

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

MODELAGEM DE MEOR PARA POÇOS MADUROS NO RECÔNCAVO BAIANO

Nestor Maurício Teixeira Neto¹; Pablo Rodrigo Fica Piras²

1. Bolsista PIBIC/UEFS, Graduando do curso de bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: netaum_mgs@hotmail.com

2. Orientador, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: pafipi@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: MEOR, equação parabólica, diferenças finitas, colocação ortogonal

INTRODUÇÃO

O Recôncavo Baiano foi a primeira região de produção de petróleo no Brasil. Pelo mesmo motivo, é a que concentra mais poços que, após exauridos parcialmente, são considerados inviáveis para a recuperação secundária (FILHO *et alii*, 2006). O presente trabalho visa contribuir ao desenvolvimento de um bioprocessamento que permita reativar a produção de poços maduros, denominado MEOR, pela sua sigla em inglês (Microbial Enhanced Oil Recovery). Pelas características do sistema, confinado e hiperbárico, o estabelecimento de uma modelagem matemática e a pesquisa de métodos para a sua solução e uma etapas primordial deste desenvolvimento, visando um projeto seguro, apropriado e dimensionado visando a implantação de unidades de bancada que permita a determinação de parâmetros para o processo industrial. O leito poroso em que o óleo mineral está contido é reúne as características que o tornam local propício para o desenvolvimento de um processo catalisado por microorganismos. Este tipo de bioprocessamento pode-se demarcar inserido no corpo de conhecimentos dedicado ao estudo de biorreatores trifásicos, neste caso líquido-líquido-sólido. Do adequado equacionamento dos balanços de substratos, biomassa e produtos, ainda na literatura e foco do presente desenvolvimento, e da correta determinação dos parâmetros, poderá se dispor do modelo confiável para uma tecnologia promissora, visando o aumento da produção de petróleo em poços maduros, principalmente no estado da Bahia.

METODOLOGIA

Modelagem

Em um trabalho que modificou os anteriores dedicados ao assunto, introduzindo novos balanços, Desouky *et alii* (1996) propuseram que a modelagem de um sistema de recuperação terciária de petróleo mediante o aproveitamento do metabolismo microbiano consistisse em cinco balanços de conservação: 1) microorganismos (bactérias); 2) nutrientes; 3) metabolitos; 4) óleo; e 5) água.

$$\begin{aligned}
 1) \phi \frac{\partial}{\partial t} (\theta_w \rho_w C_{bw} + \theta_o \rho_o C_{bo} + \sigma_b \rho_r \theta_r) - \phi (u - k) (\theta_w \rho_w C_{bw} + \theta_o \rho_o C_{bo} + \sigma_b \rho_r \theta_r) = \\
 \phi \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta_w \rho_w D_{bw} \frac{\partial C_{bw}}{\partial x} + \theta_o \rho_o D_{bo} \frac{\partial C_{bo}}{\partial x} \right] - \phi k_m \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial C_n}{\partial x} \frac{1}{C_n} (\theta_w \rho_w C_{bw} + \theta_o \rho_o C_{bo}) \right] + \\
 \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial p}{\partial x} (\lambda_w \rho_w C_{bw} + \lambda_o \rho_o C_{bo}) \right] + \frac{q_w \rho_w C_{bw} + q_o \rho_o C_{bo}}{V_p} \\
 2) \phi \frac{\partial}{\partial t} (\theta_w \rho_w C_n) = \phi \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta_w \rho_w D_n \frac{\partial C_n}{\partial x} \right] - \phi N_{en} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial p}{\partial x} (C_n \rho_w \lambda_w) \right] + \frac{q_w \rho_w C_n}{V_p}
 \end{aligned}$$

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

$$3) \phi \frac{\partial}{\partial t} (\theta_w \rho_w C_{mw} + \theta_o \rho_o C_{mo} + \sigma_m \rho_r \theta_r) = \phi \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta_w \rho_w D_{mw} \frac{\partial C_{mw}}{\partial x} + \theta_o \rho_o D_{mo} \frac{\partial C_{mo}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial p}{\partial x} (\lambda_w \rho_w C_{mw} + \lambda_o \rho_o C_{mo}) \right] + \frac{(q_w \rho_w C_{mw} + q_o \rho_o C_{mo})}{V_p}$$

$$4) \phi \frac{\partial}{\partial t} (\theta_o \rho_o C_{oo}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial p}{\partial x} (\lambda_o \rho_o C_{oo}) \right] + \frac{q_o \rho_o C_{oo}}{V_p}$$

$$5) \phi \frac{\partial}{\partial t} (\theta_w \rho_w C_{ww}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial p}{\partial x} (\lambda_w \rho_w C_{ww}) \right] + \frac{q_w \rho_w C_{ww}}{V_p}$$

