

COMPORTAMENTO TERMODINÂMICO PARA FLUXO BIFÁSICO QUATRO COMPONENTES EM RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

Thiago Alvim Dutra

Universidade Estadual do Norte Fluminense / LENEP
Rod. Amaral Peixoto, km 163, Av. Brenand, s/n - Imboassica, 27925-310 - Macaé - RJ / BRASIL
alvim@lenep.uenf.br

Pedro dos Reis Viveiros da Costa

Universidade Estadual do Norte Fluminense / LENEP
Rod. Amaral Peixoto, km 163, Av. Brenand, s/n - Imboassica, 27925-310 - Macaé - RJ / BRASIL
reis@lenep.uenf.br

Adolfo Puime Pires

Universidade Estadual do Norte Fluminense / LENEP
Rod. Amaral Peixoto, km 163, Av. Brenand, s/n - Imboassica, 27925-310 - Macaé - RJ / BRASIL
puime@lenep.uenf.br

Resumo. A injeção miscível de gás é utilizada no aumento da recuperação de óleo em reservatórios de petróleo. Trata-se de um método de recuperação avançada de petróleo (EOR) caracterizado pela injeção de gases miscíveis. O deslocamento 1D é descrito por um sistema hiperbólico de $(n-1)$ equações, onde n é o número de componentes. Foi observado que características termodinâmicas do processo são independentes das propriedades de transporte. Neste trabalho, o escoamento bifásico com quatro componentes é analisado. A partir da conservação do volume de cada componente, um sistema hiperbólico 3×3 é obtido. Diagramas quaternários com pressões e temperaturas constantes descrevem o comportamento termodinâmico do sistema, enquanto que o comportamento hidrodinâmico é descrito pelas curvas de permeabilidade relativa e viscosidades. Este sistema pode ser dividido em um sistema termodinâmico auxiliar de 2 equações e uma equação do transporte. O sistema auxiliar é determinado pela termodinâmica. Diagramas de fase foram construídos para o sistema $N_2-C_3-C_6-C_{10}$ a 300 bar e 350 K. A associação do comportamento termodinâmico com a solução do problema de Riemann e com o fator de recuperação do óleo permite a determinação do melhor fluido de injeção.

Palavras chave: recuperação avançada de petróleo, engenharia de reservatórios, sistemas de equações diferenciais parciais hiperbólicas, leis da conservação.

1. Introdução

A engenharia de reservatórios direciona grande parte de seus estudos ao máximo aproveitamento das reservas de petróleo e gás natural, seja através do desenvolvimento de novas jazidas ou do aumento do fator de recuperação de campos já em produção. Assim, os reservatórios que por algum motivo retêm grandes quantidades de hidrocarbonetos após a exaustão de sua energia natural são fortes candidatos ao emprego das técnicas de recuperação secundária e terciária.

Denomina-se fator de recuperação a razão entre a quantidade de óleo produzida e a quantidade de óleo original no reservatório. Recuperação primária é a produção resultante da atuação da energia natural do reservatório. À recuperação secundária são atribuídos os métodos cujo propósito é a manutenção da pressão em algum nível desejado. Por sua vez, a recuperação terciária caracteriza-se por utilizar métodos que envolvam interação físico-química entre as fases, como, por exemplo, transferência de massa. Tais técnicas são geralmente aplicadas em reservatórios cuja recuperação secundária não seja satisfatória, e são também denominadas recuperação avançada de petróleo (Enhanced Oil Recovery ou EOR) (Lake, 1989).

Com pequenas exceções, os métodos de EOR podem ser divididos em três categorias: métodos térmicos, métodos químicos e métodos miscíveis (Lake, 1989). Os métodos miscíveis, objeto de estudo deste trabalho, são aplicados nos casos em que a baixa eficiência do deslocamento ocorre devido às tensões interfaciais estabelecidas na região de contato de fluidos que não se misturam. A magnitude destas tensões depende diretamente da natureza físico-química das fases envolvidas. Assim, o deslocamento miscível de óleo por gás proporciona o aumento da recuperação de óleo a partir da diminuição da tensão interfacial entre os fluidos.

Os métodos de EOR são utilizados para aumentar a eficiência de deslocamento do óleo dos reservatórios em produção. A escolha do método de EOR está diretamente ligada à relação custo-benefício do processo. Assim, fatores como a disponibilidade e o custo de fluidos a serem injetados, o aumento do fator de recuperação e as questões ambientais são decisivos na escolha do melhor método de recuperação de hidrocarbonetos. Nos métodos miscíveis de EOR, a composição do gás a ser injetado e a do fluido do reservatório, assim como a pressão e a temperatura da reserva de hidrocarbonetos são de grande importância para o aumento da eficiência do deslocamento.

