

**SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS COM FLUXO MONOFÁSICO IMISCÍVEL
UTILIZANDO-SE DO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS BASEADO EM
ELEMENTOS**

Lucas de Souza da Costa, Antonio Marinho Barbosa Neto

INTRODUÇÃO

A simulação numérica de reservatórios de petróleo é uma ferramenta essencial para a engenharia de reservatórios, permitindo prever o comportamento do escoamento e apoiar decisões estratégicas. Contudo, trata-se de um problema desafiador, pois o escoamento em meios porosos é descrito por equações diferenciais parciais não lineares, com coeficientes que variam no espaço e no tempo. A variação de propriedades termofísicas, como viscosidade e massa específica em função da pressão, adiciona complexidade à modelagem, exigindo esquemas numéricos robustos e capazes de lidar com geometrias complexas (RIBEIRO, 2016). Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um simulador numérico em Python, baseado no Método dos Volumes Finitos Baseado em Elementos (EbFVM) implementado na biblioteca PyEFVLib (MALISKA et al., 2008), voltado à análise do campo de pressão e velocidade do fluido em reservatórios. O diferencial da abordagem está na inclusão de propriedades dependentes da pressão, tornando a simulação mais realista. Ademais, a formulação EbFVM tem se mostrado promissora por reduzir efeitos numéricos indesejados, como a dependência da solução em relação à malha, ampliando a flexibilidade em simulações complexas (HURTADO et al., 2005).

DESENVOLVIMENTO

A formulação inicial do simulador considerou propriedades constantes do fluido, servindo como etapa de validação da metodologia. O campo de pressão foi obtido a partir da equação de difusividade hidráulica, e o gradiente de pressão, estimado pelo método de Green-Gauss (RIBEIRO, 2016), serviu como base para a aplicação da Lei de Darcy na determinação do campo de velocidades. Essa etapa permitiu verificar a consistência física do modelo e ajustar pontos cruciais, como a correta definição das condições de contorno impermeáveis e a orientação dos vetores normais nas faces dos elementos, fundamentais para o cálculo do gradiente. Na sequência, o simulador foi aprimorado para incorporar propriedades dependentes da pressão, em particular a viscosidade e a massa específica, calculadas dinamicamente em cada nó da malha a cada passo de tempo por meio da biblioteca termodinâmica CoolProp. Para o dióxido de carbono (CO₂), a CoolProp adota a equação de estado de Span & Wagner (1996). Essa evolução exigiu a reformulação da equação da difusividade hidráulica, resultando em uma nova discretização, na qual as propriedades passam a ser tratadas como variáveis no tempo e no espaço. A consequência direta dessa modificação foi a introdução de não linearidade na equação governante, aspecto também discutido por Hurtado (2005) em seu estudo sobre formulações baseadas em elementos para escoamento em meios porosos, tornando necessária a utilização de métodos de solução de sistemas não lineares, como o método de Newton, para a solução do sistema. Essa mudança trouxe desafios adicionais de convergência, estabilidade e custo computacional, os quais foram tratados com estratégias adequadas de discretização e controle de tolerância numérica.

RESULTADOS

O simulador de escoamento em um meio poroso isotrópico demonstrou robustez em duas formulações: uma com propriedades constantes e outra com propriedades variáveis. O caso de

