

PROJETO DE UM CONTROLADOR ADAPTATIVO APLICADO À ESTAÇÃO MPS-PA DA FESTO NO SISTEMA DE PRESSÃO

PAULO C. SILVA, DANIEL S. MATOS, MARIANA S. M. CAVALCA, ADEMIR NIED

*Laboratório de Controle de Processos, Departamento de Engenharia Elétrica – DEE
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC*

CEP: 89.219-710, Joinville, SC, Brasil

*E-mails: paullo_cs@hotmail.com, matos.s.daniell@gmail.com, mariana.cavalca@udesc.br,
ademir.nied@udesc.br*

Abstract—This work focuses on the study of the pressure of the bench-PA Festo MPS process. The objective is to implement a strategy of adaptive control, in order to linearize a wider range of pressure excursion process, and this self-adjusting method is compared with a non-adaptive controller. To perform the identification of the online system and make the design of an adaptive controller possible, the strategy known as Recursive Least Squares (RLS) is implemented. The self-tuning control has been designed based on the method proposed by Lim and compared with non-adaptive strategy control that used the cancellation of the pole to meet the design specifications. The software used to drive and read the data from the pressure of the countertop process was Matlab/Simulink.

Keywords— Adaptive Control, Pressure Control, Matlab/Simulink, Recursive Least Squares (RLS).

Resumo— Este trabalho tem como foco o estudo do processo de pressão da bancada MPS-PA da Festo. O objetivo do trabalho é implementar uma estratégia de controle adaptativo, de modo a linearizar uma maior faixa de excursão do processo de pressão, sendo que este método auto-ajustável é comparado com um controlador não adaptativo. Para realizar a identificação do sistema *online* e tornar possível o projeto de um controlador adaptativo, a estratégia conhecida como Mínimos Quadrados Recursivos (MQR) é implementada. O controle auto-ajustável projetado foi baseado no método proposto por Lim e comparado com a estratégia de controle não adaptativa que utilizou o cancelamento do polo da planta para atender as especificações do projeto. O software usado para o acionamento e leitura dos dados do processo de pressão da bancada foi o Matlab/Simulink.

Palavras-chave— Controle Adaptativo, Controle de Pressão, Matlab/Simulink, Mínimos Quadrados Recursivos (MQR).

1 Introdução

A bancada “MPS-PA” da Festo oferece a possibilidade de trabalho com quatro sistemas muito comuns nos processos industriais como: o controle de nível de um reservatório, o controle de temperatura de um ambiente, a vazão de uma tubulação e a pressão exercida por um líquido. Esses sistemas podem ser manipulados individualmente ou serem trabalhados de uma forma conjunta, formando uma planta industrial complexa. A Figura 1 apresenta o objeto de estudo.



Figura 1. Estação Compacta MPS-PA (Helmich, 2008)

Este trabalho tem como foco o controle do sistema de pressão oferecido pela estação, o qual será controlado através do ambiente Simulink/Matlab. Para isto é necessário utilizar a OPC (*Object linking and embedding for Process Control*) Toolbox do Matlab, que viabiliza acionar as saídas e fazer aquisição de dados do processo. Esta ferramenta fornece conexão com os servidores OPC-DA (*Data Access*) e OPC-HDA (*Historical Data Access*) através de comunicação serial permitindo acesso ao histórico dos dados via Simulink. Através do OPC-DA é possível fazer a leitura dos sensores e aquisição de dados dos atuadores. Já o OPC-HDA permite o acesso do histórico dos dados.

A maioria das técnicas clássicas de controle de processos pressupõe o conhecimento prévio do processo a ser controlado. Contudo, em muitos casos práticos, a modelagem matemática do sistema é muito complexa, ou os parâmetros internos do processo são variantes com o tempo (Serralheiro, 2013). Além disto, tipicamente os processos físicos são de natureza não linear, de forma que as considerações utilizadas nos projetos em termos de desempenho e estabilidade são válidas apenas em torno do ponto de operação no qual o modelo do processo foi obtido. Conforme as variáveis do processo se afastam desta região de operação linear, há perda de desempenho da malha controlada e em alguns casos, pode-se levar o sistema de malha fechada a uma condição de instabilidade.

