

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE DADOS PVT E PRESSÃO MÍNIMA DE MISCIBILIDADE NOS SIMULADORES SPECS E MI-PVT

Rocha, P.S.R.¹, Alves, D.C.R.², Costa, G.M.N.²

¹ PETROBRAS – Unidade de Negócios da Bahia Av. ACM, 1.113, Itaigara – CEP: 41.859-900 – Salvador – BA,

e-mail: psrocha@petrobras.com.br

² Centro de Estudos em Petróleo e Gás Natural (CEPGN) – Universidade Salvador (UNIFACS) Av. Cardeal da Silva, 132, Federação – CEP: 40.220-141 – Salvador – BA,
e-mail: gloria.costa@unifacs.br

Resumo – Processos de injeção de gás estão entre os métodos mais eficientes para a recuperação especial de óleo. Um parâmetro chave de um projeto de injeção de gás é a pressão mínima de miscibilidade (PMM), a pressão na qual a eficiência do deslocamento local se aproxima de 100%. Uma abordagem teórica, baseada em uma equação de estado, embora seja consubstanciada conceitualmente, necessita de dados experimentais empregados no ajuste dos parâmetros da equação de estado para que ela reproduza com fidedignidade o comportamento de fases envolvendo o óleo e o gás. Os experimentos PVT, testes de inchamento são normalmente utilizados nesta regressão e a avaliação da PMM, a partir da equação de estado ajustada, pode ser analisada pela comparação com dados experimentais. O objetivo deste trabalho é efetuar este estudo. Com esta finalidade, os simuladores empregados são: SPECS e MI-PVT (Technical University of Denmark), sendo a equação de estado selecionada a de Soave-Redlich-Kwong, e os experimentos necessários: dados PVT, teste de inchamento com CO₂ e medição da PMM com CO₂ utilizando o *Rising Bubble Apparatus*, realizados no CEPGN (Centro de Estudos de Petróleo e Gás Natural – UNIFACS).

Palavras-Chave: Pressão Mínima de Miscibilidade; CO₂; Equação de Estado.

Abstract – Gas injection processes are among the most efficient enhanced oil recovery methods. A key parameter in a gas injection project is the minimum miscibility pressure (MMP), the pressure at which the local displacement efficiency is near 100%. A theoretical approach based on an equation of state (EOS), although conceptually supported, needs experimental data to be used in the determination of the equation of state parameters in order for the EOS be able to predict the correct phase behavior for the oil and gas. The PVT experiments such as swelling tests are normally used in the regression analysis and the evaluation of the MMP from the adjusted equation of state can be checked against the experimental data. The purpose of this work is to report this type of study. The simulators used were: SPECS and MI-PVT (Technical University of Denmark). Soave-Redlich-Kwong's equation of state was selected. The experiments are: PVT data, CO₂ swelling tests and CO₂ MMP measurements using the *Rising Bubble Apparatus*. The experiments were performed in the CEPGN (*Centro de Estudos de Petróleo e Gás Natural*) at UNIFACS.

Keywords: Minimum Miscibility Pressure, CO₂, Equation of State

1. Introdução

A injeção de gás acima da pressão mínima de miscibilidade (PMM) é um recurso largamente utilizado para melhorar a recuperação de óleos em muitos reservatórios. A PMM é a menor pressão para qual um gás pode desenvolver miscibilidade através de um processo de contato múltiplo com um dado óleo na temperatura do reservatório. O reservatório no qual o processo é aplicado deve ser operado em ou acima da PMM para desenvolver miscibilidade por contatos múltiplos. Pressões do reservatório abaixo da PMM resultam em deslocamentos imiscíveis e conseqüentemente recuperações mais baixas de óleos.

O processo miscível de injeção necessita de uma compreensão ampla do comportamento das frações envolvidas, isto é, o fluido de reservatório e o fluido de injeção e como estes fluidos se misturam em dadas condições de temperatura e pressão.

Entre as várias abordagens para calcular a PMM podemos citar aquela teoricamente baseada em equação de estado.

