

ESTUDO DO ACOPLAMENTO POÇO-RESERVATÓRIO NA SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE POÇOS EM ÁGUAS PROFUNDAS E ULTRAPROFUNDAS – UMA REVISÃO

Jansen Dantas de Oliveira¹, Paulo Roberto Ribeiro².

¹ Universidade Estadual de Campinas, Unicamp/FEM/DEP – P.O. Box: 6052 – Campinas –
13083-970, SP, Brasil , jansen@dep.fem.unicamp.br

² Universidade Estadual de Campinas, Unicamp/FEM/DEP – P.O. Box: 6122 – Campinas –
13083-970, SP, Brasil , ribeiro@dep.fem.unicamp.br

Resumo – O estudo do controle de poços, particularmente na perfuração em águas profundas e ultraprofundas, é de fundamental importância no presente cenário nacional. O melhor entendimento da influência de parâmetros físicos e operacionais, permitirão operações mais seguras, econômicas e inertes ao meio ambiente. Foi levantada uma linhagem de trabalhos de simulação de *kicks* em poços de terra e marítimos, onde foram observados os vários enfoques, do ponto de vista de modelagem física e numérica do processo. As abordagens estão associadas, basicamente, ao modelo bifásico da zona contaminada, comportamento transiente do escoamento, reologia do fluido de perfuração, solubilidade do gás invasor no fluido de perfuração, e acoplamento físico e numérico entre o poço e o reservatório de hidrocarbonetos, durante a operação de controle. O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a evolução dos simuladores, nas últimas duas décadas, tendo como enfoque principal, os tipos de tratamento dados a essa interação entre o poço e a formação produtora. Os pontos mais relevantes de cada modelo são discutidos e as recomendações para futuras contribuições nessa área do conhecimento são apontadas, à luz do levantamento do estado da arte realizado.

Palavras-Chave: Águas profundas; Kick; Perfuração.

Abstract – The well control study, especially on drilling in deepwater and ultra-deepwater, is of fundamental importance in the actual national scenarios. The best understand of physical and operational parameters influence, allow safer operations, more economic and inert to the environment. A comprehensive literature review on kick simulation in onshore and offshore wells was realized, where have been observed several focuses, on physical model and numerical process view. The study is associated, basically, on two-phase model of contaminated zone, transient flow behavior, drilling fluid rheology, gas influx solubility in drilling fluids, and physical and numerical coupling between the well and the hydrocarbon reservoir, during control operations. This work shows a literature review to approach about simulators evolution, in the latest two decades, having as main focus, the kind of data treatment of this interaction between the well and the producer formation. The most important points of each model are discuss and the recommendations to future contributions in this acknowledge area are pointed, through the comprehensive literature review realized.

Keywords: Deepwater, Kick, Drilling.

1. Introdução

A indústria do petróleo é um dos setores que mais avança no estudo e desenvolvimento de novas tecnologias, isso é refletido no seu crescimento durante os últimos anos. A procura por novas reservas de petróleo tem avançado para cenários offshore em águas profundas e ultraprofundas. Com esse avanço, cresce também a complexidade das operações envolvidas na perfuração. Uma das operações de perfuração mais complexas é o controle de poço, a qual visa manter sob controle as pressões que agem sobre o poço quando um kick ocorre. A prevenção e o controle de um kick de gás são de grande utilidade para a indústria, já que podem se tornar um blowout e ocasionar a perda de equipamentos e de dinheiro, bem como, grandes danos ao meio ambiente e, principalmente, a perda de vidas.

A rápida detecção de um kick é um fator muito importante para o controle dos influxos no interior do poço. Os danos causados dependem da quantidade de influxo no poço e estes precisam ser minimizados.

Para o estudo de situações mais realísticas, é necessário que alguns fatores físicos e operacionais sejam analisados. O estudo da região bifásica, transferência de massa, parâmetros reológicos, a geometria do poço são importantes para uma análise mais detalhada do comportamento das pressões do poço.

Com o avanço da tecnologia, é possível utilizar modelos mais complexos no estudo do poço. Uma série de modelos foram desenvolvidos e aperfeiçoados, onde fica clara a evolução gradativa dos modelos, que cada vez mais representam uma situação real.

2. Modelos Matemáticos

2.1. Modelos básicos

Le Blanc e Lewis (1968) adotaram um modelo matemático para o controle de kicks bem simplificado, no qual foram feitas algumas considerações descritas a seguir. O influxo de gás entra no poço como uma bolha imiscível, mantendo sua composição constante e sem troca de fases. O influxo cessa no instante do fechamento do poço. As transferências de calor usadas no cálculo do volume de gás foram baseados na temperatura de circulação. A perda de carga por fricção no anular foi desconsiderada já que a proposta era de comparar algumas variáveis específicas nas pressões do anular e a densidade equivalente dos fluidos.