Tabela 1. Características do Sistema em Malha Aberta

i	Tensão [V]	Pressão (P _i) [bar]	ΔP _i [P _i - P _{i-1}]
1	6.0	0.096448	—
2	7.0	0.133948	0.037500
3	8.0	0.178186	0.044238
4	9.0	0.229944	0.051758

A resposta do processo para degraus de tensão na bomba deve ser identificada previamente de maneira que, como será mostrado posteriormente, o vetor de parâmetros estimados do MQR possa ser inicializado de maneira mais eficiente. Utilizando o *System Identification Tool* do Matlab e um período de amostragem de 50 milissegundos obteve-se o seguinte modelo para um degrau de tensão entre 6 e 7V:

$$G(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{0.028486z^{-1}}{1 - 0.5087z^{-1}} \quad (1)$$

onde: $Y(z^{-1})$ representa a saída medida (pressão dada em bar) e $U(z^{-1})$ representa a ação de controle (dada em Volts).

Observa-se que o modelo acima encontrado é válido apenas para uma faixa de tensão entre 6 e 7V, pois o processo não é linear. O modelo encontrado mostra que a resposta do processo é extremamente rápida, o que também pode ser verificado na Figura 4, pois a duração do transiente para cada degrau de tensão é de aproximadamente 400 milissegundos.

Observa-se que o modelo dado por (1), não apresenta polo em $z = 1$. Isto corresponde a um sistema que não possui um integrador, ou seja este sistema apresenta um erro estacionário, ou erro residual, na resposta a uma entrada degrau (Ogata, 1995). Devido a isto, os controladores implementados neste estudo têm uma ação integrativa além da proporcional, pois assim é possível anular o erro em regime permanente para as entradas do tipo degrau de tensão na bomba centrífuga.

3 Estratégias de Controle

Conforme observado anteriormente, o processo de pressão responde de forma não linear a uma variação linear de tensão na bomba. Desta forma, com o objetivo de se trabalhar com uma variação de tensão entre 6 – 9V de forma linear, a utilização de um controle adaptativo é justificada. O controlador utilizado é um PI e será baseado no método proposto por Lim (Lim, 1990). Tal método possui uma representação matemática que é obtida a partir de observações da resposta ao degrau. Desta forma o comportamento da mesma pode ser aproximado por uma função de transferência estimada de primeira ordem, que na forma discreta é representada por:

$$G_p(z^{-1}) = \frac{\hat{b}_0 z^{-1}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1}} \quad (2)$$

Analisando-se a Figura 4, nota-se que o comportamento da pressão pode ser aproximado por um sistema de primeira ordem e, portanto, o método de controle proposto por Lim pode ser utilizado neste caso. Na Figura 5 está representado o esquema de malha fechada adotado no sistema. A partir de um estimador de parâmetros, que no presente caso é o MQR, os parâmetros \hat{b}_0 e \hat{a}_1 serão estimados e os ganhos (K_1 e K_2) do controlador PI são atualizados *online* e de forma recursiva, ou seja, a cada período de amostragem. Com base no modelo matemático de (2), pode-se obter um controlador PI com alocação de polos, ou seja, o zero do controlador é alocado para cancelar o polo da planta.

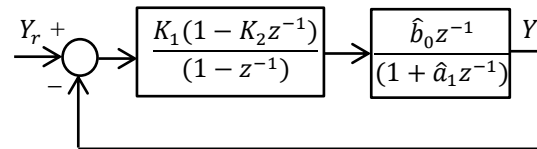


Figura 5. Malha Fechada

De acordo com a Figura 5, para haver o cancelamento de polo da planta, sintoniza-se:

$$K_2 = -\hat{a}_1 \quad (3)$$

Desta forma, aplicando a condição apresentada em (3), a função de transferência em malha fechada é dada por:

$$\frac{Y(z^{-1})}{Y_r(z^{-1})} = \frac{K_1 \hat{b}_0 z^{-1}}{1 + (K_1 \hat{b}_0 - 1)z^{-1}} \quad (4)$$

O parâmetro K_1 do controlador PI pode ser escrito em função do parâmetro \hat{b}_0 e de uma constante K_3 que determina a posição do polo desejado no processo de malha fechada:

$$K_1 = \frac{(1 - K_3)}{\hat{b}_0} \quad (5)$$

As Equações (3), (4) e (5) compõem o método de sintonia proposto por Lim e garantem um comportamento de primeira ordem imposto pelo valor de K_3 , sem erro de regime permanente. Tal comportamento apenas é válido se os parâmetros de (2) forem estimados corretamente.

O controlador PI com ganhos fixos segue a mesma metodologia descrita por (3), (4) e (5), porém os parâmetros \hat{a}_1 e \hat{b}_0 são fixos com base no modelo representado por (1). O valor de K_3 é o mesmo para ambos os projetos, assim como a faixa de excursão e o tempo de assentamento. Ressalta-se que, como o processo em estudo não é linear, o modelo descrito anteriormente apenas é válido na faixa de excursão na qual foi obtido. Portanto o desempenho do controlador diminui a medida que se afasta deste ponto,

pois aumenta o descasamento entre o controlador e a planta.

