

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

IDENTIFICAÇÃO DA ZONA-MORTA INERENTE AOS ATUADORES DOS PROCESSOS INDUSTRIAIS PETROLÍFEROS

AUTORES:

Auciomar C. T. de Cerqueira, Daniel G. V. da Fonseca,
Fábio M. U. de Araújo, André L. Maitelli

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

IDENTIFICAÇÃO DA ZONA-MORTA INERENTE AOS ATUADORES DOS PROCESSOS INDUSTRIAIS PETROLÍFEROS

Abstract

Great part of the oscillations in industrial process control loops is due by nonlinearities of actuators. Dead-zone, hysteresis and backlash are the ones most known. Therefore, the parameter identification of these nonlinearities could help to improve performance of many industrial controllers. So, the goal of this work is to recursively identify the nonlinearity inherent to actuator of an industrial process. A simulation of a level system was used as test platform. The system is composed by a valve, which contains dead-zone (nonlinearity), and a reservoir, and it is represented by a Hammerstein model. Recursive least square with forgetting factor estimation method will be used and the unique signals available for estimation are the valve opening command (MV) and the system response (PV). In a future work, once the parameters of the dead-zone are known, the oscillations can be prevented.

Introdução

Dentro de uma planta industrial podem existir centenas de malhas de controle. Portanto, a eficácia do controle é muito importante para assegurar um produto com alta qualidade e baixo custo de produção. Dessa forma, encontrar e resolver os problemas das malhas de controle de uma planta pode implicar em redução de resíduos, em uma maior homogeneidade do produto, em diminuição nos custos operacionais e aumento da taxa de produção. Até mesmo uma melhora de 1% em eficácia de energia pode representar uma grande economia em processos industriais na ordem de milhões de dólares (Desborough & Miller, 2002).

Grande parte das pesquisas relacionadas ao desempenho das malhas de controle indica que a maioria apresenta comportamento deficiente, o qual pode ser verificado pelas oscilações na saída do processo. A presença de oscilações em uma malha de controle aumenta a variabilidade das saídas do processo, causando qualidade inferior dos produtos, taxas de rejeição elevadas, aumento do consumo de energia, redução do desempenho médio e rentabilidade (Choudhury; Thornhill; Shah, 2005). E cerca de 20% a 30% dessas oscilações são ocasionadas pelas não-linearidades dos atuadores, dentre as quais estão a histerese, a folga e a zona-morta como as mais conhecidas (Ulaganathan & Rengaswamy, 2008).

O objetivo deste trabalho é o de identificar recursivamente os parâmetros da não-linearidade do atuador de um processo industrial, a fim de que possam ser usados futuramente num método para amenizar os efeitos das oscilações na saída do sistema. Todo o processo foi representado por um modelo de Hammerstein. O atuador aqui estudado é uma válvula de controle de fluxo, a qual possui uma não-linearidade do tipo zona-morta associada. O processo industrial linear é representado por um tanque de nível.

Primeiro serão introduzidos o conceito e a representação matemática da zona-morta utilizada na identificação. Na seção seguinte é mostrada a metodologia para estimação recursiva dos parâmetros da zona-morta. Em seguida está descrita a planta de testes usada para a estimação dos parâmetros. Por último são mostrados os resultados de estimação e as conclusões do trabalho, respectivamente.

Zona-Morta

A zona-morta é uma não-linearidade estática que descreve a insensibilidade da saída de componentes para pequenos sinais de entrada. Ela pode ser vista como uma relação estática entre entrada e saída, em que para uma faixa de valores de entrada não há saída. Uma vez que a saída aparece, a relação entre a entrada e a saída é linear.