Os resultados obtidos foram diferentes dos dados das pressões na superfície do revestimento. Esta diferença, mostrada na figura 1, pode ser atribuída ao longo período de permanência da bolha no fechamento do poço e à perda de carga da circulação no anular.

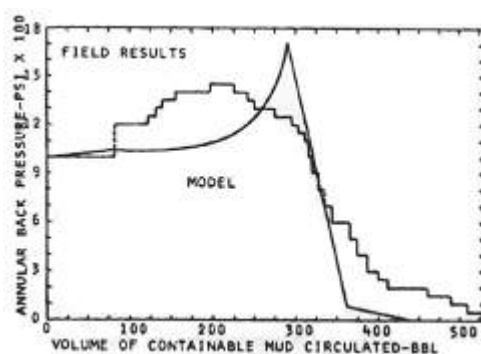


Figura 1. Comparação do modelo de Le Blanc e das pressões de revestimento para uma operação de controle de poços (Le Blanc e Lewis, 1968).

Hoberock e Stanbery (1981) fizeram um estudo das pressões dinâmicas do comportamento do fluxo em um poço contendo um kick de gás controlado pelo método do sondador. Eles utilizaram o modelo de bolha única para simular a pior situação no revestimento de um poço. Entretanto, utilizando uma aproximação para a fração de vazios em um fluxo bifásico como sendo um fluxo monofásico e introduzindo a velocidade relativa entre o gás e a lama (velocidade de deslizamento) este modelo pode se aproximar bastante do que é observada nos dados de um poço real, esta comparação pode ser vista na figura 2. A curva corrigida do modelo de bolha única representa o perfil da pressão de revestimento esperada considerando a pressão no fundo do poço constante.

Nickens (1987) propôs um modelo para o cálculo de um kick de gás em um poço vertical com lama base água e broca no fundo do poço. Seu modelo foi de grande importância e foi utilizado por muitos trabalhos posteriores. Além destas considerações o modelo utilizava as densidades do gás e da lama, a fração de vazio do gás, a velocidade de deslizamento, pressão e temperatura. Assim, as equações utilizadas no modelo são descritas a seguir.

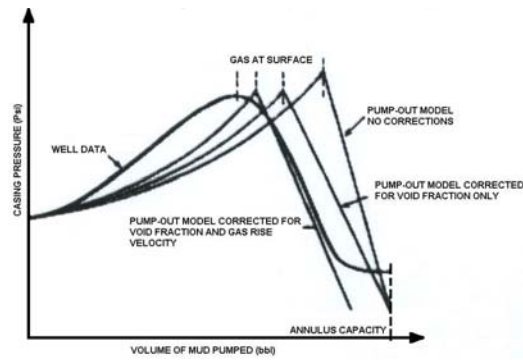


Figura 2. Comparação dos modelos corrigidos com os dados do campo (Hoberock e Stanbery, 1981).

Equação do balanço de massa de lama:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_m (1-\lambda)] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_m v_m (1-\lambda)] = 0 \quad (1)$$

Equação do balanço de massa do gás:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_g \lambda] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_g v_g \lambda] = 0 \quad (2)$$

Balanço de quantidade de movimento para a mistura gás-líquido.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_m v_m (1-\lambda) + \rho_g v_g \lambda] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_m v_m^2 (1-\lambda) + \rho_g v_g^2 \lambda] + \frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_f + [\rho_m (1-\lambda) + \rho_g \lambda] = 0 \quad (3)$$

2.1. Modelo Bifásico

Nickens (1987) desenvolveu uma equação empírica relacionando a velocidade do gás com a velocidade média de mistura mais a velocidade de deslizamento relativa, como é demonstrado a seguir:

$$v_g = K_g [v_m (1-\lambda) + v_g \lambda] + v_{gs} (\rho_g, \rho_m, \lambda, \sigma, d_e, d_i) \quad (4)$$

Ele também constatou que a velocidade de deslizamento é uma função não só as propriedades físicas das fases do gás e do líquido, mas também da quantidade e distribuição do gás no anular. Assim ele definiu um critério de transição entre as distribuições de gás para determinar a velocidade de deslizamento baseada na fração de vazios do gás.

