

PROJETO DE CONTROLADORES DIGITAIS PARA SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Thiago H. F. Nascimento^{1*}, Alisson Ribeiro¹, Juliana S. F. e Silva¹, Allan D. F. Côrrea¹, Rafael A. D. Rezende¹, Juan C. da Costa¹, Sarah M. T. Amoras¹, Ian A. Mendes¹, Orlando F. Silva².

1. Estudante de Engenharia Elétrica da Fac.de Engenharia Elétrica e Biomédica da UFPA
2. Docente e Doutor do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará UFPA

Resumo:

O presente trabalho trata do projeto de controladores digitais para um sistema de aquecimento de água utilizando diferentes técnicas de controle adaptativo para resolver problemas de rastreamento.

Palavras-chave: Controle Digital; Controle Adaptativo, Sistema de Aquecimento.

Introdução:

O desenvolvimento de controladores digitais tem ganhado destaque no mundo contemporâneo. Isso se deve ao fato das indústrias utilizarem cada vez mais microcomputadores nas diversas etapas de produção.

A utilização de controladores digitais se justifica pelo fato de apresentarem maior simplicidade, maior flexibilidade, serem menos suscetíveis a ruídos e mais baratos. Substituindo, dessa forma, os circuitos analógicos, cujas configurações são rígidas e pré-definidas.

Nessa perspectiva, este trabalho teve por objetivo realizar o projeto e a avaliação de controladores digitais para um sistema de aquecimento de água utilizando diferentes técnicas como a regra desenvolvida pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e o projeto por alocação de polos RST, para resolver problemas de rastreamento para controladores a ganhos adaptativos.

Metodologia:

Foram utilizados 2 métodos de controle adaptativo para uma mesma planta de aquecimento de água, detalhada a seguir:

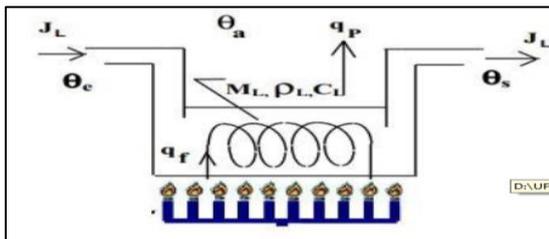


Figura 1. Modelo aproximado da planta: um trocador de calor [1].

O sistema de aquecimento de água utilizado é caracterizado como um trocador de calor, visto na Figura 1, cujo modelo

matemático pode ser descrito como uma planta de 1ª ordem, com função de transferência dada pela Equação 1.

$$G(s) = \frac{Q(s)}{\theta(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{R^*}{C_T R^* s + 1} \quad (1)$$

Onde a entrada $\theta(s)$ é a potência calorífica fornecida, a saída $Q(s)$ é o incremento de temperatura, R^* é definida como uma resistência térmica equivalente, C_T é a capacitância térmica do trocador de calor, K é o ganho do sistema e τ a sua constante de tempo.

O aquecedor utilizado foi desenvolvido pela empresa CONTROLGAS. Os valores numéricos do modelo, de acordo com a referência [1], constam na Equação 2.

$$G(s) = \frac{2.75}{22.5s + 1} \quad (2)$$

Nota-se que a constante de tempo τ é de 22.5 segundos, um valor considerado elevado, portanto o sistema em malha aberta é lento. Para se projetar um controlador digital é necessário discretizar a planta, assim utilizou-se o método *Zero Order Hold* (ZOH) disponível no *software* Matlab [4] em todos os métodos a seguir.

O sistema discretizado está representado na Equação 3 e o modelo desejado para malha fechada na Equação 4. Ambos foram discretizados com um período de amostragem de 0.2, igual a décima parte da constante de tempo do modelo desejado.

$$Gp(z) = \frac{0.02434}{z - 0.9912} = \frac{b}{z + a} \quad (3)$$

$$G(s) = \frac{1}{2s + 1} \quad (4)$$

O equivalente discreto ZOH do modelo desejado, com o mesmo período de amostragem, tem a função de transferência mostrada na Equação 5.

$$Gm(z) = \frac{0.09516}{z - 0.9048} = \frac{bm}{z - am} \quad (5)$$

Método do Gradiente - Regra MIT

A regra MIT pode ser considerada como um método de gradiente para minimizar o erro quadrático, e^2 . Ou seja, é uma abordagem que possibilita o ajuste dos parâmetros do controlador, tal que a função custo da Equação 6 seja minimizada [3].