4 Mínimos quadrados recursivos (MQR)

Os parâmetros do controlador, conforme comentado anteriormente, foram estimados pela técnica dos Mínimos Quadrados Recursivos (MQR). O conceito principal do MQR foi desenvolvido por Karl Friedrich Gauss no século XVIII cujo intuito inicial era de estudar as órbitas de alguns objetos celestes. Gauss definiu o conceito dos mínimos quadrados afirmando que: “a soma dos quadrados das diferenças entre o valor observado e o calculado multiplicado por constantes que medem o grau de precisão é um mínimo” (Åström, 1995).

Considerando-se um modelo matemático descrito por:

$$y(k) = \varphi_1(k)\theta_1^0 + \varphi_2(k)\theta_2^0 + \dots + \varphi_n(k)\theta_n^0 \quad (6)$$

onde: $y(k)$ é a variável observada, $\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_n^0$ são os parâmetros do modelo a serem determinados e $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ são dados por funções conhecidas. Os resultados podem ser apresentados na forma vetorial:

$$\boldsymbol{\varphi}^T(k) = [\varphi_1(k) \quad \varphi_2(k) \quad \dots \quad \varphi_n(k)] \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\theta}(k) = [\theta_1^0 \quad \theta_2^0 \quad \dots \quad \theta_n^0]^T \quad (8)$$

O problema dos Mínimos Quadrados pode então ser entendido como o problema em determinar $\boldsymbol{\theta}(k)$ tal que o produto $\boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k)$ seja equivalente a saída observada $y(k)$. Portanto, $\boldsymbol{\theta}(k)$ deve ser determinado tal que a função custo dos Mínimos Quadrados seja minimizada, sendo esta função dada por:

$$J_{MQ}(\boldsymbol{\theta}, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (y(i) - \boldsymbol{\varphi}^T(i)\boldsymbol{\theta})^2 \quad (9)$$

$$J_{MQ}(\boldsymbol{\theta}, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k e^2(i) = \frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{E} \quad (10)$$

onde: $\boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k)$ é a saída estimada e $e(k)$ é o erro de estimação que compõe o vetor dos erros de estimação dado por:

$$\mathbf{E} = [e(1) \quad e(2) \quad \dots \quad e(k)]^T \quad (11)$$

$$= \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \boldsymbol{\Phi}\hat{\boldsymbol{\theta}}$$

Note que na Equação (11), quando a função custo for minimizada, o erro de estimação tenderá a zero e neste caso existirá um conjunto de parâmetros estimados $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ que garante:

$$\boldsymbol{\Phi}\hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{Y} \quad (12)$$

Pode-se então reescrever a Equação (12), para possibilitar a determinação dos parâmetros:

$$\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi} \hat{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{Y} \quad (13)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi})^{-1} \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{Y} = \mathbf{P} \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{Y} \quad (14)$$

onde \mathbf{P} é uma matriz não-singular e que relaciona a variância entre os parâmetros estimados, sendo denominada de Matriz de Covariância.

No resultado, mostrado na Equação (14), é necessário a utilização de um vetor $\boldsymbol{\Phi}$ com todos os elementos observados, o que inviabilizaria a sua utilização a cada período de amostragem, já que seria necessário um certo número de observações de $y(k)$ e $u(k)$ para a determinação de $\hat{\boldsymbol{\theta}}$. Além disso, seria preciso realizar a inversão matricial em tempo de execução, o que nem sempre é possível, pois em sistemas embarcados isto acarretaria em um alto custo computacional. Devido a tais inconvenientes, é necessário que se tenha um estimador que determine $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ sequencialmente em tempo real. Para isto é desejável que o algoritmo dos Mínimos Quadrados opere recursivamente.