Um sistema de $n-1$ equações hiperbólicas oriundas da conservação do volume descreve o deslocamento unidimensional de óleo por gás, onde n é o número de componentes (Johns *et al.*, 1993; Johns e Orr Jr., 1996; Wang e Orr Jr., 1997 e Orr Jr. *et al.*, 1998). A partir de experimentos semi-analíticos e numéricos, foi observado que características termodinâmicas do processo (pressão mínima de miscibilidade, *tie-lines*, etc) são independentes das propriedades de transporte. Segundo Pires (2003), a introdução de uma função potencial associada à conservação do n -ésimo componente permite a mudança das variáveis independentes do sistema. Essa mudança proporciona a divisão do sistema hiperbólico de $n-1$ equações em um sistema termodinâmico auxiliar de $n-2$ equações hiperbólicas e uma equação do transporte, ou equação do levantamento. A injeção contínua de gás resulta num problema de Riemann. Neste trabalho, o deslocamento miscível de óleo por gás é analisado para o sistema $N_2-C_3-C_6-C_{10}$ na pressão de 300 bar e temperatura de 350 K.

2. Sistema Termodinâmico

O estudo das propriedades termodinâmicas e o cálculo do equilíbrio de fases torna possível compreender o comportamento termodinâmico dos fluidos comumente encontrados em reservatórios. Os fluidos contidos em reservatórios são complexas misturas de hidrocarbonetos. No entanto, muitas vezes o comportamento de fases é estudado através de representações ternárias, onde seus componentes são agrupados em três espécies: leves, intermediários e pesados. Esse sistema é particularmente útil na avaliação de processos onde ocorre deslocamento bifásico miscível, com transferência de massa entre as fases. Nesse caso, a temperatura e a pressão do sistema são constantes, e a composição varia ao longo do processo.

Utilizando como exemplo um modelo para três componentes, o sistema termodinâmico pode ser representado a partir do diagrama da Fig. 1. Nesse exemplo, o componente 1 é o mais leve e o 3 o mais pesado. Os vértices representam 100 % do componente e os lados mostram as misturas binárias entre os compostos. É importante ressaltar que nesse diagrama, a temperatura e a pressão do sistema são constantes, variando apenas a composição. As linhas de amarração (*tie-lines*) não se cruzam na região bifásica. Além disso, qualquer mistura cuja composição global esteja localizada no interior da curva que separa as zonas bifásica e monofásica (curva binodal) se dividirá em uma fase líquida e uma fase vapor, e as composições das fases são determinadas pelos pontos de interseção entre a linha de amarração correspondente à composição global e as curvas de ponto de bolha e de ponto de orvalho.

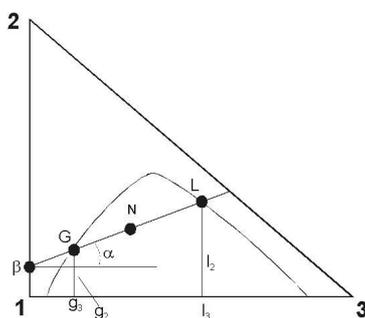


Figura 1. Diagrama ternário.

A partir da análise geométrica da Fig. (1) obtemos α e β :

$$\alpha(\beta) = \frac{(l_2 - g_2)}{(l_3 - g_3)} \quad (1)$$

$$\beta = g_2 - \alpha g_3 \quad (2)$$

onde l indica a concentração do componente na fase líquida e g na fase gás.

As saturações das fases líquido e gás são calculadas pela regra da alavanca:

$$s = \frac{GN}{GL} \quad (3)$$

$$(1-s) = \frac{LN}{GL} \quad (4)$$

onde s é a saturação da fase líquido, $(1-s)$ é a saturação da fase gás, G é um ponto sobre a curva de orvalho, L é um ponto sobre a curva de bolha e N é um ponto qualquer sobre a *tie-line* que une os pontos G e L .

Esse trabalho propõe o estudo de sistemas contendo quatro componentes. Desta forma, o sistema termodinâmico deve ser representado a partir do diagrama quaternário apresentado na Fig. 2.

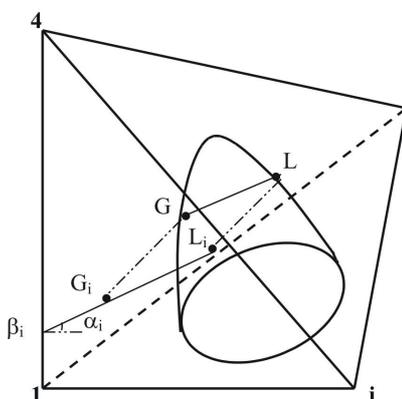


Figura 2. Diagrama quaternário.