Negrão e Maldla (1989) utilizaram a correlação de Griffith para o cálculo da velocidade na região bifásica com a distribuição de bolha de Stanbery, a qual assume que o diâmetro da bolha é varia linearmente com a diferença entre o raio do anular na parte superior da região bifásica para um valor infinitesimal na parte inferior. Na linha de choke a variação será função do diâmetro interno da parte superior e infinitesimal no final da região bifásica.

$$v_b = K_1 \sqrt{\frac{g \cdot d_b (\rho_m - \rho_m)}{\rho_m}} + (1 + K_2) \cdot v_m \quad (5)$$

Onde v_m é a velocidade da lama, v_b é a velocidade da bolha e os fatores K_1 e K_2 são obtidos em função da razão dos diâmetros da seção.

Choi (1995) apresentou um modelo para previsão do comportamento de um fluxo bifásico transiente para um poço vertical em operação de gás-lift contínuo. A diferença entre este trabalho aos tradicionais está no fato de não usar o sistema de equações diferenciais; em vez disso, cada variável é tratada localmente, isto é, o modelo ocupa-se em solucionar uma variável de cada vez. Outra característica do método é que a fase gasosa é tratada, ao invés de um tratamento Euleriano essa frente é tratada de maneira Lagrangeana, pois assim, é possível monitorar a posição da frente de gás de modo preciso. Este sistema foi chamado por Choi de sistema híbrido Euleriano-Lagrangeano, próprio para células elásticas móveis, tratadas em pequeno volume.

Para o escoamento anular a equação constitutiva da velocidade de deslizamento v_{gi} foi apresentada, considerando a geometria interfacial, efeitos da gravidade e a transferência interfacial da quantidade de movimento. Para o filme de líquido em regime anular a expressão de v_{gi} em função de \square e v_m é dada como:

$$v_{gi} = \frac{8\mu_L \alpha^2}{\rho_m D f_i \xi} \left\{ -1 + \left(1 + \frac{f_i D \rho_m^2 (1-\alpha) \xi}{4\mu_L \alpha^3 \rho_g} \left[v_m + \frac{\Delta \rho D^2 (1-\alpha)^2}{48\mu_L} \right] \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

Aqui α é igual a $\sqrt{\alpha}$ para fluxo anular num tubo e f_i é fator de fricção artificial.

Rommetveit et al (1995) fizeram experimentos com o intuito de se obter mais conhecimento na circulação de um kick de gás em poços horizontais através do estudo do comportamento do fluxo bifásico à altas pressões. Uma nova correlação foi desenvolvida para velocidade de deslizamento, baseada na equação:

$$v_G = \sum_{i=1}^N C_i x_i \quad (7)$$

Onde x_i são composições das fases e C_i são os coeficientes de cada termo. Este modelo gerou um ajuste significativamente melhor para os dados.

2.2. Geometria do Anular

Nickens (1987) fez uma comparação entre um modelo de bolha simples de um modelo de gás distribuído para um volume de kick de 26 bbl apresentado na figura 3. Ela indica que a velocidade de deslizamento é dependente da geometria do anular, mostrando que o modelo de bolha simples não é adequado para descrever o comportamento do poço.

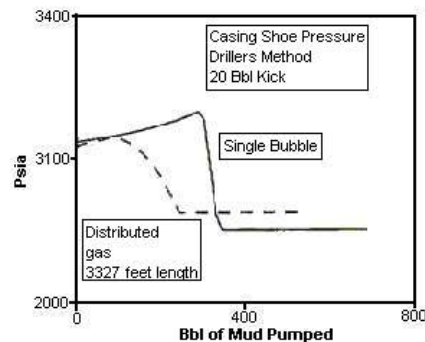


Figura 3. Pressão na sapata, comparação entre bolha simples vs. Gás distribuído (Nickens, 1987).

Pódio e Yang (1986) fizeram um modelo baseado no modelo de Nickens, a principal diferença estava no método de solução das equações diferenciais. Eles propuseram um método utilizando um contorno móvel enquanto que Nickens utilizou uma malha fixa. Ele concluiu que a geometria do poço tem grande efeito na pressão durante a circulação de um kick. A figura 4 corresponde a um poço no qual o anular muda de 7 1/8 para 16 inches à 3000 ft.

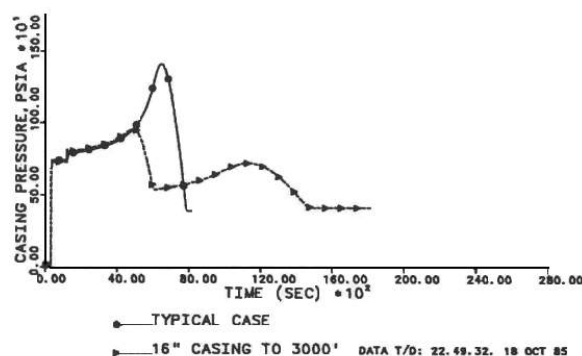


Figura 4. Efeito da mudança da geometria do poço em perfil de pressão (Pódio e Yang, 1986).