$$J(kT, \theta) = \frac{1}{2} e^2(kT, \theta) \quad (6)$$

Onde θ é vetor dos parâmetros de entrada e saída, mostrados na Equação 7.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{z^{-d}(b_0 + b_1 z^{-1} + b_{nB} z^{-nB})}{1 + a_1 z^{-1} + a_{nA} z^{-nA}} \quad (7)$$

$$\theta = (b_0, b_1, b_{nB}, a_1, a_{nA})$$

Nas Equações 8, 9, 10, 11 e 12 estão representadas, respectivamente, a equação de diferenças do modelo MIT, sua função de transferência, a equação de diferenças da planta, a ação de controle e o sistema em malha fechada.

$$y_m(k) = -a_m y(k-1) + b_m w(k-1) \quad (8)$$

$$\frac{Y_m(z)}{W(z)} = \frac{b_m z^{-1}}{1 + a_m z^{-1}} \quad (9)$$

$$y(k) = -a y(k-1) + b u(k-1) \quad (10)$$

$$u(k) = -f y(k) + g w(k) \quad (11)$$

$$y(k) = -a y(k-1) + b[-f y(k-1) + g w(k-1)] \quad (12)$$

Controlador RST

Para o método de alocação de polos com controle RST, especificou-se o modelo desejado de malha fechada dado pela Equação 4. Sendo a planta do tipo zero (sem integrador), para atender erro nulo em regime é necessário acrescentar um integrador ($i=1$). Para obter o grau do polinômio do observador A_o , utilizou-se a Inequação 13, onde $g(\cdot)$ indica o grau do polinômio. Como a planta não tem nenhum zero, $g(B^+) = 0$, portanto, definiu-se $g(A_o) = 1$. Para obter o grau de S e R_1' utilizou-se respectivamente, as Equações 14 e 15. [2]

$$g(A_o) \geq 2g(A) - g(A_m) - g(B^+) - 1 + i \quad (13)$$

$$g(S) = g(A) + i - 1 = 1 + 1 - 1 = 1 \quad (14)$$

$$g(R_1') = g(A_o) + g(A_m) - g(A) - i = 0 \quad (15)$$

Em seguida calcularam-se os coeficientes dos polinômios R , S e T de acordo com a equação característica de malha fechada mostrada na Equação 16.

$$AR_1'(z-1)^i + B^- S = Am A_o \quad (16)$$

$$(a_1 z + a_2) r_0 (z-1)^i + Kp(s_0 z + s_1) = (z + p_1)z$$

Resultados e Discussão:

Método do Gradiente - Regra MIT

Primeiramente verificou-se os resultados das simulações no MatLab [4] para o problema de rastreamento do sistema.

A Figura 2 mostra a resposta da planta em malha fechada e a do modelo desejado, quando submetidos a uma onda quadrada.

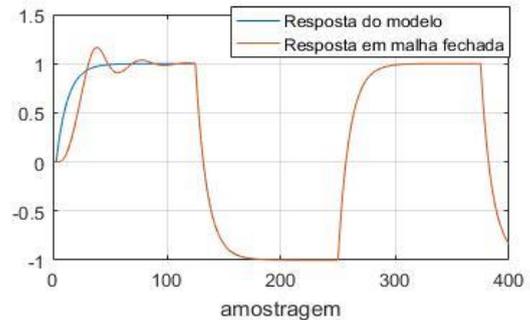


Figura 2: Resposta do Controle Adaptativo MIT [4]

Nota-se que o controlador leva aproximadamente 100 amostras para alcançar o modelo desejado, dessa forma o controlador está funcionando de forma adequada.

Na Figura 3, tem-se a resposta do sistema com uma variação paramétrica no ganho da planta, ocorrendo na metade do tempo total de simulação.

