

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Um Algoritmo para Estimação de Vazão de Gás em Poços de Petróleo produzindo por Golfadas

AUTORES:

Fernando Cesar de Miranda⁽¹⁾ - fcesar@ccet.ufrn.br

Francisco das Chagas Mota⁽¹⁾ - mota@dca.ufrn.br

Sérgio José Gonçalves e Silva⁽²⁾ – sergiojose@petrobras.com.br

INSTITUIÇÃO:

(1) Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica e de Computação – UFRN

(2) Petrobrás, E&P, UN-RNCE

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. 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 6ºPDPETRO.

UM ALGORITMO PARA ESTIMAÇÃO DE VAZÃO DE GÁS EM POÇOS DE PETRÓLEO PRODUZINDO POR GOLFADAS

Abstract

In this article we present a technique for estimation of the gas flow in plunger lift wells. The technique consists in using system identification methodology for developing a maximum likelihood estimator. In this way, it is possible to estimate the gas flow by measuring the control signal of the pressure control valve, which can be easily measured from the CLP's. We show that an estimator with nine parameters is enough for calculating the gas flow with good precision.

Introdução

A indústria de petróleo tem desenvolvido ao longo do tempo diversos mecanismos de elevação artificial de forma a compensar o efeito natural da depleção dos poços, dentre eles pode-se citar: bombeio mecânico, bombeio centrífugo submerso (BCS), bombeio de cavidades progressivas (BCP), *gas lift*, *plunger lift*, dentre outros.

O método *plunger lift* é caracterizado pelo uso de um pistão ou êmbolo que é instalado no interior da coluna de produção e tem a função de criar uma interface entre o fluido que se encontra acima dele e o fluido que fica abaixo do mesmo (normalmente o gás). O pistão permanece se deslocando para cima e para baixo em movimentos cíclicos utilizando, para isto, a energia de expansão do gás que fica acumulado no espaço anular entre o revestimento e a coluna de produção. A produção de um poço com *plunger lift* se dá através de golfadas na superfície ocorridas quando o pistão alcança a cabeça do poço, momento em que todo o fluido deverá escoar pela linha de produção com grande velocidade, conforme apresentado em SILVA, 2006.

Em função desta característica de produção por golfadas, a medição da vazão de gás de poços com *plunger lift* não é uma tarefa trivial, ocorrendo, normalmente, a ultrapassagem da faixa de medição do equipamento. Na maioria dos casos, o tipo de medidor mais utilizado para medir a vazão de gás de um separador é a placa de orifício que, ao ser atravessada por um fluido, provoca um pequeno diferencial de pressão (Δp) entre as duas faces da mesma. Com base neste valor de Δp e utilizando-se um algoritmo definido pela norma API-MPMS 14.3-1 é obtido o valor da vazão de gás através da placa. Uma das maiores limitações deste tipo de medidor é a sua faixa de operação (rangeabilidade), ou seja, a razão entre a vazão mínima e a vazão máxima onde a placa de orifício pode ser utilizada. Esta razão normalmente é da ordem de 1:3 ou 1:4 e durante o momento da golfada a vazão instantânea máxima na placa de orifício pode facilmente ultrapassar dezenas de vezes o valor da vazão mínima, provocando o fenômeno chamado *overrange* do medidor, acarretando erros elevados na medição.

A solução proposta neste trabalho foi a de obter, com base no sistema de medição atual, uma estimativa da vazão de gás do separador utilizando-se sinais que são medidos de forma confiável. Numa planta piloto, existente no Laboratório de Engenharia e Computação e Automação da UFRN, foram feitas simulações a fim de se encontrar estimadores que medissem com precisão a vazão de gás. Para isso, foram usadas ferramentas de Séries Temporais, Inferência Estatística e o software R que permitiram o desenvolvimento e testes de um modelo recursivo. Dessa forma, foi possível se estimar o sinal de vazão de gás de saída do vaso separador a partir da medição sinal de atuação da válvula de controle de pressão (PCV) do vaso separador, sinal este lido diretamente da memória do CLP que controla o processo.