Equações de estado têm larga aceitação como ferramentas que permitem o cálculo do comportamento de fases do fluido do reservatório, porém os parâmetros de uma equação de estado necessitam de ajuste antes de sua aplicação para um fluido particular.

A predição do comportamento de fases e, por conseguinte os ajustes dos parâmetros da equação de estado, que serão depois usados na simulação da PMM, podem ser monitorados através dos seguintes experimentos PVT: expansão à composição constante (CCE); liberação diferencial (LD); teste de inchamento.

A finalidade deste trabalho é fazer uma avaliação da simulação da PMM utilizando para tal os simuladores SPECS e MI-PVT (Technical University of Denmark). Tanto a medição experimental da PMM obtida no *Rising Bubble Apparatus*, utilizada para a comparação com o valor simulado, como os experimentos: CCE, LD e teste de inchamento, obtidos na célula PVT, empregado no ajuste da equação de estado, são realizados no CEPGN (Centro de Estudos de Petróleo e Gás Natural – UNIFACS). Além do resultado da avaliação da simulação, tem-se também, como produto decorrente, o desenvolvimento de toda uma estratégia de sistematização das várias etapas desenvolvidas durante o processo de ajuste e simulação propriamente dito.

2. Métodos

A equação de estado selecionada para a simulação foi a de Soave – Redlich – Kwong (SRK), Soave (1972), introduzida resumidamente como segue:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b)} \quad (1)$$

Para componentes puros, o parâmetro de energia $a(T)$ pode ser calculado por:

$$a(T) = a_c \alpha(T_R, w) \quad (2)$$

Os parâmetros a_c e b são expressos em termos da pressão crítica, P_c , e temperatura crítica, T_c , e $\alpha(T_R)$ em termos de temperatura, temperatura crítica, T_c , e fator acêntrico, w . Quando usada a Equação 1 para misturas, os parâmetros dos componentes puros a e b são substituídos pelas seguintes regras de misturas:

$$a(T) = \sum \sum z_i z_j (a_i a_j)^{0,5} (1 - k_{ij}) \quad (3)$$

$$b = \sum z_i b_i \quad (4)$$

sendo z_i e z_j as frações molares dos componentes i e j e k_{ij} , é conhecido como o parâmetro binário de interação.

Em relação ao procedimento usado na obtenção de um modelo para um fluido com “n” componentes, a temperatura crítica, T_c , pressão crítica, P_c e o fator acêntrico, w , dos componentes que descrevem a fração pesada e o seu parâmetro de interação binário são somente valores aproximados. Assim, é justificado o uso destes valores como parâmetros em uma regressão de dados experimentais disponíveis. Esta regressão pode ser conduzida pela minimização sob restrições do software ou “manualmente”.

A correção de volume proposta por Peneloux et al (1982) fornece resultados precisos de modelagem da densidade e não afeta os cálculos do equilíbrio líquido-vapor. Ela consiste em mudar o volume obtido com equações de estado para um volume deslocado v_{cor} ,

$$v_{cor} = v - c \quad (5)$$

onde c é o termo de correção.

A simulação e, como consequência, o ajuste dos dados experimentais PVT e dados de inchamento foram realizados com 02 programas: SPECS (Technical University of Denmark) e MI-PVT (Tie line Technology at Denmark). Estes programas são baseados na mesma estrutura (mesmo procedimento de caracterização), mas o inchamento está disponível somente no segundo programa. O procedimento de ajuste é realizado etapa por etapa, i.e., cada propriedade, uma por uma, e “manualmente”. São usados dois procedimentos diferentes de caracterização disponíveis nos programas SPECS e MI-PVT: Pedersen et al (1988) – de agora em diante denominado caracterização de Pedersen – e Quiñones-Cisneros e Stenby (2003) – caracterização de Cisneros. Na caracterização de Pedersen, para calcular as propriedades críticas e o fator acêntrico, dos pseudocomponentes (resíduo), abrangendo portanto frações a partir de C_7 , as variáveis independentes necessárias são o peso molecular (MW_i) e a densidade (SG_i) de cada componente. Para estimar a composição do resíduo, uma distribuição logarítmica da fração molar, z_i , versus número de carbonos do componente (ou fração), CNi , é usada. O peso molecular MW_i e a densidade SG_i de cada subfração no resíduo são calculados com CNi . A partir do conhecimento de SG_i e MW_i de cada subfração no resíduo, a temperatura crítica, pressão e fator acêntrico são calculados com as mesmas equações utilizadas para os componentes definidos. O método usado para “aglutinar” as frações do resíduo em grupos é dado por Pedersen et al (1985).

