



Sistema de Inferência Fuzzy para Seleção de Poços de Petróleo para a Operação de Fraturamento Hidráulico

Antônio Orestes de Salvo Castro
Petrobras
Av. Chile 65 sala 1804, Centro, Rio de Janeiro
orestes@ep.petrobras.com.br
Universidade do Estado de Rio de Janeiro (UERJ)

Virgílio José Martins Ferreira Filho
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Departamento de Engenharia Industrial, Escola de Engenharia
virgilio@ufrj.br

Resumo

O trabalho visa apresentar um modelo fuzzy de apoio à decisão, utilizado para seleção poços e formações produtoras de petróleo para a operação de fraturamento hidráulico. Esta operação visa o aumento da produtividade de poços de petróleo e a seleção dos candidatos requer análises de dados incompletos ou imprecisos. Permite também avaliar, dentre os poços selecionados, quais são prioritários para a operação de acordo com incremento de produção esperado.

Abstract

This paper has the objective to present a fuzzy inference system to support the decision in selecting oil wells candidates to hydraulic fracture operations used to increase their production. Most of the times it is necessary to analyze incomplete and uncertainties data for the wells selection. The model is also capable of ranking the wells selected according to their expected production improvement.

Palavras chave: Lógica Fuzzy, Petróleo, Sistemas Especialistas.

Key words: Fuzzy Logic, Petroleum, Expert Systems .



Introdução

As operações de estimulação são largamente utilizadas na indústria petrolífera para ampliação do potencial produtivo de poços e formações portadoras de hidrocarbonetos. Estas operações aumentam a permeabilidade da formação através da indução de canais na rocha produtora ou pela remoção do dano de formação, o que facilita o fluxo dos fluidos a serem produzidos. Nem todos os poços são candidatos naturais a serem estimulados, devido as diferentes características que estes possuem. Mesmo dentro do mesmo campo petrolífero e dentro da mesma formação, serão encontrados poços que devem e que não devem sofrer estas operações. O processo de seleção deve estar calçado em critérios técnicos e econômicos que podem ser trabalhosos caso sejam aplicados com os níveis de detalhes necessários.

Um dos principais métodos de estimulação de poços utilizado na indústria do petróleo é o fraturamento hidráulico. Trata-se de uma operação que embora possa ser bastante lucrativa, se mal especificada, projetada ou conduzida, pode acarretar inclusive na perda do poço produtor. A figura 1 ilustra um procedimento de fraturamento hidráulico, que consiste no bombeio de um fluido a partir da superfície e a sua propagação no interior da zona produtora provocando o rompimento estrutural da formação.

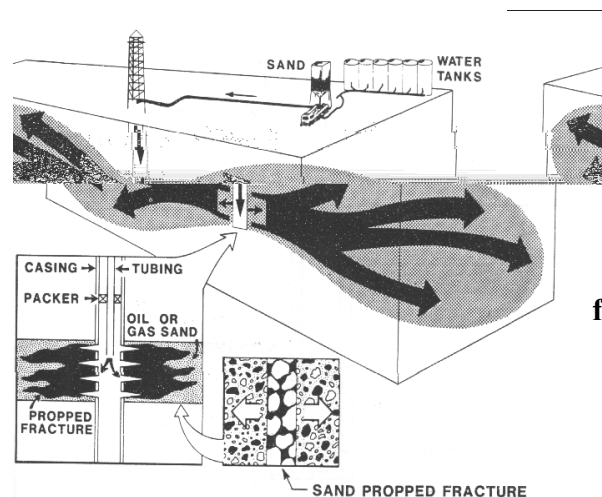


figura 1

Até o momento, o processo de seleção de poços para a operação de fraturamento hidráulico segue os procedimentos convencionais de análise de engenharia de reservatório, e engenharia econômica, onde dados sísmicos, de perfuração e de testes de pressão são detalhadamente analisados por uma equipe especializada. Este trabalho se propõe a dar uma nova visão a estes procedimentos com a utilização de um sistema de inferência fuzzy no tratamento dos aspectos técnicos e econômicos de seleção de poços para este tipo de operação. O sistema de inferência fuzzy