Metodologia

Identificação de sistemas lida com o problema de construir modelos matemáticos de sistemas dinâmicos com base em dados observados dos sistemas reais. Dentre os modelos de identificação paramétrica conhecidos na literatura, será dada maior ênfase ao modelo ARX que foi o que melhor se ajustou aos dados coletados do campo, como também ao método de estimação dos parâmetros através do método de máxima verossimilhança que coincide com o dos mínimos quadrados. Segundo LJUNG, 1987, o objetivo da identificação de sistemas é obter uma relação matemática que possa prever, com razoável confiabilidade, o comportamento da saída de um sistema dinâmico, usando dados coletados da entrada e da saída do processo.

Para um sistema linear e invariante no tempo, LJUNG, 1987, descreve uma estrutura genérica para um modelo de identificação paramétrica que pode ser representada na forma matemática. Considere um conjunto de n observações pareadas de $(X(t), Y(t))$, $t=1, 2, \dots, n$ para estimar $p+q+2$ (ver modelo abaixo) parâmetros de um sistema com sinal de entrada representada por $X(t)$ (sinal de controle da válvula) e saída (sinal de vazão de gás) representada por $Y(t)$. Assumindo-se que as séries $x(t)=X(t+1)-X(t)$ e $y(t)=Y(t+1)-Y(t)$ são estacionárias, tem-se a seguinte representação do modelo:

$$y(t) = \sum_{i=1}^p c_i y(t-i) + d_0 x(t-b) - \sum_{i=1}^q d_i (t-i)x(t-i-b) + a(t), t \geq t_0 \quad (1)$$

com $t_0 = \max\{p+1, b+q+1\}$. Para $n-t_0$ observações, haverá $n-t_0$ equações que podem ser combinadas dentro de uma matriz simples representada por:

$$y(t) = U\theta + a(t) \quad (2)$$

Onde y é um vetor, U é uma matriz, $\theta = (c_1, \dots, c_p, d_0, \dots, d_q)'$ é um vetor de parâmetros (a ser determinado) e a_t um vetor ruídos.

Escrevendo-se a função de verossimilhança sugerida por Box [8], em termos matriciais, vem:

$$L(\theta, \sigma_a^2 | y, x) \cong \frac{1}{(2\pi\sigma_a^2)^{\frac{n-t_0}{2}}} \exp \left[-\frac{(y - U\theta)'(y - U\theta)}{2\sigma_a^2} \right] \quad (3)$$

Logaritmizando e derivando-se a função, obtém-se os seguintes estimadores:

$$\hat{\theta} = (U'U)^{-1} U'y \quad (4)$$

$$\sigma_a^2 = \frac{(y - U\hat{\theta})'(y - U\hat{\theta})}{n-t_0} = \frac{a'a}{n-t_0} \quad (5)$$

A variância do estimador será:

$$V(\theta) = \sigma_a^2 (UU')^{-1} \quad (6)$$

Estimador da vazão com uma diferença.

É necessário reescrever a equação do estimador numa expressão que envolva as variáveis originais (ao invés das diferenças no tempo). O estimador encontrado, obtido a partir da equação do modelo (1) é:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^p \hat{c}_i y(t-i) + \hat{d}_0 x(t-b) - \sum_{i=1}^q \hat{d}_i x(t-b-i) \quad (7)$$

Desenvolvendo-se a expressão acima com as variáveis originais ($X(t)$ e $Y(t)$), obtém-se:

$$\begin{aligned} \hat{Y}(t) = & (1 + \hat{c}_1) Y(t-1) + \sum_{i=2}^p (\hat{c}_i - \hat{c}_{i-1}) Y(t-i) - \hat{c}_p Y(t-p) + \hat{d}_0 X(t-b) - \\ & (\hat{d}_0 + \hat{d}_1) X(t-b-1) + \sum_{i=2}^{q-1} (\hat{d}_{i-1} - \hat{d}_i) X(t-b-i) + \hat{d}_q X(t-b-q) \end{aligned} \quad (8)$$

Critérios de análises.