O modelo matemático da zona-morta utilizado neste artigo é baseado em Tao & Kokotovic (1996) e é descrito através da Equação (1):

$$x(k) = X_r(k)m_r[u(k) - b_r] + X_l(k)m_l[u(k) - b_l] \quad (1)$$

onde $X_r(k)$ e $X_l(k)$ são funções auxiliares que assumem o valor 0 (zero) ou 1 (um), de acordo com as equações (2) e (3), respectivamente.

$$X_r(k) = \begin{cases} 1, & \text{se } u(k) \geq b_r \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

$$X_l(k) = \begin{cases} 1, & \text{se } u(k) \leq b_l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

Os *break-points* b_r e b_l representam a faixa onde o sinal de saída permanece inalterado, e m_r e m_l indicam as inclinações das retas, como visto na figura 1. Por definição, $b_r \geq 0$, $b_l \leq 0$, $m_r > 0$ e $m_l > 0$ e, de uma maneira geral, nem os *break-points* nem as inclinações são necessariamente iguais. Na Figura 1 é mostrada uma representação gráfica da zona-morta, onde $u(k)$ é a entrada e $x(k)$ é a saída.

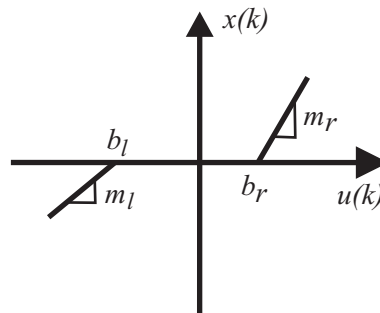


Figura 1: Esquema gráfico da zona-morta.

Metodologia para Identificação da Zona-Morta

Existem diversos métodos de estimação de parâmetros para processos lineares e não-lineares: mínimos quadrados, filtros de Kalman, Levenberg-Marquardt, Gauss-Newton. O método escolhido foi o método dos mínimos quadrados recursivo com fator de esquecimento, devido a sua vasta aplicação na identificação de sistemas e pela sua simplicidade, comparado a outros métodos de estimação. Além do mais, a estimação recursiva é importante não apenas porque pode ser computada em tempo real, mas também pelo fato de poder ser combinada com estratégias de controle *on-line* para produzir algoritmos de controle adaptativos.

A metodologia aqui desenvolvida foi baseada em Vörös (2006) e leva em consideração a representação por diagrama de blocos de um sistema. O autor propôs um método de identificação recursivo dos modelos de Hammerstein com não-linearidades polinomiais. O modelo de Hammerstein

é caracterizado por uma conexão em cascata entre o bloco da função estática não-linear, bloco “NL”, e o bloco da dinâmica linear do sistema, bloco “L” (Aguirre, 2007). A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos do modelo de Hammerstein.

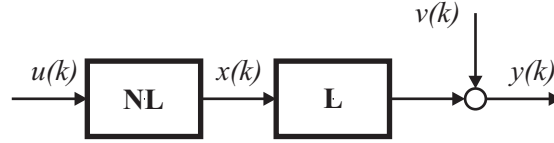


Figura 2: Modelo de Hammerstein.

Considere, portanto, como função não-linear do modelo de Hammerstein a Equação (1) da zona morta, e como dinâmica linear o modelo ARX (Auto Regressivo com entrada eXterna) representado conforme a Equação (4):

$$y(k) = q^{-d} B(q^{-1})x(k) - [A(q^{-1}) - 1]y(k) + v(k) \quad (4)$$

onde $-d$ representa o atraso puro do sistema, $x(k)$, $y(k)$ e $v(k)$ são a entrada, a saída e o ruído, respectivamente. $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ são polinômios em função do operador de deslocamento q^{-1} , e estão definidos a seguir.

