



ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS COM ESPUMA PARA RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO

Berilo de Oliveira Santos¹ - berilo.santos@engenharia.ufjf.br

Iury Igreja^{1,2} - iuryigreja@ice.ufjf.br

Filipe Fernandes de Paula¹ - filipe.paula@engenharia.ufjf.br

Grigori Chapiro^{1,3} - grigori.chapiro@ufjf.br

Rodrigo Weber dos Santos^{1,2} - rodrigo.weber@ice.ufjf.br

Bernardo Martins Rocha^{1,2} - bernardomartinsrocha@ice.ufjf.br

¹Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

²Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

³Departamento de Matemática, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

Resumo. A engenharia de petróleo evoluiu muito com o passar do tempo visando aumentar a eficiência da recuperação de óleo. Um método que vem sendo muito estudado para recuperação avançada de petróleo é a injeção de espuma no meio poroso, a qual possibilita uma varredura mais uniforme do reservatório através da redução da mobilidade do gás e, por consequência, resulta em uma maior produção de petróleo. Nesse contexto, modelos matemáticos têm sido amplamente utilizados para realizar previsões e estudos de como otimizar a produção. Logo, é importante estudar e entender claramente a influência de cada parâmetro do modelo matemático sobre o escoamento. Para isso, técnicas de Análise de Sensibilidade (AS) têm sido amplamente utilizadas pois estas permitem uma compreensão do grau de influência dos parâmetros de entrada do modelo sobre os resultados gerados por ele. Este trabalho consiste na aplicação de análise de sensibilidade para simulações computacionais de escoamento bifásico de água e gás na presença de espuma para um caso baseado em escala de laboratório usando dados experimentais obtidos em amostras de rocha. O conjunto de resultados permitiu quantificar e entender a influência de cada parâmetro de entrada sobre as Quantidades de Interesse (QdIs) escolhidas a cada instante de tempo da simulação.

Palavras-chave: Recuperação avançada de petróleo, Análise de sensibilidade, Escoamento Bifásico, Injeção de Espumas, Meios porosos.

1. INTRODUÇÃO

A recuperação de petróleo visa o aumento de eficiência de recuperação de um campo, uma vez que ainda há uma demanda crescente de energia nas próximas décadas, e óleo ainda fará parte da matriz energética.

Os métodos convencionais de extração têm a sua eficiência limitada drasticamente por fenômenos físicos intrínsecos ao processo, com isso não é possível ter um bom aproveitamento do reservatório por se tornar impossível extrair parte expressiva do óleo ali contido. Com o passar do tempo, os métodos de extração foram evoluindo, sobretudo mais recentemente com o auxílio de experimentos em escala de laboratório e também com o uso de modelos matemáticos e simulações computacionais.

Atualmente, a técnica de injeção de água alternada com gás, denominada WAG (do inglês, *water alternating gas*) é bastante utilizada como forma de recuperação nos campos petrolíferos, em especial no Brasil, para melhorar a eficiência de varredura. Entretanto, esta técnica enfrenta problemas quanto à irrupção prematura de gás devido à formação de caminhos preferenciais causada pelas diferenças de viscosidade e densidade das fases e também pela heterogeneidades do meio levando à diminuição do fator de recuperação. Em particular, um método de Recuperação Avançada de Petróleo (do inglês, *enhanced oil recover - EOR*) bastante utilizado e promissor é o WAG assistido por espuma (*foam assisted WAG - FAWAG*, em inglês). Trata-se de uma tecnologia promissora, uma vez que o uso de espumas reduz a formação de caminhos preferenciais (*fingering*), através do controle de mobilidade do gás. Assim, é possível atenuar os efeitos causados pela diferença de densidade e heterogeneidades, permitir o retardamento da irrupção do gás e, possivelmente, aumentar a eficiência de varredura no reservatório.

