



II CREEM
CONGRESSO
REGIONAL DE
ESTUDANTES DE
ENGENHARIA
MECÂNICA

**UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO**

**21 A 25 DE AGOSTO
1995**

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO EM BACIAS PETROLÍFERAS

Jederson Angelo de Cesaro
Manoel de Queiróz Córdova Santos
Marcos Omoto
Mauricio Berto
SINMEC - Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e
Transferência de Calor
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC
Campus Universitário - Trindade
CEP 88040 - 900 - Florianópolis - SC

Orientadores: Adalberto Romalino Cunha (Mestrando)
Clóvis Raimundo Maliska, Phd.
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC

SUMÁRIO

Neste trabalho, são apresentados aspectos de uma metodologia numérica para a determinação do campo de pressões e saturações no interior de uma jazida petrolífera, considerando o escoamento como sendo bifásico (2 fases: petróleo e água). Faz-se uma descrição sucinta das etapas necessárias para a simulação numérica das bacias petrolíferas. É utilizado o modelo Black-oil para a representação do escoamento na jazida. Utiliza-se o Método dos Volumes Finitos para a discretização das equações governantes. Como as bacias petrolíferas apresentam formas irregulares, verifica-se a necessidade do uso de coordenadas generalizadas que permitem a simulação numérica em bacias de geometria arbitrária.

1. INTRODUÇÃO

Quando se começa a explorar uma bacia petrolífera, as pressões existentes no interior da jazida são altas e suficientes para que a produção nos poços inicialmente se realize sem nenhum esforço adicional. Desse modo, a exploração da jazida é conseguida sem a necessidade de injeção de outros fluidos na bacia. Este tipo de recuperação é conhecida como Recuperação Primária e normalmente obtém de 15 a 30 % do óleo disponível da bacia. No entanto, com o decorrer da produção, a pressão diminui, o que resulta no decaimento do volume extraído do petróleo. Portanto, observa-se que a presença de apenas poços produtores, que retiram óleo da jazida, é insuficiente para um aproveitamento satisfatório. Um dos métodos utilizados para melhorar a produção consiste na instalação de poços que injetam

substâncias em locais convenientemente localizados da bacia, aumentando a produção nos outros poços devido à elevação da pressão no interior da jazida. A injeção de substâncias também serve para deslocar o óleo em direção aos poços produtores. Este processo de recuperação é conhecido como Recuperação Secundária e pode recuperar até 50% do óleo da jazida.

A fim de se obter a melhor localização para os poços injetores e obter informações importantes como vida útil da bacia, capacidade de produção, etc., são utilizados os métodos numéricos para a simulação do escoamento na jazida. Para a engenharia do petróleo, os métodos numéricos se apresentam de grande importância, pois a predição das questões de interesse apenas por métodos experimentais ou analíticos é bastante limitada. Corrobora para a importância da simulação numérica, o alto custo envolvido com as instalações de exploração do petróleo.

O modelo utilizado é o modelo Black-Oil considerando as fases óleo e água. Este modelo assume condições isotérmicas para a bacia e considera a água e o óleo como imiscíveis entre si.

Utiliza-se o Método dos Volumes Finitos para a discretização das equações governantes. Algumas das vantagens deste método são a obediência às condições de conservação mesmo utilizando malhas não refinadas e a maior facilidade de interpretação física dos termos provenientes da discretização (Patankar, 1980).

As jazidas petrolíferas apresentam formas irregulares o que faz com que seja necessário o uso de um sistema de coordenadas flexível que se adapte à geometria da bacia a ser analisada. Nestetrabalho, é utilizado um sistema de coordenadas generalizadas que além de permitir a discretização de jazidas de formas arbitrárias, permite uma boa representação das falhas geológicas (regiões impermeáveis dentro da bacia).

2. ETAPAS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

Pode-se dividir a simulação numérica de reservatórios petrolíferos em quatro etapas principais. Este trabalho trata especificamente da terceira etapa onde as equações governantes são discretizadas, implementadas e resolvidas. Etapas principais:

1) Levantamento das informações da bacia petrolífera analisada. São obtidas informações como dimensões e geometria da jazida, caracterização das falhas geológicas existentes, porosidade, informações à respeito das propriedades do óleo, pressão e saturações iniciais, etc.

2) Com as informações geométricas da bacia, realiza-se a discretização do domínio físico, ou seja, o domínio de interesse é dividido em vários volumes (células) discretos. Esta tarefa pode ser executada por um programa gerador de malhas como o GERMAL.

