

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada a
Faculdade de Engenharia de Campinas
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

ESTUDO DE UM MODELO COMPOSICIONAL
PARA SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida pelo Eng. Denis José Schiozer e aprovada pela Comissão Julgadora em 28/06/89.

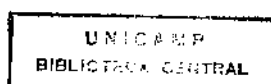
Antônio Cláudio de França Corrêa
Prof. Dr. Antônio Cláudio de França Corrêa

Autor : Denis José Schiozer

31189

Orientador : Antônio Cláudio de França Corrêa

Junho de 1989

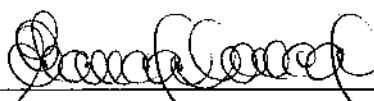


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação "Estudo de um modelo Composicional para Simulação de Reservatórios", elaborada por Denis José Schiozer e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 28 de Junho de 1989.

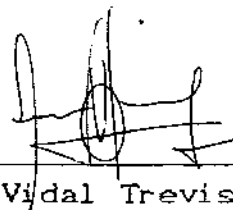
Banca Examinadora



Antônio Cláudio de França Corrêa, Ph. D.



Kelsen Valente Serra, Ph. D.



Osvaldo Vidal Trevisan, Ph. D.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Antônio Cláudio de França Corrêa, por sua valiosa orientação na elaboração deste trabalho.

Aos funcionários e professores do CEPETRO e da UNICAMP e aos colegas de curso, por tornarem esta tarefa mais fácil e agradável.

INDICE

	Página
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
1) Introdução.....	1
1.1- A escolha do modelo.....	3
1.2- O modelo.....	4
2) Modelo Matemático.....	6
2.1- Equações do Escoamento.....	6
2.2- Equações de Equilíbrio.....	9
2.3- Equações Adicionais.....	10
3) Discretização.....	11
3.1- Grade.....	11
3.2- Equações.....	12
4) Método de Solução.....	15
4.1- Fluxograma.....	18
4.2- Equação de Pressão.....	19
4.3- Equações das Composições.....	26
4.4- Equações das Saturações.....	27

5) Equilíbrio Líquido-Vapor - "Flash".....	29
5.1- Equilíbrio Líquido-Vapor.....	29
5.2- Equações de Estado.....	32
5.3- O "Flash".....	35
6) Tópicos especiais.....	39
6.1- Permeabilidade Relativa.....	39
6.2- Modelo de Poço.....	41
6.3- Balanço de Materiais.....	44
6.4- Critério de Convergência.....	45
6.5- Modelo Radial.....	46
6.6- Resolução do Sistema.....	49
6.7- Controle do Intervalo de Tempo.....	50
6.8- Modelo de Helfferich.....	51
7) Resultados.....	53
7.1- Caso 1 - Modelo Unidimensional - Injeção de Gás.....	54
7.2- Caso 2 - Condensação Retrógrada.....	63
7.3- Caso 3 - Modelo de Helfferich.....	68
7.4- Caso 4 - Modelo Radial.....	75
7.5- Caso 5 - Validação do Modelo.....	76
8) Conclusões.....	80

ANEXOS

A) Nomenclatura.....	84
B) Tabela de Conversão de Unidades para o SI	88
C) Listagem do Programa.....	89
D) Exemplo Entrada de Dados.....	113
Referências Bibliográficas.....	115

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 4.1 : Fluxograma.....	18
Figura 4.2 : Sistema de Resolução da Equação da Pressão.....	21
Figura 7.1.1 : Distribuição das Composições no Tempo Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3".....	56
Figura 7.1.2 : Distribuição das Composições nos Blocos Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3".....	57
Figura 7.1.3 : Distribuição das Composições nos Blocos Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3" sem a Limitação da Equação (3.10).....	58
Figura 7.1.4 : Composição do Butano Efeitos da Limitação da Equação (3.10).....	59
Figura 7.1.5 : Composição do Butano Efeitos da Variação do Número de Blocos.....	60
Figura 7.1.6 : Saturação de Óleo Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3".....	61
Figura 7.2.1 : Saturação de Óleo - Condensação Retrógrada Efeitos da Variação do Intervalo de Tempo.....	65
Figura 7.2.2 : Envelope de Fases para (Metano: 0.65065), (Butano: 0.32551) e (Decano: 0.02384).....	66
Figura 7.2.3 : Envelope de Fases para (Metano: 0.69189), (Butano: 0.30304) e (Decano: 0.00507).....	67
Figura 7.3.1 : Saturação de Óleo - Modelo de Helfferich Efeitos da Variação do número de blocos.....	71

Figura 7.3.2 : Saturação de Óleo - Modelo de Helfferich	
Efeitos da Variação da Formulação das	
Composições.....)	72
Figura 7.3.3 : Composição do Fluido Injetado - Modelo de	
Helfferich. Efeitos da Variação do número	
de blocos.....	73
Figura 7.3.4 : Composição do Fluido Injetado - Modelo de	
Helfferich. Efeitos da Variação da	
Formulação das Composições.....	74

RESUMO

Este trabalho descreve um simulador composicional isotérmico, implícito para a pressão e explícito para as saturações e composições.

Este tipo de modelo é usado na simulação do comportamento de reservatórios de gás condensado e óleo volátil, na injeção de gás e CO_2 e em estudos de deslocamentos miscíveis. A sua aplicação pode ser estendida para alguns problemas do tipo "black-oil". As equações são resolvidas por um método iterativo e sequencial, através do balanço de moles dos hidrocarbonetos e da água, com base em um modelo de Nghiem, L.X., Fong, D.K. e Aziz, K..

O equilíbrio e as propriedades das fases são estimadas por um "flash" usando uma equação de estado que pode ser tanto a de Peng-Robinson como a de Soave-Redlich-Kwong, dentre outras. Um cálculo "flash" eficiente permite o uso do modelo na região crítica.

O modelo foi testado para vários casos e alguns deles são apresentados e discutidos.

Devido à simplicidade, tempo computacional e desempenho, este trabalho pode ser um primeiro passo para o desenvolvimento de um "General Purpose Reservoir Simulator".

ABSTRACT

This work describes an implicit-pressure, explicit-composition and explicit-saturation isothermal compositional model.

This type of model is required in the simulation of the behavior of gas condensate and volatile oil reservoirs, in enhanced oil recovery reservoirs by CO₂ or enriched gas injection and in miscible displacement. It can be used also for some black-oil problems.

The equations are based on the molar balance of the hydrocarbon components and water, and they are solved using an iterative-sequential method, based on a model by Nghiem, L.X., Fong, D.K., and Aziz, K..

The compositional phase equilibrium and phase behavior properties are estimated by a equilibrium flash calculation using an equation of state (either Peng-Robinson or Soave-Redlich-Kwong). An efficient flash-calculation permits the use of the model around the critical point.

The model has been tested against some conditions which are presented and discussed.

This model, due to the simplicity to program, run-time and performance, can be usefull as a first step for the development of a General Purpose Reservoir Simulator

1 - INTRODUÇÃO

Simulação numérica de reservatórios é usada para estimar a produção de poços, avaliar os efeitos de alterações nas condições de operação dos reservatórios e comparar os diferentes métodos de recuperação.

Um modelo de simulação de reservatórios pode ser definido como um grupo de equações de balanço de materiais a ser resolvido numericamente, geralmente por diferenças finitas.

Recentemente, com o surgimento de diferentes métodos de recuperação de óleo e gás, o número de modelos de simulação de reservatórios cresceu bastante. Os modelos térmicos podem ser aplicados na injeção de vapor ou em processos de combustão "in-situ" em reservatórios de óleo pesado. Os modelos químicos incluem a injeção de produtos químicos tais como polímeros e soda cáustica. Os modelos de dupla porosidade e dupla permeabilidade são usados para simular reservatórios naturalmente fraturados. Estes, porém, não pertencem ao alvo de discussões deste trabalho.

Os modelos do tipo "black-oil" são isotérmicos e podem ser usados em estudos de recuperação convencionais de hidrocarbonetos em reservatórios contendo água, óleo e gás. O balanço de massas é feito com base nestas três fases e as propriedades dos fluidos dependem apenas da pressão atuante e da pressão de saturação do sistema de hidrocarbonetos. Este tipo de modelo supõe ainda composições de óleo e gás constantes e não considera a solubilidade do óleo no gás, isto é, a volatilidade do óleo.

Na década de 70, com a elevação acentuada do preço do petróleo, cresceu a importância dos métodos especiais de recuperação. A necessidade de se aumentar a produção doméstica de óleo fez com que poços mais profundos fossem perfurados, aumentando a frequência de reservatórios de óleo volátil e gás condensado.

Dentro deste contexto, surgiu a necessidade de desenvolvimento de sistemas mais complexos capazes de simular a produção de óleo sob condições em que os modelos "black-oil" são ineficientes.

Ganharam ênfase os modelos "black-oil" modificados e os composicionais. Os primeiros são modelos um pouco mais sofisticados que os "black-oil" convencionais, com algumas alterações como, por exemplo, mútua solubilidade entre as fases. Os modelos composicionais são utilizados quando o comportamento do reservatório é afetado pela variação das propriedades PVT com a composição dos hidrocarbonetos.

O sucesso de alguns modelos composicionais, aliado à rápida evolução dos computadores, faz com que as pesquisas se voltem para o desenvolvimento de um simulador capaz de englobar todos ou a maioria dos casos anteriores ("General Purpose Reservoir Simulator").

A idéia deste trabalho nasceu da possibilidade de se estudar um modelo composicional simples, que pudesse ser usado também para problemas do tipo "black-oil". Este é o primeiro passo para o desenvolvimento de um "General Purpose Reservoir Simulator".

1.1 - A ESCOLHA DO MODELO

O estudo dos efeitos de mudanças de composição na simulação de reservatórios começou com a introdução do equilíbrio líquido-vapor (ELV) nos modelos computacionais. Todas as tentativas, entretanto, apresentavam problemas de convergência na região crítica.

Este problema começou a ser superado por Fussell e Fussell [FF79], com a introdução de uma equação de estado cúbica (EOS) na determinação do equilíbrio líquido-vapor.

Desde então, outros modelos utilizando equações de estado foram apresentados. A referência [TLS83] mostra uma comparação entre três modelos: o modelo totalmente implícito de Coats [Coa80], o de Nghiem, Fong e Aziz [NFA81] e o de Young e Stephenson [YS83]. A referência [Won88] apresenta também algumas outras formulações e comparações.

De acordo com os resultados apresentados nestas referências, o modelo [NFA81] foi escolhido como base na formulação do presente trabalho, pelos resultados apresentados, pelo menor tempo de desenvolvimento do programa, pela maior simplicidade de construção do modelo e pelo menor tempo de computação quando se trabalha com um pequeno número de componentes.

A viabilização do estudo dos problemas do tipo "black-oil" seria conseguida pela redução do número de componentes. Com apenas dois componentes, o tempo de computação diminui bastante e a solubilidade entre as fases é feita naturalmente pelo cálculo do

equilíbrio líquido-vapor através do "flash" como será visto no capítulo (5).

A escolha dos componentes para cada caso deve ser feita a partir de dados experimentais de propriedades PVT.

1.2 - O MODELO

O modelo computacional a ser estudado é do tipo composicional, com cálculo implícito da pressão e explícito das saturações e composições.

O equilíbrio de fases é calculado por um "flash" através de uma equação de estado, que pode ser a de Peng-Robinson ou a de Soave-Redlich-Kwong.

A formulação da equação da pressão leva a uma matriz simétrica e diagonalmente dominante, o que é uma característica importante para a estabilidade numérica do modelo, e permite a utilização de métodos de eliminação direta para a solução do sistema de equações.

As equações são resolvidas através de um método iterativo sequencial, conforme o fluxograma apresentado no item (4.1).

O modelo tem por base ainda as seguintes características:

- fluxo isotérmico,
- escoamento trifásico (óleo, gás e água),
- bidimensional (X e Y),
- multicomponente,
- poços de injeção ou produção em qualquer bloco,
- gravidade e pressão capilar desprezadas,

- meio homogêneo e isotrópico,
- blocos uniformes em cada direção,
- escoamento regido pela lei de Darcy,
- produção à vazão ou pressão constante e,
- reservatório fechado (sem fluxo externo).

2 - MODELO MATEMÁTICO

2.1 - EQUAÇÕES DO ESCOAMENTO

As equações do escoamento serão escritas com base no princípio da conservação de massa e na lei de Darcy.

- Conservação de massa para fluxo monofásico em uma direção

A equação do escoamento para este caso é:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \tilde{q} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) \quad (2.1)$$

onde, ρ —→ densidade molar,
 ϕ —→ porosidade,
 u_x —→ velocidade aparente e
 \tilde{q} —→ vazão molar por unidade de volume.

- Fluxo Multidimensional

A equação (2.1) pode ser generalizada para mais de uma dimensão, resultando:

$$-\nabla \cdot (\rho \vec{u}) + \tilde{q} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) \quad (2.2)$$

- Fluxo Multifásico

Para mais de uma fase, a equação de conservação de massa pode ser escrita como:

$$-\vec{\nabla} \cdot (\rho_l \vec{u}_l) + \tilde{q}_l = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \phi S_l) \quad (2.3)$$

onde, l \longrightarrow índice indicador da fase (óleo, gás ou água)

S_l \longrightarrow saturação da fase l

• Lei de Darcy

A lei de Darcy, modificada para escoamento multifásico, fornece uma relação entre a velocidade de escoamento aparente, u_l , e o gradiente de pressão para cada fase. Esta relação pode ser expressa da forma,

$$\vec{u}_l = - \frac{k k_{rl}}{\mu_l} \left[\vec{\nabla} p_l - \gamma_l \vec{\nabla} z \right] \quad (2.4)$$

onde, k \longrightarrow permeabilidade absoluta,

k_{rl} \longrightarrow permeabilidade relativa a fase (D) e,

p_l \longrightarrow pressão atuante na fase (D).

Definindo-se o potencial de fluxo através de

$$\vec{\nabla} \psi = \vec{\nabla} p_l - \gamma_l \vec{\nabla} z, \quad (2.5)$$

a lei de Darcy pode ser expressa por:

$$\vec{u}_l = - \frac{k k_{rl}}{\mu_l} (\vec{\nabla} \psi_l) . \quad (2.6)$$

● Equações de fluxo para as fases

A fim de se produzir as equações de escoamento para cada fase, a equação (2.6) pode ser substituída na (2.3) resultando em:

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\frac{k k_{rl}}{\mu_l} \rho_l \vec{\nabla} \psi_l \right] + \tilde{q}_l = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \phi S_l) , \quad (2.7)$$

ou

$$\vec{\nabla} \cdot (\lambda_l \vec{\nabla} \psi_l) + \tilde{q}_l = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \phi S_l) . \quad (2.8)$$

onde a mobilidade da fase l é definida por:

$$\lambda_l = \frac{k k_{rl}}{\mu_l} \rho_l . \quad (2.9)$$

● Equações de fluxo para os componentes

O modelo composicional tem por base o balanço de moles de cada componente do sistema de hidrocarbonetos. Com isto torna-se necessário escrever também as equações de fluxo para cada componente, as quais são:

$$\vec{\nabla} \cdot (\lambda_o x_m \vec{\nabla} \psi_o + \lambda_g y_m \vec{\nabla} \psi_g) + \tilde{q}_m = \frac{\partial}{\partial t} [\phi z_m (\rho_o S_o + \rho_g S_g)] ,$$

$$m = 1 \dots \nu , \quad (2.10)$$

onde, z_m \longrightarrow fração molar do componente (m),
 x_m \longrightarrow fração molar do componente (m) na fase líquida,
 y_m \longrightarrow fração molar do componente (m) na fase gasosa e,
 ν \longrightarrow número de componentes.

2.2 - EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

A condição de equilíbrio termodinâmico exige igualdade de fugacidades nas fases óleo e gás para cada componente:

$$f_{m_o} = f_{m_g}, \quad m = 1.. \nu \quad (2.11)$$

Ainda como equações de equilíbrio, estão aquelas obtidas do balanço de materiais das fases óleo e gás, ou seja,

$$z_m = L x_m + V y_m, \quad (2.12)$$

$$L = \frac{\rho_o S_o}{\rho_o S_o + \rho_g S_g}, \quad (2.13)$$

e

$$V = \frac{\rho_g S_g}{\rho_o S_o + \rho_g S_g}, \quad (2.14)$$

onde, L \longrightarrow fração molar do líquido,
 V \longrightarrow fração molar do gás.

2.3 - EQUAÇÕES ADICIONAIS

Para completar o sistema de equações do modelo, as definições de fração molar e saturação fornecem as seguintes relações:

$$S_o + S_g + S_v = 1 \quad (2.15)$$

$$L + V = 1 \quad (2.16)$$

e

$$\sum_{m=1}^{\nu} z_m = \sum_{m=1}^{\nu} x_m = \sum_{m=1}^{\nu} y_m = 1 \quad (2.17)$$

Deste modo, obtém-se um sistema com $n_b(3\nu+6)$ equações e $n_b(3\nu+6)$ incógnitas, originadas pela discretização das equações diferenciais.

As incógnitas são: a pressão atuante no sistema (p_i), as saturações (S_{oi} , S_{gi} e S_{vi}), as frações molares totais no óleo (L_i) e no gás (V_i) e as frações molares dos componentes na mistura (z_{mi}), no óleo (x_{mi}) e no gás (y_{mi}). O índice (i) refere-se ao bloco e varia de (1) a (n_b) e o índice (m) refere-se ao componente, variando de (1) a (ν).

As equações finais a serem utilizadas pelo sistema são: a (2.8), a (2.10), a (2.11) e da (2.13) a (2.17).

3 - DISCRETIZAÇÃO

Uma vez posto o sistema de equações na forma diferencial, torna-se necessário a sua discretização a fim de que as equações sejam colocadas na forma a ser utilizada pelo modelo computacional.

3.1 - GRADE

O primeiro passo para a discretização é a definição das características do modelo, que são:

- bloco centrado,
- duas dimensões (x e y),
- "upstream mobility",
- "2-point upstream" para frações molares,
- malha de 5 pontos e,
- grade uniforme em cada direção.