A espuma é formada a partir da drenagem de solução surfactante pela injeção do gás, o que, conseqüentemente, gera bolhas e espuma *in-situ*. Em escala de laboratório, também há o método de co-injeção, no qual a espuma é formada antes de ser injetada no meio poroso. As características do surfactante usado para formá-la e também a forma como esta é introduzida no processo influenciam na interação entre os fluidos durante o escoamento e, conseqüentemente, em todo o fenômeno e a recuperação. Entretanto, dentre tantos parâmetros que interferem no escoamento, em um processo dinâmico, não é simples entender quais parâmetros têm maior influência sobre os resultados a cada instante de tempo. Nesse sentido, simulações computacionais começaram a ser realizadas a fim de aumentar a compreensão sobre o assunto e maximizar os ganhos em contextos de grande escala. A teoria do fluxo fracionário descreve o escoamento de fluidos em meios porosos, proposta inicialmente por Buckley e Leverett (Welge, 1952), e o modelo STARS contido no simulador comercial CMG-STARS (CMG, 2019) apresenta uma solução mecanicista para o escoamento de espuma em meios porosos. Após o desenvolvimento dos modelos matemáticos, soluções analíticas ou numéricas das equações diferenciais viabilizaram diferentes análises (Lozano et al., 2021; Fritis et al., 2023; de Paula et al., 2020, 2023). Técnicas de análise de sensibilidade, como os índices de Sobol, têm sido amplamente utilizados em diversos estudos da ciência e engenharia pois permitem identificar quais dos parâmetros de entrada têm maior ou menor influência sobre as saídas do modelo, ou até mesmo para verificar se ocorrem interações entre os parâmetros de forma que afetem significativamente as saídas do modelo (Saltelli et al., 2008).

Este trabalho apresenta um estudo de análise de sensibilidade global sobre o escoamento bifásico de água e gás na presença de espuma em uma amostra de rocha visando reproduzir condições de um experimento de laboratório. As condições de simulação foram baseadas nos valores de experimentos realizadas em laboratório (Valdez et al., 2021). No conjunto de simulações, cinco parâmetros de entrada do modelo foram escolhidos para a análise com uma distribuição uniforme com 20% de perturbação. Todos os experimentos computacionais foram realizados usando o simulador FOSSIL (de Paula et al., 2020, 2023). Utilizou-se a técnica de análise de sensibilidade global baseada nos índices de Sobol, tendo como quantidades de interesse a queda de pressão e a produção acumulada de água.

O restante deste documento está organizado da seguinte maneira: na seção 2 são apresentados os modelos matemáticos para escoamento de espuma; na seção 3 são descritas as ferramentas numéricas do problema e a técnica de análise de sensibilidade utilizada, assim como a configuração dos experimentos realizados; e na seção 4 os resultados são apresentados. Por fim, a seção 5 finaliza o trabalho com as conclusões, limitações e trabalhos futuros.

2. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A seguir são apresentados os conceitos fundamentais e os modelos matemáticos utilizados para simular computacionalmente o fenômeno de escoamento de água e gás na presença de espuma em um meio poroso saturado.

2.1 Modelo de Escoamento de Espuma

A equação governante do escoamento aqui considerado é baseada no princípio de conservação da massa das fases água e gás, considerando fluidos imiscíveis e incompressíveis em um escoamento unidimensional em um meio poroso. A hipótese de incompressibilidade para a fase gasosa é usualmente adotada para simplificar a modelagem matemática e a obtenção de soluções analíticas e, visando comparações com este tipo de solução, a mesma também foi adotada neste trabalho (Lozano et al., 2022). Por simplicidade, desconsideram-se os efeitos de pressão capilar, gravitacionais e de dispersão. Considera-se também um escoamento totalmente saturado, isto é, onde $S_w + S_g = 1$ é satisfeito, onde S_w e S_g representam as saturações da água e do gás, respectivamente. Logo, a equação governante do problema é dada por:

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{u_t}{\phi\alpha} \frac{\partial f_w}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

onde u_t é a velocidade, ϕ a porosidade, α a área da seção transversal do domínio e f_w representa o fluxo fracionário (da fase água), que é dado por

$$f_w = \frac{k_{rw}}{k_{rw} + \frac{\mu_w}{\mu_g} k_{rg}^f} \quad (2)$$

onde $k_{rg}^f = k_{rg}^f(S_w)$ e $k_{rw} = k_{rw}(S_w)$ são as funções de permeabilidade relativa adotadas para o escoamento bifásico. Vale notar que k_{rg}^f denota a permeabilidade relativa da fase gás incluindo os efeitos da espuma, uma vez que esta não apresenta efeitos na mobilidade da fase água (Eftekhari and Farajzadeh, 2017). Na presença da espuma, este termo é descrito como

$$k_{rg}^f = \frac{k_{rg}}{MRF}, \quad (3)$$

onde k_{rg} é a permeabilidade relativa da fase gasosa na ausência de espuma e MRF é um termo conhecido como fator de redução de mobilidade, o qual é introduzido para representar os efeitos da espuma.