proposto neste trabalho procede a uma análise detalhada e, de forma computacionalmente eficiente, permite que um grande número de poços e formações possam ser avaliados de forma rápida, criteriosa e consistente utilizando as informações contidas nas bases de dados técnicos. Este modelo visa conter o conhecimento nebuloso inerente a este processo de seleção e, através da entrada dos dados relativos às características de diversos poços, avaliar o grau de adequação destes a este tipo de operação. Através da elaboração de um ranking de poços, os engenheiros e químicos responsáveis pelo projeto destas operações, poderão de forma rápida e padronizada efetuar esta seleção, podendo se concentrar no dimensionamento de fraturamentos somente para os poços com alto potencial e viabilidade de execução.

Fraturamento Hidráulico

O fraturamento hidráulico é uma técnica utilizada para aumentar a produtividade ou injetividade de poços de petróleo ou ainda aumentar a recuperação esperada de óleo de um reservatório. Esta técnica, se bem aplicada, pode ser altamente eficaz duplicando ou até mesmo quadruplicando as taxas de produtividade de poços cujas características de reservatório dificultem a sua produção (Thomas 2001). Operações de fraturamento hidráulico consistem na aplicação de um diferencial de pressão acima da resistência mecânica da formação, que provoca quebra da formação (fratura), o bombeio de um volume de fluido especificado a alta vazão para propagar TT2 1 (urd)-6.3afraturame



eliminando este grave problema. Outro aspecto que deve ser considerado a favor destas operações é que a fratura imposta pode atingir áreas do reservatório com melhores condições permo-porosas e, em reservatórios lenticulares ou naturalmente fraturados, pode promover a inter-conexão de áreas não produtivas inicialmente (Thomas, 2001).

A primeira etapa para o projeto de uma operação de fraturamento hidráulico é a seleção dos poços e das formações que serão candidatas. Para tal é efetuado um estudo de reservatórios para avaliar as razões da baixa produtividade de um conjunto poço formação e são elaboradas estimativas do aumento esperado de produção que trará os subsídios necessários à avaliação da economicidade da operação. Neste estudo a análise dos testes de crescimento de pressão irá indicar se a baixa produtividade está relacionada a baixa permeabilidade da formação, a um elevado dano de formação, ao estado de depleção do reservatório ou um conjunto destes fatores. Sendo assim, selecionar os poços que devem ser analisados dentre um universo de várias dezenas ou até mesmo várias centenas de poços requer um grande consumo de mão-de-obra altamente especializada e um grande dispêndio de recursos. Assim, este modelo de inferência fuzzy se propõe e efetuar o trabalho de seleção, liberando os especialistas para se dedicarem de forma exclusiva ao dimensionamento e projeto das operações para os poços selecionados.

O Modelo de Inferência Fuzzy

Para que o modelo proposto possa substituir os técnicos e engenheiros neste processo de seleção de poços e formações, vários fatores devem ser considerados. Estes fatores devem possuir tanto um carácter econômico, de forma a excluir os poços nos quais o tratamento não implicaria em um ganho significativo de receita, quanto técnico, visando descartar os poços onde a boa prática da engenharia de petróleo identifica dificuldades, riscos ou ausência de aplicabilidade do tratamento de fraturamento hidráulico. Desta forma o procedimento que está sendo proposto visa efetuar a análise das causas da baixa produtividade, baseado em parâmetros relativos aos poços e reservatórios, sob a ótica de um engenheiro de petróleo. Assim, estes parâmetros seriam apresentados ao modelo que simularia o raciocínio lógico de um especialista ao analisá-los e promoveria uma quantificação da adequação do conjunto poço / formação à operação de fraturamento hidráulico, sem a necessidade da avaliação detalhada dos testes de crescimento de pressão pelo engenheiro.

