

IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	Artigo: 20
	Páginas: 142 - 149

INVESTIGAÇÃO DE CONTROLE DE ORDEM FRACIONÁRIA APLICADA AO PROBLEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE TURBINAS HIDRÁULICAS.

Cláudia S. M. da Silva ^{1*}, Florindo A. de C. Ayres Júnior ¹, Renan L. P. de Medeiros ¹

*1 - Universidade Federal do Amazonas – UFAM – Campus Manaus, * sabrinam901@gmail.com*

Resumo - Este trabalho apresenta a sintonia de um controlador PID de ordem fracionária (FOPID) aplicado à regulação da frequência elétrica em um modelo linear de um sistema de geração em escala reduzida, com o objetivo de tornar o Sistema Elétrico de Potência mais eficiente. O projeto foi realizado em ambiente computacional fundamentado em um método analítico de sintonia de controladores baseado em margem de ganho e fase. O comportamento do controlador FOPID será apresentado através de simulação computacional utilizando a ferramenta MATLAB/SIMULINK, buscando equiparar o seu desempenho em relação ao controlador PID sintonizado por convencional.

Palavras-chave: Controle Automático, Regulação de Frequência, FOPID.

Abstract - This work presents the tuning of a fractional order PID controller (FOPID) applied to the electric frequency regulation in a linear model of a small scale generation system, in order to make the Electric Power System more efficient. The project was carried out in a computational environment based on an analytical method of controller tuning based on gain and phase margin. The behavior of the FOPID controller will be presented through computational simulation using the MATLAB / SIMULINK tool, aiming to equate its performance with respect to the conventional tuned PID controller.

Key-words: Automatic Control, Frequency Regulation, FOPID.

INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e econômico do Brasil, a demanda por energia elétrica vem se tornando cada vez maior [1]. Atualmente, a principal fonte de energia limpa do Brasil é a hidráulica e, com o aumento da complexidade do Sistema Elétrico de Potência e de suas tecnologias, surgiram diversos problemas relacionado a dinâmica das máquinas [2].

Uma das principais máquinas que compõem esse sistema de geração de energia é a turbina hidráulica, ela é responsável pela conversão de energia cinética em energia mecânica, sendo o seu controle efetuado por meio do regulador de velocidade (RV).

O regulador de velocidade é um controlador que atua no circuito hidráulico do distribuidor da turbina e, possui a função de regular a vazão da água que passa pelo rotor da turbina. Esse controle visa manter os geradores síncronos operando na velocidade síncrona, pois, devido as condições de operação do sistema de geração, essa velocidade possui variações. Sendo assim, o RV é responsável pelo controle da potência mecânica da turbina e do gerador e, da frequência da tensão que está sendo gerada [3]. Logo, essa pesquisa visa apresentar técnicas de controle aplicadas ao RV de turbinas hidráulicas, para que o sistema funcione de forma eficiente e segura.

Portanto, buscou-se investigar técnicas de controle, com ênfase no controlador PID de ordem fracionária (FOPID - Fractional-Order Proportional Integral Derivate), pois, os controladores FOPID permitem uma maior flexibilidade em um projeto [4]. Para isso, buscou-se desenvolver algoritmos computacionais, utilizando o

<p>14 e 15 de março de 2019 Curitiba - Paraná</p>

MATLAB/Simulink [5], que permitissem reproduzir através de simulações o sistema de geração hidráulico.

METODOLOGIA

Para esse projeto se utilizará um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Onde, ação integral realiza a eliminação de erros de regime permanente, a ação derivativa antecipa o comportamento do processo e, a ação de proporcionalidade faz com que o sistema tenha uma reação rápida ao erro presente. [6].