Deste modo, as equações dos componentes (2.10) podem ser escritas para as direções x e y :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_o x_m \frac{\partial}{\partial x} \psi_o + \lambda_g y_m \frac{\partial}{\partial x} \psi_g \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_o x_m \frac{\partial}{\partial y} \psi_o + \lambda_g y_m \frac{\partial}{\partial y} \psi_g \right] +$$

$$+ \tilde{q}_m = \frac{\partial}{\partial t} [\phi z_m (\rho_o S_o + \rho_g S_g)] \quad (3.1)$$

Do mesmo modo, as equações (2.8), para cada fase ficam:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_l \frac{\partial}{\partial x} \psi_l \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_l \frac{\partial}{\partial y} \psi_l \right] + \tilde{q}_l = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_l \phi S_l \right] \quad (3.2)$$

3.2 - EQUAÇÕES

Utilizando-se um esquema de diferenças finitas com 5 pontos, a equação (3.2) pode ser discretizada por:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x_i} \left[(\lambda_l)_{i+1/2}^n \frac{(\psi_l)_{i+1,j}^{n+1} - (\psi_l)_{i,j}^{n+1}}{\Delta x_{i+1/2}} - (\lambda_l)_{i-1/2}^n \frac{(\psi_l)_{i,j}^{n+1} - (\psi_l)_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x_{i-1/2}} \right] + \\ & + \frac{1}{\Delta y_j} \left[(\lambda_l)_{j+1/2}^n \frac{(\psi_l)_{i,j+1}^{n+1} - (\psi_l)_{i,j}^{n+1}}{\Delta y_{j+1/2}} - (\lambda_l)_{j-1/2}^n \frac{(\psi_l)_{i,j}^{n+1} - (\psi_l)_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y_{j-1/2}} \right] + \\ & + \tilde{q}_{lij}^n = \frac{1}{\Delta t} \left[(\phi \rho_l S_l)^{n+1} - (\phi \rho_l S_l)^n \right]_{ij} \quad (3.3) \end{aligned}$$

onde, $q_l = \tilde{q}_l \cdot V_b$,

V_b \longrightarrow volume do bloco ($\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$) e,

α \longrightarrow indica o intervalo de tempo.

Definindo-se a transmissividade por:

$$T_l = \frac{\lambda_l A}{\Delta x}, \quad (3.4)$$

onde, A é a área transversal aberta ao fluxo, e multiplicando a equação (3.3) pelo volume do bloco, V_b , obtém-se:

$$\begin{aligned} & T_{l_{i+1/2}} \left[(\psi_l)_{i+1,j}^{n+1} - (\psi_l)_{i,j}^{n+1} \right] - T_{l_{i-1/2}} \left[(\psi_l)_{i,j}^{n+1} - (\psi_l)_{i-1,j}^{n+1} \right] + \\ & + T_{l_{j+1/2}} \left[(\psi_l)_{i,j+1}^{n+1} - (\psi_l)_{i,j}^{n+1} \right] - T_{l_{j-1/2}} \left[(\psi_l)_{i,j}^{n+1} - (\psi_l)_{i,j-1}^{n+1} \right] + \\ & + (q_l)_{i,j}^n = \frac{V_b}{\Delta t} \left[(\phi \rho_l S_l)^{n+1} - (\phi \rho_l S_l)^n \right]_{ij}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Na forma simplificada, a equação (3.5) fica :

$$\Delta T_l^n \Delta \psi_l^{n+1} + q_l^n = \frac{V_b}{\Delta t} \left[(\phi \rho_l S_l)^{n+1} - (\phi \rho_l S_l)^n \right]_{ij} \quad (3.6)$$

A discretização para as equações de cada componente, eq.(3.1), pode também ser expressa desta forma, ou seja,

$$\begin{aligned} \Delta \left[T_o^n x_m^n \Delta \psi_o^{n+1} + T_g^n y_m^n \Delta \psi_g^{n+1} \right] + q_m^n = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\phi^{n+1} z_m^{n+1} (\rho_o S_o + \rho_g S_g)^{n+1} - \right. \\ \left. - \phi^n z_m^n (\rho_o S_o + \rho_g S_g)^n \right]_{ij}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

As transmissividades (T_o , T_g e T_v) entre os blocos são calculadas a partir das propriedades no bloco de maior

potencial ("single-point upstream mobility").

As composições (x_m e y_m) também poderiam ser calculadas desta forma, mas segundo a referência [NFA81], isto pode causar dispersão numérica excessiva. Para diminuir a dispersão numérica o cálculo é feito levando-se em conta os dois blocos no sentido do maior potencial ("two-point upstream").

Por exemplo, se $p_{i-1} > p_i$ onde (i) é um bloco da grade, tem-se:

$$x_{m_{i-1/2}} = x_{m_{i-1}} + \frac{\Delta l_{i-1}}{\Delta l_{i-1} + \Delta l_{i-2}} \left(x_{m_{i-1}} - x_{m_{i-2}} \right), \quad (3.8)$$

Como os blocos são uniformes, tem-se que $\Delta l_{i-1} = \Delta l_{i-2}$, e portanto:

$$x_{m_{i-1/2}} = x_{m_{i-1}} + \frac{1}{2} \left(x_{m_{i-1}} - x_{m_{i-2}} \right),$$

ou,

$$x_{m_{i-1/2}} = \frac{3}{2} x_{m_{i-1}} - \frac{1}{2} x_{m_{i-2}}. \quad (3.9)$$

São ainda impostas as limitações,

$$\min \left\{ x_{m_{i-1}}, x_{m_i} \right\} \leq x_{m_{i-1/2}} \leq \max \left\{ x_{m_{i-1}}, x_{m_i} \right\} \quad (3.10)$$

para minimizar problemas de "overshoot" e "undershoot".

As considerações apresentadas nas equações (3.9) e (3.10) valem também para y_m .

4 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

O sistema de equações definido nos itens 3 e 4 é resolvido usando-se um método iterativo e sequencial a ser explicado no item (4.1).

O método é baseado no tratamento implícito das pressões, ficando as saturações e as composições com um tratamento explícito. Deste modo, as transmissividades são calculadas no intervalo de tempo anteriores (n), e as equações de balanço de massa ficam:

- água

$$\Delta \left[T_v^n (\Delta \psi_v^{n+1}) \right] + q_v^n = \frac{V_b}{\Delta t} \left[(\phi \rho_v S_v)^{n+1} - (\phi \rho_v S_v)^n \right]_{ij} \quad (4.1)$$

- componentes hidrocarbonetos

$$\Delta \left[T_o^n x_m^n \Delta \psi_o^{n+1} + T_g^n y_m^n \Delta \psi_g^{n+1} \right] + q_m^n = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\phi z_m (\rho_o S_o + \rho_g S_g) \right)^{n+1} - \right. \\ \left. - \left(\phi z_m (\rho_o S_o + \rho_g S_g) \right)^n \right]_{ij}, \quad m = 1 \dots \nu \quad (4.2)$$

Somando-se as equações (4.2), tem-se a equação de balanço de massa para o sistema de hidrocarbonetos:

$$\Delta \left[T_o^n \Delta \psi_o^{n+1} + T_g^n \Delta \psi_g^{n+1} \right] + q_h^n = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\phi (\rho_o S_o + \rho_g S_g) \right)^{n+1} - \right.$$

$$- \left[\phi (\rho_o S_o + \rho_g S_g) \right]_{ij}^n \quad (4.3)$$

onde,

$$q_h = \sum_{m=1}^{\nu} q_m \quad (4.4)$$

Para o caso particular de pressão capilar e efeitos gravitacionais desprezíveis,

$$\Delta \psi_o = \Delta \psi_g = \Delta \psi_v = \Delta p \quad (4.5)$$

Portanto, as equações (4.1) a (4.3) podem ser simplificadas para:

$$\Delta \left[T_v^n \Delta p^{n+1} \right] + q_v^n = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\phi \rho_v S_v \right)_{ij}^{n+1} - \left(\phi \rho_v S_v \right)_{ij}^n \right] \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta \left[\left(T_o^n x_m^n + T_g^n y_m^n \right) \Delta p^{n+1} \right] + q_m^n &= \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\phi z_m (\rho_o S_o + \rho_g S_g) \right)_{ij}^{n+1} - \right. \\ &\left. - \left(\phi z_m (\rho_o S_o + \rho_g S_g) \right)_{ij}^n \right] \quad (4.7) \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} \Delta \left[\left(I_o + T_g^n \right) \Delta p^{n+1} \right] + q_m^n &= \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\phi^{n+1} (\rho_o S_o + \rho_g S_g) \right)_{ij}^{n+1} - \right. \\ &\left. - \phi^n (\rho_o S_o + \rho_g S_g)_{ij}^n \right] \quad (4.8) \end{aligned}$$

O método de solução pode ser melhor entendido através do

fluxograma do item (4.1) mas, em resumo, pode ser explicado por meio do seguinte processo iterativo:

Passo 1 \longrightarrow Combinar equações (4.6) a (4.8) para formar a equação da pressão, item (4.2).

Passo 2 \longrightarrow Resolver a equação da pressão obtendo p^{l+1} .

Passo 3 \longrightarrow Resolver equação (4.6) obtendo S_v^{l+1} .

Passo 4 \longrightarrow Resolver equação de composição obtendo z_m^{l+1} .

Passo 5 \longrightarrow Fazer um flash obtendo x_m^{l+1} , y_m^{l+1} , V^{l+1} , L^{l+1} , ρ_o^{l+1} e ρ_g^{l+1} .

Passo 6 \longrightarrow Resolver equações de saturação, obtendo S_o^{l+1} e S_g^{l+1} .

Passo 7 \longrightarrow Testar convergência.

\longrightarrow Se não houver convergência, voltar ao passo 2 fazendo $(l=l+1)$,

\longrightarrow Se houver convergência, passar para o próximo intervalo de tempo $(n=n+1)$.

Observar que o índice (l) é usado para indicar o número da iteração e (n) para indicar o intervalo de tempo. Na primeira iteração (l=1), os valores das variáveis são iguais aos do intervalo de tempo anterior (n). Quando a convergência for atingida, as variáveis do intervalo de tempo (n+1) assumem os valores que possuíam na iteração (l+1).

4.1 - FLUXOGRAMA

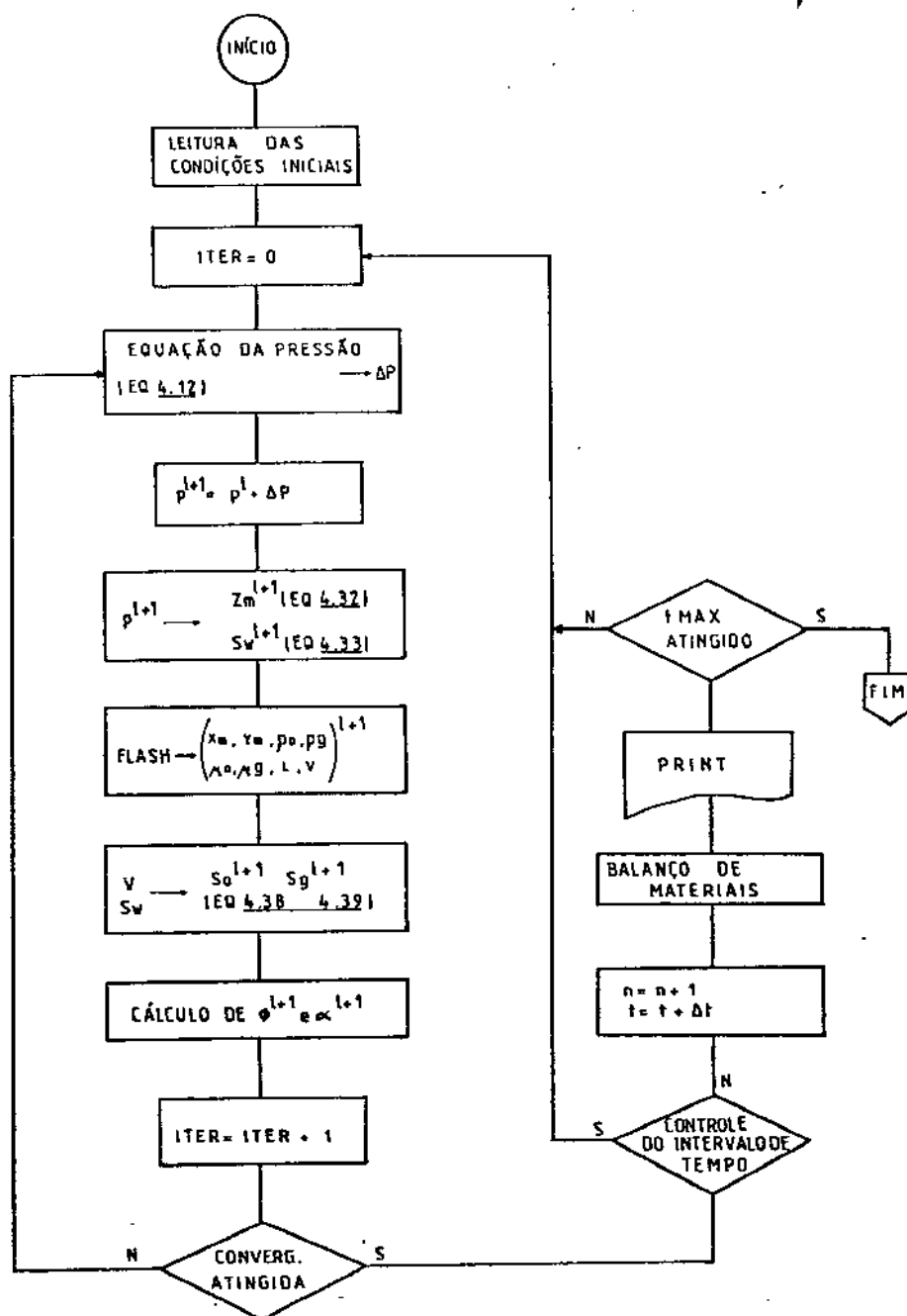


Figura 4.1 : Fluxograma.

4.2 - EQUAÇÃO DA PRESSÃO

A equação da pressão é obtida multiplicando-se a equação (4.6) por um parâmetro constante (θ) e somando-se com a equação (4.8). Tem-se então:

$$\Delta \left[\left(\theta T_v^n + T_o^n + T_g^n \right) \Delta p^{n+1} \right] + \theta q_v^n + q_h^n - \frac{V_b}{\Delta t} \left(\phi^{n+1} \alpha^{n+1} - \phi^n \alpha^n \right) = 0 \quad (4.9)$$

onde,

$$\alpha = \theta \rho_v S_v + \rho_o S_o + \rho_g S_g \quad (4.10)$$

O fator θ é introduzido para que o termo θT_v se torne da mesma ordem de grandeza de T_o e T_g , objetivando melhorar a convergência do modelo.

Este fator pode ser calculado em $t=0$ pela expressão:

$$\theta = \frac{\rho_o S_o + \rho_g S_g}{\rho_v (S_o + S_g)} \quad (4.11)$$

Segundo a referência [NFA81], para os casos práticos de densidades molares, o valor de θ fica entre 0,1 e 0,2.

• Solução da equação da pressão

A equação da pressão (4.9) é válida para os (n_b) blocos da grade. Deste modo, a resolução desta equação está baseada num sistema de (n_b) equações e (n_b) incógnitas.

A discretização feita no item (3) determina que a equação

(4.9) dependa da pressão de cada bloco e dos quatro blocos adjacentes, formando um sistema penta-diagonal.

O processo iterativo utilizado foi o método de Newton, que determina o sistema:

$$\sum_{k=1}^{n_b} J_{ik}^{(l)} [p_k^{(l+1)} - p_k^{(l)}] = - F_i^{(l)}, \quad i = 1 \dots n_b, \quad (4.12)$$

onde, $J_{ik}^{(l)}$ \longrightarrow elementos do Jacobiano,

$F_i^{(l)}$ \longrightarrow lado esquerdo da equação de pressão (4.9).

A pressão na iteração (l+1) é obtida a partir das propriedades na iteração (l), sendo a primeira iteração baseada no intervalo de tempo anterior (n).

O sistema penta-diagonal resultante é apresentado na figura (4.2).

Os termos da matriz Jacobiana, para $i \neq k$, são calculados por:

$$J_{ik}^l = \left[\frac{\partial F_i}{\partial p_k} \right]^l = \left[\theta T_v + T_o + T_g \right]_{(i+k)/2}^n \quad (4.13)$$

Analogamente, para $i=k$, tem-se que:

$$J_{ii}^l = \left[\frac{\partial F_i}{\partial p_i} \right]^l = - \sum_{k \neq i} \left[\theta T_v + T_o + T_g \right]_{(i+k)/2}^n + \theta \left[\frac{\partial q_v}{\partial p} \right]_i^{(l)} +$$

$$+ \left[\frac{\partial \alpha_h}{\partial p} \right]_i^{(k)} - \frac{V_b}{\Delta t} \left[\frac{\partial \phi \alpha}{\partial p} \right]_i \quad (4.14)$$

Nas equações (4.13) e (4.14) o índice $(i+k)/2$ indica a interface entre os blocos (i) e (k).

No caso deste trabalho as transmissividades (T) são calculadas no bloco de maior pressão ("upstream mobility").