No método de Cisneros, o procedimento da caracterização consiste em caracterizar as frações pesadas distribuindo a fração mássica de C_7+ de acordo com uma função de distribuição qui - quadrado com grau de liberdade p que melhor representa a distribuição mássica da fração C_7+ . No simulador o grau da função distribuição p está fixado em 4. A fração C_7+ (cujo peso molecular é $MW+$) é caracterizada em um número m de frações Fi , sendo MW_i o peso molecular da fração Fi , obtido a partir do valor atribuído a $MW+$. As equações resultantes para propriedades críticas e fator acêntrico da fração Fi são:

$$T_{c_i} = -423,587 + 210,152 \ln(MW_i) \quad (6)$$

$$P_{c_i} = fc \exp(9,67283 - 4,05288 MW_i^{0,1}) \quad (7)$$

$$w_i = \exp \left[8,50471 - \frac{15,1665}{MW_i^{0,1}} \right] \quad (8)$$

onde fc representa um fator de perturbação diferente do valor de $fc=1$ que corresponde ao ajuste dos n -alcanos.

O parâmetro de Peneloux c , Equação 5, é estimado com a regra de mistura, expressa pela Equação 9 onde o somatório inclui somente a fração pesada (h.fr) dos pseudocomponentes correspondentes a C_7^+ e k_v representa uma constante característica de volume para o líquido.

$$c = k_v \sum_{h.fr.} x_i MW_i \quad (9)$$

3. Sistematização dos Ajustes

Os experimentos realizados no CEPGN foram utilizados no ajuste dos parâmetros da equação de estado para o seu uso posterior na simulação da PMM com CO_2 . Os seguintes dados experimentais são disponíveis: pressão de saturação, densidades totais e volumes relativos medidos durante a expansão à composição constante (CCE) nas condições do reservatório; massa específica do líquido (Dens), razão de solubilidade (Rs), fator volume de formação do óleo (Bo) medidos durante a liberação diferencial (LD) na temperatura do reservatório; outras pressões de saturação do óleo com a adição de várias frações de CO_2 na temperatura do reservatório, resultando no teste de inchamento (SWE); flash do teste de inchamento realizado no óleo inchado onde são monitoradas a composição das fases (em termo da constante de equilíbrio), principalmente para metano e CO_2 , fator de compressibilidade de fase líquida e fração vaporizada e finalmente a pressão mínima de miscibilidade. Para as duas caracterizações as etapas a serem seguidas na regressão são: ajustes dos parâmetros críticos (temperatura e pressão) dos pseudocomponentes e metano tendo como referência os valores experimentais do CCE e da LD, com a avaliação simultânea do número de pseudocomponentes envolvidos na regressão; ajuste dos parâmetros de interação binária entre a fração mais pesada e o CO_2 envolvendo também o número de frações participantes da regressão e a última etapa do ajuste consiste na simulação do flash do inchamento do óleo com CO_2 no qual é realizado o ajuste dos parâmetros de interação binária entre a fração mais pesada e C_1 , sendo também envolvida nesta regressão a avaliação do número de frações.

Como as duas caracterizações são intrinsecamente diferentes, o detalhamento das etapas da simulação no que tange aos experimentos PVT, apresenta diferenças.

3.1 Regressão dos Experimentos PVT com a Caracterização de Pedersen

No CEPGN, a análise cromatográfica do óleo permite a identificação das frações mássicas até a fração C_{30}^+ . Porém, a única opção disponível no simulador SPECS ou MI-PVT é a fração molar. Necessitamos do peso molecular das frações para realizar esta conversão. Como não dispomos do crioscópio, para a determinação do peso molecular do óleo, fica subtendido que não é conhecido o peso molecular da fração C_{30}^+ . Baseado no fato de que a análise cromatográfica (em termos de fração mássica) e a determinação da pressão de saturação na célula PVT são experimentos distintos, foi usada uma alternativa para suprir a ausência do crioscópio, que consiste em atribuir um peso molecular à fração C_{30}^+ até que exista uma concordância com o valor experimental da pressão de bolha, sendo todos os outros parâmetros de ajuste mantidos como *default* do programa.

