



IDENTIFICAÇÃO EM MALHA FECHADA PARA UM CASO MONOVARIÁVEL

Bruna Racoski¹, Jorge Otávio Trierweiler¹

¹Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,
E-MAIL: {bruna, jorge}@enq.ufrgs.br

Palavras Chaves: Identificação de sistemas, malha fechada, estudo de caso.

Resumo: O principal objetivo deste trabalho é a aplicação dos métodos de identificação em malha fechada a um exemplo prático e, em segundo plano, a consolidação dos conhecimentos acerca dos métodos mais utilizados para identificação de sistemas a partir de dados de operação em malha fechada. Para tanto, foram escolhida três diferentes estruturas de modelos, ARX, Box Jenkins e Espaço de Estados e analisados os seus desempenhos frente aos diferentes métodos de identificação em malha fechada.

1 INTRODUÇÃO

A identificação de modelos a partir de dados de operação em malha fechada teve inicialmente como motivação questões de cunho prático - como o comportamento integrador da planta ou a instabilidade em malha aberta - econômico ou mesmo de segurança. Recentemente, a identificação em malha aberta recebeu um novo foco: a identificação para controle, o que resultou no desenvolvimento de novos algoritmos com características atrativas e uma série de vantagens práticas.

A teoria de identificação de sistemas apresentada na literatura (Ljung, 1999), tem como foco principal a identificação de sistemas sob condições de operação em malha aberta.

Este trabalho apresenta brevemente a teoria de identificação em malha fechada e em seguida a sua aplicação a um caso em particular: um sistema formado por três tanques esféricos ligados em série. A identificação do modelo do sistema é conduzida utilizando diferentes métodos e algoritmos, como ARX, Box Jenkins e Espaço de Estados.

2 IDENTIFICAÇÃO EM MALHA FECHADA

A identificação em malha fechada, em contraste com a identificação em malha aberta, é realizada a partir de dados de saída de um processo operando em malha fechada, num esquema como o ilustrado pela Figura 1. A diferença básica entre a identificação em malha fechada e a identificação em malha aberta padrão é, portanto, a origem dos dados e não os métodos utilizados. Essa diferença pode parecer sutil, mas ao passo que dados de malha fechada impõem limitações àquilo que pode ser feito, torna-se evidente os cuidados especiais requeridos na análise (Ljung e Forssell, 1997).

O problema fundamental dos dados de malha fechada é a correlação entre o ruído (ou distúrbio não medido) e a entrada. É claro que sempre que há presença de um controlador a o sinal de entrada da planta e o ruído estarão correlacionados. Esta é a razão pela qual vários métodos de identificação que apresentam bons resultados em malha aberta falham quando aplicados aos dados obtidos a partir do sistema operando em malha fechada.

A identificação em malha fechada tradicional está



baseada em dois métodos: direto e indireto. Recentemente, Aguero e Goodwin (2004) introduziram uma nova alternativa para a

identificação em malha fechada, utilizando um sistema em malha fechada virtual, o chamado *Virtual Closed Loop*.

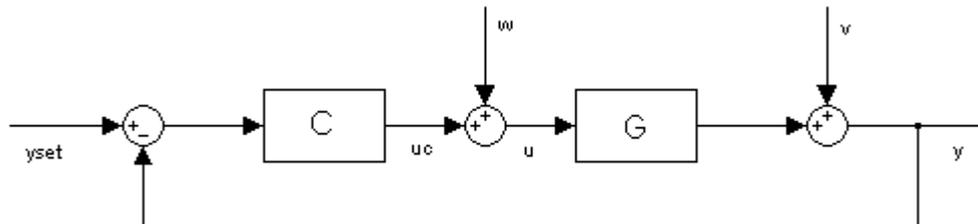


Figura 1: Representação do sistema em malha fechada.