Segundo Åström (Åström, 1995) o vetor de parâmetros estimados do processo pode ser escrito de forma recursiva utilizando algumas manipulações matemáticas e algumas propriedades de inversão de matrizes. Desta forma (14) pode ser reescrita como:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{L}(k)[y(k) - \hat{y}(k)] \quad (15)$$

onde: $\mathbf{L}(k)$ é conhecido como vetor de ganho de Kalman e é dado por:

$$\mathbf{L}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}{1 + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)} \quad (16)$$

A matriz de covariância $\mathbf{P}(k)$ é atualizada após o cálculo do ganho de Kalman e com o uso do vetor $\boldsymbol{\varphi}^T(k)$:

$$\mathbf{P}(k) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k))\mathbf{P}(k-1) \quad (17)$$

A Figura 6 mostra em blocos o sistema em malha fechada. Conforme citado anteriormente o controlador adaptativo foi feito de forma indireta. Nesta forma de controle o processo de realimentação pode ser dividido por duas malhas. Conforme pode ser visto na Figura 6, uma das malhas consiste em uma realimentação da saída do processo através do sensoramento. O que diferencia dos controladores estáticos é o acréscimo de uma malha externa formada pelo MQR que estima os parâmetros da planta e, a partir de tal estimação, ajusta o controlador de forma recursiva.

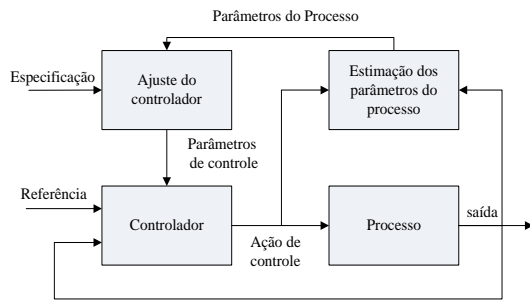


Figura 6. Método de controle indireto (Åström, 1995)

5 Projeto e implementação dos controladores

O projeto implementado consiste de um controlador PI adaptativo, onde os parâmetros do mesmo são estimados *online* com a utilização da técnica de Mínimos Quadrados Recursivos (MQR). A tensão na bomba centrífuga varia entre 6 – 9V, sendo que a pressão varia entre 0.090 – 0.21 bar. Cada degrau de tensão de 1V, corresponde portanto, a um incremento de 0.040 bar o qual será tomado como referência.

O tempo de estabilização, definido como o tempo que o sistema leva para entrar e permanecer na faixa de $\pm 2\%$ (Coelho e Coelho, 2004) do valor de referência, em malha aberta é algo em torno de 400 ms, conforme pode ser visualizado na Figura 1. Desse modo, foi definido como requisito de projeto um tempo de assentamento de 2.3 segundos para que a variação da pressão fique dentro de um valor tomado como tolerável. Esta especificação torna o sistema mais lento, pois é de interesse no projeto suavizar a elevação da pressão na tubulação do sistema, de modo a prevenir possíveis incidentes com a variação brusca da pressão na bancada ou no meio industrial onde a ideia deste projeto pode ser implementada.

Devido ao fato do controlador utilizado ser um PI adaptativo, espera-se de antemão que a saída do processo seguirá a referência imposta respeitando o tempo de assentamento estabelecido, linearizando assim a faixa de variação de tensão trabalhada.

Pode-se observar que os atuadores, estão abaixo dos valores limites de operação, pois a bomba pode trabalhar até 10V e a pressão pode atingir um valor de aproximadamente 0.25 bar.

O projeto do controlador é bastante simples, visto que o modelo do processo é de primeira ordem. De acordo com os requisitos de projeto a localização do polo do controlador que irá impor um tempo de assentamento de 2.3 segundos é dado por:

$$K_3 = 0.92 \quad (18)$$

O valor de K_3 encontrado garante que os requisitos de projeto serão atendidos seguindo o princípio da equivalência a certeza apresentado por Aguirre (Aguirre, 2000) e Hemerly (Hemerly, 2000). Desta forma a função de transferência de malha fechada será dada por:

$$\frac{Y(z^{-1})}{Y_r(z^{-1})} = \frac{0.08z^{-1}}{1 - 0.92z^{-1}} \quad (19)$$

6 Resultados

A Figura 7 mostra graficamente os resultados obtidos no processo de pressão com a inclusão do controlador adaptativo projetado. Os resultados mostram um erro nulo em regime permanente para as especificações dadas anteriormente, o que era previamente esperado, pois o controlador é um PI. Inicialmente a pressão é de 0.090 bar, e após o primeiro degrau de tensão, a mesma estabiliza em 0.13 bar. Após isto foram aplicados mais dois degraus de tensão, sendo os valores de 0.17 e 0.21 bar alcançados pela saída, observando-se a linearização do processo, pois a cada degrau de 1V na bomba, obteve-se o acréscimo de 0.040 bar na saída. O tempo de estabilização também ficou de acordo com o especificado, convergindo para o valor em regime em torno de 2.3 segundos.