Encontrado o estimador é necessário fazer uma análise estatística a fim de averiguar se o mesmo tem as propriedades adequadas ou não. Neste trabalho analisaremos os seguintes critérios:

Intervalos de Confiança

Os intervalos de confiança servem para realizar os controles das estimativas. Supondo-se que as amostras de tamanho n são suficientemente grandes, de forma que se permitam utilizar aproximações normais (BOX and JENKINS, 1970), os intervalos $(1-\alpha)$ de confiança para a média e desvio padrão da vazão de gás são dados pelas expressões:

$$\left[\hat{Y} - z_{\frac{\alpha}{2}} \hat{\sigma}(\hat{Y}), \hat{Y} + z_{\frac{\alpha}{2}} \hat{\sigma}(\hat{Y}) \right] \quad (9)$$

$$\left[\frac{\hat{S} \sqrt{n-t_0-1}}{\sqrt{\chi^2_{n-t_0-1, \frac{\alpha}{2}}}}, \frac{\hat{S} \sqrt{n-t_0-1}}{\sqrt{\chi^2_{n-t_0-1, 1-\frac{\alpha}{2}}}} \right] \quad (10)$$

Onde

$z_{\frac{\alpha}{2}}$ é abscissa na curva normal de média zero e variância igual a um cuja área à sua

direita é igual a $\frac{\alpha}{2}$. $\hat{Y}$ é o estimador da média da vazão de gás. $\hat{\sigma}(\hat{Y})$ é o estimador do desvio padrão do estimador da média. $\chi^2_{n-t_0-1}$ é a distribuição qui-quadrado com $n-t_0-1$ graus de liberdade.

Critérios para a definição do número de parâmetros do modelo ARX

Os critérios de Informação de Akaike e Bayesiano, encontrados em WEI, 2006, permitem a escolha do número de parâmetros que comporão o modelo. Fazendo-se um paralelo com o modelo de séries temporais univariado, tem-se: $k = p + q + 1, l = 0$. Daí, vem:

$$AIC(p + q + 1) = \ln \hat{\sigma}_{p+q+1} + \frac{2(p+q+1) + (n-t_0)}{n-t_0} \quad (11)$$

$$BIC(p + q + 1) = \ln \hat{\sigma}_{p+q+1} + \frac{(p+q+1) \ln(n-t_0)}{n-t_0} \quad (12)$$

Os valores mínimos de AIC ou BIC indicarão as escolhas do modelo.

Diagnóstico do modelo ARX

Após o modelo ter sido identificado e seus parâmetros estimados é necessário verificar a adequacidade do modelo antes que se possa usar suas previsões, controles e outros propósitos. No modelo ARX, assume-se que os $a_t(s)$ são ruídos brancos e são independentes da série de entrada x_t . Dois procedimentos devem ser feitos: analisar a correlação cruzada e os erros do modelo.

Correlação cruzada

A correlação cruzada tem a função de verificar se a série de ruído a_t e a série de entrada x_t são independentes. Se a entrada for um ruído, para um modelo adequado, a amostra CCF (função de correlação cruzada), $\hat{\rho}_{xa}$, entre a_t e x_t deve mostrar nenhum padrão e deve estar dentro do intervalo:

$$\left(-\frac{2}{\sqrt{n-k}}, \frac{2}{\sqrt{n-k}}\right) \quad (13)$$

Se a entrada não for um ruído branco e for um modelo ARMA, $\varphi_x(B)x_t = \theta_x(B)\alpha_t$, onde α_t é um ruído branco, a correlação cruzada deve ser feita entre $\hat{a}_t$ e $\hat{\alpha}_t$ que é a série *prewhitened* (WEI, 2006).

Erros do modelo.