Analogamente ao diagrama ternário da Fig. 1, as *tie-lines* não se cruzam na região bifásica. Para qualquer mistura cuja composição global esteja localizada no interior da curva binodal, esta se dividirá em uma fase líquida e uma fase vapor, sendo as composições das fases determinadas pela interseção das *tie-lines* com a curva binodal. Assim, a *tie-line* GL representa a composição de equilíbrio, sendo G_iL_i a projeção desta *tie-line* no plano (C_2, C_4) . A inclinação da linha reta G_iL_i é igual a α_i e sua interseção é β_i . Torna-se importante ressaltar que em tais diagramas a temperatura e a pressão são constantes, variando apenas a composição.

A análise geométrica das projeções das *tie-lines* leva às expressões para α_i e β_i :

$$\alpha_i(\vec{\beta}) = \frac{(l_i - g_i)}{(l_4 - g_4)}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \tag{5}$$

$$\beta_i = g_i - \alpha_i g_4, \quad i = 2 \text{ e } 3 \tag{6}$$

3. Modelo Matemático

A conservação do volume do i -ésimo componente de uma mistura bifásica com n componentes, considerando válida a lei de Amagat e desprezando os efeitos capilares, gravitacionais e de dispersão é dada por (Pires, 2003):

$$\frac{\partial C_i}{\partial T} + \frac{\partial U_i}{\partial X} = 0, \quad i = 2, \dots, n \tag{7}$$

onde as concentrações e as velocidades totais do i -ésimo componente são calculadas através de:

$$\begin{aligned} C_i &= l_i s + g_i (1 - s) \\ U_i &= l_i f + g_i (1 - f) \end{aligned} \tag{8}$$

Na Eq. (8), f é o fluxo fracionário da fase líquido, determinado através da relação entre a velocidade da fase e a velocidade total. Considerando o sistema incompressível e utilizando a lei de Darcy para representar a velocidade de cada fase é possível obter a seguinte expressão para o fluxo fracionário de líquido:

$$f = \frac{\frac{k_{rl}(s)}{\mu_l}}{\frac{k_{rl}(s)}{\mu_l} + \frac{k_{rg}(s)}{\mu_g}} \tag{9}$$

onde k_r indica a permeabilidade relativa e μ a viscosidade de cada fase. As permeabilidades relativas das fases gás e líquido foram calculadas a partir das seguintes equações:

$$k_{rg}(s) = k_{rgm} \left(\frac{1-s}{1-s_{wi}} \right)^{n_g} \quad (10)$$

$$k_{rl}(s) = k_{rlm} \left(\frac{s-s_r}{1-s_{wi}-s_r} \right)^{n_l} \quad (11)$$

onde s_{wi} é a saturação da água inicial, s_r é a saturação do óleo residual, os coeficientes n_g e n_l são parâmetros de ajuste obtidos experimentalmente, k_{rgm} é a permeabilidade relativa ao gás na saturação de óleo residual e k_{rlm} é a permeabilidade relativa ao líquido na saturação de gás residual.

Reescrevendo o sistema em função das variáveis termodinâmicas geométricas α_i e β_i temos (Pires, 2003):

$$\begin{aligned} C_i &= \alpha_i C_n + \beta_i \\ U_i &= \alpha_i U_n + \beta_i \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_n(X,T)}{\partial T} + \frac{\partial U_n(C_n, \vec{\beta})}{\partial X} &= 0 \\ \frac{\partial [\alpha_i(\vec{\beta}) C_n(X,T) + \beta_i(X,T)]}{\partial T} + \frac{\partial [\alpha_i(\vec{\beta}) U_n(C_n, \vec{\beta}) + \beta_i(X,T)]}{\partial X} &= 0, \quad i = 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (13)$$

No sistema de Eq. (13), X corresponde à distância adimensional ($X=x/L$) e T corresponde ao número de volumes porosos injetados ($T=ut/\phi L$, sendo u a velocidade total de fluxo, ϕ a porosidade do sistema e L o comprimento do meio poroso) (Pires, 2003).

4. Separação de Sistemas

Pires (2003) mostrou que a partir da introdução de uma função potencial baseada na lei da conservação do n -ésimo componente, o sistema de $n-1$ equações hiperbólicas formado pelo sistema de Eq. (13) pode ser dividido em um sistema termodinâmico auxiliar de $n-2$ equações e uma equação do transporte:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial \psi} + \frac{\partial \beta_i}{\partial \varphi} = 0, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{C_n}{U_n - C_n} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{-1}{U_n - C_n} \right) = 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} d\varphi &= U_n dT - C_n dX \\ d\psi &= dX - dT \end{aligned} \quad (16)$$

O sistema formado pelas $n-2$ equações mostradas na Eq. (14) é denominado sistema auxiliar. É importante observar que este sistema é composto de propriedades termodinâmicas apenas, enquanto que o sistema original composto pelo sistema de Eq. (13) é parametrizado pelas propriedades de transporte. As novas variáveis independentes φ e ψ correspondem à mudança de coordenadas de um sistema euleriano para um sistema lagrangiano.