No escoamento bifásico de água e gás, como o considerado neste estudo, o modelo de permeabilidades relativas de Corey (Bruining, 2021) foi usado, o qual é dado por

$$k_{rg} = k_{rg}^0 (S_{we})^{ng}, \quad k_{rw} = k_{rw}^0 (1 - S_{we})^{nw}, \quad (4)$$

onde S_{we} é a saturação de água normalizada, dada por

$$S_{we} = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{gr}}, \quad (5)$$

onde k_{rg}^0 , k_{rw}^0 , n_g , n_w , S_{wc} e S_{gr} são parâmetros do modelo. Os parâmetros S_{wc} e S_{gr} representam a água e o gás residual, respectivamente. Para o modelo Corey, n_g e n_w representam os seus expoentes, enquanto k_{rg}^0 e k_{rw}^0 são os pontos finais das permeabilidades relativas do gás e da água, respectivamente.

2.2 Modelo STARS

O modelo STARS para espumas é o modelo matemático utilizado para descrever o efeito da espuma em escoamentos em meios porosos que é utilizado no simulador comercial CMG-STARS (CMG, 2019). Neste modelo, os efeitos da espuma são descritos considerando-se um fator de redução de mobilidade do gás denotado por MRF . Em geral, este fator depende dos efeitos da concentração de surfactante, da saturação de água, da saturação de óleo, de efeitos não-newtonianos, entre outros.

O fator de redução de mobilidade MRF é dado por

$$MRF = 1 + fmmob \prod_i F_i, \quad (6)$$

onde F_i são termos que podem ser incluídos para representar os diversos efeitos na espuma. Em particular, por simplicidade, neste trabalho considerou-se apenas os efeitos da saturação de água (S_w), representada pelo termo F_2 , o qual é dado por:

$$F_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan(sfbet(S_w - sfdry)), \quad (7)$$

onde $fmmob$, $sfbet$ e $sfdry$ são os parâmetros do modelo e descrevem, respectivamente, a redução máxima de mobilidade do gás, a inclinação no efeito de *dry-out* (espuma seca) e a saturação de água crítica abaixo da qual a espuma colapsa.

3. MÉTODOS

Nesta seção são descritos os métodos computacionais utilizados para as análises realizadas neste trabalho. Inicialmente apresenta-se de forma sucinta a ferramenta utilizada para resolver as equações governantes do escoamento e, posteriormente detalha-se a técnica de análise de sensibilidade utilizada e as quantidades de interesse investigadas.

3.1 FOSSIL

O FOSSIL (*FOam diSplacement SIMuLator*) consiste em um simulador baseado nos métodos dos volumes finitos e no método dos elementos finitos para simulações de escoamentos bifásicos bidimensionais incluindo a presença de espuma (de Paula et al., 2020, 2023). O simulador é capaz de lidar com variados cenários de escoamento em meios porosos incluindo espuma e outras complexidades como, por exemplo, heterogeneidades do meio poroso, presença do componente surfactante e sua adsorção, pressão capilar, compressibilidade e outras.

Para a solução numérica do problema (1) é utilizado um método dos volumes finitos (MVF) de alta ordem e discretização temporal feita por um método implícito (*backward differentiation formula* - BDF), enquanto para a solução do campo de velocidades e pressão pelo problema de Darcy é utilizada uma formulação do método dos elementos finitos (MEF) híbrida. Do ponto de vista da implementação computacional, o FOSSIL foi desenvolvido com base em duas bibliotecas de código aberto:

- SUNDIALS: conjunto de códigos computacionais avançados para resolver sistemas de equações diferenciais ordinárias e algébricas (Hindmarsh et al., 2005);
- deal.II: biblioteca escrita em C++ orientada a objetos projetada para resolver sistemas de equações diferenciais parciais usando o MEF (Arndt et al., 2021).