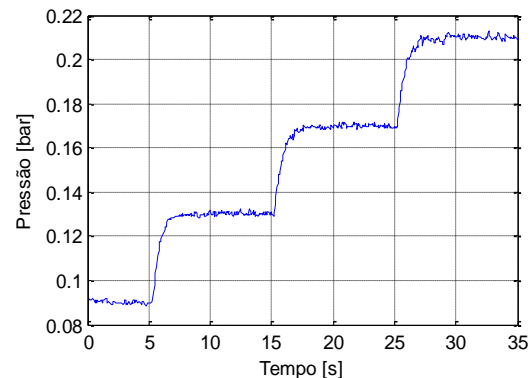


Figura 7. Saída do processo com o controlador adaptativo

A Figura 8 mostra a dinâmica dos parâmetros \hat{a}_1 e \hat{b}_0 estimados, adaptando-se a cada degrau aplicado na entrada do processo.

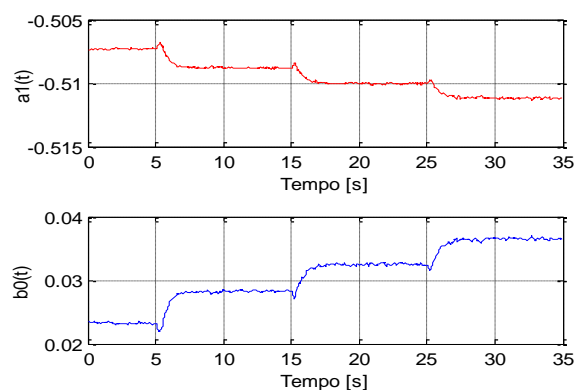


Figura 8. Parâmetros estimados pelo MQR sem perturbação

Pode-se observar na Figura 8 que os parâmetros estimados entre 5 e 15 segundos coincidem com os valores encontrados pelo *System Identification Tool* do Matlab, conforme o modelo apresentado em (1). Isto se deve ao fato de a bomba estar trabalhando na

mesma faixa de tensão na qual o modelo foi encontrado, mostrando assim a correta estimação *online* dos parâmetros pelo MQR. Na Figura 9 está representada a ação de controle dada em Volts.

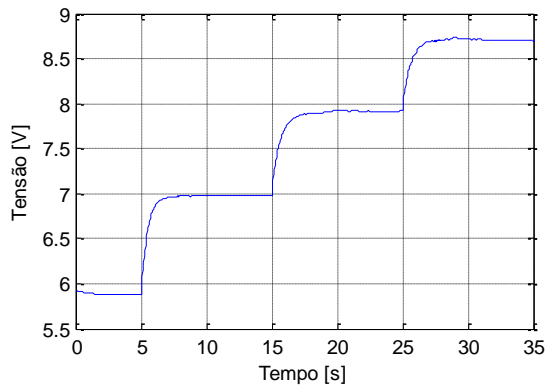


Figura 9. Ação de controle sem perturbação

Na Figura 10 é mostrada a variação da pressão do processo com o degrau de tensão na bomba. Fica evidente que o sistema rastreia a referência, que neste caso é dada por uma função de 1ª ordem com tempo de acomodação de 2.3 s.

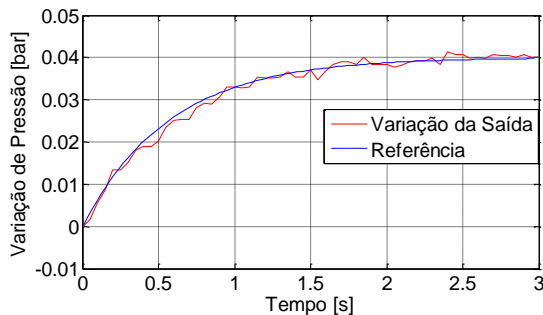


Figura 10. Referência e variação da pressão

Na Figura 11, é apresentado o erro entre a referência e a variação de saída do sistema com controle adaptativo, o qual apresenta valores bem reduzidos.