5. Condições Inicial e de Contorno

Deste ponto em diante C_n será chamado de C e U_n será denominado U . O problema de valor inicial e de contorno para a injeção contínua de gás em um reservatório de óleo é definido como:

$$\begin{aligned}
 T = 0, X > 0 : & \begin{cases} C = C_i(X, 0) \\ \vec{\beta} = \vec{\beta}_i(X, 0) \end{cases} \\
 X = 0, T > 0 : & \begin{cases} U = U_j(0, T) \\ \vec{\beta} = \vec{\beta}_j(0, T) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{17}$$

e corresponde ao seguinte problema para o sistema auxiliar:

$$\begin{aligned}
 T = 0, X > 0 \rightarrow \varphi = -C_i \psi : & \begin{cases} C = C_i(X, 0) \\ \vec{\beta} = \vec{\beta}_i(X, 0) \end{cases} \\
 X = 0, T > 0 \rightarrow \varphi = -U_j \psi : & \begin{cases} U = U_j(0, T) \\ \vec{\beta} = \vec{\beta}_j(0, T) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{18}$$

onde o índice I indica condição inicial e J condição de injeção.

6. O Princípio da Projeção

O princípio da projeção mostra que as velocidades características, as ondas de rarefação e os choques da solução do sistema auxiliar são projeções das características, ondas de rarefação e choques da solução do sistema original (Pires, 2003).

6.1. Projeção das Velocidades Características

Os autovalores do sistema auxiliar são denominados λ_i , enquanto que os autovalores do sistema original são chamados de Λ_i , onde $i=1, \dots, n-1$ e $\Lambda_i = U_C'$. Os autovalores λ_i e Λ_i se relacionam através da seguinte expressão (Pires, 2003):

$$\Lambda_i(C, \vec{\beta}) = \frac{1 + \lambda_i(\vec{\beta})U}{1 + \lambda_i(\vec{\beta})C} \tag{19}$$

6.2. Projeção das Ondas de Rarefação

Apenas C varia ao longo da onda de rarefação correspondente a $\Lambda_i = U_C'$, e essa onda é chamada de C -rarefação. A expressão para C em uma C -rarefação é dada por (Pires, 2003):

$$\xi = \frac{X}{T} = \frac{\partial U(C, \vec{\beta})}{\partial C} \tag{20}$$

A projeção da i -ésima β -rarefação do sistema original corresponde à i -ésima onda de rarefação do sistema auxiliar. A Fig. 3 apresenta as relações geométricas entre as ondas de rarefação dos dois sistemas.

6.3. Projeção das Ondas de Choque

Considerando que apenas a concentração C varia no choque do sistema original, o salto de concentração é semelhante ao salto de saturação de Buckley-Leverett (1942):

$$D = \frac{[U]}{[C]}, [\beta_i] = 0, \quad i = 2, \dots, n-1 \tag{21}$$

Para o caso em que β varia no choque:

$$D = \frac{\begin{bmatrix} U^- + [\beta_i] \\ \alpha_i \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} C^- + [\beta_i] \\ \alpha_i \end{bmatrix}} = \frac{\begin{bmatrix} U^+ + [\beta_i] \\ \alpha_i \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} C^+ + [\beta_i] \\ \alpha_i \end{bmatrix}}, \quad i = 2, \dots, n-1 \tag{22}$$

onde o sobrescrito (-) indica a condição antes e o sobrescrito (+) indica a condição depois do choque.

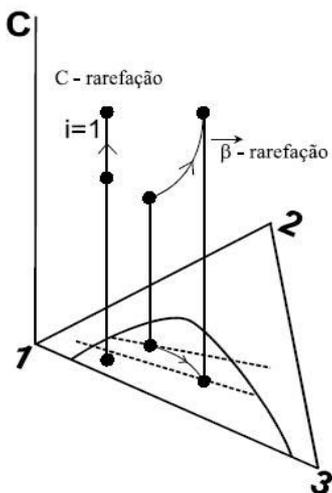


Figura 3. Relação geométrica entre as ondas de rarefação.

A condição de Rankine-Hugoniot no choque para o sistema auxiliar é:

$$V = \frac{[\alpha_i(\beta_i)]}{[\beta_i]}, \quad i = 2, \dots, n-1 \tag{23}$$

A relação entre as velocidades do choque dos sistemas original e auxiliar é calculada através de:

$$D = \frac{\left[U^\pm + \frac{1}{V} \right]}{\left[C^\pm + \frac{1}{V} \right]} \tag{24}$$

Desta forma, a velocidade do choque no sistema auxiliar é a projeção da velocidade do choque no sistema original e as suas velocidades estão relacionadas através da Eq. (24) (Pires, 2003). A Fig. 4 apresenta os *C-choques* e os *β-choques* com suas respectivas projeções.