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n} \quad (5)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m} \quad (6)$$

Pode-se reescrever a Equação (4) introduzindo o deslocamento nos sinais de entrada e saída, obtendo-se:

$$y(k) = \sum_{i=0}^m b_i x(k-d-i) - \sum_{j=1}^n a_j y(k-j) + v(k) \quad (7)$$

Substituindo a Equação (1) da zona morta na Equação (7) da dinâmica linear, tem-se a Equação (8), a qual descreve o comportamento total do sistema tanto com suas características lineares quanto as não-lineares.

$$y(k) = \sum_{i=0}^m b_i \{ X_r(k-d-i) m_r [v(k-d-i) - b_r] + X_l(k-d-i) m_l [v(k-d-i) - b_l] \} - \sum_{j=1}^n a_j y(k-j) + v(k) \quad (8)$$

Observe que se houver a multiplicação dos coeficientes do polinômio $B(q^{-1})$ pelo termo entre chaves teremos uma quantidade de parâmetros igual a $n+4(m+1)$ para ser estimada, além de os mesmos estarem combinados entre si ($b_i m_r$ e $b_i m_r b_r$, por exemplo). Para evitar esta grande quantidade de parâmetros, usou-se o “princípio da separação do termo chave”, proposto por Vörös (1995). Nesta nova formulação, a variável interna $b_0 x(k-d)$ é o termo separado dos demais, o que gerou a seguinte Equação, com número de parâmetros igual a $n+m+4$:

$$y(k) = b_0 \{ X_r(k-d) m_r [v(k-d) - b_r] + X_l(k-d) m_l [v(k-d) - b_l] \} + \sum_{i=1}^m b_i x(k-d-i) - \sum_{j=1}^n a_j y(k-j) + v(k) \quad (9)$$

O método utilizado para estimação dos parâmetros foi o método dos mínimos quadrados recursivo com fator de esquecimento, e as equações que o regem estão logo abaixo (Coelho 2004):

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k+1) \left[y(k+1) - \varphi^T(k+1) \hat{\theta}(k) \right] \quad (10)$$

$$K(k+1) = \frac{P(k) \varphi(k+1)}{\lambda + \varphi^T(k+1) P(k) \varphi(k+1)} \quad (11)$$

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} \left[P(k) - \frac{P(k) \varphi(k+1) \varphi^T(k+1) P(k)}{\lambda + \varphi^T(k+1) P(k) \varphi(k+1)} \right] \quad (12)$$

onde λ é o fator de esquecimento, $\hat{\theta}$ é vetor de parâmetros estimados, K é o ganho do estimador calculado a partir da matriz de covariância P e φ é o vetor de regressores. A partir da Equação (9), pode-se definir respectivamente o vetor de regressores e o vetor de parâmetros como:

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), X_r(k-d)v(k-d), -X_r(k-d), \\ X_l(k-d)v(k-d), -X_l(k-d), x(k-d-1), \dots, x(k-d-m)] \quad (13)$$

$$\theta^T = [a_1, \dots, a_n, b_0 m_r, b_0 m_r b_r, b_0 m_l, b_0 m_l b_l, b_1, \dots, b_m] \quad (14)$$

Os componentes $x(k-d-1) \dots x(k-d-m)$ do vetor de regressores não podem ser medidos diretamente (problema da variável interna do modelo de Hammerstein). Serão usadas estimativas dos seus valores calculadas a partir dos parâmetros do passo anterior da estimação recursiva. Em outras palavras, os valores estimados dos parâmetros da zona-morta serão usados na Equação (1) para construção de tais regressores. Como obter os valores estimados de m_r , b_r , m_l e b_l separadamente será explicado mais à frente.