O último termo da equação (4.14) pode ser expandido para:

$$\frac{\partial(\phi\alpha)}{\partial p} = \alpha \frac{\partial \phi}{\partial p} + \phi \frac{\partial \alpha}{\partial p} \quad (4.15)$$

ou ainda,

$$\frac{\partial(\phi\alpha)}{\partial p} = \phi \left[\alpha c_r + \frac{\partial \alpha}{\partial p} \right] \quad (4.16)$$

onde a compressibilidade da rocha é definida por:

$$c_r = \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \quad (4.17)$$

O termo $\frac{\partial \alpha}{\partial p}$ é tratado de forma diferente nas referências [NFAB1], [Man81] e [Ngh81], a saber:

● [NFAB1] → Despreza as derivadas das saturações e composições em relação à pressão ficando:

$$\left[\frac{\partial \alpha}{\partial p} \right]_i^{(k)} = \left[\theta S_v \frac{\partial \rho_v}{\partial p} + S_o \frac{\partial \rho_o}{\partial p} + S_g \frac{\partial \rho_g}{\partial p} \right]_i^{(k)} \quad (4.18)$$

onde,

$$\rho_v = \rho_v^* \left[1 + c_v (p - p^*) \right] , \quad (4.19)$$

ρ_v^* —→ densidade molar da água à pressão de referência,

c_v —→ compressibilidade da água definida por,

$$c_v = \frac{1}{\rho_v} \frac{\partial \rho_v}{\partial p} \quad (4.20)$$

Tem-se ainda que:

$$\rho_j = \frac{p}{z_j RT} \quad j = o, g \quad (4.21)$$

e

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial p} = \frac{1}{RT z_j} \left[1 - \frac{p}{z_j} \frac{\partial z_j}{\partial p} \right] \quad (4.22)$$

• [Man81] —→ Segundo Mansoori, existem certas condições de fluxo no reservatório em que as derivadas das saturações em relação a pressão não podem ser desprezadas. Deste modo, a utilização da equação (4.18) pode resultar em divergência, oscilação ou convergência lenta do método de Newton (4.12).

Uma nova formulação foi apresentada para eliminar estes problemas:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial p} = \theta S_v \frac{\partial \rho_v}{\partial p} + \frac{\partial}{\partial p} (\rho_o S_o + \rho_g S_g) . \quad (4.23)$$

Combinando-se as equações (2.13) e (2.14) pode-se obter:

$$S_g = \frac{V \rho_o (1 - S_v)}{\rho_g + V(\rho_o - \rho_g)} \quad (4.24)$$

Pode-se escrever, então:

$$\rho_o S_o + \rho_g S_g = \rho_g \cdot \frac{V \rho_o (1 - S_v)}{\rho_g + V(\rho_o - \rho_g)} \quad (4.25)$$

Derivando-se a equação (4.25) em relação a pressão, resulta:

$$\frac{\partial}{\partial p} (\rho_o S_o + \rho_g S_g) = (1 - S_v) \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{\rho_o \rho_g}{\rho_g + V(\rho_o - \rho_g)} \right] \quad (4.26)$$

ou

$$\frac{\partial}{\partial p} (\rho_o S_o + \rho_g S_g) = (1 - S_v) \cdot$$

$$\cdot \frac{\rho_o' \rho_g^2 + V(\rho_o^2 \rho_g' - \rho_g^2 \rho_o') - V' \rho_o \rho_g (\rho_o - \rho_g)}{[\rho_g + V(\rho_o - \rho_g)]^2} \quad (4.27)$$

onde, $\rho_o' = \frac{\partial \rho_o}{\partial p}$

$$\rho_g' = \frac{\partial \rho_g}{\partial p}$$

$$V' = \frac{\partial V}{\partial p}$$

O termo V' pode ser calculado numericamente através de:

$$V' = \frac{V_p - V_{(p+\delta p)}}{\delta p} \quad (4.28)$$

● [Ngh81] → Segundo Nghiem, o problema de oscilação em certos casos pode ser resolvido por um fator de amortecimento (w)

$$p_k^{l+1} = p_k^l + w^l \partial p_k^l \quad (4.29)$$

onde, $\partial p_k^{(l)}$ → variação de pressão obtida pela equação (4.12) e
 $w^{(l)}$ → fator de amortecimentos ($0 < w^l < 1$).

Nghiem ressalta ainda que o método de Mansoori requer um flash adicional para cada bloco em cada iteração, aumentando o tempo computacional.

Deve-se levar em consideração, porém, que o fator de amortecimento pode aumentar o número de iterações, aumentando também o tempo computacional.

Neste trabalho, o método utilizado foi o de Mansoori e o "flash" adicional foi utilizado também para calcular ρ_o' e ρ_g' numericamente, assim como foi feito para V' (equação 4.28).

A discussão deste problema está no item (8).

Numa análise das equações (4.13) e (4.14) permite concluir que como $(\partial \phi_a / \partial p)$ é positivo e $(\partial q_v / \partial p)$ e $(\partial q_h / \partial p)$ são negativos ou nulos, o Jacobiano é simétrico e diagonalmente dominante.

A solução do sistema penta-diagonal está explicado no item (6.6).

4.3 - EQUAÇÕES DAS COMPOSIÇÕES

As frações molares na iteração (l+1), $z_m^{(l+1)}$, são obtidas explicitamente a partir das pressões $p^{(l+1)}$ utilizando-se a equação (4.7).

Isolando-se z_m^{l+1} tem-se:

$$z_m^{(l+1)} = \left\{ \Delta \left[\left(T_o x_m + T_g y_m \right)^n \Delta p^{l+1} \right] + q_m + \frac{V_b}{\Delta t} \phi^n \left(\rho_o S_o + \rho_g S_g \right)^n z_m^n \right\} \div \left\{ \frac{V_b}{\Delta t} \phi^{l+1} \left(\rho_o S_o + \rho_g S_g \right)^{l+1} \right\} \quad (4.30)$$

O denominador da equação anterior pode ser substituído por:

$$\frac{V_b}{\Delta t} \phi^{l+1} \left(\rho_o S_o + \rho_g S_g \right)^{l+1} = \Delta \left[\left(T_o + T_g \right)^n \Delta p^{l+1} \right] + q_h + \frac{V_b}{\Delta t} \phi^n \left(\rho_o S_o + \rho_g S_g \right)^n \quad (4.31)$$

Deste modo, elimina-se a necessidade de usar ρ_o^{l+1} , S_o^{l+1} , ρ_g^{l+1} e S_g^{l+1} que ainda não são conhecidos e garante-se que:

$$\sum_{m=1}^v z_m^{l+1} = 1 .$$

A equação final para o cálculo da fração molar de cada componente fica então:

$$z_m^{(l+1)} = \left\{ \Delta \left[\left(T_o x_m + T_g y_m \right)^n \Delta p^{l+1} \right] + q_m + \frac{V_b}{\Delta t} \phi^n \left(\rho_o S_o + \rho_g S_g \right)^n z_m^n \right\} \div \left\{ \Delta \left[\left(T_o + T_g \right)^n \Delta p^{l+1} \right] + q_n + \frac{V_b}{\Delta t} \phi^n \left(\rho_o S_o + \rho_g S_g \right)^n \right\} \quad (4.32)$$

4.4 - EQUAÇÕES DAS SATURAÇÕES

As saturações na iteração (l+1) são também obtidas explicitamente como descrito a seguir.

O primeiro passo é calcular ρ_v^{l+1} e ϕ^{l+1} a partir das equações (4.17) e (4.18).

Após isto, a equação (4.6) é reordenada para o cálculo de S_v^{l+1} , resultando:

$$S_v^{l+1} = \left\{ \Delta T_v^n \Delta p^{l+1} + q_v + \frac{V_b}{\Delta t} \phi^n \rho_v^n S_v^n \right\} \div \left\{ \frac{V_b}{\Delta t} \phi^{l+1} \rho_v^{l+1} \right\} \quad (4.33)$$

Já para o cálculo das saturações de óleo e gás, existe a necessidade de obter x_m^{l+1} , y_m^{l+1} , ρ_o^{l+1} , ρ_g^{l+1} , V^{l+1} e L^{l+1} . Isto é feito por um "flash" conforme está explicado no item (5).

Se o resultado do "flash" conduzir a $V^{l+1} = 0$, então,

$$S_o^{l+1} = 1 - S_v^{l+1} , \quad (4.34)$$

e

$$S_g^{l+1} = 0 . \quad (4.35)$$

Por outro lado, se $V^{l+1} = 1$, as saturações se tornam:

$$S_g^{l+1} = 1 - S_v^{l+1} \quad (4.36)$$

e

$$S_o^{l+1} = 0 . \quad (4.37)$$

Caso $0 < V^{l+1} < 1$, as saturações são calculadas a partir das equações (2.15), (2.16) e (2.17), resultando:

$$S_o^{l+1} = \left[\frac{(1 - S_v) L \rho_g}{L \rho_g + V \rho_o} \right]^{l+1} . \quad (4.38)$$

e

$$S_g^{l+1} = 1 - S_v^{l+1} - S_o^{l+1} . \quad (4.39)$$

Depois de obtidas todas as propriedades na iteração (l+1), o processo segue para a próxima iteração ou o próximo intervalo de tempo, conforme a convergência tenha sido obtida ou não. O critério de convergência está descrito no item (6).

5 - EQUILÍBRIO LÍQUIDO-VAPOR - "FLASH"

O maior número de incógnitas dos modelos composicionais em relação aos modelos "black-oil" é compensado pela introdução das equações de equilíbrio líquido-vapor.

Para o caso de um modelo totalmente implícito, estas equações são incorporadas ao sistema, como na referência [Coa80] no modelo de Coats.

No caso de um modelo sequencial, assim como qualquer outro modelo não totalmente implícito, o equilíbrio líquido-vapor é resolvido separadamente, sendo chamado de liberação instantânea ou "flash".

O "flash" é parte fundamental do modelo e, principalmente na região crítica, ele deve ser eficiente para evitar oscilações ou divergência.

O primeiro passo para evitar estas oscilações na região crítica foi dado por "Fussell and Fussell" [FF79], com a introdução de um modelo composicional com equação de estado cúbica.

5.1 - EQUILÍBRIO LÍQUIDO-VAPOR

O critério termodinâmico do equilíbrio líquido-vapor em um sistema de (ν) componentes implica em se minimizar a energia livre de Gibbs, G , de acordo com as equações:

$$\frac{\partial G}{\partial N_{ml}} = \frac{\partial G}{\partial N_{mv}}, \quad m = 1 \dots \nu, \quad (5.1)$$

onde, N_{ml} \longrightarrow número de moles do componente m na fase líquida
 N_{mv} \longrightarrow número de moles do componente m na fase gasosa
 N_m \longrightarrow número de moles do componente m

Como $N_{ml} + N_{mv} = N_m$, pode ser mostrado que:

$$\frac{\partial G}{\partial N_{ml}} = - \frac{\partial G}{\partial N_{mv}} = \bar{G}_{ml} - \bar{G}_{mv} \quad (5.2)$$

onde, \bar{G}_{ml} \longrightarrow energia livre parcial molar de Gibbs do componente m na fase líquida,
 \bar{G}_{mv} \longrightarrow energia livre parcial molar de Gibbs do componente m na fase gasosa.

A diferença $\bar{G}_{ml} - \bar{G}_{mv}$, para temperatura constante, pode ser relacionada com as fugacidades dos elementos como se segue:

$$\bar{G}_{ml} - \bar{G}_{mv} = NRT_k \ln \frac{f_{ml}}{f_{mv}}, \quad i = 1 \dots \nu, \quad (5.3)$$

onde, f_{mv} \longrightarrow fugacidade do elemento m na fase gasosa,
 f_{ml} \longrightarrow fugacidade do elemento m na fase líquida,
 N \longrightarrow número de moles.
 T_k \longrightarrow Temperatura.
 R \longrightarrow Constante Universal dos Gases

O conceito de fugacidade foi introduzido pois é uma medida

mais fácil do potencial de transferência do componente entre as fases.

No equilíbrio termodinâmico, a transferência de massa entre as fases é nula, o que exige:

$$f_{ml} = f_{mv} \quad (5.4)$$

ou ainda,

$$\ln \left(\frac{f_{ml}}{f_{mv}} \right) = 0 \quad (5.5)$$

Os coeficientes de fugacidade para cada fase podem ser definidos como:

$$p_l = f_l / p \quad (5.6)$$

e

$$p_v = f_v / p \quad (5.7)$$

Para uma mistura de (ν) componentes, a relação pode ser estendida usando-se as frações molares:

$$p_{ml} = f_{ml} / (p x_m) \quad (5.8)$$

e

$$p_{mv} = f_{mv} / (p y_m) \quad (5.9)$$

Das equações (5.4), (5.8) e (5.9):

$$\varphi_{ml} P x_m = \varphi_{mv} P y_m , \quad (5.10)$$

ou,

$$\varphi_{ml} x_m = \varphi_{mv} y_m , \quad (5.11)$$

ou ainda,

$$K_m = \frac{y_m}{x_m} = \frac{\varphi_{ml}}{\varphi_{mv}} , \quad (5.12)$$

onde, $K_m \longrightarrow$ constante de equilíbrio líquido-vapor.

5.2 - EQUAÇÕES DE ESTADO

As equações de estado são usadas para calcular as fugacidades dos elementos em cada fase. As equações de estado de melhor resultado e mais discutidas na literatura são as de Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong, ambas modificações da equação de Van der Waals.

5.2.1 - PENG-ROBINSON (PR)

A relação PVT assume a forma:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V(V + b) + b(V - b)} , \quad (5.13)$$

onde,

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} , \quad (5.14)$$

$$a(T) = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \alpha , \quad (5.15)$$

$$\alpha^{0.5} = 1 + m(1 - T_r^{0.5}) , \quad (5.16)$$

$$m = 0.37464 + 1.54226 \omega - 0.26992 \omega^2 , \quad (5.17)$$

$$\omega = \frac{\sum_m \omega_m N_{ml} b_m^{0.5}}{\sum_m N_{ml} b_m^{0.7}} , \quad (5.18)$$

- sendo: ω \longrightarrow fator acêntrico da mistura,
 ω_m \longrightarrow fator acêntrico do componente m,
 b_m \longrightarrow constante de equação de estado (função de T_c e P_c)
e N_{ml} \longrightarrow número de moles do componente m na fase l.

Com a introdução do fator de compressibilidade ($Z=pv/RT$), a seguinte equação cúbica é obtida:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (5.19)$$

onde, $A = \frac{ap}{R^2 T^2} ,$

$$B = \frac{bp}{RT}$$

$$b = \sum_m x_m b_m$$

$$a = \sum_m \sum_l x_m x_l a_{ml}$$

$$a_{ml} = (1 - \delta_{ml}) a_m^{0.5} a_l^{0.5}$$

m → componente,

l → fase,

δ_{ml} → coeficiente de iteração binário e

a_{ml} , a_l , a_m → constantes da equação de estado, funções de p_c , T_c e w .

O coeficiente de fugacidade ϕ_m , para cada fase, é dado

por:

$$\ln \phi_m = \frac{b_m}{b} (Z - 1) - \ln(Z - B) - \frac{A}{2\sqrt{Z} B} \left[\frac{2 \sum_l x_l a_{ml}}{a} - \frac{b_m}{b} \right]$$

$$\cdot \ln \left[\frac{Z + (\sqrt{Z} + 1)B}{Z - (\sqrt{Z} - 1)B} \right] \quad (5.20)$$

5.2.2 - SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK)

Da mesma forma, pode-se escrever para SRK,

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V(V + b)} \quad (5.21)$$

onde,

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c} \quad (5.22)$$

$$a(T) = 0.42747 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \alpha \quad (5.23)$$

$$\alpha^{0.5} = 1 + m(1 - Tr^{0.5}) \quad (5.16)$$

$$m = 0.480 + 1.574 \omega - 0.176 \omega^2 \quad (5.24)$$

A equação cúbica do fator de compressibilidade fica:

$$Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0 \quad (5.25)$$

E o coeficiente de fugacidade é dado por:

$$\ln \phi_m = \frac{b_m}{b} (Z - 1) - \ln (Z - B) - \frac{A}{B} \left[\frac{2 \sum_l x_l a_{lm}}{b} - \frac{b_m}{b} \right] \cdot \ln \left(1 + \frac{B}{Z} \right) \quad (5.26)$$

As constantes são as mesmas da equação de (PR).

5.3 - O "FLASH"

O cálculo do equilíbrio líquido-vapor tem como objetivo principal, a determinação das frações molares dos componentes e

das fases.

O "flash" é um método iterativo que estima a constante de equilíbrio K_m e as frações molares a partir de um sistema com temperatura (T), pressão (p) e composições totais (z_m) conhecidas.

Utilizando-se a definição da constante de equilíbrio, (5.12), as equações (2.12), (2.16) e (2.17) podem ser combinadas para fornecer :

$$x_m = \frac{z_m}{1 + V(K_m - 1)} \quad (5.27)$$

e

$$y_m = \frac{z_m K_m}{1 + V(K_m - 1)} \quad (5.28)$$

Da equação (2.21) pode-se escrever

$$g(V) = \sum_{m=1}^N y_m - \sum_{m=1}^N x_m = 0 \quad (5.29)$$

Das equações (5.27), (5.28) e (5.29) vem:

$$g(V) = \sum_{m=1}^N \frac{z_m (K_m - 1)}{1 + V(K_m - 1)} = 0 \quad (5.30)$$

Se F_m é a razão de fugacidades, segue-se que :

$$F_m = \frac{f_{ml}}{f_{mv}} \quad (5.31)$$

e, no equilíbrio,

$$F_m - 1 = 0 \quad (5.32)$$

ou ainda,

$$K_m = \frac{\phi_{ml}}{\phi_{mv}} = \frac{f_{ml}(p, x_m)}{f_{mv}(p, y_m)} = F_m \frac{y_m}{x_m} \quad (5.33)$$

Uma vez obtidos os valores de K_m , V é obtido de equação (5.30) e as frações molares x_m e y_m são calculados a partir das equações (5.27) e (5.28).

O processo de obtenção de K_m é iterativo, e uma estimativa inicial pode ser dada pela relação de Wilson:

$$K_m = \frac{1}{P_{rm}} \exp \left[5.3727 (1 + \omega_m) \left(1 - \frac{1}{T_{rm}} \right) \right] \quad (5.34)$$

onde, P_{rm} \longrightarrow pressão reduzida

T_{rm} \longrightarrow temperatura reduzida

O novo valor de K_m é obtido da relação dos coeficientes de fugacidade calculados pelas equações de estado (5.20) ou (5.26).