Como parte inicial da simulação dos experimentos PVT (CCE e LD), foram examinadas duas opções: considerar o óleo com a composição completa até C_{30}^+ ou até C_7^+ , nos dois casos a fração mais pesada foi admitida como sendo constituído de três pseudocomponentes. Com a composição até C_{30}^+ foram examinadas as seguintes opções em relação do ajuste das propriedades críticas Tc e Pc: duas frações mais pesadas, duas frações mais pesada e metano e finalmente quatro frações mais pesadas e metano. Em relação à consideração da composição do óleo até C_7^+ , foram avaliadas além das opções anteriores a inclusão ou não da correção de Peneloux. A avaliação dos resultados indicou como sendo a melhor opção, o ajuste das propriedades críticas das três frações e metano e a composição do óleo até C_7^+ .

3.2 Regressão do Experimento PVT com a Caracterização de Cisneros

A caracterização de Cisneros, Equações 6 a 9, é diferente da caracterização de Pedersen em vários aspectos: não é necessária a transformação da composição do óleo de fração em peso para fração molar pois o peso molecular de C_7^+ (MW^+) é um parâmetro de ajuste do método; o número de frações mais pesadas a ser ajustado é fixo, pois o método considera a composição até C_7^+ , a pressão crítica é modificada assumindo um valor de MW^+ e é influenciada por fc e MW^+ e finalmente, o parâmetro de Peneloux c é modificado com o valor de kv . Resumidamente, podemos ajustar três parâmetros: MW^+ , fc e kv .

Uma análise inicial de sensibilidade foi realizada sobre a influência de fc e MW^+ com o objetivo de avaliar a qualidade da simulação dos experimentos PVT. Para um valor fixo de fc , os resultados indicaram que um aumento de MW^+ ocasiona sistematicamente um decréscimo de Bo e Rs e um aumento de densidade e pressão de saturação. Por outro lado com um valor fixado de MW^+ com valores variados de fc ocorre um espalhamento das propriedades não existindo nenhuma sistemicidade de comportamento. Estes resultados indicam que o ajuste em relação aos experimentos PVT, dos parâmetros fc e MW^+ é mais rapidamente conseguido, fixando-se o valor de fc em 1,4 (*default*) e variando o MW^+ até ser atingido a melhor aproximação do experimento PVT, seguido então do ajuste fino com o fc para a aproximação ótima.

3.3 Regressão dos Testes de Inchamento e Simulação da PMM para as Duas Caracterizações: Pedersen e Cisneros

O ajuste do parâmetro de interação K_{ij} é realizado em duas etapas: na primeira estão envolvidas a fração ou frações mais pesadas e CO_2 na simulação do teste de inchamento e na segunda etapa a fração ou frações mais pesadas e C_1 , na simulação do flash do inchamento. Nesta segunda etapa o monitoramento da simulação é realizado em termos da constante de equilíbrio para C_1 e CO_2 , fração vaporizada e fator de compressibilidade para a fase líquida.

Após o ajuste das propriedades críticas (temperatura, pressão), do fator acêntrico das frações mais pesadas e dos parâmetros de interação binária (K_{ij}), a próxima etapa é a determinação por simulação da PMM, sem portanto o ajuste de nenhum parâmetro adicional. A caracterização escolhida tem influência no cálculo final da PMM e nas regressões das outras propriedades.