Apesar de existir uma multiplicação de b_0 pelos parâmetros da zona morta (como em $b_0 m_r$), caracterizando uma não-linearidade, foi utilizado um método de estimação linear. Para isso, foi construído o modelo generalizado de Hammerstein através de uma re-parametrização, de forma que se torne linear nos parâmetros (Nelles, 2001). Assim, $b_0 m_r$, $b_0 m_r b_r$, $b_0 m_l$ e $b_0 m_l b_l$ serão chamados de θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 respectivamente. O novo vetor de parâmetros linear é, portanto:

$$\theta^T = [a_1, \dots, a_n, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, b_1, \dots, b_m] \quad (15)$$

Desse modo, os parâmetros da zona morta serão estimados em conjunto com b_0 . Para se obter seus valores separados, se faz necessário conhecer o parâmetro b_0 e, para isso, foi admitido conhecido o ganho da planta. Segundo Nelles (2001):

$$\frac{\sum_{i=0}^m b_i}{1 + \sum_{j=1}^n a_j} = K_p \quad (16)$$

onde K_p é o ganho da planta. Logo, tem-se que b_0 vale:

$$b_0 = -\sum_{i=1}^m b_i + K_p \left(1 + \sum_{j=1}^n a_j \right) \quad (17)$$

Por fim, conhecendo-se o valor de b_0 , basta realizar as seguintes divisões para que a zona-morta seja identificada. São esses parâmetros que serão utilizados para a estimação dos regressores $x(k-d-1) \dots x(k-d-m)$.

$$\begin{aligned} m_r &= \theta_1 / b_0 \\ b_r &= \theta_2 / b_0 m_r \\ m_l &= \theta_3 / b_0 \\ b_l &= \theta_4 / b_0 m_l \end{aligned} \quad (18)$$

Plataforma de Testes – Simulação de um Sistema de Nível

Como plataforma de testes para a metodologia desenvolvida foi utilizado um sistema de nível composto por uma válvula de controle de fluxo, a qual possui uma zona-morta associada, e um tanque de armazenamento. O sistema apresenta como entrada uma vazão q_{in} controlada pela válvula e, como saída, uma vazão q_{out} dependente da altura do tanque. Um esquema gráfico do sistema de nível pode ser visto na Figura 3:

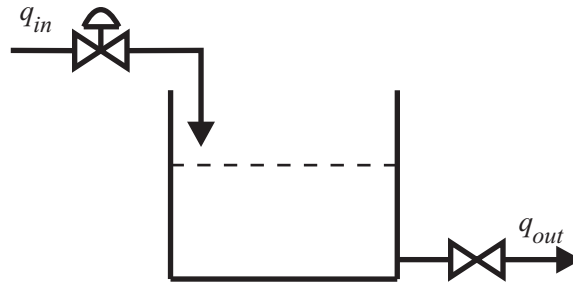


Figura 3: Esquema gráfico do sistema de nível.

O sistema também pode ser representado na forma de diagrama de blocos, conforme visto na Figura 4:

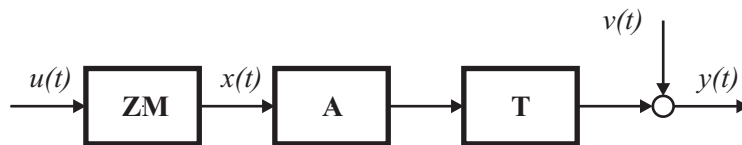


Figura 4 Diagrama de blocos do sistema de nível.

onde o bloco “ZM” representa o modelo da zona-morta inerente à válvula descrito anteriormente, “A” é a dinâmica linear da mesma válvula e “T” é o bloco representando a dinâmica do tanque.

Todo o sistema de nível pode ser representado por um modelo de Hammerstein. Logo, a zona-morta representa a não-linearidade estática e as dinâmicas lineares do atuador e do tanque representam a parte linear do modelo.