A partir das condições de simulação adequadas para reproduzir o experimento de laboratório descrito em Valdez et al. (2021), um arquivo de entrada de referência foi configurado e utilizado com o *software* para se obter saídas típicas como a queda de pressão, produção de água, perfis de saturação, dentre outras.

3.2 Análise de Sensibilidade via Índices de Sobol

Para se realizar uma avaliação dos parâmetros de entrada $x_i \in \mathbf{x}$, como eles e suas interações contribuem para as variações de uma determinada quantidade de interesse escalar \mathcal{Y} , uma análise de sensibilidade global baseada na variância foi realizada. Através dela, é possível analisar os parâmetros escolhidos a fim de identificar qual deles possui a maior influência direta sobre determinada quantidade de interesse e quais não influenciam a quantidade.

Neste estudo, optou-se por utilizar os índices Sobol como técnica de análise de sensibilidade global (Saltelli et al., 2008). O índice Sobol de primeira ordem (ou índice de Sobol principal) expressa como qualquer entrada incerta x_i contribui diretamente para a variância da saída \mathcal{Y} . O índice de Sobol principal relativo ao parâmetro x_i para a quantidade \mathcal{Y} é dado por:

$$S_i = \frac{\mathbb{V}[\mathbb{E}[\mathcal{Y}[x_i]]]}{\mathbb{V}[\mathcal{Y}]}, \quad (8)$$

onde \mathbb{E} e \mathbb{V} denotam o valor esperado (ou esperança) e a variância, respectivamente.

O índice Sobol de primeira ordem não leva em consideração possíveis interações entre os parâmetros e os seus efeitos na variância da saída. Sendo assim, pode ser utilizado o índice de Sobol total, para estimar as mudanças em $\mathbb{V}[\mathcal{Y}]$ considerando as interações de primeira e de alta ordem do i -ésimo parâmetro. O índice Sobol total relativo a x_i para a quantidade \mathcal{Y} é dado por:

$$S_{Ti} = 1 - \frac{\mathbb{V}[\mathbb{E}[\mathcal{Y}[x_{-i}]]]}{\mathbb{V}[\mathcal{Y}]}, \quad (9)$$

onde x_{-i} denota o conjunto de todos os parâmetros de entrada, exceto o parâmetro x_i .

Para os fins das análises deste trabalho, os índices de Sobol principal (S_i) e total (S_{Ti}) foram calculados com o pacote SALib disponível para a linguagem de programação Python. Esta implementação utiliza o algoritmo Saltelli para o cálculo dos índices e a amostragem dos parâmetros é baseada na sequência de Sobol, conforme detalhado em Herman and Usher (2017).

3.3 Quantidades de Interesse (QdI)

Para simplificar as análises, foram escolhidas apenas duas quantidades de interesse (QdI). As seguintes quantidades de interesse (QdIs) como funções do tempo foram consideradas:

- produção de água cumulativa (medida em unidades de volumes porosos (PV), adimensional);
- queda de pressão na amostra (medida em Pascal (Pa)), definida pela diferença de pressão entre a entrada e a saída da amostra e calculada ao longo do tempo.

Essas quantidades são exportadas por cada simulação do FOSSIL em arquivos VTK (Schroeder et al., 2000) que foram pós-processados para fins de realização da análise de sensibilidade.

3.4 Configuração das Simulações

As simulações realizadas através do FOSSIL foram de escoamentos bifásicos de água e gás com a presença de espuma em domínios unidimensionais, como descrito anteriormente no modelo matemático. Foi considerado um domínio 1D com $L = 0,1486$ m, discretizado uniformemente com $\Delta x = 0,001486$ m. Considerou-se uma permeabilidade absoluta homogênea ($k = 2,7 \times 10^{-13}$ m²) e uma porosidade também homogênea ($\phi = 0,1548$).