4. Resultados e Discussão

Foram realizados no CEPGN experimentos PVT e teste de inchamento em 8 amostras, sendo a PMM obtida experimentalmente no *Rising Bubble Apparatus* para 5 amostras. Os resultados dos ajustes e da simulação são apresentados sob a forma de desvio absoluto percentual da pressão mínima de miscibilidade (DPMM %), pressão de saturação (DPsat %), densidade (DDens %), teste de inchamento (DSWE %), razão de solubilidade (DRs %) na Tabela 1, para a caracterização de Pedersen e na Tabela 2, para a caracterização de Cisneros. Para o teste de inchamento, a razão de solubilidade, Bo e densidade são apresentados os desvios para as três maiores pressões utilizadas em seus testes, a ordem decrescente de P_1 para P_3 , sendo seus valores não nomeados por razão de sigilo industrial.

Tabela 1- Desvios percentuais finais do ajuste – caracterização de Pedersen

Amostra	D PMM %	D Psat %	D Dens %			D Rs %		
			P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	N.D.	30,66	2,20	0,37	2,49	17,22	3,20	15,29
2	N.D.	31,08	3,65	4,34	2,25	17,25	24,81	16,38
3	N.D.	75,53	37,54	41,27	43,45	85,12	43,91	26,10
4	0,59	46,74	73,32	67,52	72,14	4,83	71,69	60,00
5	3,50	14,80	12,90	12,80	13,98	5,19	5,16	4,33
6	17,93	25,27	50,14	47,44	48,53	11,27	13,46	21,71
7	17,84	13,49	72,16	76,21	80,62	5,49	20,25	20,13
8	6,16	34,09	88,98	86,47	90,93	4,55	34,33	33,94

Amostra	D Bo %			D SWE %		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	3,40	1,28	2,26	28,16	27,17	27,95
2	1,44	1,72	0,88	83,36	47,00	34,49
3	11,58	4,54	2,47	99,84	99,85	99,86
4	0,09	5,83	2,75	40,08	38,08	37,65
5	1,79	2,50	1,31	17,63	16,15	15,44
6	1,23	2,07	1,79	25,87	23,78	22,71
7	1,84	0,49	1,58	17,82	18,25	18,01
8	0,82	4,23	2,29	26,65	27,95	28,91

N.D.- Resultados experimentais não disponíveis.

Tabela 2- Desvios percentuais finais do ajuste – caracterização de Cisneros

Amostra	D PMM %	D Psat %	D Dens %			D Rs %		
			P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	N.D.	29,94	13,09	15,38	13,35	7,61	13,96	5,75
2	N.D.	20,30	4,41	3,97	5,98	20,33	28,26	20,81
3	N.D.	6,08	19,51	19,93	20,40	9,73	10,75	5,76
4	2,22	53,59	48,73	42,87	47,67	48,41	169,00	185,28
5	17,34	9,31	20,90	21,34	21,16	20,89	17,69	25,10
6	26,19	25,46	2,03	0,27	0,05	11,57	13,51	22,33
7	23,49	13,77	1,70	0,31	1,48	2,90	18,04	18,88
8	3,84	32,97	1,41	0,77	0,39	8,15	28,15	31,65

Amostra	D Bo %			D SWE %		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	0,53	3,85	0,33	26,86	26,15	27,08
2	2,04	2,26	0,38	N.A.	N.A.	N.A.
3	0,46	0,76	1,53	N.A.	N.A.	N.A.
4	6,88	13,93	9,28	46,75	44,13	43,66
5	1,34	0,70	1,21	23,96	19,79	17,74
6	1,97	1,37	1,16	28,56	24,85	23,29
7	0,77	0,40	2,35	28,70	24,93	22,91
8	0,30	3,08	1,52	32,73	31,35	30,80

N.D.- Resultados experimentais não disponíveis.

N.A.- Convergência não alcançada.