A válvula foi modelada de acordo com Borges Filho et al (2005) e apresenta função de transferência igual a $G_v(s)$.

$$G_v(s) = \frac{1}{5s + 1} \quad (19)$$

O tanque foi modelado de acordo com as equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico de sua altura (Ogata, 1982) e tem como função de transferência $G_t(s)$.

$$G_t(s) = \frac{1}{20s + 1} \quad (20)$$

A função de transferência $G(s)$ que caracteriza a dinâmica linear do sistema total é:

$$G(s) = G_v(s) \cdot G_t(s) = \frac{1}{5s + 1} \cdot \frac{2}{20s + 1} = \frac{2}{100s^2 + 25s + 1} \quad (21)$$

Vale ressaltar que o método de identificação apresentado anteriormente utiliza equações de um modelo discreto no tempo. Isso retrata a realidade, em que processos reais contínuos no tempo são controlados por computadores com uma amostragem dos valores das variáveis de processo por meio de sensores. Logo, a dinâmica linear e contínua acima descrita, será vista como o modelo discreto a seguir:

$$G(z) = \frac{b_0 z + b_1}{z^2 + a_1 z + a_2} = \frac{0,03398z + 0,02877}{z^2 - 1,575z + 0,6065} \quad (22)$$

O tempo de discretização t_d foi escolhido como um décimo (1/10) da constante de tempo do pólo dominante ($t_d = 2s$).

Resultados

Considerando a planta teste apresentada, montou-se uma simulação com o objetivo de realizar a identificação do atuador não-linear. A zona-morta presente no atuador do processo, para fins de testes, possui os seguintes parâmetros: $m_r = 1$, $b_r = 2$, $m_l = 1$ e $b_l = -2$. Todos esses parâmetros serão considerados desconhecidos.

Como sinal de excitação para estimação utilizou-se um PRS (*Pseudo-Random Signal*), com uma faixa de valores entre -5 e 5. Cada valor escolhido aleatoriamente permanece inalterado durante 5 a 10 constantes de tempo. O ruído branco foi configurado de forma que seus valores máximos fossem 1% do valor de pico do sinal PRS. O fator de esquecimento foi de $\lambda = 0,99$ até os 500 primeiros segundos. Após este intervalo, o fator foi alterado para $\lambda = 1$. O tempo total da simulação foi de 5000 segundos.

A Figura 5 mostra o resultado da estimação para os parâmetros da zona-morta. Observe que por volta de 1000 segundos (500 períodos de amostragem) praticamente todos os parâmetros já foram estimados corretamente. O valor de cada parâmetro ao fim da estimação foi: $m_r = 1,0389$, $b_r = 2,0086$, $m_l = 1,0355$ e $b_l = -2,0144$. Os parâmetros reais são: $m_r = 1$, $b_r = 2$, $m_l = 1$ e $b_l = -2$.

Os parâmetros da dinâmica linear do sistema de nível também foram estimados. Ao fim do tempo de simulação, o resultado da estimação dos parâmetros do processo discretizado foi: $a_1 = -1,5321$, $a_2 = 0,5649$, $b_0 = 0,0396$ e $b_1 = 0,0256$. Os parâmetros reais são: $a_1 = -1,575$, $a_2 = 0,6065$, $b_0 = 0,03398$ e $b_1 = 0,02877$.