2.1 Método direto

O método direto para identificação em malha fechada utiliza os sinais de entrada u e de saída y da planta por um algoritmo de identificação exatamente da mesma forma que a identificação em malha aberta, sem necessidade de manipulação dos dados. O conhecimento dos parâmetros do controlador e a natureza do feedback não são necessários. É importante no processo de identificação obter-se primeiramente um modelo de alta ordem para minimizar o bias e, posteriormente, este modelo pode sofrer uma redução de ordem.

2.2 Método indireto

O método clássico de identificação indireta para identificação em malha fechada é baseado na idéia de identificar primeiramente a função de transferência em malha fechada e, então, calcular o modelo da planta relacionado usando o conhecimento do controlador C na malha. Propriedades atrativas desse esquema de identificação são que o método não sofre com efeitos de bias devido ao ruído correlacionado com o sinal de entrada, pois o sinal de entrada para identificação (u) é tido como um sinal de referência externo. A parte crítica da identificação indireta é a construção do modelo da planta G (em malha aberta), num segundo momento, baseado no modelo em malha fechada estimado. Entretanto, se o modelo da planta resultante não é limitado na ordem do modelo esta construção pode ser realizada perfeitamente sendo o controlador conhecido e a função de transferência em malha fechada apropriadamente identificada. A identificação pelo método indireto é realizada como

se o sinal de referência (w), ou *set point* (y_{set}), fosse a entrada do processo, em conjunto com o sinal de saída (y).

Para evitar a utilização dos parâmetros do controlador propõem-se métodos alternativos para a identificação indireta: *Two Step Approach*. Esse método não necessita do conhecimento do controlador e cria sinais auxiliares como passo intermediário. Mantendo o $y_{set} = 0$, num primeiro momento, se obtém uma estimativa da função de sensibilidade $S = 1/(1+CG)$, fazendo a identificação entre o sinal w (distúrbio na carga) e o sinal de entrada da planta u . Assim, um sinal $w_f = Sw$ é gerado pela filtração do sinal w pela função de sensibilidade S . A saída da planta pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} y &= \frac{G}{1+CG} w + \frac{G}{1+CG} v = GSw + Sv \\ &= G(Sw) + Sv = Gw_f + Sv \end{aligned} \quad (1)$$

Da Equação (1) pode-se concluir que o modelo da planta pode ser identificado pela relação y e w_f . Esse procedimento é conhecido como filtro- w (Van Den Hof, Schrama et al., 1992). Huang e Shah (1997) propuseram o filtro- y , onde a saída (y) é filtrada pelo inverso da função de sensibilidade S :

$$\begin{aligned} y &= \frac{G}{1+CG} w + \frac{G}{1+CG} v = GSw + Sv \rightarrow S^{-1}y \\ &= Gw + v = Gw + v \rightarrow y_f = Pw + v \end{aligned} \quad (2)$$

O segundo passo do filtro- y , então, baseia-se na identificação entre y_f e w para produzir a estimativa



do modelo da planta G .

2.3 Virtual Closed Loop

Segundo Goodwin (2007), o método *Virtual Closed Loop* (VLC) combina em uma só ferramenta as melhores características da identificação direta e indireta em malha fechada. O VLC considera um controlador hipotético linear $\bar{C} = \frac{G}{P}$ que estabiliza o sistema, sem haver relação alguma entre \bar{C} e o controlador real. O controlador virtual é introduzido e subtraído da planta de forma que não haja modificações na malha real. Sendo essas operações realizadas *off line* e os dados utilizados para identificação gerados pela verdadeira malha. Essa idéia é conhecida e utilizada com MPC para evitar problemas numéricos de processos instáveis.

3 ESTUDO DE CASO

Para analisar e comparar os métodos apresentados para identificação em malha fechada são empregados dados de simulação, no ambiente do Simulink[®] 6.3, de um sistema formado por três tanques esféricos ligados em série, baseado na modelagem fenomenológica do processo, considerando um balanço material sobre cada tanque, conforme as equações (3), (4) e (5).

$$\frac{d}{dt}V_i = F_{i-1} - F_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Onde V_i é o volume do tanque i , definido pela equação (4) e F_i é a vazão de descarga do tanque i , dependente do nível líquido, considerando fluxo turbulento, segundo a equação (5).

$$V_i = \frac{\pi}{3} h_i^2 \left(\frac{3}{2} D_i - h_i \right) \quad (4)$$

$$F_i = CD_i - \sqrt{h_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

O diâmetro (D_i) e o coeficiente de descarga (CD_i) possuem diferentes valores para cada tanque. O primeiro tanque é alimentado a certa vazão, utilizada como variável manipulada, ao passo que a variável controlada fica sendo o nível do terceiro tanque, conforme mostra a Figura 2.