O escoamento é realizado pela coinjeção de água e gás. Como condição de contorno na esquerda considerou-se um fluxo fracionário de gás prescrito f_g^{inj} .

O tempo final de simulação foi de $t_{final} = 5000$ segundos com um passo de tempo ajustado automaticamente pelo SUNDIALS no FOSSIL. Este tempo final de simulação foi reduzido com relação ao experimento original reportado em Valdez et al. (2021) para simplificar a análise e reduzir o tempo de execução de cada simulação e de toda a análise de sensibilidade. O tempo de execução médio de uma simulação para este cenário do conjunto dos parâmetros é de cerca de 5 minutos.

Foram escolhidos cinco parâmetros para se realizar a análise de sensibilidade. Em particular, os três parâmetros do modelo de espuma do STARS ($sfdry$, $fmmob$, $sfbet$) e ainda a velocidade superficial de injeção u_t e a fluxo fracionário de gás f_g^{inj} .

Cada parâmetro de entrada foi definido como variável seguindo uma distribuição uniforme com 20% de variação (coeficiente de variação - cov) em torno dos valores de referência apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros de entrada

Parâmetro	$sfdry$	$fmmob$	$sfbet$	f_g^{inj}	u_t [m/s]
Valor de Referência	0,437664	269,342	787,458	0,6	$1,45 \times 10^{-5}$

A biblioteca SALib considera, de acordo com o amostrador de Saltelli et al. (2008), a seguinte expressão para definir o número de amostras:

$$N_s = N(2D + 2), \quad (10)$$

onde D é o número de parâmetros recebidas como entrada do problema e N um fator multiplicativo que deve ser escolhido como resultado de um potência de dois. Foi escolhido $N = 2^7$ que resultou em um número de amostras total de $N_s = 1536$ para $D = 5$ parâmetros de entrada.

4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados das simulações computacionais realizadas neste trabalho. Para as duas quantidades de interesse (queda de pressão e produção de água) foram calculados os índices de Sobol principal e total para as cinco QdIs consideradas neste estudo: $sfdry$, $fmmob$, $sfbet$, f_g^{inj} e u_t .

4.1 Simulação de Referência

A Figura 1 apresenta o resultado típico de uma simulação do problema considerado neste trabalho. No painel à esquerda observa-se a queda de pressão ao longo do tempo e à direita a produção de água obtida na saída da amostra. É importante observar que os gráficos apresentam comportamento típico da solução da equação de Buckley-Leverett, um aumento linear da produção até o instante de irrupção, que ocorre por volta do tempo $t = 800$ s, e depois uma redução da produção, enquanto a queda de pressão atinge o valor de estado estacionário após este instante de tempo.

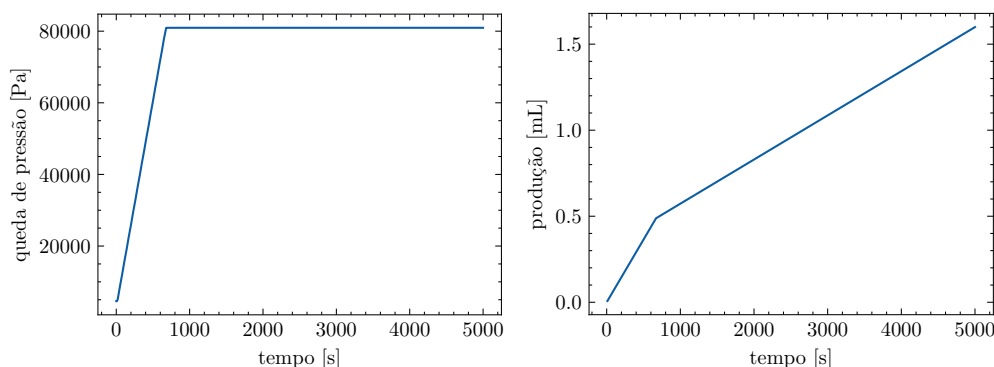


Figura 1: Resultado de uma simulação em termos da queda de pressão (esquerda) e produção (direita).