A convergência do flash é obtida quando:

$$\sum_m (F_m - 1)^2 < \epsilon_c \quad (5.35)$$

O valor de ϵ_c está discutido na referência [TSL83].

Depois que o equilíbrio é atingido a densidade de cada fase pode ser calculada a partir do fator de compressibilidade (Z):

$$\rho = \frac{PM}{ZRT} \quad (5.36)$$

As viscosidades das fases devem ser calculadas a partir de correlações que podem ser encontradas nas referências [Bur79], [ABW60] e [MC73] ou ainda na referência [JST58].

6 - TÓPICOS ESPECIAIS

6.1 - PERMEABILIDADE RELATIVA

Para o cálculo da permeabilidade relativa às três fases, dois modelos de Stone têm sido mais comuns na literatura.

Os dois modelos assumem que a permeabilidade relativa a água é função apenas da saturação de água, a permeabilidade relativa ao gás é função apenas da saturação de gás e que a permeabilidade relativa ao óleo é função das saturações de água e gás, ou seja:

$$k_{rv} = f(S_v) , \quad (6.1)$$

$$k_{rg} = f(S_g) , \quad (6.2)$$

e

$$k_{ro} = f(k_{rov} , k_{rog} , k_{rg} , k_{rv}) , \quad (6.3)$$

onde,

$$k_{rov} = f(S_o) , \quad (6.4)$$

$$k_{rog} = f(S_L) , \quad (6.5)$$

$$S_L = S_o + S_v \quad (6.6)$$

e

$$S_h = S_o + S_g \quad (6.7)$$

Os valores de k_{rov} , k_{rog} , k_{rg} e k_{rv} são tabelados e usados como entrada do programa. Um exemplo desta tabela pode ser visto no anexo (D), nos dados de entrada dos os exemplos utilizados neste trabalho.

As expressões de k_{ro} para os dois modelos são:

Modelo (1)

$$k_{ro} = k_{rov}(S_o) + k_{rog}(S_L) - k_{rov}(1 - S_{vc}) + \left\{ [S_L] \left[k_{rov}(1 - S_{vc}) - k_{rov}(S_h) \right] \left[k_{rov}(1 - S_{vc}) - k_{rog}(S_L) \right] \div \left[k_{rov}(1 - S_{vc}) \right] \right\} \quad (6.8)$$

Modelo (2)

$$k_{ro} = \left\{ \left[k_{rov}(S_h) + k_{rv}(S_v) \right] \left[k_{rg}(S_g) + k_{rog}(S_L) \right] \div \left[k_{rov}(1 - S_{vc}) \right] \right\} - \left[k_{rv}(S_v) + k_{rg}(S_g) \right] \quad (6.9)$$

onde, S_{vc} \rightarrow Saturação de água conata.

O modelo (1) é utilizado quando a equação (6.9) conduzir a valores de k_{ro} maiores que 1.0, que pode acontecer em certos casos.

Se as equações (6.9) e (6.8) levarem a valores negativos de k_{ro} faz-se ($k_{ro} = 0$).

6.2 - MODELO DE POÇO

O modelo proposto pode conter poços em qualquer bloco da grade.

Para os poços injetores, a vazão molar de cada elemento deve ser especificada e, de acordo com a formulação apresentada, devem ter valores positivos.

Para os poços produtores podemos ter dois casos:

- vazão volumétrica das fases (Q_v , Q_o , Q_g) especificadas

Neste caso as vazões molares dos elementos devem ser calculadas da seguinte maneira:

$$q_v = \rho_v^n Q_v^n \quad (6.10)$$

e

$$q_m = x_m^n \rho_o^n Q_o^n + y_m^n \rho_g^n Q_g^n \quad (6.11)$$

● produção a pressão constante

Para este caso deve-se especificar o valor do IP (índice de produtividade).

O valor de IP, constante, pode ser fornecido na entrada de dados, anexo (D). Se o valor fornecido na entrada de dados for zero, ele será calculado da seguinte maneira (segundo a referência [Ped84]).

$$IP = \frac{2\pi k h}{\ln(r_o/r_w)} \quad (6.12)$$

onde,

$$r_o = 0.14 \Delta x [1 + \alpha^2]^{1/2} \quad (6.13)$$

$$\alpha = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad , \quad \frac{1}{2} \leq \alpha \leq 2 \quad (6.14)$$

e

$$h = \Delta z \quad (6.15)$$

Depois de calculado o valor de IP, as vazões molares são dadas por:

$$q_m = IP \left[\frac{k_{ro} \rho_o}{\mu_o} x_m + \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} y_m \right] (P_w - P^{n+1}) \quad (6.16)$$

$$q_v = IP \left[\frac{k_{rv} \rho_v}{\mu_v} \right] (P_w - P^{n+1}) \quad (6.17)$$

$$q_o = IP \left[\frac{k_{ro} \rho_o}{\mu_o} \right] (P_v - P^{n+1}) , \quad (6.18)$$

$$q_g = IP \left[\frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \right] (P_v - P^{n+1}) , \quad (6.19)$$

onde, p_v é a pressão no fundo do poço especificada.

As derivadas das vazões em relação à pressão de equação (4.14) são:

$$\frac{\partial q_v}{\partial p} = IP \left[\frac{k_{rv} \rho_v}{\mu_v} \right] , \quad (6.20)$$

e

$$\frac{\partial q_h}{\partial p} = IP \sum_{m=1}^N \left[\frac{k_{ro} \rho_o}{\mu_o} x_m + \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} y_m \right] . \quad (6.21)$$

Para o caso de vazão constante as derivadas são nulas pois as propriedades são calculadas no intervalo de tempo (n).

Uma outra possibilidade é calcular a vazão a cada iteração a partir dos dados da iteração anterior (1). Isto foi testado com sucesso, diminuindo inclusive a pequena oscilação na produção de óleo.

6.3 - BALANÇO DE MATERIAIS

O balanço de materiais é um importante instrumento para testar a eficiência do modelo, assim como para a validade do critério de convergência.

O modelo está baseado no balanço de moles de cada elemento dentro de cada bloco da grade. O balanço de materiais é usado para verificar se a variação de moles no reservatório é igual à vazão de moles nos poços.

O erro, em número de moles pode ser calculado como:

- para os hidrocarbonetos

$$\text{erro}_m (\%) = 100 \cdot \sum_{i=1}^{nb} \left\{ V_b \left[\phi^{n+1} (\rho_o S_o x_m - \rho_g S_g y_m)^{n+1} - \phi^n (\rho_o S_o x_m - \rho_g S_g y_m)^n \right] + (q_m \Delta t) \right\} \div V_m \quad (6.22)$$

$m = 1 \dots \nu$

- para a água

$$\text{erro}_v (\%) = 100 \cdot \sum_{i=1}^{nb} \left\{ V_b \left[(\phi \rho S_v)^{n+1} - (\phi \rho S_v)^n \right] + (q_v \Delta t) \right\} \div V_m \quad (6.23)$$

onde, V_m é o número de moles inicialmente no reservatório.

6.4 - CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA

Na referência [TLS83] o critério de convergência usado é baseado nos resíduos do balanço de moles de cada componente, ou:

$$\frac{|MIP_m^{l+1} - MIP_m^n + (V_b \nabla N_m^{l+1} - q_m^{l+1}) \Delta t|_k}{\Delta t_{\max} |q_m^{l+1}|} < \varepsilon_b \quad (6.24)$$

$$m = 1..v$$

$$k = 1..n_b$$

onde, MIP \longrightarrow número de moles inicial do reservatório (moles "in place")

N_m \longrightarrow fluxo molar superficial do componente m

ε_b \longrightarrow varia de 10^{-4} a 10^{-8}

Porém, para o caso específico deste modelo, a mesma referência sugere um teste de convergência baseado na iteração da pressão.

O critério de convergência usado foi, então foi baseado na equação (4.11) e na definição de F_i , ou:

$$\sum_{i=1}^{n_b} |F_i|^2 < \varepsilon \quad (6.25)$$

onde,

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} * \sum_{i=1}^{n_{inj}} \left[q_v + \sum_{m=1}^v q_m \right] \quad (6.26)$$

$\bar{\varepsilon}$ \longrightarrow varia de 1% a 0.01% .

n_{inj} \longrightarrow blocos de injeção .

Se não houver injeção, ε pode ser baseado no número de moles de produção.

Os efeitos da variação de $\bar{\varepsilon}$ estão descritos no item (8)

6.5 - MODELO RADIAL

O modelo proposto pode ser discretizado para o fluxo radial. A equação (2.8), pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda_l \frac{\partial p}{\partial r} \right] + \tilde{q}_l = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_l S_l) \quad (6.27)$$

A equação discretizada, de acordo com as mesmas condições mencionadas no capítulo (3), fica:

$$\frac{1}{r_i \Delta r_i} \left[\lambda_{l+1/2}^n r_{i+1/2} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{r_{i+1} - r_i} \right)^{n+1} + \lambda_{l-1/2}^n r_{i-1/2} \left(\frac{P_{i-1} - P_i}{r_{i-1} - r_i} \right)^{n+1} \right] + \tilde{q}_l = \frac{1}{\Delta t} \left[(\phi \rho_l S_l)^{n+1} - (\phi \rho_l S_l)^n \right] \quad (6.28)$$

Define-se o volume do bloco (V_b), o volume discretizado do bloco (V_d) e o raio de curvatura $r_{i+1/2}$ pela aproximação da média logarítmica como se segue:

$$V_b = \pi \left(r_{i+1/2}^2 - r_{i-1/2}^2 \right) \Delta z \quad (6.29)$$

$$V_d = 2\pi r_i \left[r_{i+1/2} - r_{i-1/2} \right] \Delta z, \quad (6.30)$$

$$r_{i+1/2} = r_{i+1/2}^L = \frac{r_{i+1} - r_i}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \quad (6.31)$$

$$r_{i+1/2}^2 = \frac{r_{i+1}^2 - r_i^2}{\ln(r_{i+1}/r_i)^2} \quad (6.32)$$

Multiplicando-se os termos de acumulação e fontes pelo volume e o termo de fluxo pelo volume discretizado, obtém-se:

$$\begin{aligned} 2\pi\Delta z \left[\lambda_{i+1/2} r_{i+1/2} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{r_{i+1} - r_i} \right) + \lambda_{i-1/2} r_{i-1/2} \left(\frac{P_{i-1} - P_i}{r_{i-1} - r_i} \right) \right] + q_l = \\ = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\phi \rho_l S_l \right)^{n+1} - \left(\phi \rho_l S_l \right)^n \right]. \end{aligned} \quad (6.33)$$

Definindo-se ainda,

$$T_{li+1/2} = \frac{2\pi\Delta z \lambda_{li+1/2} r_{li+1/2}^L}{r_{i+1} - r_i} = \frac{2\pi\Delta z \lambda_{li+1/2}}{\ln(r_{i+1}/r_i)}, \quad (6.34)$$

a equação final fica equivalente à equação (3.6) com variação apenas no cálculo das transmissividades e do volume (V_b).

Quando a equação (3.6) é resolvida numericamente, blocos menores são necessários à medida se aproxima do poço. Isto resulta em uma grade altamente irregular.

Uma maneira de se evitar esta grade irregular é a

transformação $\xi = \ln(r)$ e espaçamento regular em ξ .

A equação (6.27) pode ser escrita como:

$$\frac{1}{\exp(2\xi)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\lambda_l \frac{\partial p}{\partial \xi} \right) + \tilde{q}_l = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \rho_l S_l \right) \quad (6.35)$$

A equação final é a mesma, com diferença apenas nos termos de transmissividade que ficam:

$$T_{li+1/2} = \frac{2\pi \Delta z \lambda_{li+1/2}}{\xi_{i+1} - \xi_i} \quad (6.36)$$

O espaçamento regular pode ser feito através de:

$$\Delta \xi = (\ln r_e - \ln r_v) / n_b \quad (6.37)$$

onde, $r_e \rightarrow$ raio externo do reservatório .

Da mesma forma que para cada fase (D), pode-se escrever as equações de fluxo radial para cada hidrocarboneto. Elas serão semelhantes às equações (3.7) com diferença nos termos de transmissividade e no volume do bloco.

6.6 - RESOLUÇÃO DO SISTEMA

A equação (4.12) resultante do método de Newton determina a solução do sistema penta-diagonal mostrado na figura 4.1. Para a resolução deste sistema, o programa utiliza a subrotina GBAND da referência [AS79], que é um método de eliminação de Gauss sem pivoteamento e pode resolver sistemas com qualquer número de bandas, ou diagonais.

Para os problemas de uma dimensão, incluindo o radial, o sistema passa a ser tri-diagonal. Para estes casos, o algoritmo utilizado foi o de Thomas, que é também uma forma de eliminação de Gauss.

Para alguns casos, o sistema pode ser mal condicionado, principalmente os de vazão constante onde as derivadas da vazão em relação à pressão são nulas. Nestes casos o determinante da matriz Jacobiana é próximo de zero, fazendo com que a resposta oscile em torno da solução real. Para certos casos, a convergência pode nem ser atingida.

Um artifício matemático simples para se evitar esta oscilação está descrito na referência [PFTV88]. Supondo que o sistema a ser resolvido seja:

$$[A]\langle u \rangle = \langle b \rangle , \quad (6.38)$$

se a matriz [A] for mal condicionada, a solução $\langle u \rangle$ será acrescida de um $\langle \delta u \rangle$, resultando também em um $\langle \delta b \rangle$, ou seja:

$$[A](u+\delta u) = (b+\delta b) . \quad (6.39)$$

Das equações (6.38) e (6.39), obtem-se o sistema

$$[A]\langle \delta u \rangle = \langle \delta b \rangle , \quad (6.40)$$

de onde pode-se determinar o valor de $\langle \delta u \rangle$ que deve ser subtraído da resposta inicial.

A implementação deste artifício fez não só com que certos casos passassem a convergir, como diminuiu bastante o número de iterações necessárias nos casos que já convergiam.

6.7 - CONTROLE DO INTERVALO DE TEMPO

O controle do intervalo de tempo é feito na forma convencional baseado nas variações máximas de pressão, saturação ou composições, e nos limites estabelecidos para estas variáveis

Se todas estas variáveis forem menores que seus limites, o próximo intervalo de tempo aumentará. A razão deste crescimento é a menor razão entre o limite estabelecido e o máximo calculado para cada variável.

Por exemplo, se a menor razão for a da saturação de gás:

$$\Delta t^{n+1} = \Delta t^n \frac{|\Delta S_{g \text{ lim}}|}{|\Delta S_{g \text{ max}}|} \quad (6.41)$$

A diminuição do intervalo é feita de duas maneiras. Para explicar melhor, admite-se que, por exemplo, o caso mais crítico seja o de pressão, ou seja:

$$|\Delta p_{\max}| > |\Delta p_{\lim}| \quad (6.42)$$

Ao valor limite de variação da pressão é aplicado um valor de segurança (η) que deve ser aproximadamente (1.3).

Se $|\Delta p_{\max}| < \eta |\Delta p_{\lim}|$, o próximo intervalo de tempo diminuirá do seguinte modo:

$$\Delta t^{n+1} = \Delta t^n \frac{|\Delta p_{\lim}|}{|\Delta p_{\max}|} \quad (6.43)$$

Se $|\Delta p_{\max}| > \eta |\Delta p_{\lim}|$, o próprio intervalo de tempo é calculado novamente mas com um valor novo, usando-se a equação anterior (6.43).

O intervalo de tempo deve diminuir também quando há uma previsão de condensação retrógrada.

6.8 - MODELO DE HELFFERICH

Um modo de se validar o modelo é através da obtenção de uma solução analítica, obtida a partir de algumas simplificações, e a comparação com a resposta deste modelo [Hél81]. Admitindo-se que:

$$S_v = 0 , \quad (6.44)$$

$$\mu_o = \mu_g = \text{constante} , \quad (6.45)$$

$$\rho_o = \rho_g = \text{constante} , \quad (6.46)$$

$$k_{ro} = S_o^2 \quad (6.47)$$

e

$$k_{rg} = S_g^2 , \quad (6.48)$$

e que o "flash" tenha como resultado valores constantes das frações molares do líquido e do gás, e ainda reduzindo-se para dois o número de hidrocarbonetos, pode-se obter uma solução analítica.

No item (7.3) pode-se verificar a comparação entre os resultados do modelo e a solução analítica, obtidos a partir destas considerações.

7 - RESULTADOS

Problemas do tipo "black-oil" e composicional foram testados pelo modelo para uma e duas dimensões e para o fluxo radial. Alguns resultados são apresentados neste capítulo e comparados com soluções analíticas ou com resultados do simulador "COMP3" existente na PETROBRÁS.

O erro no balanço de materiais foi feito para todos os casos e não está mencionado para cada um em particular pois apresentou valores aceitáveis, sendo de no máximo da ordem de 10^{-9} . De maneira geral, os erros eram maiores nos blocos onde estava a frente de gás ou água injetados ou quando havia uma maior variação das saturações.

O número de hidrocarbonetos dos casos testados foi de no máximo três pois, embora o programa aceite um número maior de componentes, este não é o objetivo deste trabalho.

Em todos os casos apresentados, a variação da saturação de água se deve exclusivamente à variação de pressão pois a água não flui entre os blocos.

O efeito da utilização da formulação "2-point upstream" para as frações molares (x_m e y_m) está descrito no caso (1).

O método é comparado com uma solução analítica, obtida a partir de certas simplificações, como pode ser visto no caso (3).

7.1 - CASO 1 - MODELAMENTO UNIDIMENSIONAL - INJEÇÃO DE GÁS

Este caso é um exemplo da referência [TLS83] que compara os métodos de [NF81], [YS83] e [Coa80]. É um caso unidimensional e os dados deste problema estão nas tabelas (7.1.1) e (7.1.2).