Para as primeiras avaliações o sistema foi simulado sem conter distúrbios não medidos ou ruídos de medição.

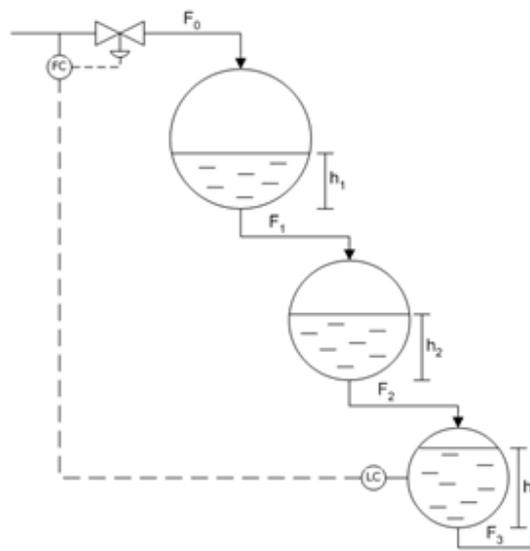


Figura 2: Esquema da planta de três tanques.

4 RESULTADOS

Em primeira análise, podemos comparar os diferentes métodos de identificação em malha fechada, o método direto – utilizando para identificação o sinal de entrada u e o sinal de saída y , o método indireto com a filtragem do distúrbio w – utilizando o sinal filtrado w_f e o sinal de saída y , e o método indireto com a filtragem do sinal de saída da planta y – sendo que a identificação, nesse caso é feita com o sinal filtrado y_f e o distúrbio w . A Figura 3 mostra os resultados da resposta ao degrau dos modelos identificados em comparação com o modelo não linear da planta simulada. Observa-se com clareza, que os métodos utilizados apresentam resultados muito bons para o caso aplicado, à exceção da identificação via filtragem de y . O diagrama de Bode dos modelos identificados para o sistema é apresentado na Figura 4, onde a discrepância de fase em altas frequências é percebida.

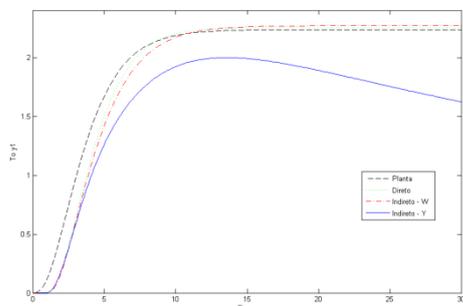


Figura 3: Comparação entre os métodos de identificação em malha fechada – resposta ao degrau.

As estruturas de melhor ajuste aos dados de validação dos modelos identificados são diferentes, o modelo identificado pelo método direto tem estrutura ARX, enquanto ambos os modelos identificados pelo método indireto são Box Jenkins. O ajuste do modelo ARX da identificação direta é de 88,83%, e dos modelos BJ são, respectivamente 88,27% e 87,63%, para a filtragem w e filtragem y . O método direto apresentou os melhores resultados, sendo que os melhores modelos de cada estrutura tem o ajuste próximo, como pode ser verificado nas Figura 5. As Figuras 6 e 7 mostram o ajuste aos dados de validação para os modelos identificados pelos métodos indiretos.