O controlador PID de ordem inteira possui os parâmetros de sintonização apresentados na Eq. 1, $\lambda = \mu = 1$, diferentemente do controlador FOPID, que possui expoentes fracionários e ajustáveis, onde λ refere-se a parte integrativa e μ a parte derivativa deste controlador [7]. Logo, o FOPID apresenta uma região de ajustes de parâmetros mais ampla que o controlador PID convencional, ocasionando uma maior flexibilidade para projeto [8].

$$C(s) = k_p + \frac{k_I}{s^\lambda} + k_D s^\mu \quad (1)$$

Em AYRES JÚNIOR (2013), é apresentado a arquitetura de um sistema de controle desenvolvido para o motor CC da micromáquina, que representa uma unidade hidrogeradora conectada ao barramento infinito, de um sistema de geração em escala reduzida. Para a sintonia dos controladores RV aplicados neste trabalho, é apresentada a função de transferência que relaciona o desvio da velocidade com o desvio da abertura do distribuidor dada pela Eq. 2, a qual engloba a equação de Swing do sistema relacionada as dinâmicas rotacionais físicas da máquina síncrona, a função de transferência da turbina hidráulica, a função de transferência do servoposicionador, sendo a saída do sistema a velocidade angular no rotor da máquina. [7].

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

Os valores dos parâmetros dos controladores RV foram obtidos utilizando três metodologias de sintonia de controladores, sendo eles: lugar geométrico das raízes (LGR), alocação de polos e margem de ganho e fase para a sintonia do controlador FOPID. As especificações para realizar a sintonia desses controladores são definidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações do controladores

ESPECIFICAÇÕES		Fracionário	LGR	Aloc. Polos
Tempo de acomodação	$t_s (s)$	100	100	100
Máximo sobressinal	M_{ss}	0,1	0,043	0,1
Fator de amortecimento	ζ	0,5912	0,707	0,5912
Frequência de natural	$\omega_n (rad/s)$	0,0507	-	0,0507
Margem de ganho	$M_g (dB)$	10	-	-
Margem de fase	$M_p (^\circ)$	70	-	-
Frequência de cruzamento de ganho	$\omega_{cg} (rad/s)$	0,0507	-	-
Frequência de cruzamento de fase	$\omega_{cf} (rad/s)$	0,2534	-	-

Apesar de duas especificações de projeto (M_{ss} e ζ) do controlador pelo método LGR apresentadas na Tabela 1 não serem iguais as especificações dos outros dois controladores, utilizou-se esses valores para que a sua resposta se aproximasse da resposta dos outros dois métodos (FOPID e alocação de polos), como será observado nas Fig. 3 e 5.

Pelo método LGR, desenvolveu-se um controlador PID convencional. Para isso, utilizou-se a Eq. (1) de ordem inteira com a planta mencionada na Eq. (2). Utilizando o comando *rlocus* traçou-se o gráfico do lugar das raízes no MATLAB [9] e, a partir dos gráficos plotados, encontrou-se os valores dos parâmetros k apresentado na Eq. 1, de acordo com as especificações da Tabela 1.

Ao utilizarmos o método de alocação de polos garantimos que os polos da função de transferência em malha fechada sejam alocados em posições pré-definidas [6]. Portanto, determinou-se a função de transferência do controlador certificando que, juntamente com a planta da Eq. (2), em laço fechado o sistema contenha as especificações desejadas.

O método analítico de sintonia de controladores baseado em margem de ganho e fase é utilizado para se obter os parâmetros do controlador FOPID a partir dos valores de margem de fase e ganho desejados em malha fechada. Porém, para que o sistema possua número de incógnitas igual ao número de equações é utilizado um caso particular, onde $\lambda = 1$, e μ um valor fracionário a ser encontrado, prevalecendo apenas quatro incógnitas K_P, K_I, K_D e μ e quatro equações não-lineares que são apresentadas em VALÉRIO e COSTA (2013) [7 e 10].

Para resolver as equações não-lineares utilizamos o comando *fsolve* no MATLAB, sendo que essa função aplica o método numérico de Newton. O Método de Newton realiza a combinação de linearização e iteração nas aproximações numéricas [11]. Portanto, a resultado das equações define parâmetros do controlador de ordem fracionária K_P, K_I, K_D e μ .

Após a obtenção dos parâmetros do controlador FOPID, será aplicado um método para obter um modelo de aproximação contínua à ordem fracionária. O método aplicado é conhecido como Método de Oustaloup, baseado no ajuste da curva de resposta, ou seja, realiza-se a implementação dentro de uma largura de banda limitada [12]. A aplicação desse método retornará uma função aproximada de um derivador de ordem fracionária.