Tratam-se de balanços em equações diferenciais parciais, pois se considera um sistema em fluxo empistonado, onde as coordenadas relevantes são apenas a temporal e a de posição longitudinal ao longo do reservatório, entendido como um leito fixo poroso. No entanto, um sistema assim não fica completo sem as definições de restrições e correlações. A soma das frações correspondentes às fase oleosa, aquosa e de transição é um: $\theta_w + \theta_o + \theta_r = 1.0$; a soma de frações de componentes na fase aquosa é também igual a um: $C_{ww} + C_{bw} + C_{mw} + C_n = 1.0$; idêntico comportamento na fase oleosa: $C_{oo} + C_{bo} + C_{mo} = 1.0$; supõe-se que a fração porosa é completada por material biodegradável e bactérias: $\sigma_b + \sigma_m = 1.0$; destes dois termos, a adsorção de bactérias nas partículas de formação:

$$\sigma_b = \frac{Ac_{bw}}{1 + bC_{bw}}. \text{ Daqui em diante, começa a ficar em evidência que há necessidade de estimar}$$

alguns parâmetros, seja para ter noção de grandeza dos fenômenos, seja para calibrar o modelo. Por exemplo, tal é o caso dos metabólitos produzidos pelos microorganismos nas duas fases líquidas, aquosa e oleosa: $C_{mw} = (a_1 + b_1 t)C_{bw}$ e $C_{mo} = (a_2 + b_2 t)C_{bo}$. Pelas necessidades na modelagem, as curvas de produtos metabólicos podem ser escritas como equações do seguinte tipo: $C_{mw} = (\alpha + \beta \cdot t)C_{bw}$, onde os coeficientes α e β dependem do tipo de microorganismo que participa no bioprocessamento.

Colocação Ortogonal

A definição de ortogonalidade estabelece que duas funções $g_n(x)$ e $g_m(x)$ são ortogonais se cumprem com as duas seguintes condições (HOLLAND e LIAPIS, 1983):

$$\int_a^b W(x) g_n(x) g_m(x) dx = 0, \text{ para } (n \neq m) \text{ e } \int_a^b W(x) [g_n(x)]^2 dx > 0, \text{ para } (n = m). \text{ Há vários}$$

conjuntos de polinômios desenvolvidos, designados pelo nome do seu proponente original. Por exemplo, Legendre propõe a seguinte equação genérica recursiva:

$$L_n(x) = \left(\frac{2n-1}{n} \right) x L_{n-1}(x) - \left(\frac{n-1}{n} \right) L_{n-2}(x), \text{ com } n \geq 2. \text{ Nos outros valores de } n \text{ há valores}$$

pré-definidos: $L_0(x) = 1; L_1(x) = x; L_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1)$. Com equações desse tipo e a

quadratura de Gauss $\int_a^b W(x) f(x) dx \cong \sum_{i=0}^n w_i f(x_i)$, chega-se a algoritmos como o proposto

por Villadsen e Stewart (1967), denominados de colocação ortogonal, propostos para a

solução de problemas com valores de fronteira, particularmente freqüentes em problemas de fluxo viscoso, transferência de calor e difusão com reação química, como é o caso deste.

Diferenças finitas

Para equações diferenciais parabólicas como as que o modelo proposto contem, que podem ser generalizadas com uma do tipo $\frac{\partial u}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, divide-se o plano xt em uma grade com incrementos definidos: $\Delta t = k$ e $\Delta x = h$. Transformando (NIELSEN, 1956) em uma equação de diferenças: $k^{-2}[u(x, t+k) - u(x, t)] = c^2 h^{-2}[u(x+h, t) - 2u(x, t) + u(x-h, t)]$. Fazendo $c^2 k h^{-2} = r$, fica $u(x, t+k) = r[u(x+h, t) + u(x-h, t)] + (1-2r)u(x, t)$. Dessa expressão, dispondo de valores para $u(x-h, t)$, $u(x, t)$ e $u(x+h, t)$, ou seja, valores da variável dependente para três posições no mesmo tempo, calcula-se $u(x, t+k)$. Derivações similares aplicam-se à mesma equação em formato bidimensional, conhecida como a equação do calor: $\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$. Com derivações similares, chega-se à seguinte expressão:

$$T(x, y, t+k) = \frac{1}{4}[T(x+h, y, t) + T(x, y+h, t) + T(x-h, y, t) + T(x, y-h, t)],$$

válida para equações em derivadas parciais com duas coordenadas espaciais. Estas equações tem tido também soluções propostas por métodos gráficos (MICKLEY *et alii*, 1957).

FEMAP-NASTRAN

O pacote computacional FEMAP-NASTRAN[®] é utilizado para preparar modelos e visualização dos resultados das análises de engenharia para transferência de calor estrutural, e problemas de fluxo de fluido, incluindo modelagem para obter resultados lineares e não lineares de fadiga estrutural, deformação, análise modal, térmicas, de transferência de calor, impacto, colisão, fluxo de fluido, multifísica, elasticidade aero, otimização, dinâmica de rotores e outros problemas de engenharia.

Para o presente trabalho foram criadas superfícies no próprio programa simulando dutos com dimensões que podem ser especificadas pelo usuário simulando como poderiam se apresentar numa situação real, preenchido parcialmente com o fluido do petróleo.