estudo consistiu em um reservatório de petróleo quadrangular com 2 metros de comprimento e com fronteiras impermeáveis, incluindo um poço injetor com uma vazão prescrita de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ e um produtor com pressão prescrita de 50 bar, o que permitiu uma avaliação realista da redistribuição de pressão e do comportamento do escoamento. Na formulação com propriedades constantes, o campo de pressão apresentou distribuição estável e coerente com as condições de contorno (fronteiras impermeáveis e poços com vazão e pressão prescritas), servindo como etapa de validação. Esse resultado pode ser observado na Figura 1, onde a diferença de pressão entre os poços gera uma distribuição previsível, reforçando a consistência do modelo. Com a inclusão de propriedades dependentes da pressão, a dinâmica do escoamento tornou-se mais complexa: pressão e velocidade variaram significativamente, e o campo de velocidades deixou de ser uniforme, apresentando intensidades distintas próximas aos poços. Na Figura 2, esse comportamento reflete a não linearidade introduzida pelas propriedades variáveis, também discutida em estudos sobre a aplicação do EbFVM em reservatórios (HURTADO et al., 2005). Mesmo com maior custo computacional, o modelo final apresentou convergência estável e soluções fisicamente consistentes, mostrando-se adequado para análises mais realistas do escoamento de CO₂ em meios porosos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O simulador desenvolvido evoluiu de um modelo simplificado para uma formulação mais realista, incorporando propriedades dependentes da pressão e uma nova discretização da equação da difusividade hidráulica. O uso do EbFVM demonstrou robustez na análise do campo de pressão em meios porosos e estabeleceu uma base sólida para futuras melhorias. Dessa forma, o trabalho contribui com uma ferramenta numérica consistente, de relevância tanto para a pesquisa acadêmica quanto para aplicações práticas na engenharia de petróleo.

Palavras-chave: simulação numérica; fluxo monofásico; escoamento em meios porosos; volumes finitos; propriedades termodinâmicas.

ILUSTRAÇÕES

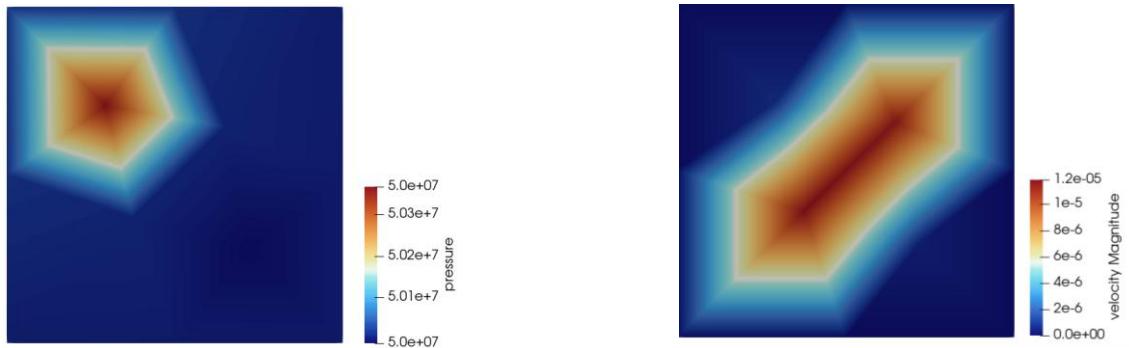


Figura 1. Campo de Pressão em $t = 0s$.
 $t=0s$.

Figura 2. Campo de Velocidade em

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HURTADO, F. S. V. Uma formulação de volumes finitos baseada em elementos para a simulação do deslocamento bifásico imiscível em meios porosos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

HURTADO, F. S. V.; MALISKA, C. R.; PHILIPPI, P. C. An element-based finite volume formulation for reservoir simulation. In: XXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2005, Guarapari, 2005.

MALISKA, C. R.; SILVA, A. F. C.; HURTADO, F. S. V.; DONATTI, C. N.; PESCADOR JR., A. V. B. Desenvolvimento e implementação da biblioteca EFVLib. Relatório técnico SINMEC/SIGER I-03, Parte 1. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

RIBEIRO, G. G. Volumes Finitos Baseado em Elementos para Problemas de Poroelasticidade. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Lucas de Souza da Costa

MODALIDADE DE BOLSA: PROBIC-AF/UDESC (IC)

VIGÊNCIA: 01/09/2024 a 31/08/2025 – Total: 12 meses

ORIENTADOR: Antonio Marinho Barbosa Neto

CENTRO DE ENSINO: CESFI

DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia de Petróleo

ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharias / Engenharia Mecânica / Fenômenos de Transporte

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Análise Integrada de Sistemas de Produção de Petróleo.

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP3420-2020