DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE RESERVATÓRIO BIFÁSICO IMISCÍVEL UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS BASEADO EM ELEMENTOS

Lucas de Souza da Costa, Antonio Marinho Barbosa Neto, Gustavo Gondran Ribeiro

INTRODUÇÃO

A simulação de reservatórios permite representar o escoamento de fluidos em meios porosos e prever a evolução da pressão, da saturação e da produção ao longo do tempo, fornecendo subsídios para o planejamento e a avaliação de estratégias de recuperação de petróleo. Para isso, os modelos numéricos precisam descrever a interação entre as propriedades da rocha e dos fluidos, as condições de operação dos poços e a distribuição das fases no reservatório. No escoamento bifásico água–óleo, essa interação se manifesta pelo acoplamento entre pressão e saturação: enquanto o gradiente de pressão conduz o movimento dos fluidos, a distribuição das fases modifica suas mobilidades e, consequentemente, o próprio campo de pressão. A representação desse comportamento em domínios de geometria irregular requer uma discretização que associe conservação de massa e flexibilidade geométrica. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um simulador bidimensional para o escoamento bifásico imiscível água–óleo, utilizando o Método de Volumes Finitos Baseado em Elementos (EbFVM) em malhas não estruturadas. A implementação foi inicialmente verificada por comparação com soluções analíticas e, posteriormente, aplicada a um reservatório com um poço injetor e um produtor, incorporando a dependência das propriedades dos fluidos em relação à pressão.

DESENVOLVIMENTO

O modelo descreve o escoamento isotérmico de duas fases imiscíveis por meio das equações de pressão e saturação de água, desprezando os efeitos gravitacionais e a pressão capilar. A discretização espacial foi realizada pelo EbFVM, conforme a abordagem descrita por Maliska (2004), construindo volumes de controle ao redor dos vértices de uma malha triangular. Essa organização permite estabelecer os balanços locais de conservação e representar geometrias irregulares, tendo sido implementada em Python com o auxílio da biblioteca PyEFVLib. Para resolver o acoplamento entre as equações, empregou-se a estratégia IMPES, na qual a pressão é calculada implicitamente e a saturação é atualizada explicitamente. A discretização e a atualização temporal da equação de saturação foram implementadas conforme a formulação apresentada por Hurtado (2005). Em cada etapa, as permeabilidades relativas são determinadas a partir da saturação pelo modelo de Corey (1954) e utilizadas, juntamente com as viscosidades, no cálculo das mobilidades das fases. Essas mobilidades entram na equação de pressão, cuja solução fornece as velocidades necessárias à atualização da saturação. O transporte nas faces dos volumes de controle é avaliado por interpolação *upwind*, considerando o sentido local do escoamento. A implementação foi inicialmente comparada com as soluções de Buckley e Leverett (1942) e de deslocamento do tipo pistão, utilizando propriedades constantes e malhas progressivamente refinadas. Essa etapa permitiu avaliar a propagação das frentes de saturação antes da aplicação ao reservatório, representado por um domínio irregular com refinamento próximo aos poços e contornos externos impermeáveis. Nesse caso, a injeção ocorreu com vazão prescrita, enquanto a produção foi controlada pela pressão de fundo por meio do modelo de Peaceman (1978). Na aplicação ao reservatório, o óleo foi representado de forma simplificada pelo *n*-decano. Mantendo a temperatura constante, as massas específicas e viscosidades da água e do *n*-decano foram atualizadas em função da pressão local por meio do CoolProp (Bell et al., 2014). Dessa forma, as alterações no campo de pressão passaram a influenciar também as propriedades empregadas no cálculo do escoamento.

RESULTADOS

As comparações com as soluções analíticas mostraram que o simulador acompanhou a propagação das frentes de deslocamento nos dois casos avaliados. Os perfis numéricos se aproximaram das soluções de referência à medida que a malha foi refinada, reduzindo a suavização das frentes causada pela difusão numérica associada à interpolação *upwind*. Esse comportamento foi observado tanto na solução de Buckley–Leverett quanto no deslocamento do tipo pistão, evidenciando a importância do refinamento espacial para representar mudanças abruptas de saturação. Após essa verificação, a aplicação ao reservatório permitiu investigar a evolução da distribuição dos fluidos entre os poços. No primeiro passo de tempo, apresentado na Figura 1, a saturação de água permanece próxima ao valor inicial na maior parte do domínio, pois a injeção ainda não promoveu um deslocamento significativo do óleo. Com a continuidade da injeção, o gradiente de pressão conduz a água em direção ao produtor, enquanto as alterações de saturação modificam as mobilidades das fases e a distribuição do escoamento. O efeito acumulado desse processo é observado na Figura 2, correspondente ao último passo de tempo, após aproximadamente 1.000 dias. Em comparação com a Figura 1, identifica-se uma região de maior saturação de água que se estende do injetor até as proximidades do produtor, embora parte do domínio permaneça com saturação próxima à inicial. Essa distribuição evidencia um deslocamento não uniforme, condicionado pela geometria do reservatório, pelos contornos impermeáveis e pelo campo de pressão. A evolução da saturação refletiu-se no histórico de produção. Inicialmente, o fluido produzido foi predominantemente óleo, mas, por volta de 700 dias, a fração de água atingiu o critério de 1% adotado para identificar sua chegada ao produtor. A partir desse momento, a produção de água aumentou e a de óleo diminuiu, até que, no último passo de tempo, a água correspondeu a cerca de 67% da vazão produzida. Esse resultado é coerente com a presença de água na região do produtor observada na Figura 2.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O simulador desenvolvido permitiu representar o deslocamento bifásico imiscível em malhas não estruturadas e relacionar a evolução da pressão e da saturação ao comportamento da produção. A comparação com soluções analíticas evidenciou a redução da difusão numérica com o refinamento espacial, enquanto a aplicação ao reservatório demonstrou a integração de propriedades dependentes da pressão à estratégia EbFVM/IMPES. Os resultados sustentam o uso da implementação para investigar o escoamento entre poços dentro das hipóteses adotadas, permanecendo como limitações a ausência de gravidade e capilaridade e a representação simplificada do óleo pelo *n*-decano. Os campos de saturação obtidos serão integrados a um simulador de propagação de ondas elásticas, permitindo relacionar a distribuição dos fluidos à resposta das ondas e contribuir para a caracterização de reservatórios saturados por diferentes fluidos.