Para identificar os poços candidatos as operações de fraturamento hidráulico foi efetuada uma classificação conforme um possível diagnóstico de um especialista que por ventura estivesse analisando o problema. Esta avaliação consiste em classificar os poços em quatro grupos conforme sua adequação ao fraturamento hidráulico. Cada grupo representa um valor da variável lingüística



que mede esta adequação. Foram estes valores definidos inicialmente como: **Excelente candidato** - os poços nos quais não se teriam dúvidas quanto a eficácia do tratamento, **Bom candidato** - aqueles poços em que o tratamento provavelmente seria recomendado, porém existem alguns fatores técnicos contrários ou possíveis restrições econômicas, **Possível candidato** - aqueles em que o número de restrições seriam significativas, porém um projeto específico poderia contornar estas restrições, com aplicações de técnicas especiais ou até mesmo experimentais. Contudo estes poços teriam uma prioridade muito baixa e **Não candidato** - situações em que existe um consenso quanto a não aplicabilidade da operação de fraturamento hidráulico.

Identificação das variáveis de entrada do modelo

Para isso, vários fatores devem ser considerados na seleção destes poços e formações. Estes fatores possuem tanto um caracter econômico, de forma a excluir os poços nos quais o tratamento não implicaria em um ganho significativo de receita, quanto técnico, visando descartar os poços onde a boa prática da engenharia de petróleo identifica dificuldades, riscos ou ausência de aplicabilidade do tratamento de fraturamento hidráulico. Foram identificados inicialmente os seguintes fatores que deveriam compor o processo de seleção:

- 1. nível de dano que a formação possui** - Obstruções que ocasionam perda de carga ao fluxo de fluidos, que podem ser ultrapassadas pelo fraturamento hidráulico;
- 2. saturação de água na formação** - Aponta o volume de fluidos sem interesse comercial da formação, quanto maior menor será a rentabilidade da operação;
- 3. porosidade da formação** - Volume de espaços vazios da rocha interconectados onde estão contidos os fluidos, quanto menor, menores as chances de conter hidrocarbonetos e menor será assim a rentabilidade da operação ;
- 4. espessura da formação e área de drenagem** - Inferem o volume do reservatório de petróleo, quanto maior, mais hidrocarbonetos devem ser encontrados ;
- 5. gradiente de pressão estática** - infere a energia contida no reservatório na forma de pressão, de nada vale melhorar as condições de fluxo em reservatórios já sem energia;
- 6. condições mecânicas do poço** - fatores técnicos que podem impedir a operação;
- 7. profundidade da formação** - fator técnico que pode dificultar a operação;
- 8. relação permeabilidade / viscosidade (mobilidade)** - Avalia a facilidade ao fluxo dos fluidos de um reservatório, permitindo uma análise técnica e econômica.



Estes fatores estão representando uma avaliação econômica, no que diz respeito a inferência do volume de óleo que pode ser recuperado da formação a ser estimulada e uma avaliação técnica, no que tange a recomendação dos procedimentos de engenharia para se efetuar ou não a operação. Uma das inovações propostas neste modelo é a forma do tratamento sugerido para a avaliação econômica. Apesar da existência de poucos estudos sobre a seleção de poços para operações de estimulação utilizando sistemas inteligentes, os que existem necessitam da utilização preliminar de redes neurais para efetuar a avaliação econômica como em Mohaghegh at al, 2000 e Mohaghegh at al, 1998. O mesmo autor utiliza também as redes neurais para o dimensionamento e projeto de tratamentos estimulação (Mohaghegh at al, 1999). Já o modelo proposto os aspectos econômicos e técnicos são tratados dentro do sistema de inferência fuzzy.

Elaboração das funções de pertinência das variáveis do modelo

Além de um levantamento bibliográfico sobre as implicações dos diversos fatores que compõem o processo de seleção de poços para as operações de fraturamento hidráulico, o conhecimento e experiência acumulados pelos engenheiros e especialistas também foi utilizado na elaboração das funções de pertinência dos conjuntos fuzzy complementando assim, a descrição das variáveis lingüísticas do modelo. Para esta caracterização foi suficiente a utilização de um tipo especial de números fuzzy, o número trapezoidal. Este número pode ser representado simbolicamente por: $A = (a,b,c,d)$, onde $a \leq b \leq c \leq d \in \mathfrak{R}$ e sua função de pertinência é:

$$f_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a; \\ (x-a)/(b-a) & \text{para } a \leq x \leq b; \\ 1 & \text{para } b \leq x \leq c; \\ (d-x)/(d-c) & \text{para } c \leq x \leq d; \\ 0 & \text{para } x \geq d. \end{cases}$$