7. Equilíbrio de Fases

Um sistema pode apresentar uma ou mais fases em equilíbrio. Alterações na pressão e temperatura do sistema podem modificar a quantidade e a composição das fases. O cálculo do equilíbrio de fases nos permite construir o diagrama termodinâmico para este sistema. O cálculo do equilíbrio de fases necessita de relações entre algumas propriedades básicas (P-V-T). As relações normalmente utilizadas para esses cálculos são chamadas equações de estado. A equação de Peng-Robinson (Peng e Robinson, 1976) é a equação de estado cúbica mais utilizada na indústria do petróleo, pois apresenta boa capacidade de previsão do equilíbrio líquido-vapor (Silva *et al.*, 1990).

Começamos o cálculo do equilíbrio de fases com a determinação do volume molar de cada componente (V_{mi}). Os dados termodinâmicos para o nitrogênio, o propano, o hexano e o decano puro podem ser observados na Tab. 1.

Tabela 1: Dados termodinâmicos (Peng e Robinson, 1976).

	N_2	C_3	C_6	C_{10}
T_c (K)	126,26	369,8	507,4	617,7
P_c (bar)	33,99	42,5	30,1	21,0
ω	0,0372	0,1541	0,2998	0,4904
T_b (K)	77,37	231,1	341,9	447,3

onde T_c é a temperatura crítica, P_c é a pressão crítica, ω é o fator acêntrico e T_b é a temperatura normal de ebulição.

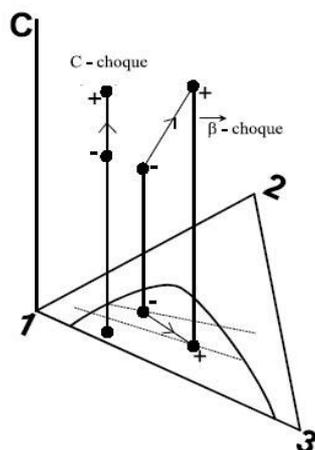


Figura 4. Choques dos sistemas original e auxiliar.

O passo seguinte foi o cálculo do “flash” bifásico para diferentes composições globais de mistura dos 4 componentes. As frações molares resultantes são então transformadas em frações volumétricas:

$$c_{i\pi} = \frac{cm_{i\pi} V_{mi}}{\sum_{i=1}^n cm_{i\pi} V_{mi}}, \quad i = 1, \dots, n \quad \pi = l \text{ ou } g \quad (25)$$

onde $c_{i\pi}$ é a fração volumétrica, $cm_{i\pi}$ é a fração molar, V_{mi} é o volume molar, i é o componente e π é a fase (líquido ou gás).

A partir dos pontos de bolha e de orvalho obtidos com o cálculo do equilíbrio de fases e a transformação realizada através da Eq. (25), as *tie-lines* são traçadas. O diagrama termodinâmico foi construído e as variáveis geométricas termodinâmicas calculadas de acordo com a Eq. (5) e a Eq. (6). O diagrama termodinâmico para o sistema N_2 - C_3 - C_6 - C_{10} , na pressão de 300 bar e temperatura de 350 K é apresentado na Fig. 5.

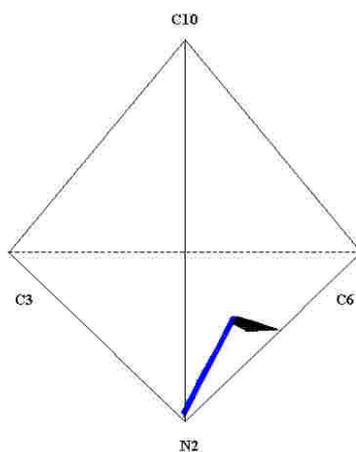


Figura 5. Diagrama termodinâmico para o sistema N_2 - C_3 - C_6 - C_{10} @ 300 bar e 350 K.

8. Função Fluxo

A separação de sistemas proposta por Pires (2003) permite a redução do sistema hiperbólico. O sistema auxiliar mostrado na Eq. (14) é constituído de propriedades termodinâmicas, sendo as funções fluxo definidas pelas variáveis geométricas α e β . A obtenção das funções fluxo foi feita através da utilização de um programa de minimização construído com base no método dos mínimos quadrados. Como dados de entrada para a minimização utilizamos os valores de $\alpha_2, \beta_2, \alpha_3$ e β_3 obtidos no cálculo do equilíbrio de fases. As funções fluxo encontradas foram:

$$\alpha_2(\beta_2, \beta_3) = -2,856 \cdot \beta_2 - 0,8497 \cdot \beta_3 + 382,8 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad (26)$$

Temos então a solução para o sistema auxiliar:

$$\beta_2\left(\eta = \frac{\varphi}{\psi}\right) = \begin{cases} 0,0125; & -0,2 < \eta < \eta_2 = 0,005 \\ 0,013; & \eta_2 < \eta < \eta_1 = 0,06 \\ 0,05; & \eta_1 < \eta < +\infty \end{cases} \quad (30)$$

$$\beta_3\left(\eta = \frac{\varphi}{\psi}\right) = \begin{cases} 0,0237; & -0,2 < \eta < \eta_2 = 0,005 \\ 0,047; & \eta_2 < \eta < \eta_1 = 0,06 \\ 0,05; & \eta_1 < \eta < +\infty \end{cases} \quad (31)$$