Os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 demonstram a influência da caracterização do óleo na simulação de todas as propriedades. Ao se analisar o desvio da PMM, observa-se que para as amostras 6 e 7, os resultados não são bons, independente da caracterização, sendo piores para a de Cisneros. Para a amostra 5 existe uma enorme diferença no desvio da PMM quando se utiliza uma ou outra caracterização. Quanto à pressão de saturação, os desvios são enormes para as duas caracterizações. O único desvio razoável em relação à pressão de saturação é o relativo a caracterização de Cisneros para a amostra 3. Quanto à densidade, a única amostra para a qual o ajuste se manteve bom, para as duas caracterizações foi a amostra 2. Para as amostras 6, 7 e 8 os ajustes foram muito bons para a caracterização de Cisneros, enquanto que para a amostra 1 a caracterização que apresentou um melhor desempenho foi a de Pedersen. Ao se avaliar os erros de Rs, a única amostra para a qual as duas caracterizações conseguiram descrever com qualidade razoável foi a amostra 1. Para a caracterização de Pedersen, descrição boa foi a obtida para a amostra 5. Para a amostra 3 resultado

bem razoável para o Rs é obtido pela caracterização de Cisneros. Para a simulação de Bo, exceto a caracterização de Pedersen para a amostra 3 e a caracterização de Cisneros para a amostra 4, os resultados dos desvios são muito bons. Para a simulação dos teste de inchamento, a caracterização de Cisneros se mostrou muito ruim para todas as amostras, inclusive não foi alcançada a convergência para as amostras 2 e 3. Quanto à caracterização de Pedersen, para as amostras 5 e 7 o ajuste foi bom.

Em relação aos desvios da densidade, observa-se que, pela caracterização de Cisneros, são muito menores do que pela caracterização de Pedersen. Isto ocorre pois na caracterização de Cisneros faz-se um ajuste no parâmetro kv, como mostrado na Equação 9 que, por sua vez altera o parâmetro de Peneloux c, sendo este o responsável pelo deslocamento (melhoria) do volume do líquido, como pode ser observado pela Equação 5. Na caracterização de Pedersen poderia ser diminuído o desvio da densidade utilizando-se o recurso da correção de Peneloux, porém percebe-se que a diminuição dos desvios da densidade acarreta um aumento nos desvios de Bo e de Rs, sendo portanto preferível ter altos desvios para a densidade do que aumentar os desvios de Rs, que na maioria dos casos já é alto e também de Bo.

Em relação aos grandes desvios da pressão de saturação, observa-se que poderia ser realizada uma pequena melhoria na sua simulação através do ajuste adicional do parâmetro Kij porém, isto acarreta um ajuste pior para a liberação diferencial, para o flash do inchamento e conseqüentemente um pior ajuste da PMM.

Em relação ao inchamento também se observa grandes desvios. Neste caso, o problema é decorrente do fato relacionado anteriormente com a pressão de saturação pois, o primeiro ponto de pressão do inchamento é a pressão de saturação na ausência de CO₂ e portanto as pressões seguintes com a adição de CO₂ vão ser iniciadas de um patamar errado.

5. Conclusões

Utilizando-se os seguintes experimentos: dados PVT, teste de inchamento, determinação da PMM, foi realizada uma avaliação dos simuladores SPECS e MI-PVT quanto à qualidade da simulação destas propriedades. Os resultados indicam que, apesar de toda uma sistemática cuidadosa criada para realizar estas tarefas, não se pode generalizar os resultados de simulação citados na literatura, como sendo de alta qualidade, a não ser que se focalize na PMM e assim mesmo com bastante cautela, pois não são para todas as amostras examinadas que os resultados extremamente favoráveis.

6. Referências

- PEDERSEN, K. S., THOMASSEN, P., FREDENSLUND, Aa. On the dangers of “tuning” equation of state parameters. *Chem. Eng. Science*, v.43, n.2, p.269-278, 1988.
- PEDERSEN, K. S., THOMASSEN, P., FREDENSLUND, Aa. Thermodynamics of petroleum mixtures containing heavy hydrocarbons. 3. Efficient flash calculation procedures using the SRK equations of state. *Ind. Chem. Process Des. Dev.*, 24, p.948-954, 1985.
- PÉNELOUX, A., RAUZY, E., FREZE, R. A consistent connection for Redlich-Kwong-Soave volumes. *Fluid Phase Equilibria*, v.8, p.7-23, 1982.
- QUINONES-CISNEROS, S. E., STENBY, E. H. Density and viscosity behaviour of petroleum reservoir fluids at high-temperature / high-pressure conditions. SPE 84284, 2003.
- SOAVE, G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state. *Chem. Eng. Sci.*, p.1197-1203, 1972.