As figuras de (7.1.1) a (7.1.6) mostram uma comparação do presente método com o simulador "COMP3" da PETROBRÁS. Para esta comparação o intervalo usado foi de 3 dias e o reservatório foi dividido em 20 blocos. Os resultados são bastante próximos e a diferença na saturação de óleo deve-se principalmente aos diferentes modelos de permeabilidade relativa. A produção total de óleo é bastante próxima nos dois casos mas a produção em cada intervalo de tempo apresenta uma oscilação nos resultados do COMP3 e isto não acontece neste modelo. Esta oscilação acontecia antes do dispositivo explicado no item 6.6.

Um outro ponto importante que deve ser mencionado é a presença de dispersão numérica no presente método. Todos os modelos apresentados nas referências demonstram uma preocupação constante com este problema, e a única maneira encontrada para amenizá-lo foi a utilização de formulação "2-point upstream" para as composições.

Este tipo de formulação, porém, traz um outro tipo de problema como pode ser verificado na figura (7.1.2) e é conhecido como "overshoot" e "undershoot". A limitação imposta no item 3, equação (3.10), diminui bastante este problema (ver figura 7.1.3).

O que deve ser pesado, é o fato de que à medida que se aumenta o número de blocos, a dispersão numérica diminui mas este problema se agrava. O número de blocos a ser utilizado, então,

deve ser escolhido com cuidado.

A fração molar total do butano ao longo dos blocos pode dar uma visão mais clara deste problema. As figuras (7.1.5) e (7.1.6) mostram algumas diferenças da formulação "2-point upstream" para a "single-point upstream" e na utilização de número de blocos diferentes.

Tabela 7.1.1 : Dados - Caso 1

VARIÁVEL	UNIDADE	VALOR
comprimento	(m)	76.2
área transversal	(m ²)	464.5
permeabilidade	(md)	2000
porosidade		0.3
compressibilidade da rocha	(1/psi)	4×10^{-6}
compressibilidade da água	(1/psi)	3×10^{-6}
temperatura	°F	160
saturações iniciais (S_o , S_g , S_v)		(0.8, 0.0, 0.2)
pressão inicial e de produção	(psi)	2000
índice de produtividade	(ft ³ -cp/dia-psi)	1.012×10^5
tempo final	(dias)	210
composição inicial (C_1 , nC_4 , nC_{10})		(0.2, 0.2, 0.6)

Tabela 7.1.2 : Injeção - Caso 1

VARIÁVEL	UNIDADE	VALOR
injeção de gás	(MSCF/dia)	83,5
	(Kmol/dia)	100
composição de gás injetado (C_1 , nC_4)		(0.8, 0.2)

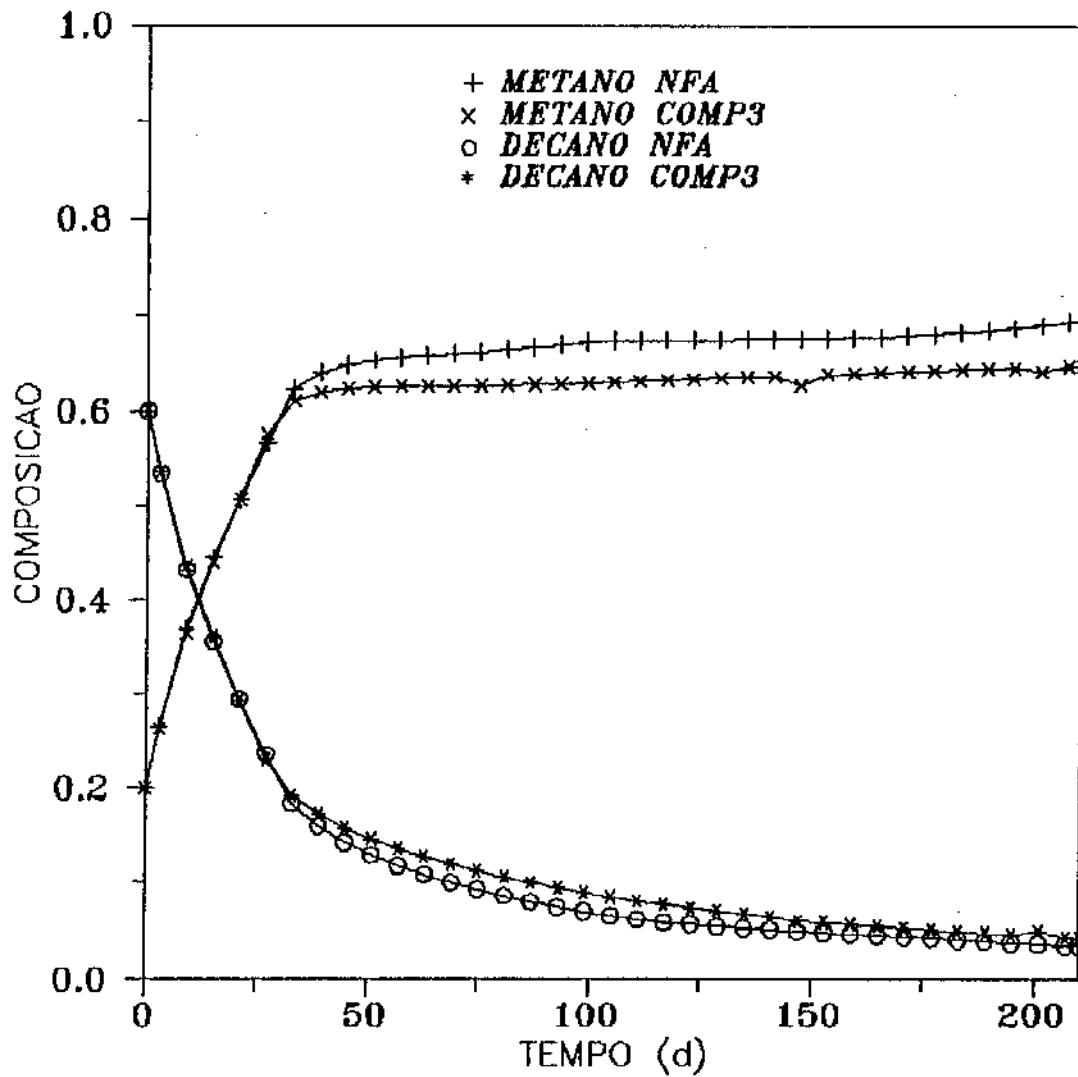


Figura 7.1.1 : Distribuição das Composições no Tempo.
 Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3".
 (Bloco de injeção).

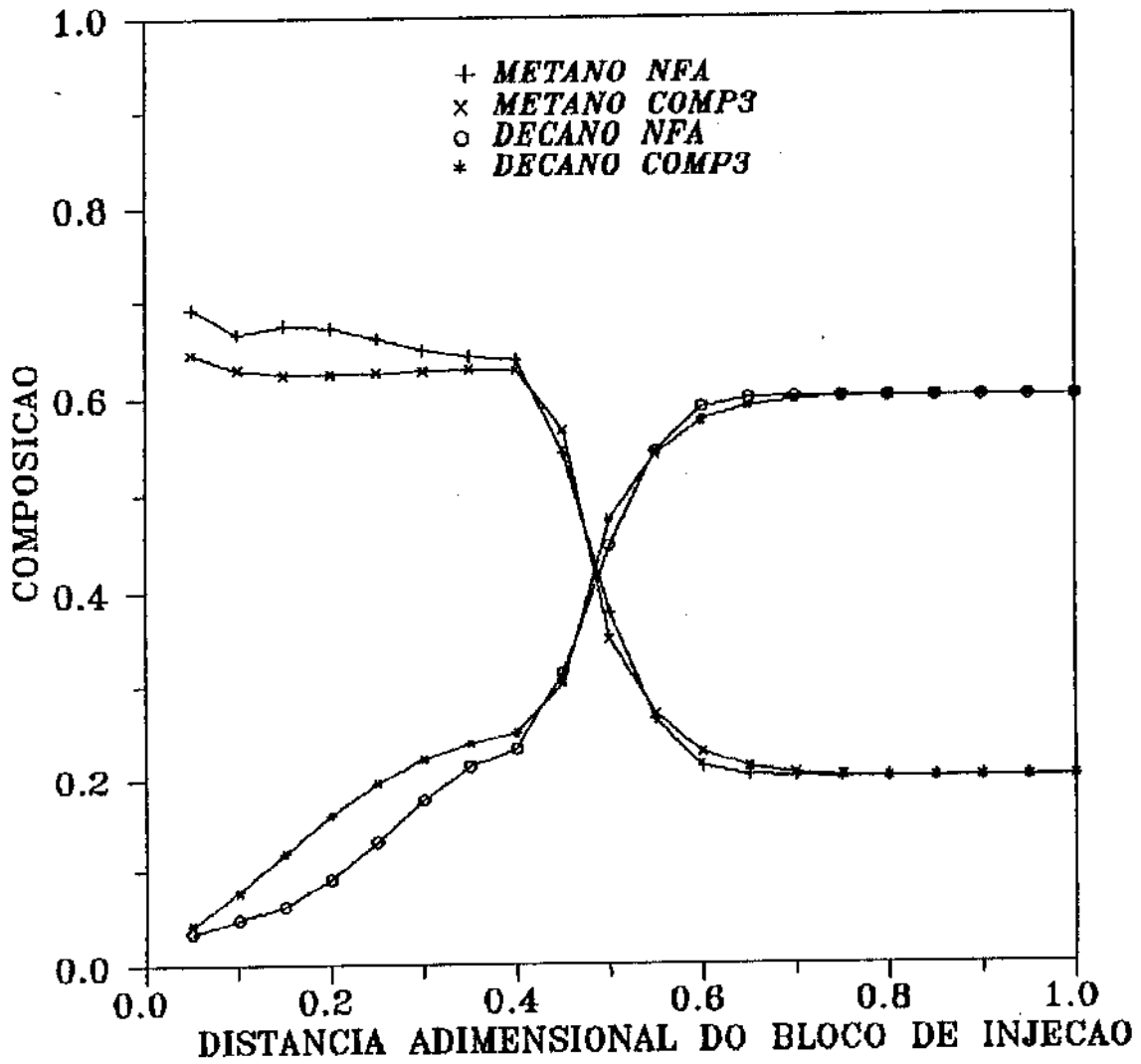


Figura 7.1.2 : Distribuição das Composições nos Blocos.
 Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3".
 (210 dias).

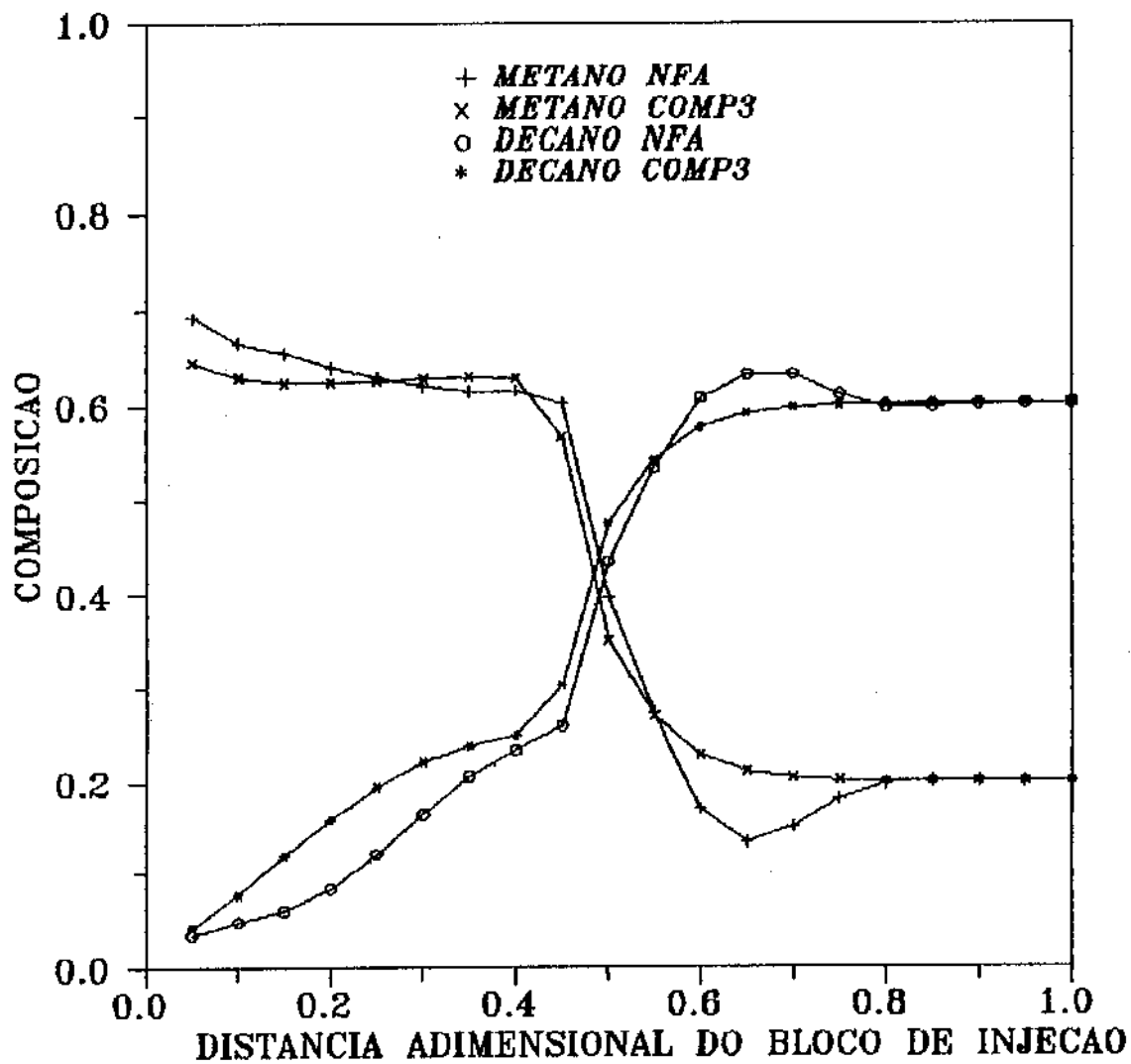


Figura 7.1.3 : Distribuição das Composições nos Blocos.

Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3" sem a Limitação da Equação (3.10).

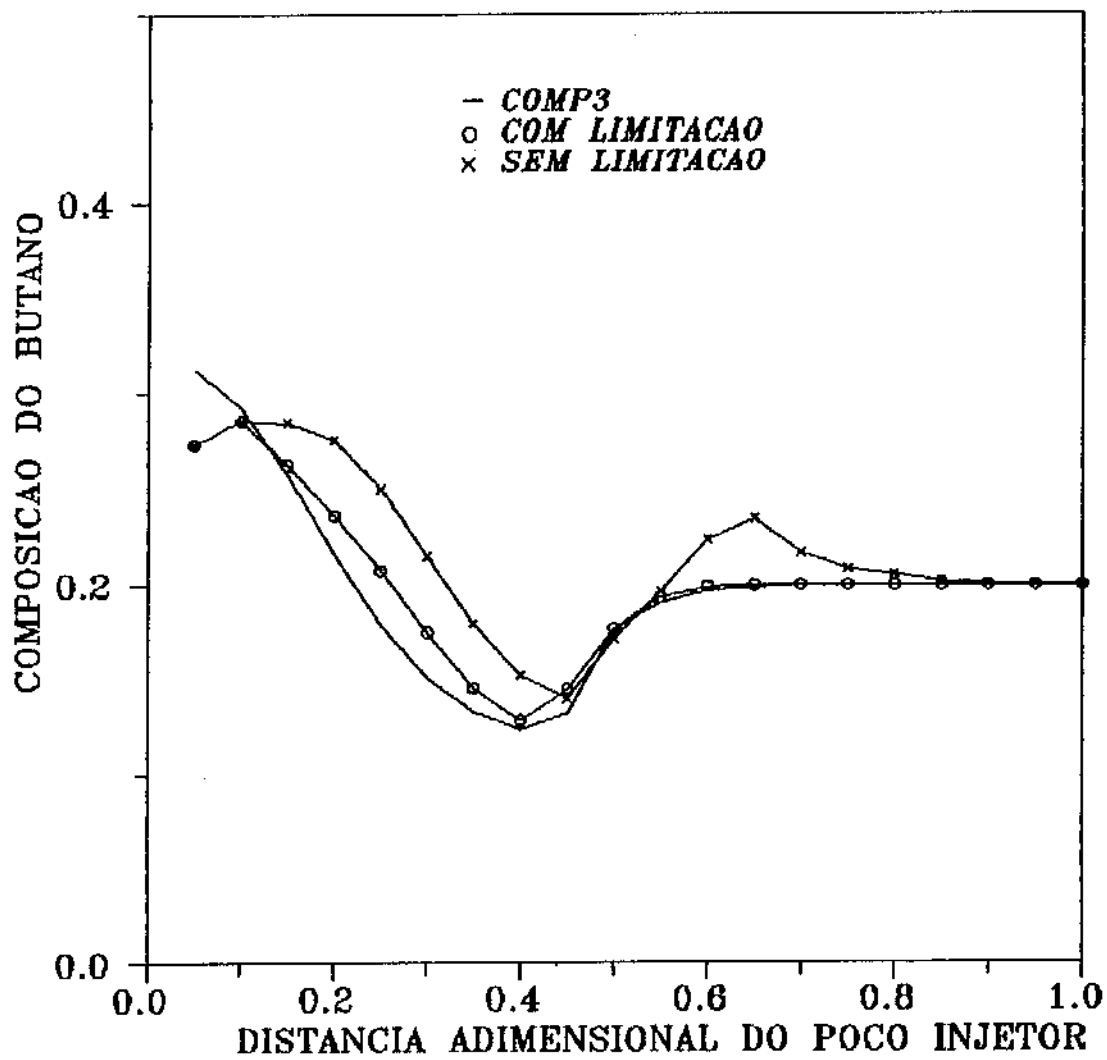


Figura 7.1.4 : Composição do Butano (210 dias).
Efeitos da Limitação da Equação (3.10).