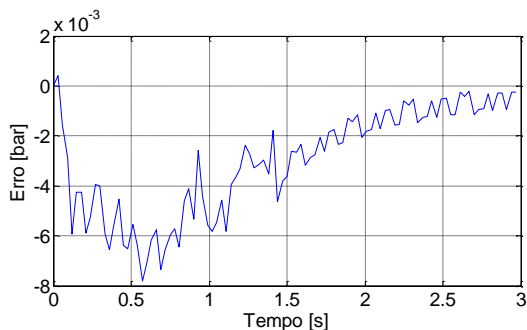


Figura 11. Erro entre a referência e a variação de pressão

A Figura 12 mostra a comparação entre o sinal medido e o sinal de saída estimado. Para realizar a estimação da saída foram utilizados os parâmetros fornecidos pelo MQR (\hat{a}_1 e \hat{b}_0), a saída ($y(k-1)$) e o sinal do controlador ($u(k-1)$). A Equação (20), descreve a relação utilizada:

$$y(k) = -\hat{a}_1 y(k-1) + \hat{b}_0 u(k-1) \quad (20)$$

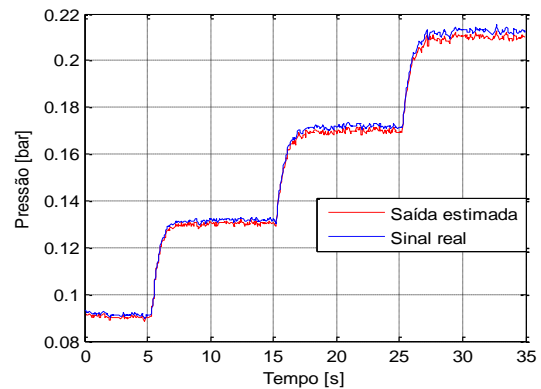


Figura 12. Sinais reais vs Estimado

Observa-se um pequeno erro residual entre os sinais. Na Figura 13 pode ser visto tal erro, dado em bar, ao longo do tempo.

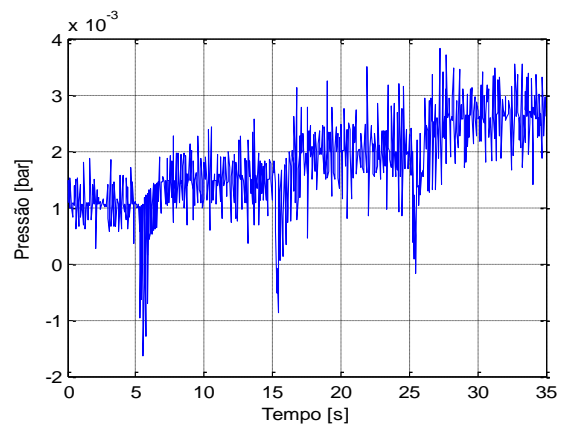


Figura 13. Erro de estimação

A resposta do PI não adaptativo pode ser visualizada na Figura 14 e a sua respectiva ação de controle na Figura 15. O valor da pressão convergiu para a referência imposta em toda a faixa de variação de tensão. Porém o tempo de assentamento, apenas está de acordo no primeiro degrau de tensão, convergindo para 0.13 bar em torno de 2.3 segundos. Isto se deve ao fato de o modelo dado por (1), ser referente a este ponto do sistema. No degrau de 7 para 8V, é possível observar um *overshoot* em relação ao valor de referência, e o valor de pressão em regime foi atingido em aproximadamente 1.8 s. Já no último degrau o valor final da pressão foi alcançado em 1.3 s, não respeitando desta forma a especificação do tempo de assentamento. Com o aumento do descasamento entre o modelo da planta e o controlador, observa-se um comportamento da bancada similar ao de malha aberta, pois a planta apresenta uma resposta mais rápida para uma mesma variação de tensão na entrada. Na Figura 15, percebe-se que o sinal enviado pelo controlador à bomba é mais brusco a cada degrau aplicado, acarretando um menor tempo para a convergência da saída.

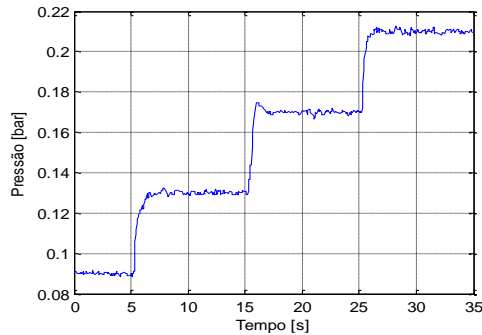


Figura 14. Saída do processo com o controlador não adaptativo

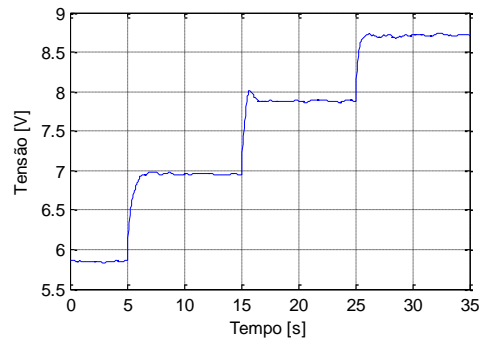


Figura 15. Ação de controle não adaptativo

Na Figura 16 é mostrada a variação da pressão do processo com o PI não adaptativo, após um degrau de tensão na bomba. É possível observar que o sistema não rastreia a referência. Na Figura 17, está o respectivo erro entre a referência e a variação de saída do sistema para o caso não adaptativo, que apresenta um valor bem acentuado em relação ao caso adaptativo apresentado anteriormente.