A solução do sistema original é obtida a partir do levantamento da solução do sistema auxiliar. Para a construção das curvas $C \times U$, foi necessário determinar as frações volumétricas do componente mais pesado em cada trecho da solução. Esses dados encontram-se na Tab. 4. Os valores dos parâmetros para cálculo das permeabilidades relativas estão listados na Tab. 5. O caminho de solução pode ser visto na Fig. 7 e na Fig. 8. A solução do sistema original no plano $X-T$ encontra-se na Fig. 9. As curvas $C_J \times U_J$, $C_M \times U_M$ e $C_I \times U_I$ representam as curvas de fluxo fracionário para o decano nas condições de injeção, intermediária e inicial, respectivamente. O ponto $P1$ indica a tangente à curva $C_J \times U_J$ que passa pela condição de injeção J , $P2$ é o ponto tangente a essa mesma curva e que intercepta η_1 . O ponto $P3$ é obtido pela interseção da tangente que passa por $P2$ na curva $C_M \times U_M$. O ponto $P4$ é determinado pelo intercepto na curva $C_I \times U_I$ da reta que passa por $P3$ e η_2 . As velocidades do choque para este sistema obtidos a partir da solução do sistema auxiliar são os choques D_2 e D_3 . Os choques D_1 e D_4 representam C -choques e ligam as condições de injeção e inicial às regiões bifásicas:

$$D_1 = \frac{U_{P1} - U_J}{C_{P1} - C_J}, D_2 = \frac{U_{P3} + \eta_1}{C_{P3} + \eta_1}, D_3 = \frac{U_{P4} + \eta_2}{C_{P4} + \eta_2} \text{ e } D_4 = \frac{U_I - U_{P4}}{C_I - C_{P4}} \quad (32)$$

O caminho estrutural da solução é descrito através da seguinte fórmula estrutural:

$$J \rightarrow P1 - P2 \rightarrow P3 \rightarrow P4 \rightarrow I \quad (33)$$

onde \rightarrow representa choque e $-$ rarefação. O trecho unindo os pontos $P1$ e $P2$ é formado por uma C -rarefação calculada segundo a Eq. (20). Os perfis de saturação de líquido e de concentração total dos componentes N_2 - C_3 - C_6 - C_{10} após a injeção de um volume poroso de gás podem ser vistos na Fig. 10 e na Fig. 11, respectivamente.

Temos então a solução para o sistema original:

$$\beta_2(\xi) = \begin{cases} 0,05; & 0 < \xi < D_2 = 0,99996 \\ 0,013; & D_2 < \xi < D_3 = 0,99998 \\ 0,0125; & D_3 < \xi < +\infty \end{cases} \quad (34)$$

$$\beta_3(\xi) = \begin{cases} 0,05; & 0 < \xi < D_2 \\ 0,047; & D_2 < \xi < D_3 \\ 0,0237; & D_3 < \xi < +\infty \end{cases} \quad (35)$$

$$C(\xi) = \begin{cases} 0; & 0 < \xi < D_1 = 0,0414 \\ C(\xi); & D_1 < \xi < D_2 \\ 0,00118; & D_2 < \xi < D_3 \\ 0,24780; & D_3 < \xi < D_4 = 1,0047 \\ 0,8430; & D_4 < \xi < +\infty \end{cases} \quad (36)$$

$$S(\xi) = \begin{cases} 0,05; & 0 < \xi < D_1 \\ S(\xi); & D_1 < \xi < D_2 \\ 0,7371; & D_2 < \xi < D_3 \\ 0,7706; & D_3 < \xi < D_4 \\ 0,80; & D_4 < \xi < +\infty \end{cases} \quad (37)$$

Tabela 4:Frações volumétricas para determinação de $C \times U$.

Condição	l_4	g_4
J	0,0009789	0,0000209
M	0,0015934	0,0000208
I	0,3205774	0,0032736

Tabela 5:Dados de entrada para a permeabilidade relativa (Pires, 2003).

s_{wi}	s_r	n_g	n_l	k_{rgm}	k_{rlm}	μ_l (cp)	μ_g (cp)
0,20	0,05	3	3	0,8	0,8	0,001	5,0

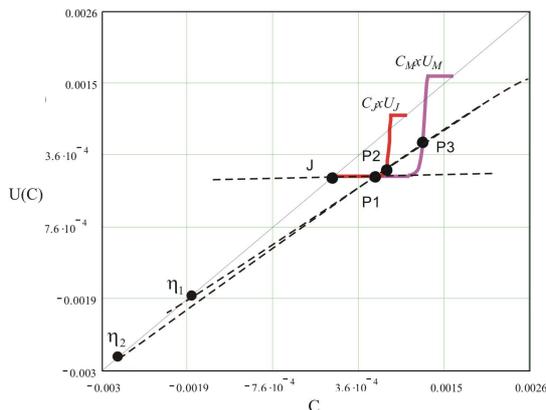


Figura 7. Primeira parte do caminho da solução.

