

2 Poços Inteligentes no Desenvolvimento de Campos Petrolíferos

2.1 Introdução

O desenvolvimento de um campo petrolífero pode ser entendido como um conjunto de ações necessárias para colocar em produção um campo delimitado e conhecido. Estas ações consistem de perfurações, sistemas de injeção, projeto de plataforma, etc. A forma como é feito esse desenvolvimento é uma das tarefas mais importantes na área de reservatório, dado que esta determinação afeta o comportamento do reservatório, as decisões futuras, as análises econômicas e, conseqüentemente, a atividade resultante do projeto em sua totalidade. Isto envolve variáveis tais como locação, número e tipos de poços, as condições de operação dos poços, uso ou não de poços inteligentes, as características do reservatório e, inclusive, o cenário econômico entre outros aspectos.

Neste capítulo são descritos os aspectos mais importantes sobre poços inteligentes no desenvolvimento de campos de petróleo, tema abordado nesta tese.

2.2 Poços Inteligentes

Um poço inteligente é um poço não convencional com completações inteligentes. A Completação de poços consiste na transformação da perfuração em uma unidade produtiva completamente equipada e com os requisitos de segurança atendidos, pronta para produzir óleo e gás, gerando receitas. As completações inteligentes podem ser definidas como completações com instrumentação (sensores e válvulas especiais) instalada na tubulação de produção, a qual permite o monitoramento contínuo e o ajuste das taxas de fluxo dos fluidos e das pressões (Valvatne, 2003). Essa tecnologia fornece a flexibilidade de controlar cada filial ou seção de um poço multilateral independentemente. No caso de um poço de corpo único (tal como um poço

horizontal), a tecnologia de poços inteligentes transforma o corpo do poço em um poço com múltiplos segmentos, novamente fornecendo a flexibilidade do controle para cada segmento.

As figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, um poço horizontal inteligente e um poço multilateral com três dispositivos de controle. A figura 1 mostra o modelo de um poço horizontal inteligente dividido em três segmentos. Cada segmento contém uma válvula de controle de fluxo, onde Q_1 , Q_2 e Q_3 representam a vazão de entrada do fluxo nos segmentos 1, 2 e 3 respectivamente. A figura 2 mostra um modelo de um poço multilateral inteligente com as válvulas de controle de fluxo localizadas na junção das laterais com o poço.

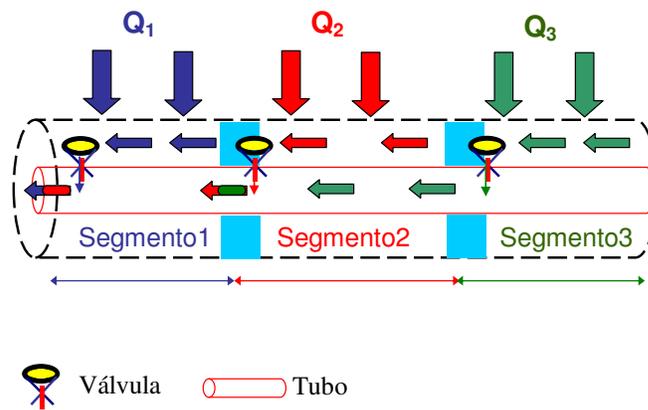


Figura 1. Exemplo de Completação de um poço Horizontal Inteligente

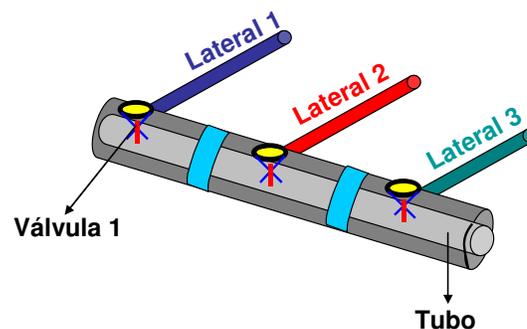


Figura 2. Exemplo de Completação de um poço Multilateral Inteligente

Poços inteligentes compreendem um importante avanço na tecnologia de poços, fornecendo novas formas de se melhorar a gerência do reservatório. Entretanto, esta tecnologia apresenta, também, algumas desvantagens. Devido

ao complexo e rápido progresso desta tecnologia, perfurar e operar esses poços possui algum risco, principalmente de falhas mecânicas. No caso de uma falha mecânica, a intervenção no poço pode ser necessária, podendo ser muito custosa, especialmente para aplicações *offshore*. A incerteza existente na descrição do reservatório complica o problema ainda mais. Assim, por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, sem muitos dados relativos a sua confiabilidade e melhor forma de utilização, ainda existe um certo receio em aprovar sua implantação, sendo a perfuração e completação com tecnologia convencional ainda a mais realizada.