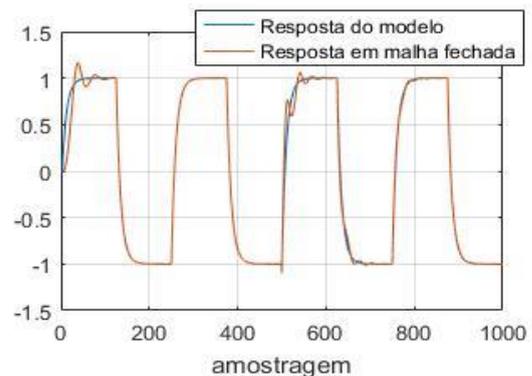


Figura 3: Resposta do Controle Adaptativo MIT variável [4]

Observa-se que mesmo com variações nos parâmetros, o controlador leva a planta a responder conforme o modelo desejado em poucas amostras.

Controlador RST

Os próximos resultados são referentes ao projeto do controlador RST Adaptativo utilizando identificação por mínimos quadrados recursivos (MQR).

A Figura 4 mostra a saída da planta em malha fechada (Y_p) quando submetida a uma entrada onda quadrada de amplitude unitária e período de 200 amostras.

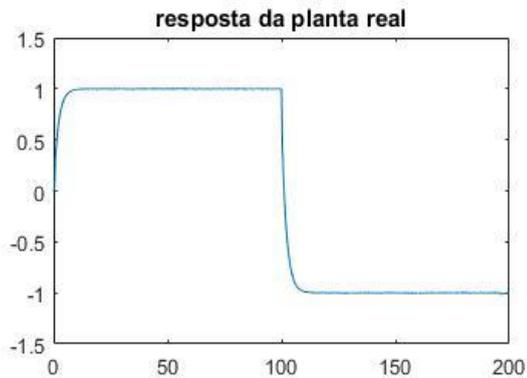


Figura 4. Resposta da planta real. [4]

A Figura 5 mostra a resposta do modelo idealizado quando submetido à mesma entrada. Pode-se notar que o modelo apresenta, praticamente, o mesmo comportamento da planta com controlador.

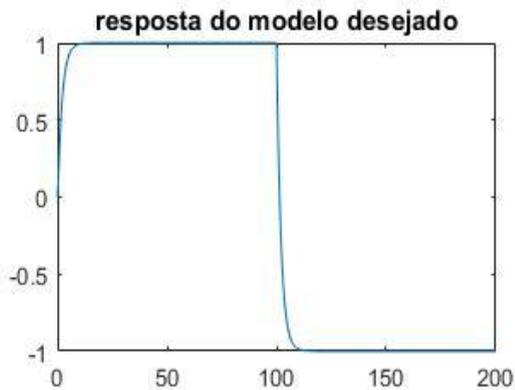


Figura 5. Resposta do modelo. [4]

A Figura 6 apresenta a resposta do modelo estimado (Y_{est}) pelo método dos MQR, quando submetidos à mesma entrada.



Figura 6. Resposta do modelo estimado. [4]

A Figura 7 mostra os coeficientes da função de transferência da planta obtidos pelo MQR

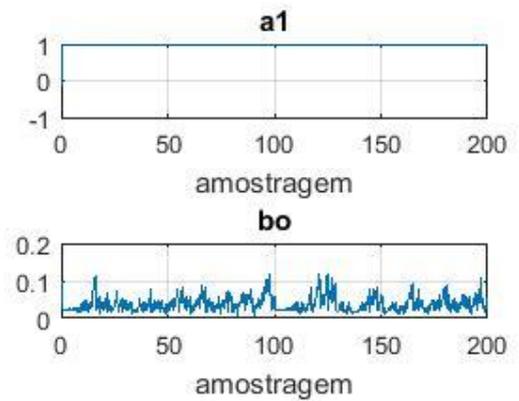


Figura 7. Coeficientes a_1 e b_0 obtidos pelo MQR. [4]

A Figura 8 representa a comparação entre a resposta da planta (Y_p) e do modelo estimado (Y_{est}) pelo MQR.

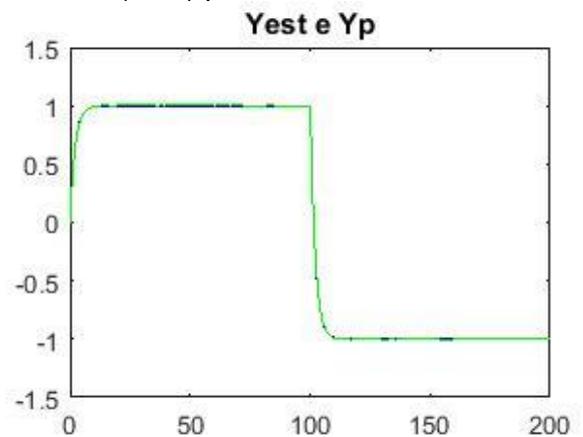


Figura 8. Comparação de Y_p e Y_{est} . [4]

Nota-se que as respostas do modelo estimado (Y_{est}) e da planta (Y_p) são praticamente iguais.