Serão analisados, através da autocorrelação e autocorrelação parcial, ou do variograma, que serão vistos a seguir:

Autocorrelação e Autocorrelação Parcial

Aqui o objetivo é verificar se o modelo do ruído é adequado. O procedimento é o mesmo que é feito em séries temporais univariados. Ambas as amostras ACF (função de autocorrelação) e PACF (função de autocorrelação parcial) de a_t devem ser estatisticamente não significativos. Os coeficientes de autocorrelação ρ_{a_t} e autocorrelação parcial $\hat{\phi}_{\hat{a}_t}$ devem ficar dentro do intervalo:

$$\left(-\frac{2}{\sqrt{m}}, \frac{2}{\sqrt{m}}\right) \quad (14)$$

Variograma

O variograma padronizado mede a variância da diferença entre observações de m etapas comparando-se com a diferença em uma etapa. O mesmo será representado por G_m . Em expressões matemáticas, para um processo estacionário, tem-se:

$$\hat{G}_m = \frac{1 - \rho_m}{1 - \rho_1} \quad (15)$$

Quando o processo é um ruído branco, tem-se que o variograma é igual a um. Pode-se então fazer um controle para os variogramas observados. Se a maioria estiver dentro do intervalo construído, haverá indicação de que o processo é um ruído branco. O intervalo é dado abaixo:

$$\left(1 - t_{k-1, \frac{\alpha}{2}} \hat{\sigma}(\hat{G}), 1 + t_{k-1, \frac{\alpha}{2}} \hat{\sigma}(\hat{G})\right) \quad (16)$$

Onde

$$\hat{\sigma}^2(\hat{G}) = \frac{\sum_{m=1}^k (\hat{G}_m - \hat{G})^2}{k-1} \quad (17)$$

$$\hat{G} = \frac{\sum_{m=1}^k \hat{G}_m}{k} \quad (18)$$

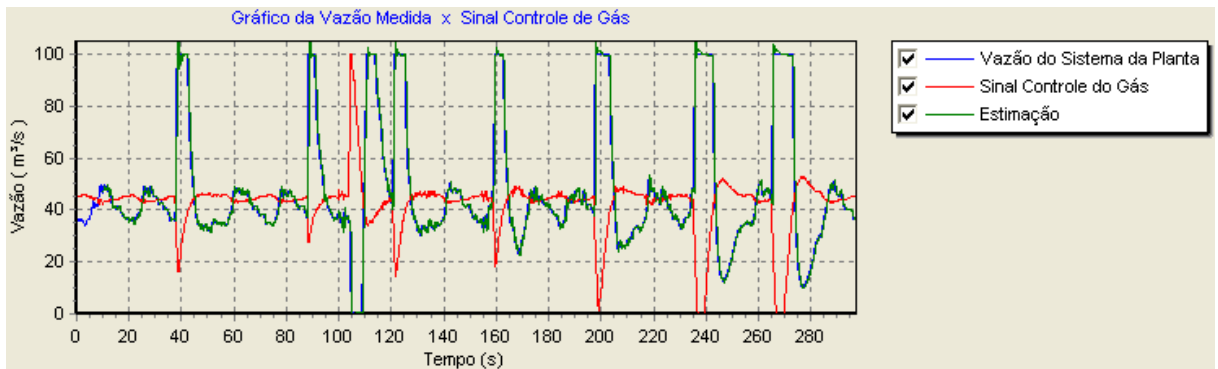
t_{k-1} é a distribuição t-Student com k-1 graus de liberdade.

$t_{k-1, \frac{\alpha}{2}}$ é a abscissa da curva de t-Student, com k-1 graus de liberdade cuja área à sua direita é $\frac{\alpha}{2}$.