Para a implementação do método de aproximação de Oustaloup, utiliza-se a função *ousta_fod* que é uma aproximação dos controladores fracionários para seus equivalentes inteiros e é apresentada em [13] em ambiente computacional. Sendo que, projeto usou-se duas oitavas acima e duas oitavas abaixo da frequência de projeto (frequência natural - ω_n) para as frequências (baixa ω_b e alta ω_h).

Dessa forma, os controladores projetados serão construídos na plataforma Simulink, aplicando um sinal na entrada do sistema, realizando variações que simulem o funcionamento do sistema, comparando a resposta de cada um dos controladores, visando demonstrar o desempenho dos mesmos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os controladores obtidos pelo método de lugar geométrico e via alocação de polos são apresentados nas Eq. 3 e Eq. 4, respectivamente.

$$C_1(s) = 0,8461 + \frac{0,01}{s} + 0,0151s \quad (3)$$

$$C_2(s) = \frac{0,6604 s^3 + 1,66s^2 + 0,4512s + 0,0166}{s^3 + 1,473s^2 + 0,8656s} \quad (4)$$

Após a aplicação da técnica de sintonia de controladores FOPID baseada em Margens de Ganho e Fase, utilizando uma tolerância desejada do método numérico menor que 10^{-8} , os valores dos parâmetros obtidos do controlador FOPID são apresentados na Tabela 2. E, depois da sintonização do controlador fracionário, implementou-se o método de aproximação de Oustaloup para os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros obtidos para o controlador FOPID

Parâmetros	Valores dos Parâmetros
K_P	0,4813
K_I	0,0040
K_D	1,0426
μ	2,2120

Tabela 3 - Valores dos parâmetros para implementação no método Oustaloup.

Parâmetros	Valores dos Parâmetros	
Frequência baixa	$w_b (rad/s)$	0,0127
Frequência alta	$w_h (rad/s)$	0,2027
Ordem de aproximação	N	4
Ordem do diferenciador	μ	2,2120

O Controlador equivalente Contínuo obtido é dado pela Eq. 5:

$$C_3(s) = \frac{0,5118s^5 + 0,2862s^4 + 0,05255s^3 + 0,003728s^2 + 9,547 \cdot 10^{-5}s + 5,621 \cdot 10^{-7}}{s^5 + 0,5785s^4 + 0,1041s^3 + 0,006883s^2 + 0,0001416s} \quad (5)$$

A Fig. 1 apresenta os diagramas de Bode do controlador FOPID desejado em cor azul, e de seu equivalente contínuo obtido a partir da aproximação de Oustaloup em preto, para as frequências entre 10^{-2} e $10^2 (rad/s)$. Observa-se que para as frequências compreendidas na faixa de aproximação e para frequências abaixo da faixa, os valores estão muito próximos, tanto em magnitude quanto em fase.

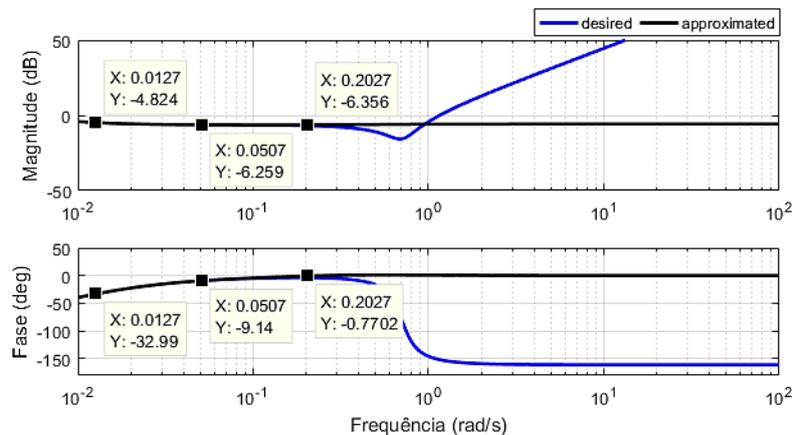


Figura 1 - Diagrama de Bode do controlador FOPID

Os três controladores projetados são constituídos na plataforma Simulink para realização de testes, sendo que, o diagrama de bloco apresentado na Fig. 2 representa o

sistema a qual serão realizados os testes. Inicialmente, aplica-se um degrau unitário (1 p.u. - por unidade) na entrada do sistema e após sua estabilização, efetuam-se dois testes.

