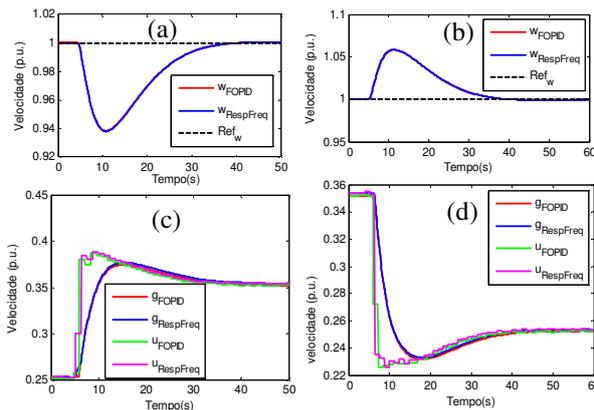


Figura 4. Respostas dinâmicas no domínio do tempo de velocidade e sinal de controle para o teste de inserção e rejeição de carga.

Pode ser verificado nas curvas acima que a inserção de carga (figura 4a) ambos os controladores apresentam resposta satisfatoriamente rápida de regulação para um sistema com característica de geração primária hidráulica, estando ambos controladores com desempenhos similares. O mesmo é observado para a retirada da carga (figura 4b), onde se verifica novamente a retomada para o valor de 1 p.u. de referência de velocidade. Na Figura 4c e 4d verifica-se os valores de sinais de controles e abertura do distribuidor emulada pelo sistema de geração utilizado nestes testes. Observa-se que para o controlador FOPID em detrimento ao PID convencional apresenta um sinal ligeiramente menor de controle, o que representa um ganho em termos de esforço e gasto de energia. Tais afirmações podem ser confirmadas a partir da análise do índice de desempenho ISE apresentados na Figura 5, e calculados a partir das respostas de velocidade (figura 5a) e sinal de controle (figura 5b). Verifica-se ao observar esta figura que para as respostas de velo-

cidade índices praticamente iguais são obtidos, contudo com o sinal de controle o ISE mantém-se abaixo do PID convencional para a resposta da inserção e retirada da carga.

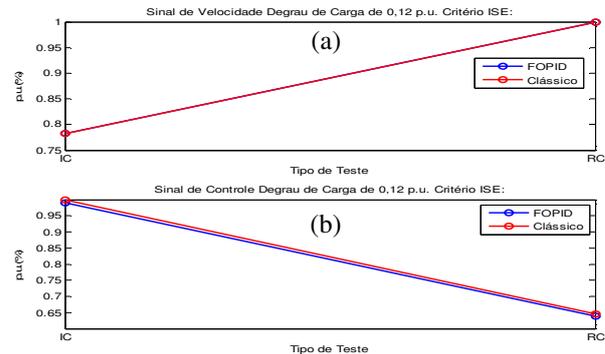


Figura 5. Índice de desempenho ISE de velocidade e sinal de controle para o teste de inserção e rejeição de carga.

5.2 Teste de Resposta ao Degrau na Referência de Velocidade.

Também foram realizados e apresentados nesta seção os testes de aplicação de degrau positivo de 5% (0,05 pu) na referência do regulador de velocidade e posterior degrau negativo. As respostas de velocidade e sinais de controle juntamente com a abertura do distribuidor (emulado) são apresentadas na Figura 6.

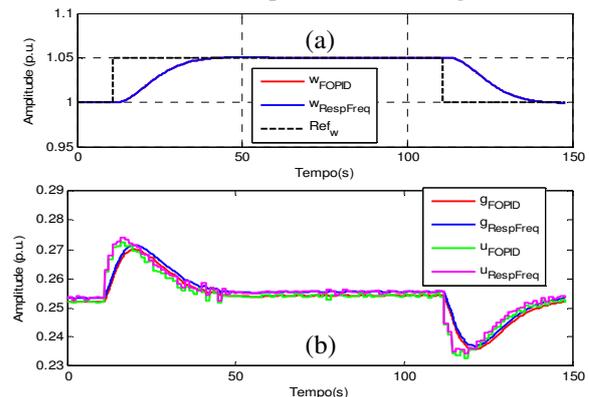


Figura 6. Respostas dinâmicas no domínio do tempo de velocidade e sinal de controle para o degrau de 5% na referência de velocidade.

Verifica-se na Figura 6a que nas curvas para o degrau positivo e negativo ambos os controladores apresentam resposta de tempo de acomodação de aproximadamente 41 segundos, satisfatoriamente rápida para rastreamento de referência em um sistema com característica de geração com fonte primária de natureza hidráulica, estando ambos controladores com desempenhos similares. Tais afirmações podem ser confirmadas a partir da análise do índice de desempenho ISE apresentados na Figura 7 e calculados a partir das respostas de velocidade (Figura 7a) e sinal de controle (Figura 7b). Pode-se observar na Figura 7a para as respostas de velocidade, os índices de desempenho ISE coincidem para ambos controladores implementados digitalmente no sistema, contudo com o ISE obtido a partir do sinal de controle (Figura 7b) verifica-se que o FOPID mantém-se abaixo do PID convencional para a resposta de degrau positivo e negativo na referência de velocidade, con-

firmando um menor esforço de controle para realização dos fins de controle especificados.