Os números trapezoidais englobam os números triangulares, os intervalos clássicos descritos por uma distribuição uniforme e os valores precisos (figura 3). Existe uma limitação deste tipo número quando aplicado na representação de distribuições muito assimétricas ou multimodais. Contudo, foi considerado pelos especialistas entrevistados, que o fator importante na representação

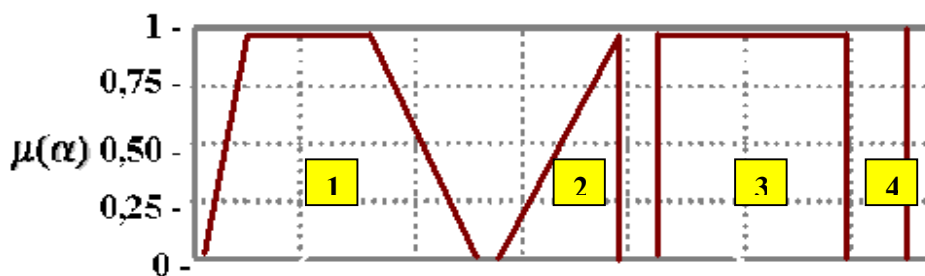


figura 2



de uma grandeza de reservatório de petróleo para sua aplicação no modelo de seleção de poços para o fraturamento hidráulico, seria a identificação do intervalo de validade e suas transições à direita e à esquerda, fazendo com que os números trapezoidais sejam plenamente adequados. Esta forma de representação para as características de reservatórios de petróleo também é recomendada por de Romeo, (1986).

Estabelecimento dos critérios de ranqueamento do poços

Para que um ranqueamento dos poços selecionados para a operação de fraturamento hidráulico possa ser efetuado, os classificadores que medem a adequação destes poços ao tratamento devem possuir valores numéricos pelo menos a nível ordinal. Assim, após o processo de agrupamento das regras fuzzy, acionadas pelos parâmetros de entrada fornecidos ao modelo, e sua posterior defuzificação, teremos como saída um valor numérico que explicitará esse grau de adequação.

Foi utilizado o sistema de inferência do tipo Sugeno, onde os atributos de saída são valores discretos e a intensidade da aplicação de cada regra define um percentual de saída deste valor discreto. A idéia foi inicializar estes valores numéricos de forma a distanciar a classe "Não Candidato" das demais ("Excelente Candidato", "Bom Candidato, "Possível Candidato), pois nessas em alguns casos, como possível candidato, o tratamento pode não ser prioritário, porém seria aplicável. Assim, o modelo foi inicializado com os seguintes valores discretos para a variável de saída do tipo Sugeno que mede a adequação do conjunto poço formação a operação de fraturamento hidráulico:

- Excelente candidato 1,0
- Bom candidato 0,5
- Possível candidato 0
- Não candidato -1,0

Resultados obtidos

O modelo foi submetido a situações com resultados já conhecidos para validação do processo de seleção de poços para a operação de fraturamento hidráulico. Assim, dados de poços que sabidamente não são candidatos e de poços que seriam excelentes candidatos foram processados pelo do sistema de inferência fuzzy e apresentaram resultados coerentes. O modelo foi robusto o suficiente para ranquear, dentre os poços que são candidatos, aqueles que apresentariam os melhores resultados.



O processo de validação utilizou-se de 8 poços, com os quatro primeiros apresentando boas perspectivas para a fraturamento e os demais quatro poços com classificações variadas desde não candidato até excelente candidato. Nos primeiros quatro poços procurou-se testar a capacidade de classificação do modelo quando exposto a poços que apresentaram bons resultados quando fraturados. O modelo, neste caso ordenou os poços priorizando os melhores resultados. Já para os demais quatro poços, o objetivo era testar a capacidade de seleção do modelo. A tabela 1 apresenta os resultados esperados para os oito poços. Nesta tabela pode-se observar para os primeiros quatro poços, a ordenação efetuada segundo o ganho de produção obtido no tratamento realizado.