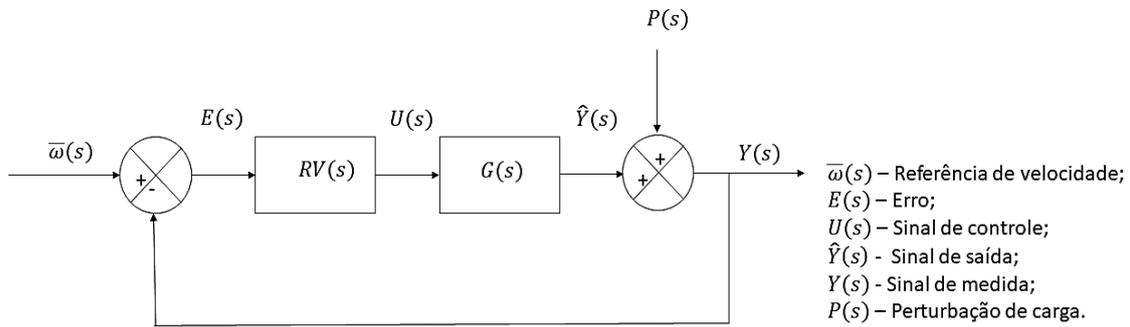


Figura 2 - Diagrama de blocos com dinâmica e controlador

O primeiro teste visa realizar a variação de degrau na referência de velocidade (Fig. 3). Na figura seguinte (Fig. 4) é possível observar melhor a resposta desse sistema ao degrau unitário.

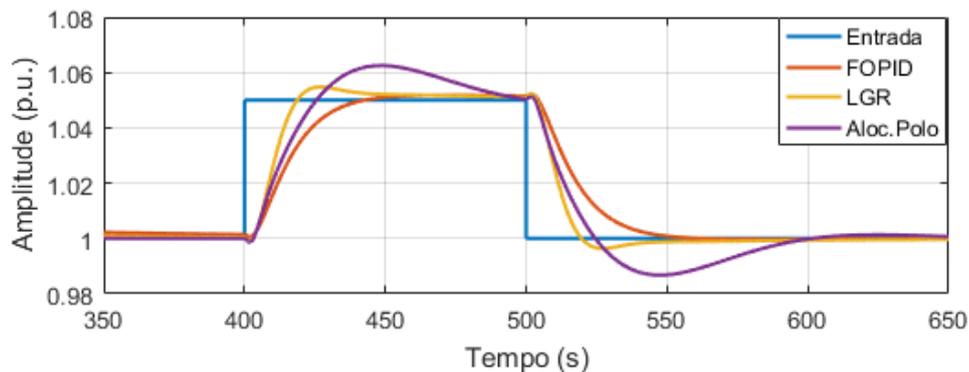


Figura 3 - Variação do sinal de entrada

Em $t = 400$ s acrescenta-se um degrau com amplitude de 0,05 p.u., observa-se a aparição de um *undershoot*, ou seja, uma resposta inversa, sendo que controlador FOPID é o que possui uma menor variação da amplitude. O mesmo se aplica ao *overshoot*, onde o controlador projetado pelo método de alocação de polos possui o maior sobressinal, enquanto a resposta do controlador FOPID desenvolve um sistema criticamente amortecido e, portanto, possui um tempo de acomodação menor (aproximadamente 60 segundos), porém, muito parecido com o controlador PID constituído pelo método LGR.

Em $t = 500$ s aplica-se um sinal de entrada negativo de 0,05 p.u., fazendo com que o sistema retorne à condição inicial de regime permanente e, como pode ser visualizado no terceiro quadrante da Fig. 4, o controlador FOPID possui uma declinação mais suave e não possui *undershoot* ao compararmos com os controladores convencionais. Portanto, o tempo de acomodação desde controlador fracionário é menor que os demais.

O segundo teste realizado visa observar o comportamento dos controladores ao aplicarmos uma variação de carga isolada. Para isso, realiza-se a inserção e rejeição de um degrau com amplitude de 0,12 p.u., resultando no comportamento da Fig. 5.