Quando o gás atinge esta profundidade, ele começa a ocupar um menor espaço e requerendo uma diminuição na pressão do revestimento para manter a condição de overbalance constante. O pico de pressão no revestimento é significativamente menor que para o caso de poço uniforme já que a fração gás ocupada é menor. O tempo de circulação é maior devido ao aumento de volume no anular.

2.3. Modelo de reservatório

Thomas et al. (1982) estudaram os efeitos da solubilidade do gás nas propriedades dos fluidos de perfuração base óleo. Ele utilizou uma expressão para a queda de pressão do reservatório dependente do tempo para prever a taxa de fluxo de gás dentro do poço. Apesar do caso de fluxo da água salgada ou do óleo do reservatório não terem sido estudados, um modelo similar pode ser inserido nestes fluidos.

$$Q_g = \frac{kh(P_f^2 - BHP^2)}{1424 P_D (BHT + 460)_{\mu Z}} \quad (8)$$

Usando as expressões do reservatório, uma taxa de gás instantânea foi calculada com a quantidade total de gás que entra no poço. O máximo de lama contaminada no poço também foi calculado. A figura 6 mostra a quantidade de instantânea de gás para ambos os casos.

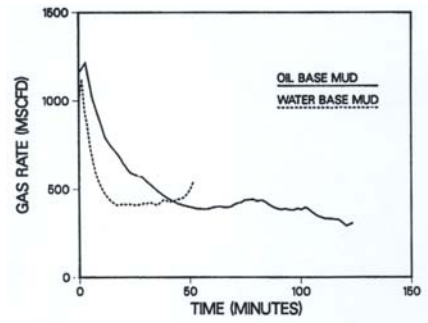


Figura 5. Taxa de gás instantâneo (Thomas et al., 1982).

Estas equações simulam o reservatório com o tempo e com a pressão de um reservatório inicialmente a pressão uniforme.

Nickens (1987) introduziu o acoplamento do poço com o reservatório, o qual é muito importante para a determinação das pressões dinâmicas no fundo do poço, uma vez que as pressões do reservatório variam e a pressão do fundo do poço precisa ser mantida constante. As propriedades do reservatório são especificadas e estas determinam a vazão do influxo. A formação é dividida em segmentos axiais de espessura iguais a taxa de perfuração (ROP) vezes um intervalo de tempo. Cada segmento é assumido um fluxo independente dos outros para efeito de cálculo da taxa total de influxo. O componente de fluxo do n -ésimo segmento é calculado da equação de fluxo radial:

$$q_{gi} = \frac{kh_i (p_{fm}^2 - p_{wf}^2)}{1,424(6) p_D (T\mu Z)_{fm}} \quad (9)$$

Santos e Bourgoiyone (1989) aplicaram o modelo de gás desenvolvido nesta pesquisa, que é baseado na teoria para testes de multi taxas de fluxos em poços de gás. Esta teoria é bem aplicável ao modelo de uma situação de blowout de gás porque considera as mudanças na no valor da taxa de fluxo de gás durante o processo de circulação do poço. O modelo de reservatório de gás foi acoplado com o sistema poço-diverter para gerar a taxa de fluxo de gás para um certo valor da pressão no fundo do poço.

A pressão na face do reservatório (equivalente à pressão no fundo do poço) de um reservatório infinito de gás produzindo a uma taxa de fluxo constante, é generalizada a uma situação blowout onde a taxa de fluxo de gás varia com o tempo. Assim, para um passo de tempo n , o resultado da equação é:

$$\frac{[m(P_{res}) - m(P_{bh})]khT_b}{5,792 \times 10^7 P_b T} - \sum_{j=1}^{n-1} [(Q_j - Q_{j-1}) \log(2,2454t_{Dj})] - Q_n \log(2,2454t_{Dn}) + Q_{n-1} \log(2,2454t_{Dn}) - 0,87Q_n (S + DQ_n) = 0 \quad (11)$$

A equação 11 pode agora ser usada para calcular a taxa de fluxo de gás em um passo de tempo n para um certo valor na pressão do fundo do poço. Em sumario, o modelo de reservatório de gás funciona da seguinte maneira: para um passo de tempo sob consideração, o valor da pressão de fundo do poço adotada é substituída na equação 11 qual é então resolvida para a taxa de fluxo de gás.