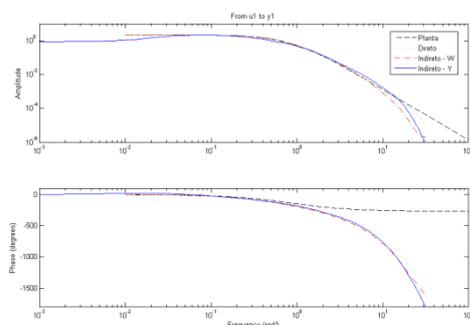


Figura 4: Diagrama de Bode dos modelos identificados por diferentes métodos.

5 CONCLUSÃO

A natureza do processo e do controlador, as suposições e negligências da aproximação empregados determinam a escolha do método de identificação a ser utilizado. Para o sistema simulado, sem distúrbios não medidos, os resultados comprovam que modelos satisfatórios, compatíveis com o seu objetivo final e forma de uso – identificação para controle, podem ser

identificados sob condições de operação em malha fechada, desde que pré-filtros apropriados sejam escolhidos para o tratamento dos dados. Tanto o método direto quanto os métodos indiretos apresentaram bons resultados, com algumas ressalvas.

Além disso, como propostas para trabalhos futuros estão a aplicação dos métodos de identificação em malha fechada a sistemas multivariáveis, além da avaliação do método de *Virtual Closed Loop* com propostas de metodologia para a escolha de modelos para o controlador virtual, baseados em dados reais de operação em malha fechada.

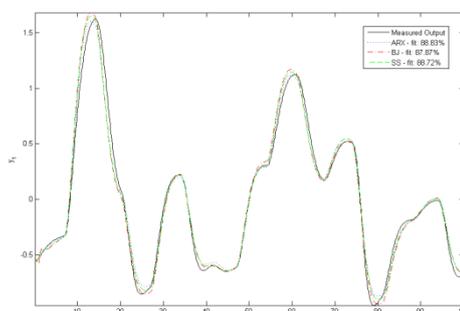


Figura 5: Ajuste aos dados de validação - Método direto

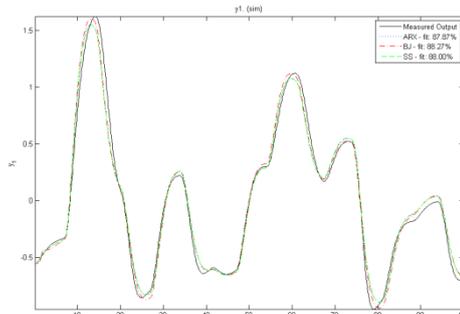


Figura 6: Ajuste aos dados de validação - Método indireto filtro w

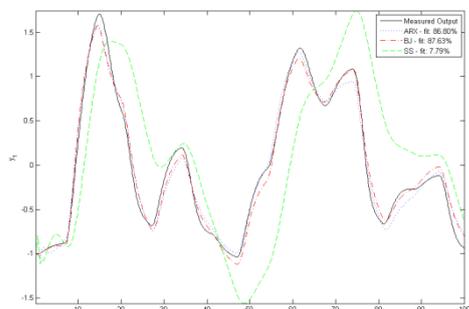


Figura 7: Ajuste aos dados de validação - Método indireto filtro y

6 BIBLIOGRAFIA

Aguero, J. C. e G. C. Goodwin. Virtual closed loop identification: a subspace approach. Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on, 2004. 364-369 Vol.1 p.

Forsell, U. e L. Ljung. Closed-loop identification revisited. Automatica, v.35, n.7, p.1215-1241. 1999.

Goodwin, G. C., Agüero, J.C., et al. Robust identification of process models from plant data. Proceedings of 8th International IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems. Preprints Vol.2, June 6-8, Cancún, Mexico, 2007.

Huang, B. e S. L. Shah. Closed-loop identification: a two step approach. Journal of Process Control, v.7, n.6, p.425-438. 1997.

Ljung, L. System Identification: Theory for the User, second ed., Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, NJ, 1999.

Van Den Hof, P. M. J., R. J. P. Schrama, et al. An indirect method for transfer function estimation from closed loop data. Decision and Control, 1992., Proceedings of the 31st IEEE Conference on, 1992. 1702-1706 vol.2 p.