Nesse experimento é possível notar que os controladores, possuem uma resposta rápida e semelhante na inserção da carga. Porém, na rejeição da carga, o decaimento dos

controladores PID convencionais ocorre antes do controlador FOPID e, ambos os controladores de ordem inteira possuem um *undershoot* consideravelmente grande ao compararmos com o controlador de ordem fracionária. Pode-se destacar também que o controlador FOPID possui um tempo de acomodação menor que os demais controladores.

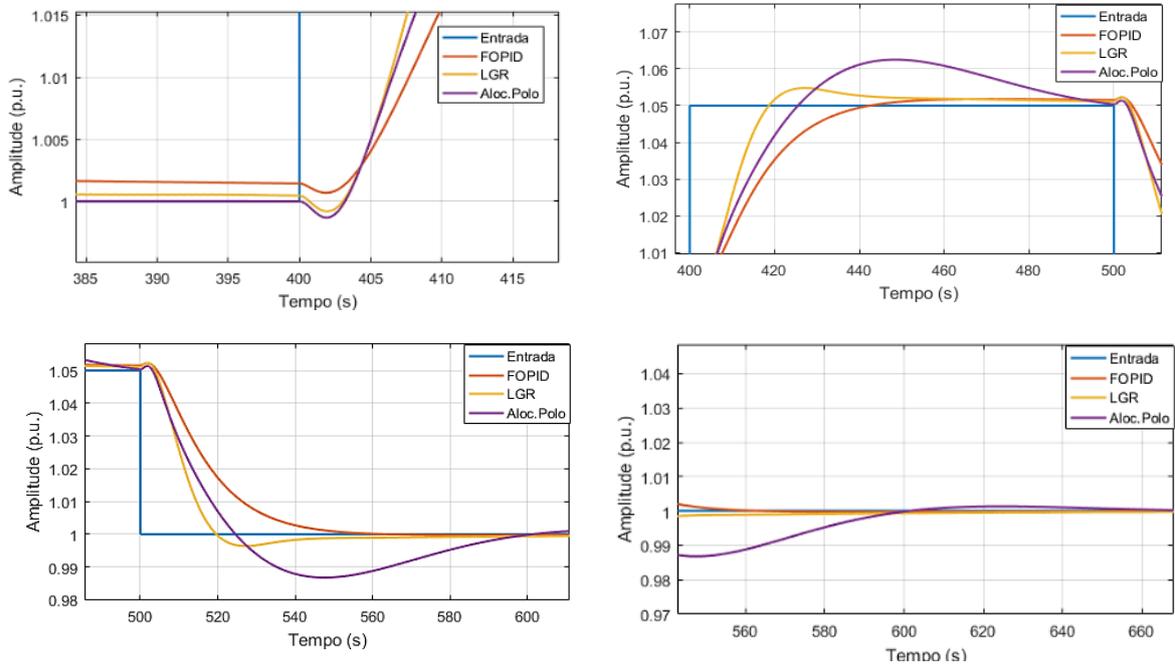


Figura 4 - Resposta dos controladores ao teste 1.