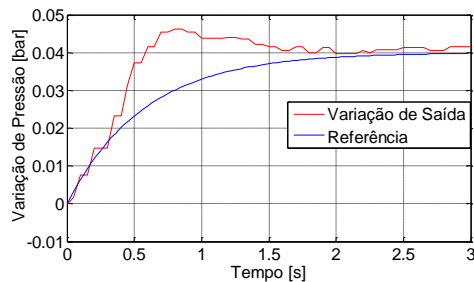


Figura 16. Referência e variação da pressão (PI fixo)

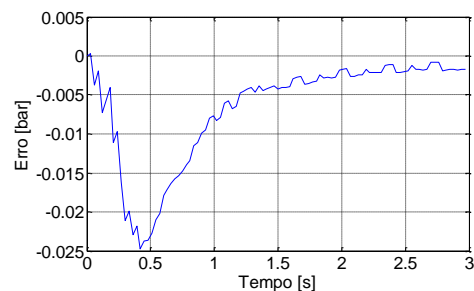


Figura 17. Erro entre a referência e a variação de pressão (PI fixo)

6.1 Resultados com Perturbação

Com o objetivo de avaliar a capacidade de adaptação dos controladores implementados diante

de uma perturbação no sistema, foi realizado um teste com o total fechamento da válvula V107. Após o fechamento da válvula, a mesma permaneceu neste estado até o fim da simulação.

O resultado para o controlador adaptativo é mostrado na Figura 18.

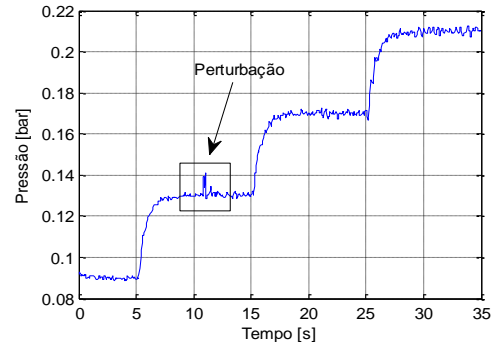


Figura 18. Saída do processo com perturbação

Observa-se que quando o fechamento da válvula é efetuado, há um aumento de pressão no sistema, pois não há fluxo de fluido no mesmo. Desta forma o controlador, conforme observado na Figura 19, identifica e faz a acomodação deste distúrbio, diminuindo a tensão enviada à bomba, fazendo assim a pressão atingir o valor de referência novamente. Não há mudança alguma (com relação ao resultado apresentado anteriormente) após a acomodação do distúrbio na resposta da planta, mesmo com a válvula mantida fechada.

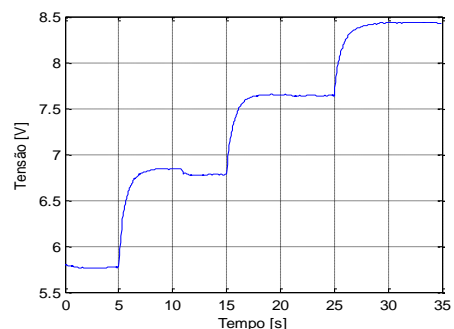


Figura 19. Ação de controle adaptativa com a perturbação

A Figura 20 ilustra uma pequena variação dos parâmetros estimados pelo MQR no momento da perturbação, de modo a se adaptar ao então novo modelo do sistema.

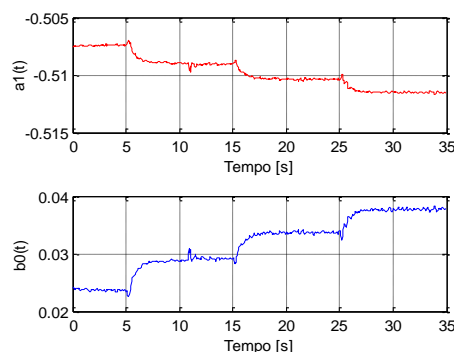


Figura 20. Parâmetros estimados pelo MQR com perturbação

Para o controlador não adaptativo o mesmo procedimento foi realizado e o resultado pode ser visto na Figura 21.