Resultados e Discussão

Foram realizados experimentos utilizando-se uma planta piloto existente na UFRN (ALTOE, P., 2009), onde se implementou, em tempo real, o estimador apresentado na equação (8) com Y (saída) representando a vazão de gás na saída do vaso separador e X (entrada) representando o sinal de controle da válvula que modula a pressão de gás no interior do vaso. Convém citar que foram utilizados nove parâmetros na equação do estimador ARX (8), onde quatro deles são relativas às saídas anteriores Y, outros quatro às entradas (X) e um correspondente ao desvio padrão do estimador. Os critérios de formação de Akaike e Baysiano (AIC e BIC) indicaram que esse número de parâmetros (nove) garantiram os melhores resultados para o estimador (ver tabelas abaixo). O cálculo dos valores dos parâmetros foi realizado através de mínimos quadrados recursivos (FRANKLIN et al., 1990) e são recalculados a cada iteração realizada para o estimador, i.e, sempre que temos uma medição confiável da entrada (X) e da saída (Y). Convém citar que no instante da golfada, os parâmetros do estimador não são atualizados a fim de não se utilizar medições incorretas para atualização desses parâmetros.

A seguir apresentamos um gráfico dos resultados do desempenho do estimador em um dos experimentos realizados:



Neste gráfico, a vazão de gás satura no valor 100, enquanto que a estimativa ultrapassa esse valor, como podemos notar.

Abaixo apresentamos tabelas onde são mostrados os dados referentes aos critérios de análise estatística do modelo usado:

Intervalos de confiança para as médias das vazões de gás

Limite inferior	Média da vazão medida	Limite superior
1,6912305	1,951863	2,212884
0,7437179	2,740169	4,736369

Intervalos de confiança para os desvios padrões das vazões.

Limite inferior	Desvio da vazão medida	Limite superior
0,1243764	0,1323167	0,1430916
0,9843540	1,0181267	1,0551899

Conforme mostrado nas tabelas, tanto a média como o desvio padrão da saída (vazão de gás) satisfazem os critérios do intervalo de confiança (equações (9) e (10)).

Escolha do número de parâmetros

AIC - $p=4, q+1=4$	AIC - $p=5, q+1=5$	BIC - $p=4, q+1=4$	BIC - $p=5, q+1=5$
-2,9877680	-2,9844932	-3,89659106	-3,87284154
0,9026932	0,9071288	-0,04418683	-0,02788223

A tabela acima mostra que os indicadores de informação de Akaike e de Bayesiano indicam que o modelo de nove parâmetros é mais satisfatório que o de onze parâmetros.

Os cálculos das auto-correlações, correlações cruzadas e variograma também indicaram que o estimador ARX de nove parâmetros se adequa satisfatoriamente ao modelo do processo.

Conclusões

Os resultados apresentados nesse trabalho mostram que o modelo ARX composto de nove parâmetros se adequa satisfatoriamente ao processo de estimação de vazão de gás em regime de golfadas. Verificou-se ainda que o aumento da quantidade de parâmetros não alterará significativamente os efeitos dos resultados. Esta constatação tem um efeito prático concreto, tendo em vista pequeno número de parâmetros envolvidos diminui significativamente a complexidade da implementação computacional para o estimador. Por último temos a confirmação de que o processo de estimação pode ser uma alternativa viável para a substituição de equipamentos de medição de vazão de gás em poços que produzem em regime de golfadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras pelo financiamento dessa pesquisa através de um projeto de P&D.

Referências Bibliográficas

LJUNG, L., System Identification: theory for the user, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.

BOX, G.E.P and JENKINS, G.M. Time Series Analysis, Forecasting and Control, 2nd Ed., Holden-Day, São Francisco, 1970.

ALTOÉ, P. Projeto de um Sistema Emulador de Escoamentos e Vaso de Separação Primária. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009

FRANKLIN, G. et al. Digital Control of Dynamic Systems. Addison Wesley, MA, 1990.

SILVA, S. Um Sistema para Estimação da Vazão de Gás de Poços produzido por *Plunger Lift* para Vaso Separador de Teste em Plataformas de Petróleo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

WEI, W.W.S., Time Series Analysis, 2nd Ed., Pearson Education, Addison Wesley, 2006;