Para fenômenos de transferência de calor, basta impor uma carga constante de calor à superfície criada durante seu resfriamento, com uniforme convecção. Então, analisa-se o modelo executando FEMAP e observando o estado de equilíbrio das temperaturas no nó em estudo no arquivo de saída. Para isto, os passos são os seguintes: 1) criar uma superfície, 2) escolher um material, 3) inserir valores de propriedades, 4) inserir ajustes à superfície, 5) aplicar cargas de calor, 6) executar o FEMAP e 7) analisar os resultados que aparecerão no citado arquivo de saída.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

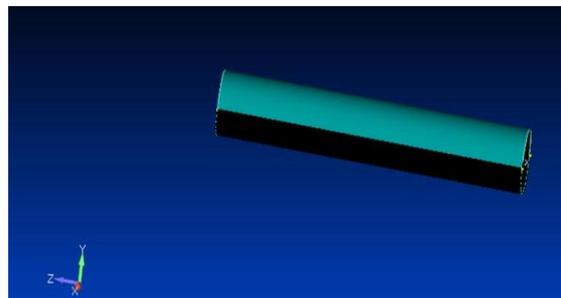
A utilização do programa FEMAP-NASTRAN[®], que utiliza o método de diferenças finitas na solução de equações diferenciais parciais, reduziu-se à

incorporação de modelos geométricos na sintaxe do programa. Não foram incorporadas equações de balanço para a solução do sistema de crescimento de

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

microorganismos para o escoamento de petróleo em formações nas quais a extração secundária não é mais

econômica.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora notavelmente avançado na modelagem, a imprevista falta da licença do programa ocasionou a impossibilidade de usufruir dele, no nível esperado de um problema como o presente. Embora notavelmente avançado na modelagem, a imprevista falta da licença do programa ocasionou a impossibilidade de usufruir dele, no nível esperado de um problema como o presente. Os resultados mais relevantes consistem na modelagem do sistema em cinco balanços materiais com variáveis independentes tempo e posição e na abordagem em duas vertentes de solução (colocação ortogonal e elementos finitos). O trabalho fica assim em condições de ser continuado, para a consecução completa dos objetivos propostos.

REFERÊNCIAS

- Babadagli T. 2007. Development of mature oil fields - A review. *J Petrol Sci Engng* **57**:221–46.
- Banat I M. 1995. Biosurfactants production and possible uses in microbial enhanced oil recovery and oil pollution remediation: a review. *Biores Technol* **51**:1-12.
- Desouky S M, Abdel-Daim M M, Sayyoush M H, Dahab A S. 1996. Modelling and laboratory investigation of microbial enhanced oil recovery. *J Petrol Sci Engng* **15**:309–20.
- Filho P A P, Santos F L S, Mansoori G A. 2006. An update on the developments in petroleum production research in Brazil. *J Petrol Sci Engng* **51**:1–5.
- Holland C D, Liapis A I. 1983. *Computer methods for solving dynamic separation problems*. McGraw-Hill Book Co. 475 pp.
- Kelessidis V C, Maglione R, Tsamantaki C, Aspirtakis Y. 2006. Optimal determination of rheological parameters for Herschel–Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling. *J Petrol Sci Engng* **53**:203–24.
- Mickley H S, Sherwood T K, Reed C E. 1957. *Applied mathematics in chemical engineering*. McGraw-Hill Book Co. 413 pp.
- Montel F, Bickert J, Lagisquet A, Galliéro G. 2007. Initial state of petroleum reservoirs: A comprehensive approach. *J Petrol Sci Engng* **58**:391–402.
- MSC Software. 2006. *MSC.Nastran 2005 r2 Release Guide Addendum*. Santa Ana, California, USA, 66 pp.
- Network Analysis. 2004. *Building your first models in FEMAP*. 3rd ed., Lindbergh Way, Chandler, Arizona, USA, 45 pp.
- Nielsen K L. 1956. *Methods in numerical analysis*. Macmillan Co. New York. 282 pp.
- Pessoa Filho P A, Santos F L S, Mansoori G A. 2006. An update on the developments in petroleum production research in Brazil. *J Petrol Sci Engng* **51**:1–5.
- Sen R. 2008. Biotechnology in petroleum recovery: the microbial EOR. *Prog Energy Combust Sci* **34**:714-24.

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

- Tharanivasan A K, Yang C, Gu Y. 2004. Comparison of three different interface mass transfer models used in the experimental measurement of solvent diffusivity in heavy oil. *J Petrol Sci Engng* **44**:269–82.
- Villadsen J V, Stewart W E. 1967. Solution of boundary-value problems by orthogonal collocation. *Chem Engng Sci* **22**:1483-501.
- Yakimov M M, Amro M M, Bock M, Boseker K, Fredrickson H L, Kessel D G, Timmis K N. 1997. The potential of *Bacillus licheniformis* strains for in situ enhanced oil recovery. *J Petrol Sci Engng* **18**:147-60.