poço	Expectativa	
poço 1	Excelente candidato	Primeiro
poço 2	Excelente candidato	Segundo
poço 3	Excelente candidato	Quarto
poço 4	Excelente candidato	Terceiro
poço 5	Possível candidato	
poço 6	Não é candidato	
poço 7	Bom candidato	
poço 8	Excelente candidato	

tabela 1

Os resultados apresentados pelo modelo estão na tabela 2, nela podemos observar uma total coerência com os resultados esperados apresentados na tabela 1. Conforme previsto, os poços 1 e 2 apresentaram os melhores resultados a partir do modelo, ficando os poços 4 e 3 classificados apenas como bons candidatos uma vez que estes apresentaram resultados inferiores aos dois primeiros, ou seja, apresentaram um menor incremento percentual no volume de produção se comparados com os poços classificados como excelentes. O poço número 5, classificado como possível pelos especialistas, também recebeu esta classificação no modelo, porém teria uma baixa expectativa de ser fraturado devido ao seu baixo escore, muito próximo de zero. A classificação dos poços 5, 6, 7 e 8, também foi totalmente coerente com o esperado conforme pode ser observado para o poço 6, para o qual não se recomenda a operação de fraturamento e foi obtido um escore negativo que confirma esta expectativa.



poço	resultado	avaliação
1	0.8026	Excelente
2	0.7278	Excelente
3	0.5657	Bom
4	0.6361	Bom
5	0.3385	Possível
6	-0.0145	não candidato
7	0.6430	Bom
8	0.9239	Excelente

tabela 2

Próximas etapas

O processo de testes e avaliações esta ainda em uma etapa inicial e terá prosseguimento com a avaliação de um número maior de poços em uma outra província petrolífera. Está também em estudo, a inclusão de novas variáveis ao modelo e, a partir de análises de sensibilidade, avaliar as possíveis melhoras no processo de seleção. Outra característica desejável para o modelo seria que o mesmo possuísse um procedimento que permitisse o ajuste automático de suas funções de pertinência, de forma a manter o sistema de inferência fuzzy sempre atualizado. Assim, a partir da finalização do processo de testes, está previsto o desenvolvimento uma sistemática que, utilizando os dados das operações de fraturamento hidráulico que fossem sendo realizadas, efetuasse os ajustes necessários no modelo.

Conclusão

O modelo de inferência fuzzy proposto é capaz de efetuar uma seleção de poços para a operação de fraturamento hidráulico baseado no mapeamento do conhecimento dos engenheiros responsáveis por esta operação, através de regras de produção e variáveis linguísticas. Nos testes iniciais o modelo foi capaz de selecionar os poços candidatos à operação efetuando uma priorização segundo os aspectos técnicos e econômicos. Com a continuidade dos testes utilizando dados de outras províncias petrolíferas e a avaliação de novos fatores que podem melhorar o processo de seleção, existe a expectativa que o modelo se torne mais robusto e eficiente e venha efetivamente atuar substituindo os especialistas nesta tarefa.



Referências

- Mohaghegh, S, Platon, V, e Ameri, S. (1998) - Candidate Selection for Stimulation of Gas Storage Wells Using Available Data with Neural Networks and Genetic Algorithms, Eastern Regional Meeting, Pittsburg, PA, November 1998, pp 9-13.
- Mohaghegh, S, Popa, A, e Ameri, S. (1999) - Intelligent Systems Can Design Optimum Fracturing Jobs, Eastern Regional Meeting, Charleston, WV, October 1999, pp 21-25.
- Mohaghegh, S, Reeves, S, e Hill, D. (2000) - Development of an Intelligent System Approach for Restimulation Candidate Selection, Gas Technology Symposium, Calgary, Canada, April 2000, pp 3-7.
- Romeu R. K. (1986), Projeto Lógico para um Banco de Dados de Reservatórios de Petróleo, Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 1986, Tese de Mestrado.
- Romeu R. K. (1988), Algoritmo de Crivo Difuso para Seleção de Reservatórios Candidatos a Métodos Especiais de Recuperação, Boletim Técnico da PETROBRAS, Vol. 31, n.1, jan/mar 1988, p. 1-81.
- Thomas J. E., et al. (2001) - Fundamentos de Engenharia de Petróleo, Interciência, Rio de Janeiro.
-