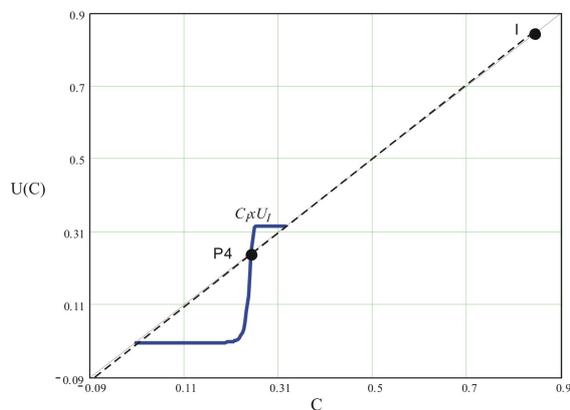


Figura 8. Segunda parte do caminho da solução.

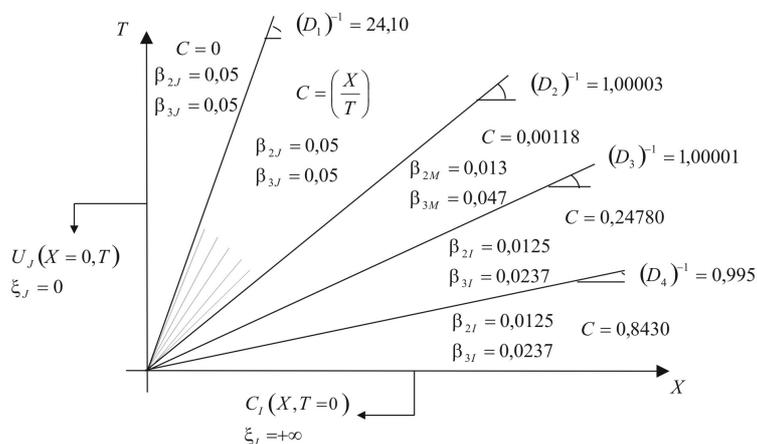


Figura 9. Solução do sistema original.

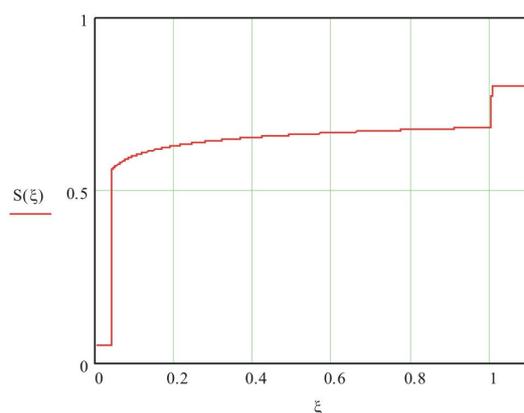


Figura 10. Perfil de saturação da fase líquido.

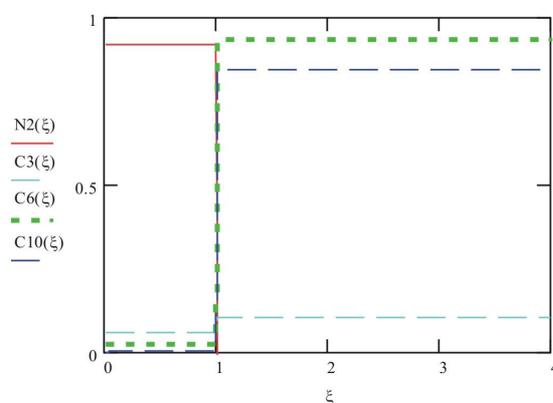


Figura 11. Perfis de concentração do sistema N_2 - C_3 - C_6 - C_{10} @ 300 bar e 350 K após a injeção de um volume poroso.

A formulação matemática aqui apresentada de forma resumida permitiu a solução de um sistema de três equações hiperbólicas que modela o fluxo bifásico miscível com quatro componentes em meios porosos. Isso foi possível devido a uma transformação das variáveis independentes em coordenadas tipo Lagrange, associadas à conservação da massa de um dos componentes do sistema.

Para a solução da parte termodinâmica do problema (sistema auxiliar) foi utilizada uma equação de estado cúbica. A solução do problema de Riemann (injeção contínua de gás) foi obtida através da aplicação de técnicas tradicionais de solução. É importante ressaltar que essa técnica permite a seleção do melhor gás de injeção para um determinado fluido de reservatório independente das propriedades de transporte do sistema (permeabilidades relativas e viscosidades).