2.4. Lama base óleo

Rommetveit et al. (1993) fizeram alguns experimentos em um poço de 2020 m e inclinado em 60°. O gás era injetado pela coluna passando pelos orifícios da broca. Ele comparou a distribuição do gás em três tipos de lamas e o perfil das pressões foram diferentes, conforme pode ser visto na figura 6. A diferença entre a curva da lama base água e

base óleo pode ser causada pela solubilidade do gás na lama base óleo, pois, quando o poço é fechado uma certa quantidade de gás irá se dissolver na lama fazendo com que uma menor quantidade de gás livre chegue à superfície.

Assim Rommetveit et al. concluiu que um fechamento do poço por um longo período de tempo cria um retorno de distribuição de gás bem mais favorável utilizando lama base óleo.

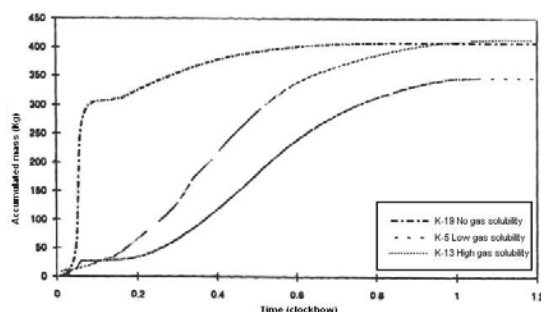


Figura 6. Distribuição do gás depois de um período de fechamento em lamas base óleo e base água (Rommetveit et al., 1993).

3. Conclusões

Os estudos dos modelos mostram uma evolução gradual, onde passaram a adotar abordagens mais detalhistas no estudo do comportamento de um poço. A evolução dos modelos permite o estudo do comportamento das pressões do poço durante as operações de perfuração, aumentando a segurança das operações envolvidas.

Os parâmetros como geometria do poço, tipo do fluido utilizado, modelo de reservatório e operacionais têm uma grande influência nos resultados finais. A sua utilização é muito importante pois assim os resultados obtidos são mais seguros e confiáveis.

Como pudemos observar neste trabalho, devido à grande evolução dos modelos matemáticos, as simulações de diversas situações de kicks podem ser realizadas. Os modelos podem descrever desde cenários com fluidos base óleo a poços horizontais offshore.

4. Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Departamento de Engenharia de Petróleo da UNICAMP pela infra-estrutura disponibilizada, a ANP (Agência Nacional de Petróleo) pela bolsa de estudos concedida ao aluno através do PRH 15.

5. Referências

- CHOI, K. I., *Modelo computacional dinâmico lagrangeano-euleriano para escoamento bifásico em poços de petróleo*. Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil. 1995.
- HOBEROCK, L. L. and STANBERY, S. R. Pressure dynamics in well during gas kicks: part 1 – fluid line dynamics. *Journal of Petroleum Technology*, p.1357-1366, Aug., 1981.
- Le BLANC, J. L. And LEWIS, R. L. *A mathematical model of a gas kick*. *Journal of Petroleum Technology*, p. 888-898, Aug., 1968.
- NEGRÃO, A. F. and MALDLA, E. E. *Optimization of flow rate selection for kick control in deep waters*. 64th ATCE, San Antonio, TX, p. 467-474, Oct., 1989.
- NICKENS, H. *A dynamic computer model of a kicking well*. *SPE Drilling Engineering*, p 158-173, Jun., 1987.
- PODIO, A. L., and YANG, A. P. *Well control simulator for IBM personal computer*. IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, p. 151-163, Feb., 1986.
- ROMMETVEIT, F. H. R., HOVLAND, F. and OLSEN, T. L. *Optimization of the return gas distribution during kicks in oil- and water-based muds: results from full-scale kick experiment*. *Offshore European Conference*, Aberdeen, p. 481-492, Sept., 1993.
- ROMMETVEIT, K. S. et al. *Full scale kick experiments in horizontal wells*. *SPE/ATCE*, Dallas, U.S.A., p. 765-775, Oct., 1995.
- SANTOS, O. L. and BOURGOYNE Jr., A. T. *Estimation of pressure peaks occurring when diverting shallow gas*. 64th ACTE, San Antonio, TX, Oct., 1989.
- THOMAS, D.C., LEA JR., J.F. and TUREK, E.A. Gas solubility in oil-based drilling fluids: effects on kick. *57th ATCE of the Society of Petroleum Engineers*. New Orleans, LA, Sept. 26-29. 1982.