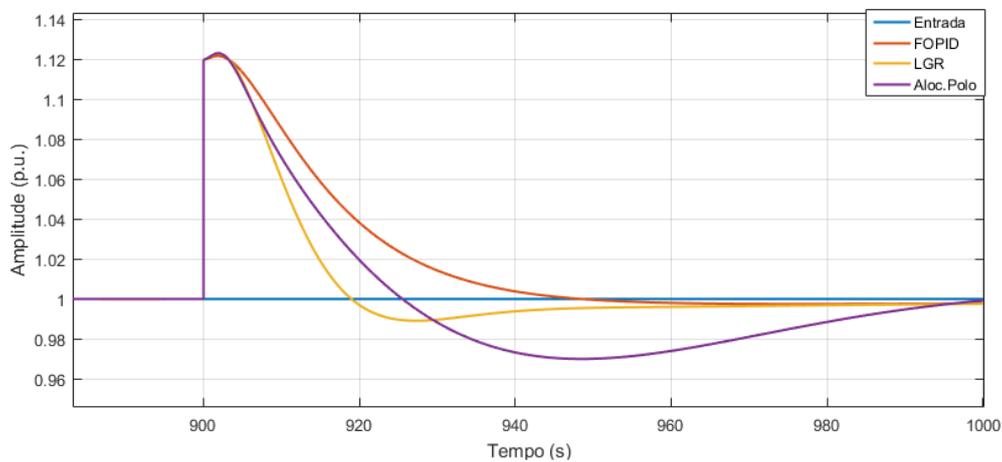


Figura 5 - Variação de carga

CONCLUSÃO

Neste trabalho, buscou-se apresentar os resultados obtidos a partir do estudo de novas metodologias de controle objetivando a melhoria do desempenho dinâmico de controladores RV, visando tornar mais eficiente a operação de Sistemas de Geração de Energia Elétrica.

Foram realizados os testes de variação da referência de velocidade, e a inserção e a retirada de uma carga de 0,12 p.u. objetivando a comparação dos desempenhos dinâmicos obtidos com a inserção dos controladores sintonizados pelas duas técnicas clássicas para sintonia de controladores PID (LGR e alocação polinomial de polos) e o controlador FOPID projetado pelo método de margem de fase e ganho.

Foi observado que com a inserção do controlador FOPID, o sistema apresentou uma resposta satisfatória em relação ao tempo de acomodação, à variação do máximo sobressinal (overshoot) e resposta inversa (undershoot), ou seja, obteve-se um menor tempo e menor variação de amplitude, quando comparado aos controladores convencionais, provavelmente isso deve-se a flexibilidade obtida no projeto destes controladores, com mais dois parâmetros, em comparação a sua contraparte de ordem inteira.

Sendo assim, a aplicação do controlador FOPID melhora o desempenho do regulador de velocidade, aumenta a eficiência do sistema de geração de energia elétrica e promove uma maior estabilidade no Sistema Elétrico de Potência.

REFERÊNCIAS

1. FINKLER, Alessandro *et al.* Relação do Crescimento Econômico e Consumo de Energia Elétrica. *In: SALÃO DO CONHECIMENTO UNIJUI*, 14, 2016, Estado do Rio Grande do Sul. Ensaio teórico [...]. Rio Grande do Sul: UNIJUI, 2016.
2. NASCIMENTO FILHO, P. S. 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. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Brasil, 2011.
3. ROCHA, D. C.; OLIVEIRA, F. M. B; NARDI, M. Simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica) – UTFPR, Curitiba, Brasil, 2012.
4. VINAGRE, B. M.; MONJE, C. A. Fractional-Order PID. *In: VILANOVA, R.; VISIOLI, A.. Advances in Industrial Control - PID Control in the Third Millennium, Lessons Learned and New Approaches.* Londres: Springer, 2012. p. 465 – 489.
5. MATHWORKS. MATLAB. Disponível em: <https://www.mathworks.com>. Acesso em: 13 fev. 2019.
6. BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. M. G. Sistemas de Controle - Princípios e Métodos de Projeto. Porto Alegre: UFRGS, 2005.
7. AYRES JÚNIOR, F. A. C. Projeto e Testes Experimentais de um Regulador de Velocidade Baseado em Lei de Controle PID de Ordem Fracionária. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - UFPA, Pará, Brasil, 2013.
8. MUÑIZ-MONTERO, Carlos *et al.* Nonlinear Dyn - New alternatives for analog implementation of fractional-order integrators, differentiators and PID controllers based on integer-order integrators. *Artigo Técnico Springer, [S. l.], 17 jul. 2017.*
9. FRANKLIN, G.F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. Sistemas de Controle para Engenharia. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
10. VALÉRIO, D.; COSTA, J. S. An Introduction to Fractional Control. Londres: The Institution of Engineering and Technology, 2013.
11. CUNHA, Cristina. Métodos Numéricos. Campinas, SP.: Unicamp, 2000.

12. SÃO ROQUE, A. A. G. Aplicação das FPAA na realização de sistemas de ordem fraccionária. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2015.

13. Monje, A. C., Chen, Y., Vinagre, B. M., Xue, D., Feliu-Battle, V.: 'Fractional Order Control Systems, Fundamentals and Applications.', Londres: Springer, 2010.