10. Conclusões

Neste trabalho aplicamos a técnica de separação de sistemas hiperbólicos para a solução do problema de deslocamento miscível de óleo por gás em um sistema com quatro componentes. Inicialmente o modelo termodinâmico foi descrito com a utilização de uma equação de estado, posteriormente foi selecionada uma determinada condição inicial e de injeção para a solução completa do problema. A condição de injeção escolhida representava uma mistura composta por 90% de N_2 , 5% de C_3 e 5% de C_6 , enquanto que a condição inicial teve a composição definida em 37,5% de N_2 , 5% de C_3 , 37,5% de C_6 e 20% de C_{10} . A solução do problema apresentado apresentou choques e rarefações e foi demonstrado como construir a solução do sistema geral a partir da solução do sistema auxiliar. A injeção miscível de gás tem por objetivo o aumento da eficiência do deslocamento de óleo. Condições de pressão e temperatura, assim como a composição do sistema são de grande importância para o desenvolvimento da miscibilidade.

11. Agradecimentos

Os autores agradecem a Dan Marchesin, Eli Isaacson e Bradley Plohr, autores do "Riemann Problem Solver - RP" pela permissão da utilização deste programa. Agradecemos ao Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA) por nos permitir a utilização de suas instalações. Agradecemos também a Dan Marchesin (IMPA) e Arthur Azevedo (UnB - Universidade Nacional de Brasília) pelo auxílio na utilização do RP.

12. Referências

- Johns, R. T., Dindoruk, B. e Orr Jr., F. M., 1993, "Analytical Theory of Combined Condensing/Vaporizing Gas Drives", Society of Petroleum Engineers Advanced Technology Series, Vol. 2, pp. 7-16.
- Johns, R. T. e Orr Jr., F. M., 1996, "Miscible Gas Displacement of Multicomponent Oils", Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 1, pp. 39-50.
- Lake, L.W., 1989, "Enhanced Oil Recovery", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 550 p.
- Buckley, S. E. e Leverrett, M. C., 1942, "Mechanisms of Fluid Displacement in Sands", Transactions AIME, Vol. 146, pp. 107-116.
- Orr Jr., F. M., Dindoruk, B. e Johns, R. T., 1995, "Theory of Multicomponent Gas/Oil Displacement", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 34, pp. 2661-2669.
- Peng, D. Y. e Robinson, D. B., 1976, "A New Two-Constant Equation of State", Ind. Eng. Chem., Vol. 15, pp. 59-64.
- Pires, A. P., 2003, "Independência entre Termodinâmica e Hidrodinâmica em Processos de Recuperação Avançada de Petróleo", Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Silva, M. K., Larsen, L. L., Orr Jr., F. M. e Monroe, W. W., 1990, "Composition Paths in Four-component Systems: Effect of Dissolved Methane on 1D CO₂ Flooding Performance", Society of Petroleum Engineers Reservoir Engineering Journal, pp. 423-432.
- Wang, Y. e Orr Jr., 1997, "Analytical Calculation of Minimum Miscibility Pressure", Fluid Phase Equilibria, Vol. 139, pp. 101-124.

THERMODYNAMIC BEHAVIOR OF TWO-PHASE FOUR-COMPONENT FLOW IN PETROLEUM RESERVOIRS

Thiago Alvim Dutra
Universidade Estadual do Norte Fluminense
alvim@lenep.uenf.br

Pedro dos Reis Viveiros da Costa
Universidade Estadual do Norte Fluminense
reis@lenep.uenf.br

Adolfo Puime Pires
Universidade Estadual do Norte Fluminense
puime@lenep.uenf.br

Abstract

Gas based methods are used in order to improve the recovery of oil in petroleum reservoirs. These techniques are also known as solvent methods of Enhanced Oil Recovery (EOR). Such methods include injection of methane, rich hydrocarbon gases, carbon dioxide, nitrogen and several combinations. The displacement of oil is improved by mass exchange between both phases, oleic and gas. The one-dimensional displacement of oil by gas is described by an $(n-1) \times (n-1)$ hyperbolic system, where n is the number of components. In this work, the two-phase four-component flow in porous media is analyzed. From the volume conservation of each component, a 3×3 hyperbolic system of conservation laws is obtained. Quaternary diagrams with constant temperatures and pressures describe the thermodynamic behavior of the system, while the hydrodynamic behavior is described by the viscosities and relative permeability curve. It is shown that the 3×3 system can be splitted into a thermodynamic auxiliary 2×2 system and one transport equation. The auxiliary system is determined by thermodynamics only. The problem of gas injection in oil reservoirs with four components was solved for initial and boundary conditions. This procedure allows the screening of EOR fluids.

Keywords: enhanced oil recovery, reservoir engineering, systems of hyperbolic differential equations, conservation laws.