De maneira semelhante ao caso anterior, o controlador não adaptativo também conseguiu acomodar a perturbação realizada na válvula, diminuindo a tensão enviada à bomba centrífuga, conforme mostra a Figura 22. Porém os transientes nos degraus posteriores mudaram em relação ao caso em que não houve perturbação. Para o degrau dado de 7 para 8V, não houve *overshoot* e o valor de referência foi atingido em apenas 1s. Já para o último degrau, ocorreu um *overshoot* na saída e o valor final foi atingido de forma mais rápida, em 800 ms.

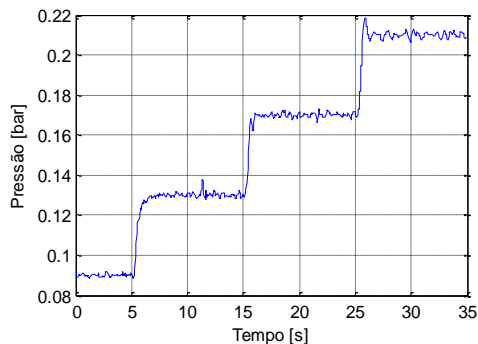


Figura 21. Saída do processo com o controlador não adaptativo com perturbação

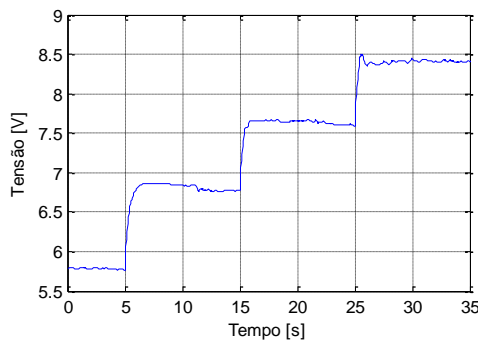


Figura 22. Ação de controle não adaptativa com perturbação

Fica evidente por meio deste teste realizado, a imprevisibilidade por parte do controlador não adaptativo e a sua inadequação para uso na faixa de trabalho considerada. Em contrapartida, o controlador com parâmetros estimados, mostrou-se capaz de acomodar uma perturbação no sistema e manter as características especificadas para o mesmo, mostrando-se desta forma eficaz e robusto para o projeto implementado.

7 Conclusão

Este trabalho apresentou um método de implementação de controle adaptativo com a estratégia PI sintonizada pela estratégia de Lim em conjunto com uma técnica de estimação de parâmetros. Foi realizada uma comparação entre a estrutura de Lim e um PI não adaptativo, a partir de um modelo encontrado para um ponto específico da planta. Conclui-se que o controlador adaptativo respondeu melhor a faixa de

excursão avaliada, pois o processo em estudo é não linear, de modo que um modelo fixo, não descreve corretamente o comportamento do sistema para toda a faixa de tensão trabalhada. Várias são as possibilidades de técnicas adaptativas que podem ser implantadas, porém como a planta da bancada se comporta aproximadamente como um sistema de primeira ordem, o método de controle de Lim atendeu de forma satisfatória às especificações de controle.

Para trabalhos futuros, é possível fazer o controle simultâneo de mais de um processo disponibilizado pela bancada didática, como um conjunto de pressão e vazão. Neste caso, espera-se uma maior evidência da robustez e eficácia do controle adaptativo, pois tratará de um sistema de maior complexidade.

Agradecimentos

Agradecemos a todos que colaboraram para a realização deste trabalho, ao Centro de Ciências Tecnológicas/CCT por disponibilizar o Laboratório de Controle de Processos, no qual foi realizado este estudo e a Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos do programa PROMOP.

Referências Bibliográficas

- Aguirre, L. A., (2000), Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais. Belo Horizonte, Ed. da UFMG.
- Åström, K. J.; Wittenmark, B., (1995), Adaptive control. 2 ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 574 p.
- Coelho, A. R.; Coelho, L. S., (2004), Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Florianópolis, Ed. UFSC.
- Helmich, J., (2008), Manual da Festo.
- Hemerly, E. M., (2000), Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos. São Paulo, Editora Blücher.
- Lim, C.M., June 1990, "Experimental Evaluation of a Self-Tuning Controller", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 37, no. 3.
- Ogata, K., (1995), Discrete-Time Control Systems. Upper Saddle River, Prentice-Hall.
- Serralheiro, W. A. O., 2013, "Um Controlador RST Adaptativo Digital com Identificação por Mínimos Quadrados Recursivo e Sintonia por Alocação de Polos", 1ª SEPEI.