4.2 Índices de Sobol

As Figuras 2 e 3 apresentam os índices de Sobol principal e total para a queda de pressão e produção acumulada de água ao longo do tempo. Pode-se dividir a análise em dois momentos, antes e após o tempo de irrupção (*breakthrough*), que acontece aproximadamente ao redor do instante $t = 1000$ s (20% de simulação).

É importante ressaltar que existe uma variação sobre o tempo de irrupção (ao redor de $t = 1000$ s) uma vez que análise realizada considera diferentes parâmetros e um intervalo de 20% de variação ao redor do caso de referência. Em particular, nota-se que o u_t tem grande influência sobre o tempo de irrupção.

A Figura 2 mostra a análise de sensibilidade para a queda de pressão. É possível perceber claramente que o parâmetro da espuma $sfdry$ é aquele que apresenta maior influência na queda de pressão durante a maior parte do tempo da simulação. Entretanto, nos instantes iniciais nota-se também que u_t apresenta uma influência significativa, mas a sua influência vai reduzindo até o instante de *breakthrough*. Para essa QdI e para os intervalos explorados para os parâmetros neste trabalho, observa-se que os parâmetros $fmmob$, $sfbet$ e f_g^{inj} tem pouco impacto na queda de pressão.

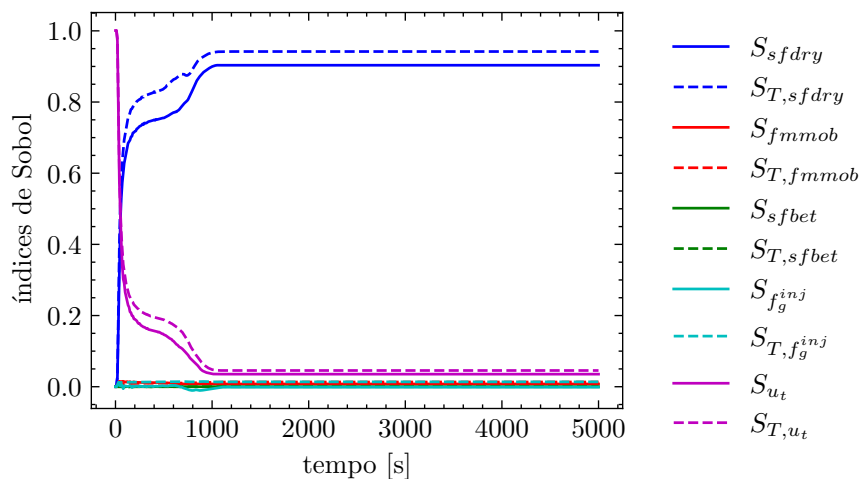


Figura 2: Análise de sensibilidade via índices de Sobol para a queda de pressão. As linhas contínuas representam os índices de Sobol principal (S_i) e as linhas tracejadas índices de Sobol total ($S_{T,i}$) para o parâmetro $i \in \{sfdry, fmmbob, sfbet, f_g^{inj}, u_t\}$.

A Figura 3 apresenta os índices de Sobol para a QdI produção de água ao longo do tempo, na qual também pode-se perceber dois regimes do escoamento: antes e depois do *breakthrough*. Dos índices de sensibilidade obtidos, fica claro que antes deste instante a velocidade de injeção u_t domina toda a produção. No intervalo onde ocorre o *breakthrough*, pode-se notar que o parâmetro da espuma $sfdry$ começa a ter um papel significativo para a produção e atinge um pico de 0.5 ao redor de $t = 1000$ s no índice de Sobol. Depois desta fase, nota-se que a produção é principalmente afetada não só por u_t , mas também pelo fluxo fracionário de injeção de gás f_g^{inj} .