Com o objetivo de se obter metodologias padronizadas para o cálculo do benefício do uso da tecnologia de poços inteligentes, muitos estudos vêm sendo realizados em cima dessa tecnologia. A seguir descreve-se alguns trabalhos relacionados ao estudo de aplicações conceituais da tecnologia de poços inteligentes. Esses trabalhos descrevem os possíveis controles dessa tecnologia bem como seus princípios operacionais, apresentando vantagens de seu uso em possíveis projetos.

Em Robinson et al. (1997), Hamer e Freeman (1999), Tubel e Hopmann (1996), Holmes et al. (1998), Bosworth et al. (1998) e Greenberg(1999), Yeten e Jalali (2001), Sinha et al. (2001), Valvatne (2003) e Poel e Jansen (2004), são apresentados estudos sobre as vantagens do uso de tecnologia de completações inteligentes em poços multilaterais e horizontais.

Robinson (1997) deu a seguinte definição para poços inteligentes: “Poços Inteligentes, no sentido genérico, é um termo que pode ser aplicado a um poço que tenha um transdutor de pressão e temperatura para monitorar condições ao longo do reservatório, junto com uma sofisticada configuração de poços multilaterais que fornece isolamento das laterais, através do controle de fluxo realizado em cada lateral, e sensores para controlar o processo de produção em tempo real”. Encontra-se em seu trabalho uma descrição breve dos componentes de poços inteligentes e de suas possíveis aplicações.

Hamer e Freeman (1999) indicaram que o próximo passo em completações multilateral seria o desenvolvimento de completações inteligentes, dado a capacidade dessas de monitoramento contínuo, conseguindo assim informação sobre o avanço da frente de água, por exemplo, e a característica de ajustes físicos da completação sem o alto custo das intervenções.

Tubel e Hopmann (1996) forneceram uma descrição clara do controle dos dispositivos e seus princípios operacionais. Neste trabalho os autores indicam que os poços inteligentes devem aumentar a recuperação através do controle da

taxa de produção. Afirmam que esta tecnologia será utilizada de forma bem sucedida em completções de águas profundas, em multilaterais e em poços horizontais.

Holmes et al. (1998) mostraram através de um modelo de poço segmentado, como os dispositivos de controle de poços inteligentes podem ser modelados e executados dentro de um simulador comercial do reservatório (GeoQuest, 2001).

Bosworth et al. (1998) e Greenberg (1999) consideraram as futuras aplicações de completções inteligentes como uma parte natural de projetos de poços multilaterais, devido à capacidade das válvulas existentes nos poços inteligentes em isolar as filiais dos poços multilaterais.

Yeten e Jalali (2001) e Sinha et al. (2001) mostraram que a tecnologia de poços inteligentes também é benéfica para poços horizontais com elevadas quedas de pressão. Estes estudos demonstraram que, atrasando o avanço de líquidos indesejáveis no poço, consegue-se alcançar um aumento substancial da recuperação do reservatório. Eles mostraram também que esta técnica de completção fornece maior flexibilidade durante o desenvolvimento do campo.

Em Valvatne (2003) comenta-se sobre o impacto dos poços não convencionais (horizontais e multilaterais) na indústria de petróleo na década passada, e no quanto esses poços podem aumentar a produção do reservatório. Entretanto o artigo indica que o desempenho desses poços pode ser muito prejudicado dependendo da heterogeneidade do reservatório. Através de um método semi-analítico, o autor modela o controle dos dispositivos existentes em completções inteligentes e demonstra que o uso de completções inteligentes em poços não convencionais pode ser muito vantajoso.

Por fim, Poel e Jansen (2004) analisaram que poços Inteligentes permitem uma reação rápida para eventos inesperados durante a vida do reservatório, e possuem um potencial de influenciar positivamente no valor presente líquido (VPL) dos projetos desenvolvidos. Eles então quantificam a influência positiva de completções inteligentes (equipadas com válvulas *on/off*) no VPL de um projeto, examinando a influência dessas completções na função de densidade de probabilidade do: óleo acumulado, produção de gás e produção da água.

A partir dos estudos anteriores, verifica-se as vantagens que podem ser alcançadas através do uso de poços inteligentes e percebe-se então a necessidade de processos capazes de otimizar o controle desses poços. Na próxima seção encontram-se alguns estudos realizados em otimização de controle de poços inteligentes.

2.3 Otimização de Controle de Poços

A tecnologia de poços inteligentes permite a otimização do controle de poços através do uso de dispositivos de controle de fluxo (válvulas) e de sensores de fluxo e pressão. Com estes dispositivos, torna-se possível controlar ou minimizar os efeitos prejudiciais da geologia, do reservatório e de hidráulica no desempenho de um poço. O objetivo principal da otimização é desenvolver uma estratégia de controle, ou seja, de ajustes dos dispositivos de controle (válvulas) existentes no poço, de forma a maximizar a produção do reservatório ou otimizar a operação do reservatório com relação a algum critério.