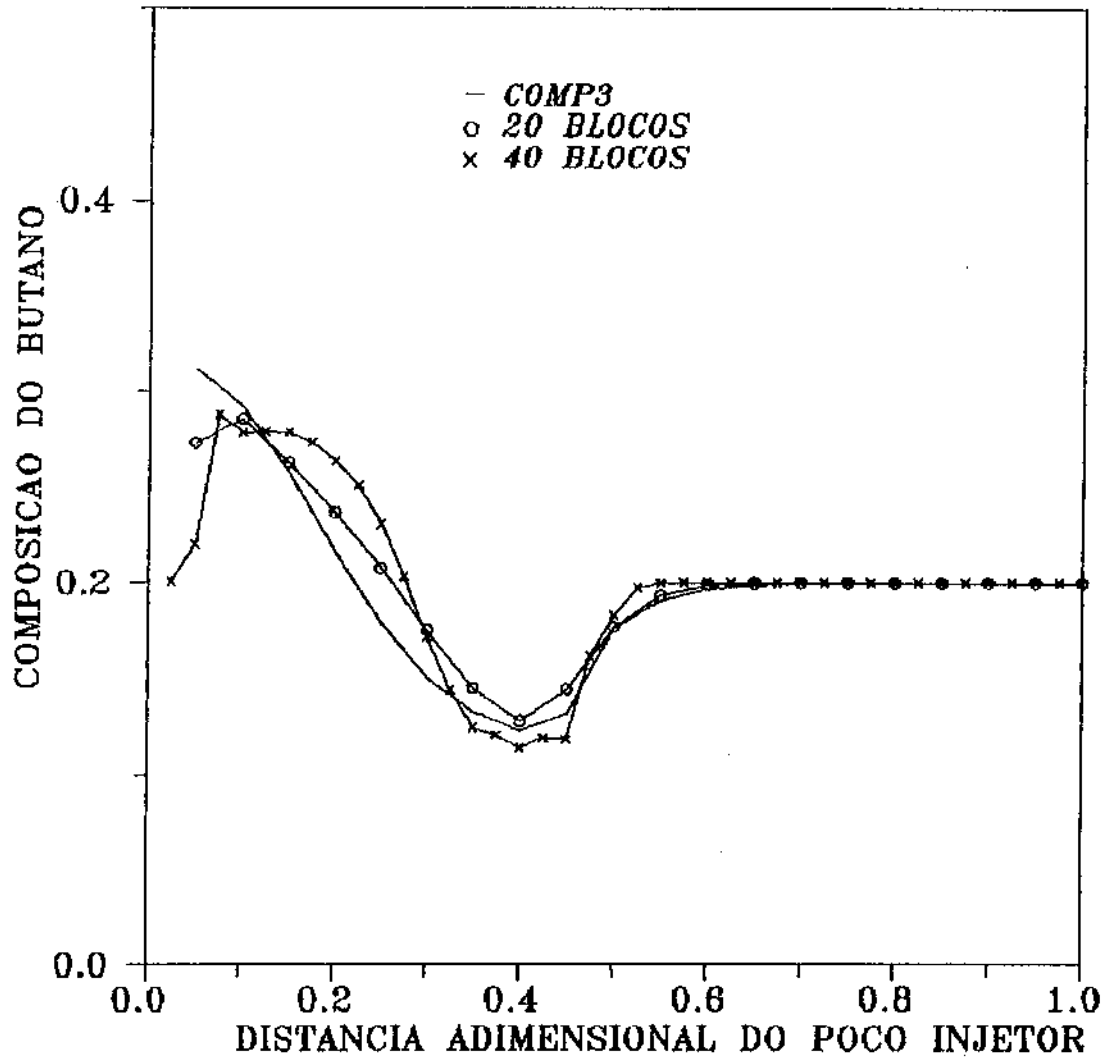


Figura 7.1.5 : Composição do Butano (210 dias).
Efeitos da Variação do Número de Blocos.

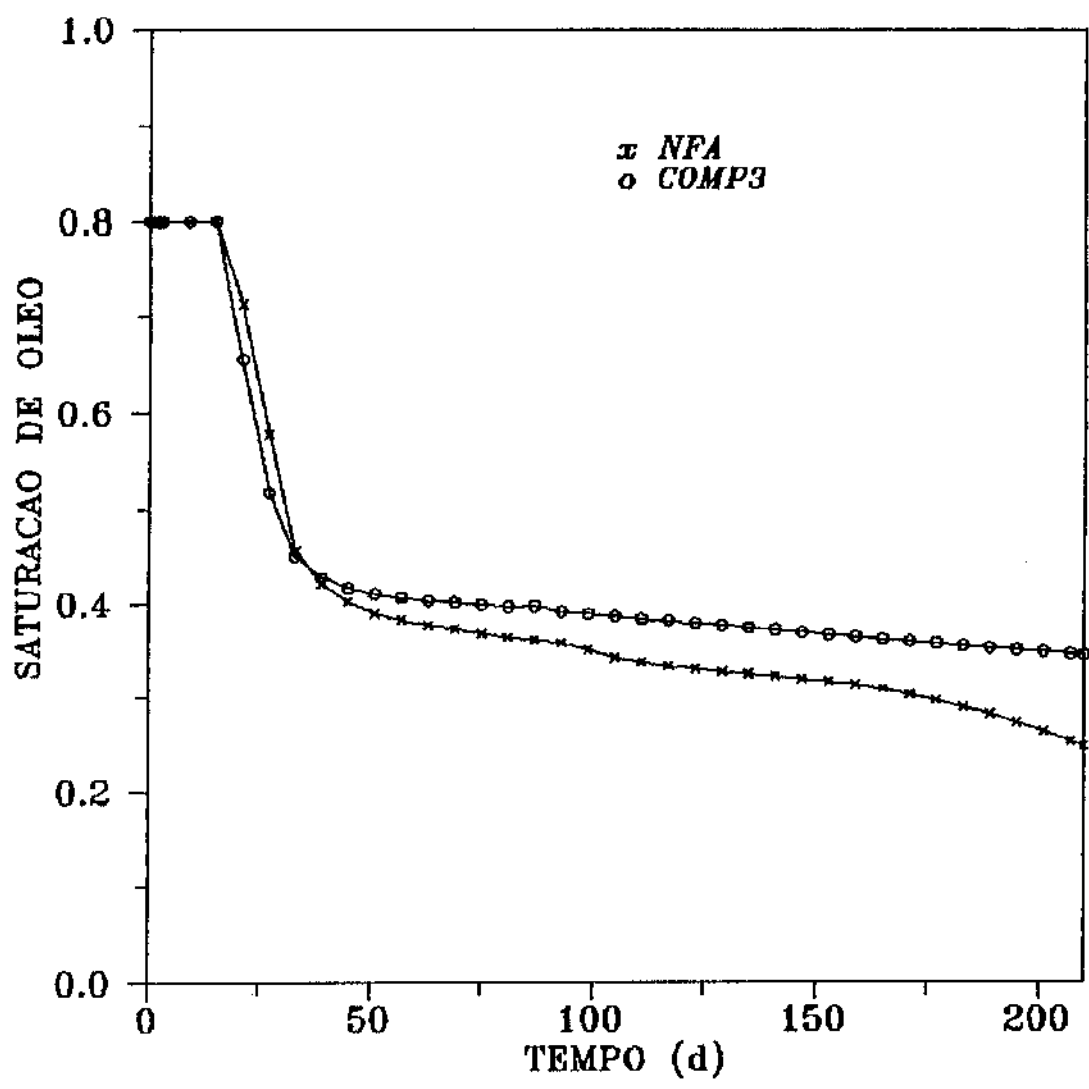


Figura 7.1.6 : Saturação de óleo no Bloco de Injeção.
 Comparação do Modelo (NFA) com o "COMP3".

7.2 - CASO 2- CONDENSAÇÃO RETRÓGRADA

Com os dados referentes ao caso (1), tabela (7.1), foram testadas várias composições e vazões de injeção e, para algumas delas, pôde-se verificar a condensação retrógrada.

Devido à particularidade dos dados de produção, a pressão e a temperatura permanecem aproximadamente constantes para cada bloco, ocorrendo variação apenas na composição dos hidrocarbonetos. Deste modo, como o fluido injetado é mais rico em elementos mais leves, espera-se que a saturação de gás aumente no bloco de injeção.

Com a composição de injeção da tabela (7.3), isto ocorre até certo ponto, quando a saturação de óleo começa a aumentar, como pode ser verificado na figura (7.2.1).

Para os pontos (1) e (2) desta figura, foram traçados os envelopes de fase, figuras (7.2.2) e (7.2.3), pelos quais se verifica a condensação retrógrada.

O maior problema da ocorrência deste fenômeno é o fato de que, como as transmissividades são calculadas no intervalo de tempo anterior, esta inversão no comportamento das saturações faz com que o modelo apresente uma certa oscilação. Isto pode ser verificado na figura (7.2.1).

Uma maneira de se evitar esta oscilação é através da diminuição do intervalo de tempo após a previsão da ocorrência do fenômeno. O controle automático do intervalo de tempo encarrega-se naturalmente de levá-lo novamente ao nível anterior.

Isto pode ser comprovado pela figura (7.2.1) onde os dados

são mantidos e a variação é feita apenas no intervalo de tempo que diminui para 0.5 dias. A oscilação diminui bastante.

Tabela 7.2 : Dados de injeção- Caso 2

VARIÁVEL	UNIDADE	VALOR
injeção de gás	(MSCF/dia)	62,5
	(Kmol/dia)	74,8
composição de gás injetado (C_1 , nC_4)		(0.8, 0.2)

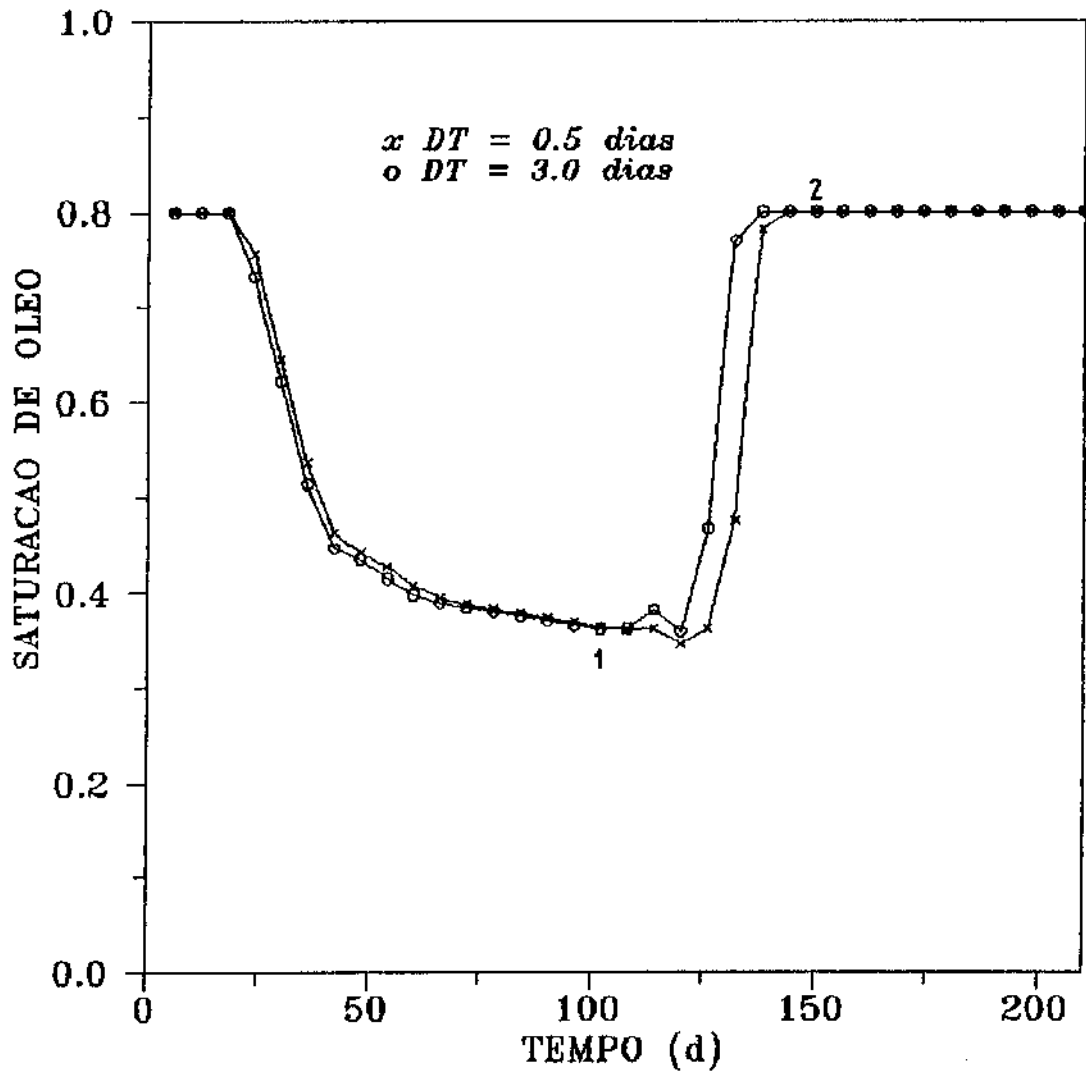


Figura 7.2.1 : Saturação de Óleo - Condensação Retrógrada
 Efeitos da Variação no Intervalo de Tempo.
 (Bloco de injeção).

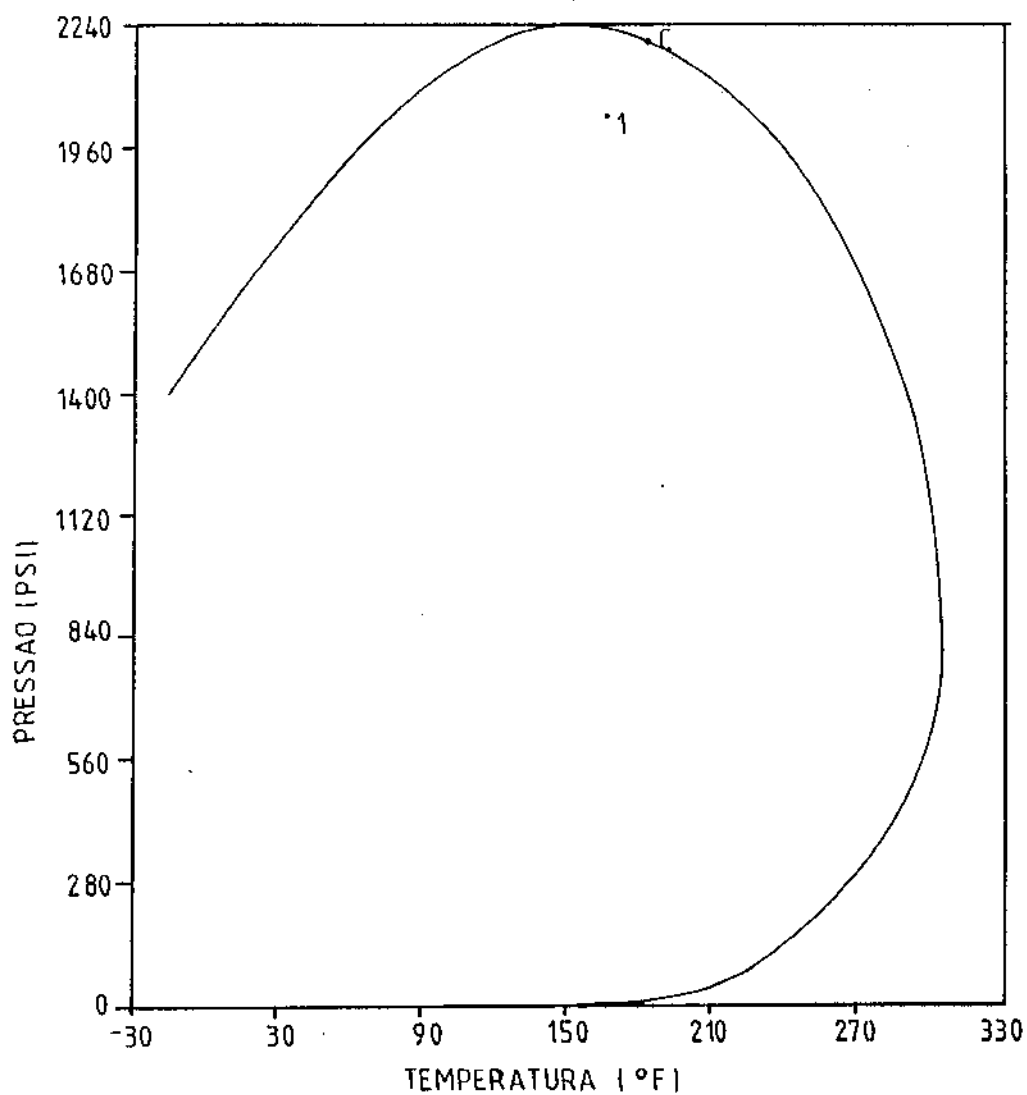


FIG. 7.2.2 ENVELOPE DE FASES PARA A COMPOSICAO
(METANO 0.650),(BUTANO 0.326) e (DECANO 0.024)