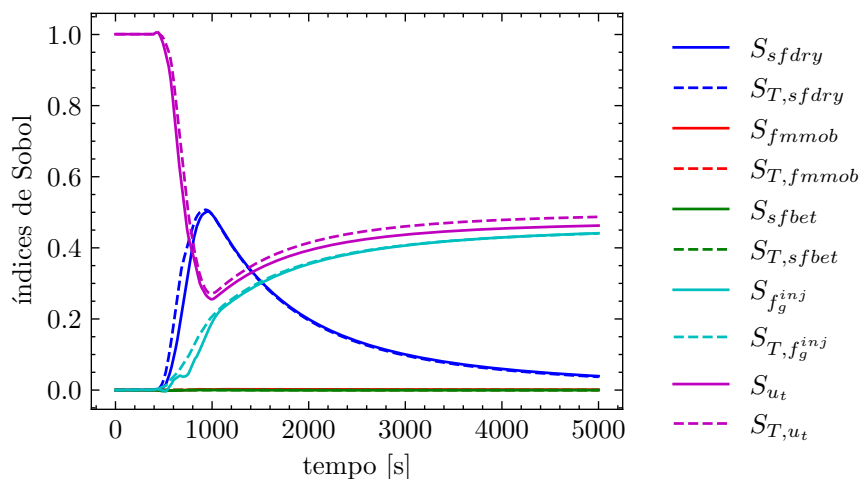


Figura 3: Análise de sensibilidade via índices de Sobol para a produção de água. As linhas contínuas representam índices de Sobol principal (S_i) e as linhas tracejadas índices de Sobol total ($S_{T,i}$) para o parâmetro $i \in \{sfdry, fmmbob, sfbet, f_g^{inj}, u_t\}$.

A análise de sensibilidade apresentada na Figura 3 está alinhada com os resultados obtidos analiticamente para este modelo (Fritis et al., 2023). Antes do tempo de irrupção

(*breakthrough*), a produção total é melhor descrita pela velocidade total dos fluidos (linhas roxas na figura). Após este tempo, a frente de choque atinge a saída e a produção depende da passagem entre o choque e a rarefação, ligada aos parâmetros que descrevem a função do fluxo fracionário (f_g). O impacto da espuma (*sfdry*) somente aparece perto do momento da irrupção por causa do modelo simplificado que considera escoamento incompressível.

4.3 Discussões

É importante discutir alguns aspectos relacionados aos resultados da análise de sensibilidade apresentada e as limitações deste trabalho. Em primeiro lugar, destaca-se que o intervalo utilizado para a análise trata-se de uma escolha simplificada e conservadora para os parâmetros. Uma análise mais detalhada deverá considerar intervalos para os parâmetros com base em informações físicas (como por exemplo para a velocidade u_t). Para os parâmetros da espuma, pode-se considerar as caracterizações realizadas em Valdez et al. (2021) e as incertezas paramétricas encontradas.

Para o cenário, os parâmetros e as quantidades de interesse avaliados, a análise de sensibilidade poderia ter sido realizada utilizando soluções analíticas (Fritis et al., 2023; Lozano et al., 2021) do modelo de espumas que possui um tempo computacional de avaliação muito menor. Entretanto, optou-se por iniciar este estudo em um cenário com um simulador numérico para que posteriormente análises mais complexas possam ser realizadas.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de análise de sensibilidade de um modelo matemático de escoamento bifásico de água e gás na presença de espuma em meio poroso visa reproduzir condições similares à de experimentos de laboratório. Foram realizadas análises utilizando os índices de Sobol do modelo implementado no simulador numérico FOSSIL incluindo os parâmetros que descrevem a espuma e outros que controlam as condições de injeção.

Os resultados preliminares deste estudo mostram que, para a queda de pressão, *sfdry* e u_t foram os parâmetros mais influentes e, para a produção, u_t e f_g^{inj} , com destaque para *sfdry* no intervalo do tempo de irrupção.

O presente trabalho possui algumas limitações que podem ser superadas em trabalhos futuros, como as flutuações em alguns instantes dos índices de Sobol devido ao baixo número de amostras utilizadas.

Para trabalhos futuros espera-se introduzir outras quantidades de interesse e outros parâmetros no estudo tal como a viscosidade aparente μ_{app} e os perfis de saturação de S_w em função do espaço para um tempo fixo, e outras quantidades escalares como o tempo de irrupção t_{BT} . Além disso, comparações e análises com as soluções analíticas do problema também são promissoras.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado em associação com o projeto de P&D registrado como ANP 23518-4, “Avançando na modelagem matemática e computacional para apoiar a implementação da tecnologia ‘Foam-assisted WAG’ em reservatórios do Pré-sal” (Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF / Shell Brasil / ANP), apoiado pela Shell Brasil sob ANP P&D como “Compromisso de Investimentos com Pesquisa e Desenvolvimento”.