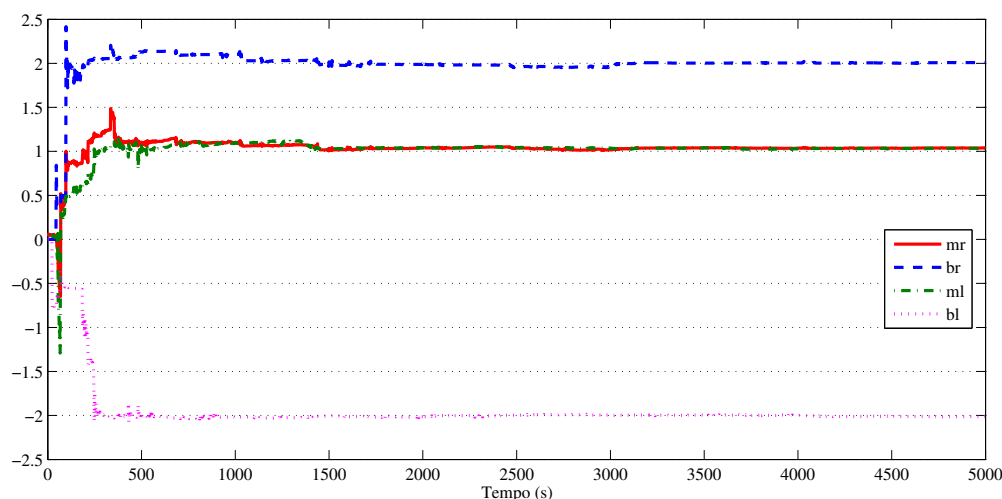


Figura 5: Estimação dos parâmetros da zona-morta.

Conclusões

Neste trabalho foi utilizada uma metodologia para identificação da zona morta inerente aos atuadores dos processos industriais petrolíferos. Como plataforma de testes, utilizou-se um processo industrial típico composto por uma válvula de controle de fluxo, a qual possui uma zona-morta associada, e um tanque de armazenamento de fluido.

A modelagem do processo industrial pode ser considerada simples. Porém, a metodologia é aplicável a qualquer processo industrial que possa ser representado pelo modelo de Hammerstein, e cuja não-linearidade estática seja a zona-morta. Para isso, admite-se conhecido o ganho da planta.

Vale ressaltar que houve um excesso na quantidade de parâmetros estimados. Além daqueles que configuram a zona-morta (objetivo deste trabalho), foram estimados também os parâmetros que caracterizam a dinâmica linear do sistema. Isso é devido à impossibilidade de medição da variável interna do modelo de Hammerstein juntamente com o método de estimação utilizado (mínimos quadrados recursivo com fator de esquecimento).

Todos os parâmetros foram estimados satisfatoriamente e convergiram com erro de estimação na segunda casa decimal. Isso é devido à presença do ruído branco. A matriz de covariância P apresentou elementos com baixa magnitude, o que caracteriza uma boa estimação.

Este artigo pode ser considerado como preliminar para um trabalho futuro, o qual utilizará os parâmetros estimados da zona-morta para a compensação da mesma. Com a compensação, as oscilações serão amenizadas ou até mesmo eliminadas.

Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq, ao programa de recursos humanos PRH-14 da ANP, e à Petrobras na pessoa do Eng. Mario Campos.

Referências Bibliográficas

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. 3ª edição. Minas Gerais: Editora UFMG, 2007.
- CHOUDHURY, M. A. A. S.; THORNHILL, N. F.; SHAH, S. L. Modelling valve stiction. *Control Engineering Practice*, v. 13, p. 641–658, 2005.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. Santa Catarina: Editora da UFSC, 2004.
- DESBOROUGH, L.; MILLER, R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring - honeywell's experience. *AIChE Symposium Series 2001*, n. 326, p. 172–192, 2002.
- BORGES FILHO, A. M.; MEIRA, M. A. A.; NUNES, G. C. Controle de nível em separadores óleo/gás. In: ISA - SOCIEDADE DE INSTRUMENTAÇÃO, SISTEMAS E AUTOMAÇÃO-DISTRITO 4 – AMÉRICA DO SUL, 2005, São Paulo.
- Nelles, O. *Nonlinear system identification*. Germany: Springer, 2001
- TAO, G.; KOKOTOVIC, P. V. *Adaptive control of systems with actuator and sensor nonlinearities*. New York: Wiley-Interscience, 1996
- ULAGANATHAN, N.; RENGASWAMY, R. Blind identification of stiction in nonlinear process control loops. *American Control Conference*, p. 3380–3384, 2008.
- VÖRÖS, J. Identification of nonlinear dynamic systems using extended hammerstein and wiener models. *Control-Theory and Advanced Technology*, 1995.
- VÖRÖS, J. Recursive identification of hammerstein systems with polynomial nonlinearities. *Journal of Electrical Engineering*, v. 57, n. 1, p. 42–46, 2006.