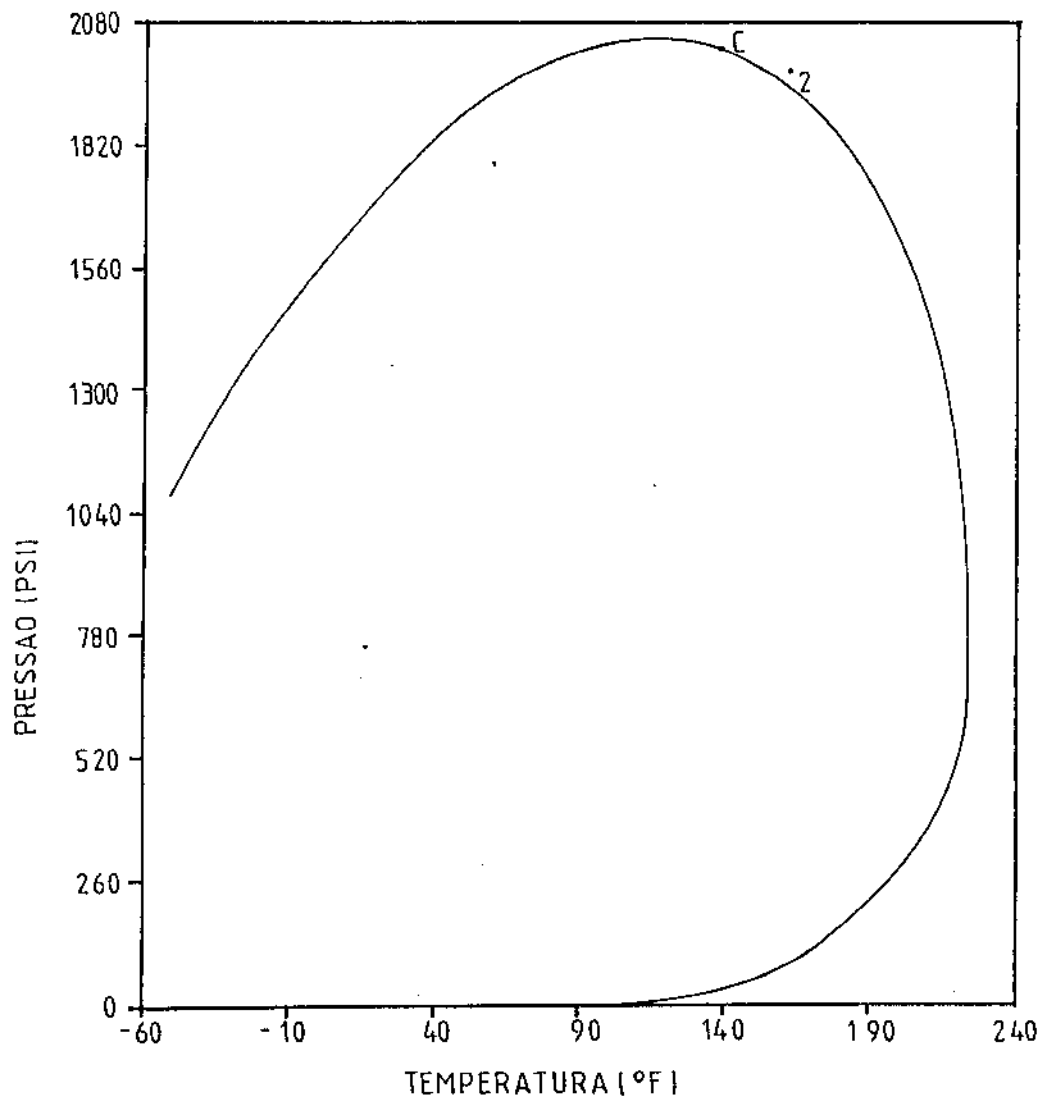


FIG. 7.2.3 ENVELOPE DE FASES PARA A COMPOSICAO
(METANO 0.692), (BUTANO 0.303) e (DECANO 0.05)

7.3 - CASO 3- MODELO DE HELFFERICH

O item (6.8) mostra uma maneira de se validar um modelo composicional através de uma solução analítica obtida a partir de algumas simplificações nas equações.

As tabelas de dados para esta comparação são a (7.3.1) e a (7.3.2), de onde se obtém os resultados mostrados nas figuras (7.3.1) a (7.3.3), para um deslocamento de 50% do volume poroso.

A diferença entre as formulações "2-point upstream" e "1-point upstream" se faz presente nos blocos onde se encontra a região de duas fases. Os resultados do "2-point upstream" são ligeiramente melhores.

A variação de 20 para 80 blocos causa uma grande diferença nos resultados. Para 80 blocos o resultado é bem próximo do analítico enquanto que para 20 blocos os erros são razoavelmente grandes.

Deste modo, deve-se escolher com cuidado o número de blocos para obter a melhor relação entre a precisão nos resultados e o tempo computacional. Para o caso unidimensional, pode ser viável um grande número de blocos, mas para o bidimensional isto deve ser estudado com maior cautela.

A única ressalva a ser feita para esta comparação é o fato de que as simplificações feitas eliminam qualquer erro proveniente do "flash", mas é um método útil para testar o modelo quanto a intervalos de tempo e número de blocos possíveis.

Tabela 7.3.1 : Dados - Caso 3

VARIÁVEL	UNIDADE	VALOR
comprimento	(m)	76.2
área transversal	(m ²)	464.5
permeabilidade	(md)	200
porosidade		0.3
compressibilidade da rocha	(1/psi)	0
temperatura	°F	180
saturações iniciais (S _o , S _g)		(1.0) , (0.0)
pressão inicial e de produção	(psi)	2000
índice de produtividade	(ft ³ -cp/dia-psi)	1.012x10 ⁵
tempo final	(dias)	210
composição inicial (C ₁ , C ₂₀)		(0.0) , (1.0)
viscosidade (μ _o e μ _g)	(cp)	(1.0) , (1.0)
densidades molares	(gmol/m ³)	6000

Tabela 7.3.2 : Dados de injeção- Caso 3

VARIÁVEL	UNIDADE	VALOR
injeção de gás	(MSCF/dia)	83,5
	(Kmol/dia)	100
composição de gás injetado (C_1 , C_{10})		(1.0, 0.0)

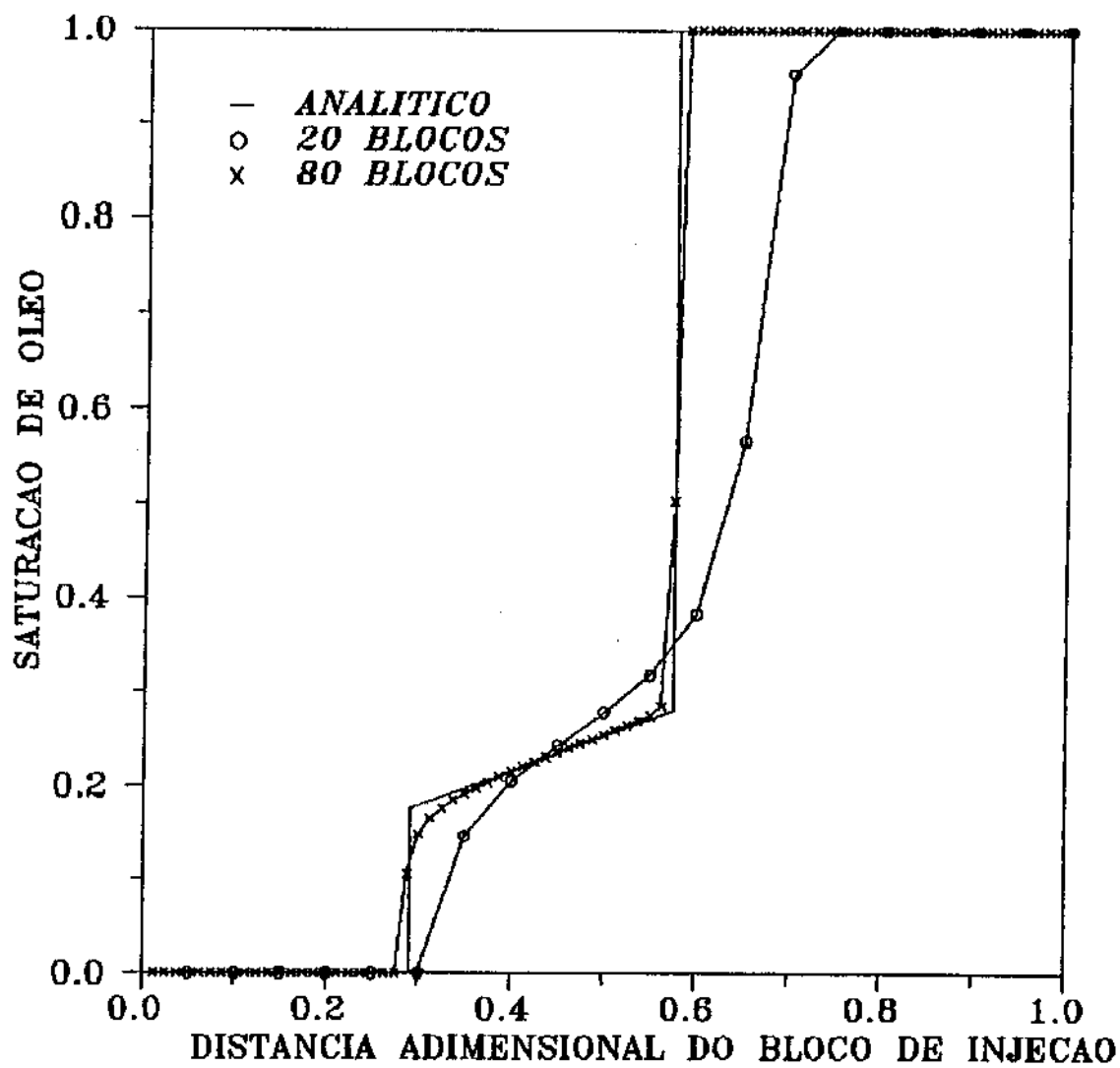


Figura 7.3.1 : Saturação de Óleo - Modelo de Helfferich.

Efeitos da Variação do Número de Blocos.

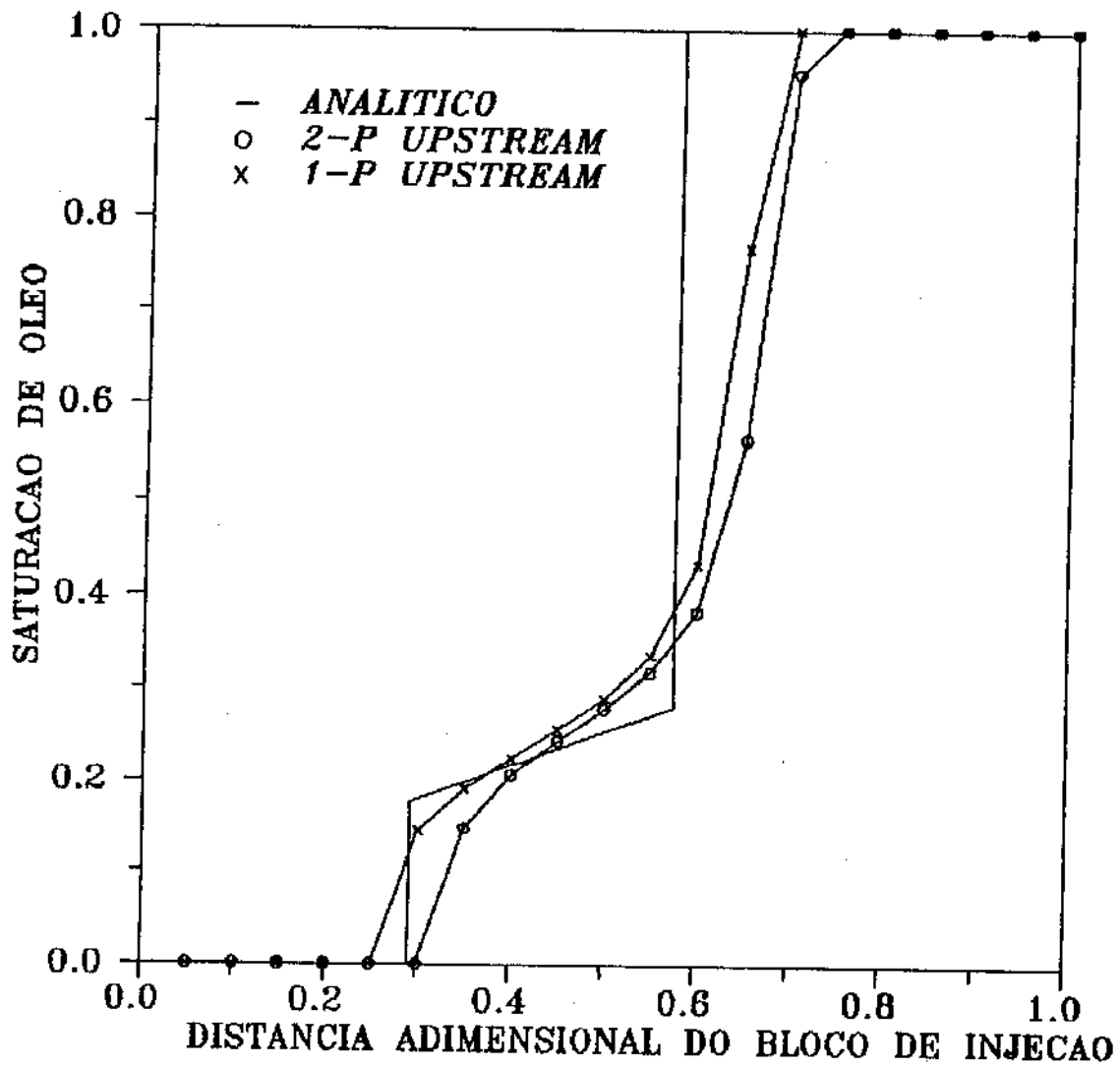


Figura 7.3.2 : Saturação de Óleo - Modelo de Helfferich.

Efeitos da Variação da Formulação das Composições.

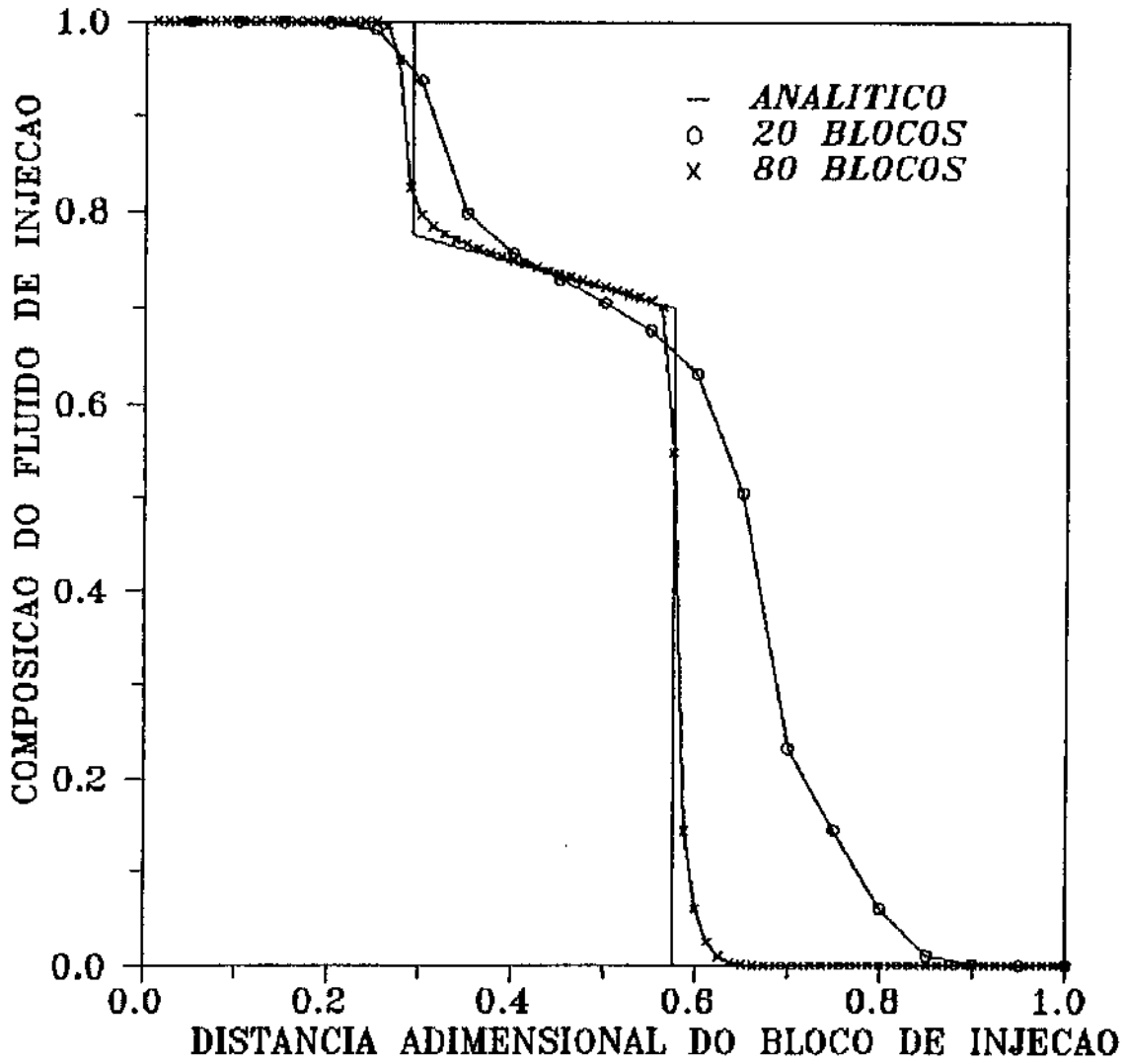


Figura 7.3.3 : Composição do Fluido Injetado - Modelo de Helfferich. Efeitos da Variação do Número de Blocos.