Referências

- Arndt, D., Bangerth, W., Davydov, D., Heister, T., Heltai, L., Kronbichler, M., Maier, M., Pelteret, J.-P., Turcksin, B., and Wells, D. (2021). The deal. ii finite element library: Design, features, and insights. *Computers & Mathematics with Applications*, 81:407–422.
- Bruining, H. (2021). *Upscaling of Single-and Two-Phase Flow in Reservoir Engineering*. CRC Press.
- CMG (2019). Computer Modelling Group: Stars users manual, Version 2019.10. CMG Ltd. *Calgary, Canada*.
- de Paula, F. F., Igreja, I., Quinelato, T., and Chapiro, G. (2023). A numerical investigation into the influence of the surfactant injection technique on the foam flow in heterogeneous porous media. *Advances in Water Resources*, 171:104358.
- de Paula, F. F., Quinelato, T., Igreja, I., and Chapiro, G. (2020). A numerical algorithm to solve the two-phase flow in porous media including foam displacement. In *International Conference on Computational Science*, pages 18–31. Springer.
- Eftekhari, A. A. and Farajzadeh, R. (2017). Effect of foam on liquid phase mobility in porous media. *Scientific reports*, 7(1):43870.
- Fritis, G. C., Paz, P. S., Lozano, L., and Chapiro, G. (2023). On the Riemann problem for the foam displacement in porous media with linear adsorption. *arXiv preprint arXiv:2304.07414*.
- Herman, J. and Usher, W. (2017). SALib: An open-source Python library for sensitivity analysis. *Journal of Open Source Software*, 2(9):97.
- Hindmarsh, A. C., Brown, P. N., Grant, K. E., Lee, S. L., Serban, R., Shumaker, D. E., and Woodward, C. S. (2005). SUNDIALS: Suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 31(3):363–396.
- Lozano, L. F., Cedro, J. B., Zavala, R. V. Q., and Chapiro, G. (2022). How simplifying capillary effects can affect the traveling wave solution profiles of the foam flow in porous media. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 139:103867.
- Lozano, L. F., Zavala, R. Q., and Chapiro, G. (2021). Mathematical properties of the foam flow in porous media. *Computational Geosciences*, 25:515–527.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., and Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.
- Schroeder, W. J., Avila, L. S., and Hoffman, W. (2000). Visualizing with VTK: a tutorial. *IEEE Computer graphics and applications*, 20(5):20–27.
- Valdez, A. R., Rocha, B. M., da Fonseca Façanha, J. M., de Souza, A. V. O., Perez-Gramatges, A., Chapiro, G., and Santos, R. W. d. (2021). Foam-assisted water–gas flow parameters: from core-flood experiment to uncertainty quantification and sensitivity analysis. *Transport in Porous Media*, pages 1–21.
- Welge, H. J. (1952). A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive. *Journal of Petroleum Technology*, 4(04):91–98.

SENSITIVITY ANALYSIS OF A TWO-PHASE FLOW WITH FOAM FOR ENHANCED OIL RECOVERY

Abstract. *Petroleum engineering has evolved a lot over time in order to increase the efficiency of oil recovery. A method that has been widely studied for oil recovery is the injection of foam into the porous medium, which enables a more uniform sweep of the reservoir by reducing gas mobility, and consequently, results in improved oil production. In this context, mathematical models have been widely used to make predictions and studies on how to optimize production.*

Therefore, it is important to study and clearly understand the influence of each parameter of the mathematical model on the flow. To this end, the use of Sensitivity Analysis (SA) techniques has been widely used, as it allows an understanding of the degree of influence of the model's input parameters on the results generated by it. The present work shows the application of sensitivity analysis to computer simulations of two-phase flow of water and gas in the presence of foam for a case based on laboratory scale data from a foam core-flooding experiment. The results allowed to quantify and understand the influence of each input parameter on the Quantities of Interest chosen at each instant of simulation time.

Keywords: *Enhanced oil recovery, Sensitivity analysis, Foam flooding, Porous media*