O processo de otimização de poços inteligentes, nesses últimos anos, vem despertando interesses na área de desenvolvimento e gerenciamento de reservatórios. Sendo assim, o emprego de algumas metodologias de otimização aplicadas a tecnologia de poços inteligentes, visando balancear a produção ao longo de um poço, controlar o avanço da frente de água e antecipar a produção de óleo, vem sendo abordado. A seguir são apresentados alguns trabalhos relacionados à otimização de poços inteligentes.

Brouwer et al. (2001) apresentaram uma metodologia de otimização estática no estudo do avanço de água. O algoritmo básico envolve fechar os segmentos do poço com o índice de produtividade mais elevado e adicionar a produção desses segmentos a outro segmento do poço. Com isso, pode-se balancear a produção ao longo do poço e alcançar uma eficiência maior no avanço da água.

Dolle et al. (2002) apresentaram um algoritmo de otimização dinâmico, baseado na teoria de controle ótimo, e conseguiu demonstrar uma melhora no avanço da água e na recuperação de óleo, em comparação com os resultados alcançados por Brouwer et al. (2001).

Brouwer e Jansen (2002), também com o uso da teoria de controle ótimo, investigaram o efeito de completações inteligentes no avanço de água. Eles conseguiram uma aceleração na produção e um aumento na recuperação.

Sudaryanto e Yortsos (2000) também aplicaram a teoria de controle ótimo para a otimização eficiente do avanço de fluidos. Eles otimizaram as taxas de injeção de fluidos especificamente em poços verticais.

Khargoria (2002) estudou o impacto da localização das válvulas, e o modo de operação das mesmas, no desempenho da produção usando um poço horizontal. Eles realizaram o controle de modo reativo (operação das válvulas é

feita em reação a mudanças observadas) e pró-ativo (ação antes do efeito). Foram usados dois processos de otimização: o “*simulated annealing*” e um algoritmo de otimização de gradiente conjugado para determinar a localização ótima e o controle das válvulas visando maximizar a produção acumulada de óleo. Ambos os algoritmos convergiram para os mesmos resultados nos dois modelos. Neste trabalho, a configuração das válvulas não é alterada no tempo.

Yeten (2003) também usou o algoritmo de otimização de gradiente conjugado para otimizar o controle de um número fixo de válvulas on/off localizadas em um único poço, considerando o tempo e visando o aumento da recuperação de óleo e o aumento do VPL. Na sua estratégia de otimização, o autor otimiza a configuração das válvulas considerando todo o período de exploração e usa essa otimização no primeiro intervalo de tempo ($t=0$ até $t=1$), em seguida ele reinicia a simulação a partir de $t=1$ e executa uma nova otimização visando uma configuração de válvulas ótima para o próximo intervalo de tempo ($t=1$ até $t=2$), e assim sucessivamente, até o tempo final do período de exploração. O autor comenta que o aumento no número de válvulas, ou o uso de válvulas de multiposições, dificultaria e possivelmente inviabilizaria o uso da técnica de otimização de gradiente conjugado.

Gai (2001) apresentou um método de otimização para o controle de fluxo em um poço inteligente multilateral com duas laterais. Foram usadas informação de relacionamento do desempenho de fluxo (IPR - *inflow performance relationship*) e relacionamento do desempenho da válvula (VPR - *valve performance relationship*) para otimizar as configurações da mesma. O autor conclui seu estudo indicando que o desenvolvimento de *hardware* para completações inteligentes avançou muito nos últimos anos, mas não houve grandes avanços em ferramentas para otimização do desempenho de poços inteligentes, e mostra que o uso de tentativa e erro no controle desses poços ainda vem sendo muito utilizado pela indústria.

Nesta tese, propõe-se um método de otimização, baseado em algoritmos genéticos, capaz de otimizar a condição de válvulas (*on/off* ou multiposições), existentes em qualquer tipo de poços, de uma dada alternativa de produção, para qualquer intervalo de tempo ao longo do período de exploração. Incertezas de falha e geológica também são levadas em consideração.

Na próxima seção encontram-se alguns estudos que abordam incertezas no controle dos poços inteligentes.

2.4 Incertezas no Controle dos Poços

Para se decidir pelo uso de poços inteligentes, deve-se quantificar primeiramente seus benefícios, pois o alto custo dos equipamentos de controle e monitoramento do poço inteligente o torna muito mais caro do que um poço não instrumentado.