3) A partir da discretização obtida na etapa anterior mais os dados sobre as características e propriedades do fluido injetado, do óleo e da jazida, pode-se então iniciar o processo de determinação das variáveis de interesse onde se utiliza o programa simulador (SIRP-3D) no qual as equações discretizadas são implementadas.

4) Com os dados e informações obtidas no simulador, pode-se proceder a análise dos resultados e determinar informações como vida útil do reservatório e capacidade de produção . A fim de agilizar a interpretação e a visualização dos dados, podem ser utilizados programas de visualização como o ISO-3D.

3. MODELO MATEMÁTICO

Realizando um balanço para a conservação da massa para as fases água e óleo e não considerando os efeitos gravitacionais e da pressão capilar, obtém-se a seguintes equação para a fase água:

$$\nabla \cdot [\nabla \lambda_w P] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \frac{S_w}{B_w} \right] + q_w \quad (1)$$

Onde as incógnitas são P (pressão) e S (saturação). A porosidade é representada por ϕ e o termo fonte por q_a . A equação para a fase óleo é similar à da água. B representa o fator formação de volume.

A equação de restrição para este caso bifásico fica :

$$S_w + S_o = 1 \quad (2)$$

A mobilidade de cada fase é dada por:

$$\lambda_a = \frac{k \cdot k_{r,a}}{B_a \cdot \mu_a} \quad (3)$$

Onde K e K_r são as permeabilidades absoluta e relativa respectivamente. μ representa a viscosidade do fluido.

Escrevendo a Eq.(1) ou a Eq.(2) em um sistema de coordenadas generalizadas (ξ, η, γ) , obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \frac{S_a}{S_a} \right] + \frac{q_a}{J} = & \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_{1a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{2a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{3a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D_{4a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{5a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{6a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[D_{7a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{8a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{9a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Os coeficientes D e as métricas da transformação podem ser encontrados em (Maliska, 1993)

4. EQUAÇÕES APROXIMADAS

Integrando a Eq.(4) no tempo e no espaço, obtém-se:

$$\frac{\Delta V}{J \Delta t} \left[\left(\phi \frac{S_a}{B_a} \right) - \left(\phi \frac{S_a}{B_a} \right)^0 \right] + \frac{q_a \Delta V}{J} =$$

$$\left[D_{1a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{2a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{3a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right]_e \Delta \eta \Delta \gamma - \left[D_{1a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{2a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{3a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right]_w \Delta \eta \Delta \gamma +$$

$$\left[D_{4a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{5a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{6a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right]_e \Delta \xi \Delta \gamma - \left[D_{4a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{5a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{6a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right]_w \Delta \xi \Delta \gamma +$$

$$\left[D_{7a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{8a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{9a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right]_e \Delta \xi \Delta \eta - \left[D_{7a} \frac{\partial P}{\partial \xi} + D_{8a} \frac{\partial P}{\partial \eta} + D_{9a} \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right]_w \Delta \xi \Delta \eta$$

(5)

As derivadas são aproximadas numericamente usando diferenças centrais e a equação final discretizada fica:

$$\frac{\Delta V}{J \Delta t} \left[\left(\phi \frac{S_a}{B_a} \right) - \left(\phi \frac{S_a}{B_a} \right)^0 \right] + \frac{q_a \Delta V}{J} = -A_p^a P_p + \sum A_{NB}^a P_{NB}$$

(6)

A equação final para a pressão é obtida somando as saturações da água e do óleo na Eq. 3. Equação resultante:

$$A_p P_p = \sum A_{NB} P_{NB} + S^*$$

(7)

Os coeficientes podem ser encontrados em (Maliska, 1993) Para a solução do sistema de equações algébricas resultante, são utilizados os métodos ADI ou Gauss-Seidel. O procedimento iterativo utilizado é o IMPES.

5. RESULTADOS

São mostrados abaixo alguns resultados obtidos na simulação de uma bacia petrolífera. O domínio é tridimensional e não foram considerados o efeito da gravidade e da pressão capilar. Os resultados foram obtidos pelo programa SIRP-3D e visualizados pelo programa ISO-3D.