Palavras-chave: simulação de reservatórios; escoamento bifásico; volumes finitos; malhas não estruturadas.

ANEXOS

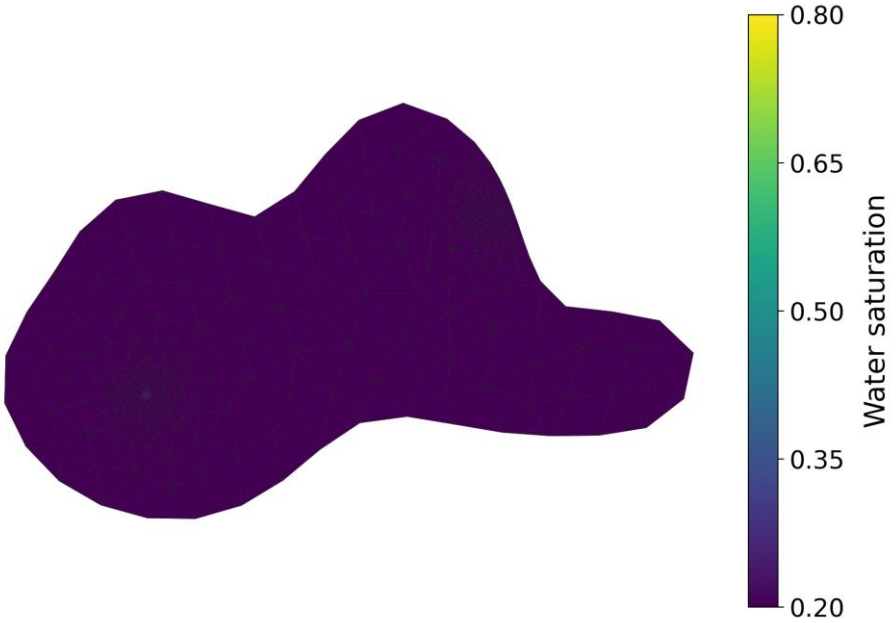


Figura 1. *Campo de saturação da água no tempo inicial da simulação..*

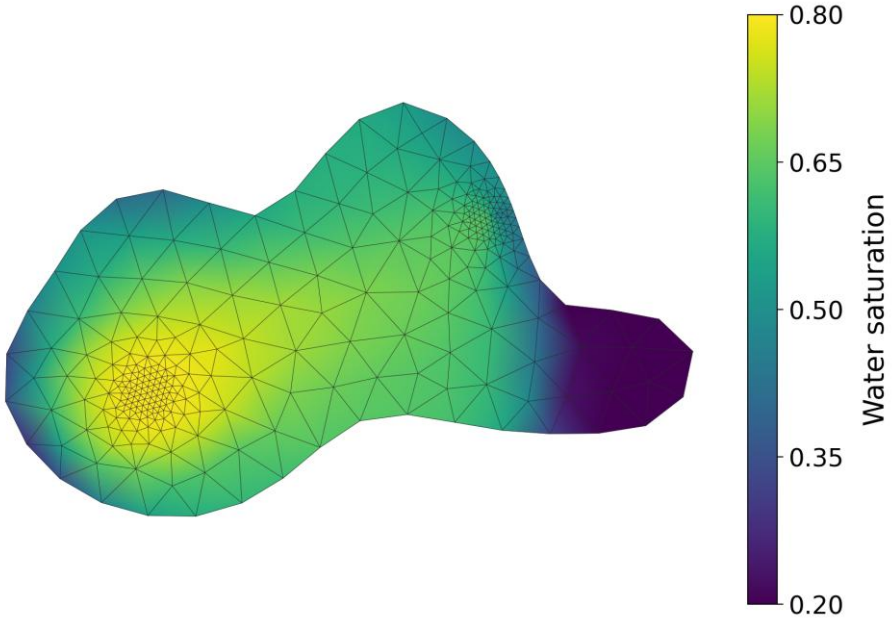


Figura 2. *Campo de saturação da água após 1000 dias de simulação*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELL, I. H. et al. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 6, p. 2498–2508, 2014.

BUCKLEY, S. E.; LEVERETT, M. C. Mechanism of fluid displacement in sands. **Transactions of the AIME**, v. 146, n. 1, p. 107–116, 1942.

COREY, A. T. The interrelation between gas and oil relative permeabilities. **Producers Monthly**, v. 19, n. 1, p. 38–41, 1954.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

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

PEACEMAN, D. W. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation. **Society of Petroleum Engineers Journal**, v. 18, n. 3, p. 183–194, 1978. DOI: 10.2118/6893-PA.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Lucas de Souza da Costa

MODALIDADE DE BOLSA: PROIP/UDESC (IC)

VIGÊNCIA: 01/10/2025 a 31/09/2026 – Total: 12 meses

ORIENTADOR: Gustavo Gondran Ribeiro

CENTRO DE ENSINO: CESFI

DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia de Petróleo

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

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Modelagem da propagação de ondas acústicas e elásticas em meios heterogêneos através do Método dos Volumes Finitos Baseado em Elementos

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: PVFI258-2025