Os benefícios dos poços inteligentes podem ser determinados otimizando sua operação para maximizar o VPL do reservatório ou a recuperação de óleo do reservatório. Porém, esses dispositivos não são de total confiança, podendo, em algum momento, ocorrer falhas em sua operação. Isto naturalmente reduzirá os benefícios previstos desses dispositivos inteligentes. Alcançar uma estratégia de controle apropriada no uso de poços inteligentes requer a integração dos diversos tipos de incertezas que influenciam durante o tempo de operação.

Verenuso et al. (2000) realizaram um estudo com o objetivo de discutir a confiabilidade dos equipamentos de um poço. Neste trabalho os autores indicam que a confiabilidade, determinada pela indústria, para equipamentos de poços é a seguinte: 90% de probabilidade de operação correta por 5 anos para sistemas de monitoramento (sensores) e 90% de operação correta por 10 anos para atuadores (controles). Baseado em dados históricos eles construíram funções de sobrevivência e risco para equipamento de medidas de poço. Três mecanismos de falhas distintos para equipamentos de poço foram identificados, cada um ocorrendo em diferentes fases. Falhas nos estágios iniciais são atribuídas às instalações. Em estágios intermediários, taxas de falhas constantes foram observadas e atribuídas a conexões na árvore ¹ ou *packer* ² e, as vezes, a sensores. Em estágios avançados, concluiu-se que as falhas são devidas a curto-circuito nos sensores ou nas conexões. Eles também indicaram que a confiabilidade do equipamento foi extremamente dependente da temperatura, com o tempo de vida esperado dos sensores sendo significativamente mais curto em ambientes de alta temperaturas. Os autores também relataram que, embora a ocorrência de uma falha particular possa ser um evento aleatório, o modo de falha não é.

Em Yeten et al. (2004) uma análise de decisão é apresentada para determinar o desenvolvimento ou não de completações inteligentes sob incertezas de falha e geológica. A técnica de otimização apresentada em Yeten

¹ Conjunto de válvulas que controla a pressão e vazão de um poço

² Vedador/Obstruidor – É um plug de expansão colocado em um poço para obstruir a passagem do fluido

(2003) é aplicada para alguns exemplos envolvendo modelos geológicos com múltiplos cenários geoestáticos e com diferentes cenários de confiabilidade. Para o tratamento da incerteza de falha um modelo probabilístico é introduzido, isso evita o uso de dados históricos na construção de modelos que indiquem a confiabilidade da válvula. Técnicas de tomada de decisão são usadas para quantificar o benefício obtido pelo uso de poços inteligentes sob diferentes cenários de risco

Nesta tese é utilizado o modelo de falha probabilístico introduzido em Yeten (2004) para o tratamento de incertezas técnicas na tomada de decisão do uso de poços inteligentes em projetos de desenvolvimento de reservatórios. Incerteza geológica também será considerada através de três cenários (otimista, pessimista e conservador) dos reservatórios em questão.

2.5 Estratégias de Controle

O controle de produção através da operação das válvulas, existentes em completações inteligentes, pode ser feito com base em duas estratégias distintas: uma estratégia denominada como “reativa” e outra “pró-ativa” (Yeten,2003).

Na estratégia de controle reativa a operação das válvulas é feita em reação a comportamentos observados na produção de fluidos dos poços. Ao se observar, por exemplo, um aumento na relação água / óleo de uma determinada região, adota-se como reação a restrição dos fluxos nessa região, privilegiando a produção em outra região que apresente menor relação água / óleo.

Por outro lado, na estratégia de controle pró-ativo, a programação da operação das válvulas é feita de forma antecipada, isto é, procura-se agir antes do efeito. Como exemplo, pode-se citar a busca, desde o início da produção de uma configuração de operação das válvulas que satisfaça alguns objetivos como: atrasar o início do corte de água nos poços, antecipar a produção, ou alcançar uma maior recuperação de óleo do campo. A estratégia de controle pró-ativo implica em um processo de otimização com um horizonte de previsão de produção e de controle de válvulas mais longo e a necessidade de um modelo de reservatório que se ajuste a este horizonte de previsão.

No contexto de campos inteligentes, o monitoramento contínuo das pressões e vazões dos poços pode levar a contínuas atualizações do modelo de fluxo ao longo do tempo. A estratégia de controle pró-ativo implica no

conhecimento do modelo do campo, ou pelo menos de um número finito de possíveis realizações, cujas características são consideradas fixas durante o processo de otimização. Dessa forma, sobretudo em uma fase de projeto, onde existe um grande número de incertezas no modelo de fluxo, os resultados obtidos em um processo de otimização no contexto de um controle pró-ativo deverão ter um valor mais qualitativo, indicando se o campo tem potencial de ganhos significativos com a completação inteligente.

Nesta tese a otimização de controle de válvulas é realizada através da filosofia de estratégia de controle pró-ativo, sendo uma ferramenta mais apropriada para apoiar a fase de projeto.