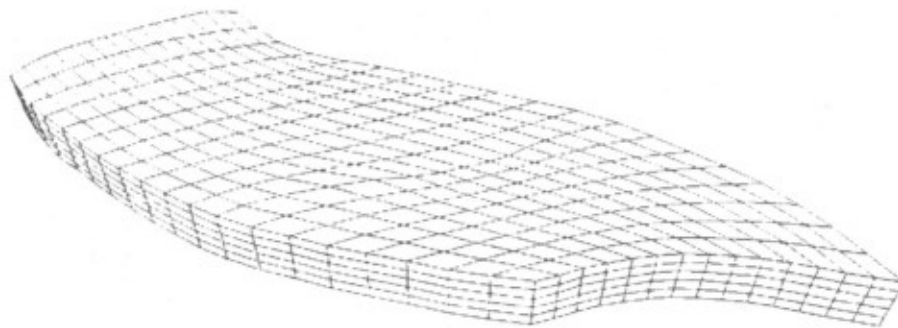


Fig 5.1 - Discretização de uma jazida tridimensional de formato irregular. 1330 volumes (19 X 14 X 5).

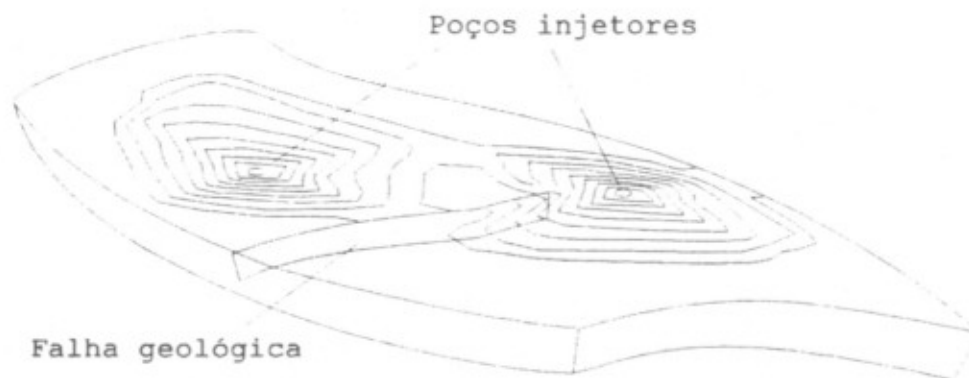


Fig 5.2 - Linhas de iso-saturação para VPI (volume poroso injetado) de 10%. $VPI = (\text{volume injetado na bacia} / \text{volume de vazio na bacia})$

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou alguns aspectos da simulação numérica de reservatórios de petróleo usando o método dos volumes finitos em coordenadas generalizadas. O uso de coordenadas generalizadas possibilita uma maior flexibilidade ao método pois bacias de formas arbitrárias podem ser discretizadas e simuladas sem os problemas decorrentes do uso de malhas cartesianas. Uma outra vantagem é que as falhas geológicas podem ser consideradas na discretização sem maiores dificuldades tanto em casos bidimensionais quanto tridimensionais.

Está em desenvolvimento a implementação dos efeitos da gravidade e da pressão capilar no programa SIRP-3D.

7. REFERÊNCIAS

- [1] CUNHA, A. R., MALISKA, C. R., SILVA, A. F. C. e LIVRAMENTO, M. A., "Two Dimensional Two-Phase Petroleum Reservoir Simulation Using Boundary-Fitted Grids", Submetido ao V ENCIT, São Paulo, 1994.
- [2] MALISKA, C. R., SILVA, A. F. C., CUNHA, A. R. e LIVRAMENTO M. A., "Desenvolvimento de um simulador 3D Black-Oil em Coordenadas Curvilíneas Generalizadas", Relatório preparado para o CENPES/PETROBRÁS S.A., parte II, Dezembro, 1993.
- [3] MALISKA, C. R., "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional - Coordenadas Generalizadas", Apostila, EMC-UFSC, Florianópolis, 1994.
- [4] MALISKA, C. R., CUNHA, A. R., LIVRAMENTO M. A., SILVA, A. F. C., "Tridimensional Petroleum Reservoir Simulation Using Generalized Curvilinear Grids", Submetido ao V ENCIT, São Paulo, 1994.
- [5] PATANKAR, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing, 1980.
- [6] CUNHA, A. R., CZESNAT A. O., "Manual do GERMAL", 1995.
- [7] SIRP3D - Manual do usuário.
- [8] MALISKA Jr., C. R., DIHLMANN, A., "ISO-3D - Visualizador Tridimensional para Campos Escalares e Vetoriais", Anais do XIII Cilamce, pp. 354-363, Porto Alegre-RS, 1992.