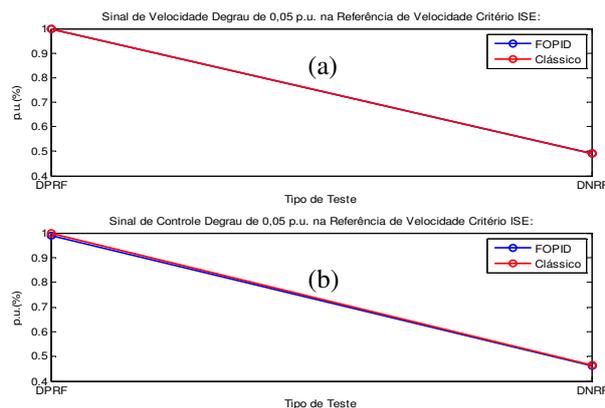


Figura 7. Índice de desempenho ISE de velocidade e sinal de controle para o teste de resposta ao degrau na referência de velocidade.

6 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado os resultados experimentais da implementação de um controlador PID de ordem fracionária projetado segundo uma abordagem de resposta em frequência aplicado à regulação de velocidade de um sistema de geração em escala reduzida composta de um gerador síncrono de 10 kVA acionado por um motor CC que foi programado para reproduzir um comportamento de uma turbina hidráulica de unidades geradores de grande porte. O estudo tem a sua validade no âmbito científico no tocante ao projeto de controladores sintetizados a partir de metodologias avançadas. As rotinas e programações realizadas neste trabalho demonstraram a viabilidade de utilização desta técnica comprovando que o sistema pode ser controlado sem leva-lo a instabilidade, apesar de apresentar resultados aproximadamente similares a técnicas clássicas já bem empregadas. Os resultados para dois tipos de experimentos, reposta ao degrau e injeção/rejeição de carga, demonstraram que o controlador FOPID apresentou um desempenho dinâmico ligeiramente melhor para as respostas dinâmicas de velocidade no domínio do tempo em detrimento a um controlador PID baseado com técnicas clássicas de resposta em frequência e implementado digitalmente. As análises dos índices de desempenho demonstraram que o FOPID consegue atender às especificações de desempenho com um esforço de controle menor para os testes realizados do sistema com configuração isolada.

Referências Bibliográficas

Ayres Júnior, F. A. C. (2013). Projeto e Testes Experimentais de um Regulador de Velocidade Baseado em Lei de Controle PID de Ordem Fracionária. -Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Brasil.

- Caponetto, R., Dongola, G., Fortuna, L., Petráš, I. (2010). Fractional Order Systems, Modeling and Control Applications.-World scientific.
- Costa, A. C., Ayres Júnior, F.A.C., Nascimento Filho, P. S., Moraes, A. R. B. Faria F. P., Costa Júnior, F. J, Barra Júnior, W. (2012). Sintonia de Controladores PID pelos Métodos de Ziegler-Nichols e Resposta em Frequência para a Regulação de Velocidade de um Sistema de Geração em Escala Reduzida de 10KVA. CBA, Campina Grande-PB, Brasil.
- Cunha, M. C. C. (2009). Métodos Numéricos, Campinas. Editora UNICAMP.
- Faiegghi, M. R., Nemati, A. (2011). On Fractional-Order PID Design, Applications of MATLAB in Science and Engineering, Prof. Tadeusz Michalowski (Ed.). INTECH.
- Faria F. P., Moraes, A. R. B., Nascimento Filho, P. S., Costa, A. C., Sousa, M. R. B., Ayres Júnior, F. A. C., Costa Júnior, F. J., Barra Júnior, W., Costa Júnior, C. T., Barreiros, J. A. L., Nunes, M. V. A. (2012). Modernização da Instrumentação para Controle e Acionamento de um Sistema de Geração em Escala Reduzida. CBA, Campina Grande-PB, Brasil.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control – McGraw-Hill.
- Landau, I.D., Zito, G. (2006). Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation – Springer.
- Moraes, A. R. B. (2011). Desenvolvimento e Implementação de Estratégias de Controle Digital para Regulação de Tensão e Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em um Gerador Síncrono de 10 kVA – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2011.
- Nascimento Filho, P. S. (2011). Investigação de Estratégias de Controle Digital para Regulação de Velocidade e Emulação da Dinâmica de Turbinas Hidráulicas, com Implementação e Testes Experimentais em uma Micromáquina de 10 KVA. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil.
- Valério, D., Costa, J.S. (2004). NINTEGER: A Non-Integer Control Toolbox for MATLAB, Proceedings of Fractional Differentiation and its Applications, Bordeaux.
- Vinagre, B.M., Monje, A.C. (2012). Advances in Industrial Control - PID Control in the Third Millennium, Lessons Learned and New Approaches, Prof. Ramon Vilanova & Prof. Antonio Visioli (Ed.), Springer.