Na Figura 9, tem-se a resposta do sistema com uma variação paramétrica no ganho da planta, ocorrendo na metade do tempo total de simulação.

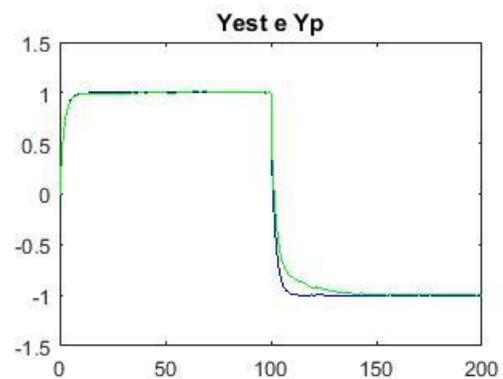


Figura 9: Resposta do Controle Adaptativo RST variável [4].

Assim observa-se que o controlador garante um ótimo desempenho, seguindo o modelo desejado em poucas amostras, mesmo com a variação paramétrica.

Ação de controle dos métodos utilizados

No método MIT, a ação de controle, para o caso de variação paramétrica do ganho na metade do tempo total de simulação, é mostrada na Figura 10.

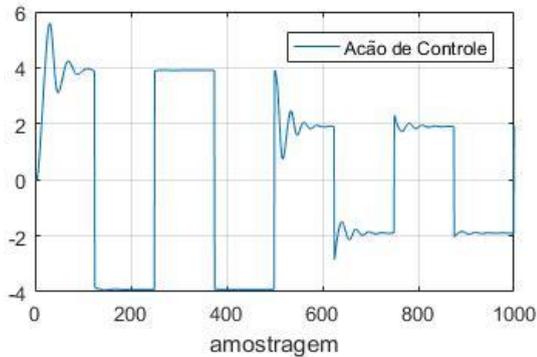


Figura 10: Ação de controle para o método MIT [4]

O resultado da ação de controle do método MIT seguiu o que se esperava e também sua amplitude tem um valor aceitável para ser aplicada a planta.

No método RST com MQR, a ação de controle é mostrada na Figura 11, para a variação paramétrica na metade do tempo total de simulação.

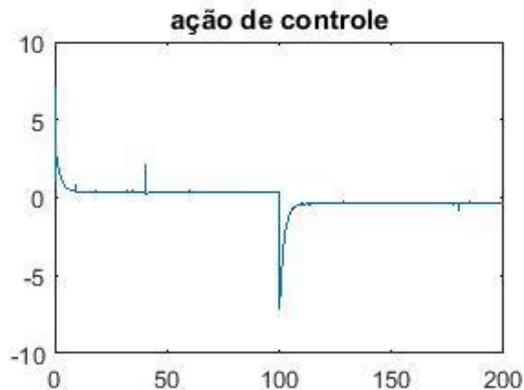


Figura 11: Ação de Controle RST [4].

Para o método RST, também foi possível obter uma ação de controle com amplitudes aceitáveis para aplicação na planta, mesmo quando foi feita uma variação no ganho, dessa forma comprovando o ótimo desempenho do controlador.

Conclusões:

Para os diferentes métodos de controle adaptativo foi possível obter bons resultados para o controle da planta de aquecimento de água, dessa forma validando os métodos utilizados neste trabalho: Regra MIT e RST, ambos para o rastreamento de um sinal de referência bem como na presença de uma variação paramétrica na planta.

Referências bibliográficas

- [1] Henz, Mateus Eduardo. (2013) **Controle de temperatura com compensação de tempo morto em aquecedores de água baseados em chama modulante**. UFRGS, Porto Alegre
- [2] Aström, K.J.; Wittenmark, B. (1990) **Computer Controlled Systems: Theory And Design**, Prentice-Hall International Editions.
- [3] Paraskevopoulos, P.N. **Digital Control Systems**. Ed. Prentice Hall, 1996.
- [4] **MathWorks Products and Services**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/>