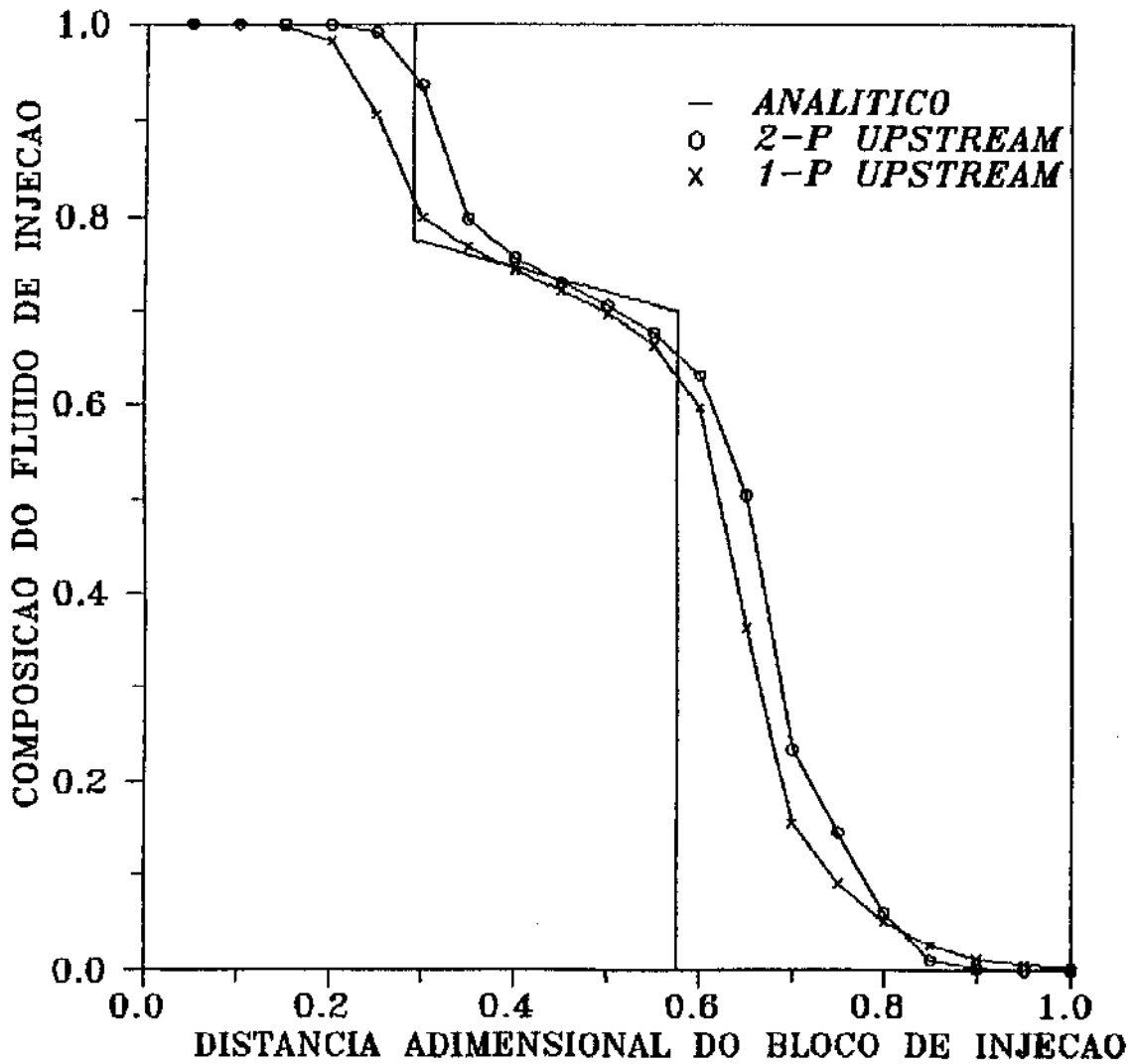


Figura 7.3.4 : Composição do Fluido Injetado - Modelo de Helfferich. Efeitos da Variação da Formulação das Composições.

7.4 - CASO 4- MODELO RADIAL

Como visto no item (6.5), este modelo pode ser estendido para o fluxo radial. O grande problema da utilização de um modelo semi-implícito para este caso é o fato de que, devido à grande queda de pressão, os blocos próximos ao poço devem ser muito pequenos, o mesmo acontecendo com o intervalo de tempo. Isto ocorre pois, nos modelos não totalmente implícitos, o fluxo fica limitado pelo volume poroso dos blocos.

Para se ter uma idéia desta limitação, com um reservatório de mesmo volume do caso (1), o intervalo de tempo fica limitado a um valor, aproximadamente, trinta vezes menor.

Por esta razão, os casos radiais não foram validados e estudados com maiores detalhes pois, para estes casos, o tempo computacional seria muito grande, principalmente para um modelo composicional. Para problemas radiais, aconselha-se a utilização dos modelos totalmente implícitos. Isto pode ser encontrado nas referências [Jon85], [JR88], [JR89] e [Coa85].

7.5 - CASO 5- VALIDAÇÃO DO MODELO

Uma maneira simples de se validar o modelo se obtém através da integração da Lei de Darcy para o regime permanente. Para o escoamento linear permanente tem-se, então :

$$\int_0^L q_t dx = - \int_{p_0}^{p_L} k A \left[\frac{k_{ro}}{\mu_o} \rho_o + \frac{k_{rg}}{\mu_g} \rho_g \right] dp , \quad (7.1)$$

onde $q_t \rightarrow$ vazão total,

$L \rightarrow$ comprimento do reservatório,

$p_0 \rightarrow$ pressão na face $x = 0$ e,

$p_L \rightarrow$ pressão na face $x = L$.

Assim, considerando a pressão de injeção igual à original do reservatório (p_i), a integral contendo os termos de permeabilidade relativa pode ser calculado por partes para cada bloco, ou seja,

$$\frac{q_t L}{A k} = \sum_{j=1}^{n_b} \int_{p_0}^{p_L} \left[\frac{k_{ro}}{\mu_o} \rho_o + \frac{k_{rg}}{\mu_g} \rho_g \right]_j \frac{dp}{dx} dx \quad (7.2)$$

Considerando a mobilidade total constante ao longo de cada bloco, obtém-se :

$$\frac{q_t L}{A k} = \sum_{j=1}^{n_b} \left[\frac{k_{ro}}{\mu_o} \rho_o + \frac{k_{rg}}{\mu_g} \rho_g \right]_j (p_j - p_{j-1}), \quad (7.3)$$

ou, simplesmente,

$$\frac{q_t L}{A k \sum_{j=1}^{n_b} \left[\frac{k_{ro}}{\mu_o} \rho_o + \frac{k_{rg}}{\mu_g} \rho_g \right]_j (p_j - p_{j-1})} = 1 \quad (7.4)$$

onde, $p_{j-1} = p_i$ quando $j = 1$.

A tabela (7.5.1) apresenta os dados para a alimentação do modelo a ser validado. A tabela (7.5.2) apresenta o resultado do quociente definido no lado esquerdo da equação (7.4) como função do número de blocos. Observa-se que, com o refinamento da malha, o quociente tende à unidade.

Tabela 7.5.1 : Dados - Caso 5

VARIÁVEL	UNIDADE	VALOR
comprimento	(m)	250
área transversal	(m ²)	464.5
permeabilidade	(md)	25
porosidade		0.3
compressibilidade da rocha	(1/psi)	0.000004
compressibilidade da água	(1/psi)	0.000003
temperatura	°F	160
saturações iniciais (S _o , S _g , S _v)		(0.8, 0.0, 0.2)
pressão inicial	(psi)	3000
índice de produtividade	(ft ³ -cp/dia-psi)	1.012x10 ⁵
composição inicial (C ₁ , C ₄ , C ₁₀)		(.2), (.2), (.6)
vazão de produção	(STB/d)	78.0
composição de injeção		igual à inicial

Tabela 7.5.2 : Resultados - Caso 5

NÚMERO DE BLOCOS	QUOCIENTE DEFINIDO NA EQUAÇÃO (7.4)
20	0.95
40	0.97
80	0.99

8 - CONCLUSÕES

O modelo estudado tem como grande vantagem a separação das equações do escoamento das equações de equilíbrio líquido-vapor. Isto economiza memória e tempo computacionais, principalmente para futuros testes com um maior número de componentes.

A grande desvantagem é a limitação do intervalo de tempo devido ao tratamento explícito das composições e transmissividades. Esta limitação pode ser pequena, como no caso do início da condensação retrógrada mas também pode ser bastante severa, como no escoamento radial. Para estes casos, torna-se necessário um modelo totalmente implícito.

Outro ponto importante é a necessidade da implementação do artifício matemático explicado no item (6). Nos casos de produção à pressão constante, o número de iterações por intervalo de tempo Δt , em média, de três para uma. Nos casos de produção constante, o sistema era mal condicionado e, muitas vezes, nem convergia. A referência [Won88] cita que a utilização do balanço de moles ao invés de frações molares pode ter o mesmo efeito, além de melhorar o balanço de materiais.

O modelo não apresentou problemas de convergência, pelo menos nos casos testados. A referência [TLS83] cita que em certos casos surge a necessidade da utilização do fator de amortecimento adotado por Nghiem [Ngh82]. Isto não foi necessário em nenhum caso estudado. A razão disto pode ser a implementação da modificação de um dos termos do Jacobiano, proposta por Mansoori [Man82] e

descrita no item (4).

Esta modificação, embora requeira um "flash" adicional, parece melhor do que o fator de amortecimento. Este último poderia ser viabilizado através de um estudo bem mais detalhado, para ser aplicado somente nos pontos necessários. O seu uso indiscriminado em todos os intervalos de tempo prejudica a convergência e aumenta demasiadamente o tempo computacional.

Um ponto sempre mencionado por todos os modelos composicionais é a presença de dispersão numérica. Segundo as referências [TLS83] e [Won88], no modelo implícito de Coats [Coa80], este problema é ainda mais grave. Coats sugere a especificação da composição do óleo como a original até que a saturação de gás seja diferente de zero. A justificativa usada foi de que os erros na composição do óleo seriam menores do que os causados pela dispersão numérica. A formulação "2-point upstream" para as composições, sugerida por [NFA81] pode apresentar problemas de "overshoot" e "undershoot", mesmo com as limitações da equação (3.10). Isto se agrava um pouco com o crescimento do número de blocos.

Um dos pontos pouco mencionados nos resultados, e que fazia parte do alvo inicial deste trabalho, foi o da aplicação deste modelo em problemas do tipo "black-oil". Uma das causas foi o maior tempo computacional dos modelos composicionais em relação aos "black-oil". Não parece viável a utilização de um modelo tão mais complexo do que o problema a ser estudado. Algumas referências sugerem algumas simplificações nos modelos composicionais que podem ser feitas para o estudo de problemas do

tipo "black-oil". Sem estas simplificações, deve-se reduzir o número de componentes para o menor possível mas, à medida que isto acontece, fica mais difícil ajustar as curvas das propriedades PVT para a comparação dos resultados.

ANEXOS

ANEXO A

NOMENCLATURA

a	constante na equação de estado
A	(ap/R^2T^2)
b	constante na equação de estado
B	(bP/RT)
c_r	compressibilidade da rocha
c_v	compressibilidade da água
erro	erro no balanço de materiais
f	fugacidade
F	lado esquerdo da equação da pressão (4.11)
F_m	razão de fugacidade
g	aceleração da gravidade
G	energia livre de Gibbs
\bar{G}	$(\partial G, \partial n)$
IP	índice de produtividade
J	Jacobiano
K_m	constante de equilíbrio líquido-vapor
k	permeabilidade absoluta
k_r	permeabilidade relativa
L	fração molar do líquido
m	constante na equação de estado
n	número de moles
n_b	número de blocos
P	pressão
P_v	pressão no fundo do poço
P_c	pressão crítica

P_r	pressão reduzida
q	vazão molar
Q	vazão volumétrica
\tilde{q}	vazão molar por unidade de volume
R	constante universal dos gases
r	raio
S	saturação
t	tempo
T	transmissividade
T_c	temperatura crítica
T_k	temperatura
T_r	temperatura reduzida
u	velocidade
V	fração molar do gás
V_b	volume do bloco
V_d	volume discretizado do bloco
w	fator de amortecimento
x_m	fração molar do componente (m) no líquido
y_m	fração molar do componente (m) no gás
z_m	fração molar total do componente (m)
Z	fator de compressibilidade
α	$(\theta \rho_v S_v + \rho_o S_o + \rho_g S_g)$
δ	coeficiente de iteração binário
ϵ	fator para medir a convergência
ϕ	porosidade
ψ	potencial de fluxo
φ	coeficiente de fugacidade
γ	gradiente
η	fator de segurança para o controle do intervalo de tempo

λ	mobilidade
μ	viscosidade
ρ	densidade molar
ξ	linearização de r ($\ln r$)
θ	$[\rho_o S_o + \rho_g S_g] / [\rho_v (S_o + S_g)]$
ν	número de componentes
ω	fator acêntrico

SUBSCRITO

h	hidrocarboneto
i, j, k	bloco
l	fase
lim	limite
m	componente
max	máximo
o, g, v	fases(óleo, gás e água)
sc	condição padrão
x	direção x
y	direção y
w	poço

SUPERESCRITO

c	Celsius
F	Fahrenheit
l	iteração
L	aproximação da média logarítmica
n	intervalo de tempo
R	Rankini

ANEXO B

Conversão das principais unidades do sistema normalmente usado em problemas de petróleo para o sistema S.I.

QUANTIDADE	UNIDADE	UNIDADE SI	FATOR DE CONV. PARA O SI
Compressibilidades	1/psi	1/Pa	1.450377E-04
Comprimento	ft	m	3.048000E-01
	in		2.540000E-02
Densidade	lbm/ft ³	Kg/m ³	1.601846E+01
	lbm/bbl		2.853010E+00
Massa	lbm	Kg	4.53590E-01
Permeabilidade	md	m ²	9.869233E-16
Pressão	psia	Pa	6.894757E+03
Temperatura	°C	K	$T_k = T^C + 273.15$
	°F		$T_k = (T^F + 459.67) / 1.8$
	°R		$T_k = T^R / 1.8$
Tempo	dias	s	8.640000E+04
Vazão	STB/dia	m ³ /s	1.840130E-06
	ft ³ /dia		3.277414E+00
Viscosidade	cp	Pa·s	1.0E-03 *
Volume	bbl	m ³	1.589873E-01
	ft ³		2.831685E-02
Vazão molar	lbmol	Kmol	4.535924E-01

* valor aproximado

PROGRAMA : ESTUDO DE UM MODELO COMPOSICIONAL PARA
SIMULACAO DE RESERVATORIOS

DENIS JOSE SCHIOZER

DATA : JUNHO - 1989

DECLARACAO DE VARIAVEIS

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+ ROOI,ROGI,ROWI
CHARACTER*4 CHARA4(15)
CHARACTER*8 CHARA8(25)
COMMON/ENT/CHARA4,CHARA8,INTE01,INTE02,INTE03,INTE04(25),
1 INTE05,INTE06,INTE07,INTE08,INTE09,INTE10,INTE11(25),
2 REAL01(25),REAL02(25),REAL03(25),REAL04(25),REAL05(25),
3 REAL06(25),REAL07(25),REAL08(25),REAL09,REAL10,REAL11,
4 REAL12,REAL13,REAL14,REAL15,REAL16,REAL17(25)
COMMON/SAI/INTE12,REAL71,REAL72,REAL73,REAL74,REAL75,REAL76,
1 REAL77,REAL78,REAL79,ICONV,REALX(25),REALY(25)
COMMON /TMS/ TOC(50),TG(50),TWC(50),TC(50),PC(50,10),ALFAC(50),FIC(50),
+ TETA,VOLC(50),DFIA,VC(50),DELTAP
COMMON /COMP/ ZC(50,10),YC(50,10),XC(50,10),NCOMP
COMMON /CONV/ FC(50)
COMMON /VAZ/ QWC(50),QH(50),QMC(50,10),QQC(50),QGC(50)
COMMON /PRT/ NDAY,ITEMAX,IPRINT,DX,DY,XL,YL,DAYPRT(30),
+ CP,CT,CQ,CD,NFLAG
COMMON /TSC/ IDT,DT,DPLIM,DSLIM,DPMAX,DSMAX
COMMON /JACOB/ GC(50,50)
COMMON /SAT/ SO(50),SG(50),SW(50)
COMMON /DENS/ ROOC(50),ROGC(50),ROWC(50)
COMMON /PROPI/ SOI,SGI,SWI,PI,FII
COMMON /PROP1/ TEMPO,ITER,NX,NY,N,AUXX,AUXY,KM,EPI,NTP
COMMON /PROP2/ RAUX,PMAX,PMIN,CR,CW,POR,DZ,ROSCW,PROIND
COMMON /PROP3/ KROC(50),KRG(50),KRWC(50),VOC(50),VGC(50),VISW,NK
COMMON /PROP4/ TMAX,TK,DTMAX,QOMIN,QOMAX,QOSC,QGSC
COMMON /PW/ PWELL(50),DTN,CUMOIL,CUMGAS,GASINJ
COMMON /PROPN/ SON(50),SGN(50),SWN(50),PNC(50,10),ZNC(50,10),
+ XNC(50,10),YNC(50,10),ROON(50),ROGN(50),ROWN(50),ALFANC(50),FINC(50)
COMMON /PERM/ SSC(20),KKOW(20),KKWC(20),KKG(20),KKOG(20),KROWI
COMMON /MOL/ PMC(10),PMO,PMW,PMG
COMMON /MATB/ ERRO(10),ERROW,ERROCC(10),ERROCW,ERTOT,VOLINI
COMMON /PRT2/ VOLHID(10),VOLIPC(10),QIC(10),QPC(10),VOLIPW,VOLWAT

```

DIMENSION AC(500),DEL(50),XIC(50),YIC(50),del2(50)

```

OPEN(1,FILE='SR.DAT')
read(1,10)PROIND,DAMP,epi3
10 format(3(15x),f10.2)

```

ROTINA DE LEITURA

CALL INIREAD

CLOSE(1)

```

        OPENC2,FILE='SR1.PRN')
        OPENC3,FILE='SR2.PRN')
        OPENC4,FILE='SR3.PRN')
        OPENC5,FILE='SR4.PRN')
        OPENC6,FILE='SR5.PRN')
C
        CALL INIPRINT
        IPRINT = 0
C
        100 ITER = 0
            IDT = 0
            WRITE(*,705)TEMPO/CT
C
C        CALCULO DAS TRANSMISSIVIDADES
C
        CALL TRANS(n)
        200 DO 110 I = 1,N
            DO 110 J = 1,N
        110     G(I,J) = 0.0d0
C
C        CALCULO DO JACOBIANO PARA RESOLUCAO DA EQUACAO DA PRESSAO
C
        CALL CALCULO
C
C        RESOLUCAO DO SISTEMA TRI-DIAGONAL
C
        if (ny.ne.1) goto 203
        call thomas(n,g,f,del)
        do 196 i=1,n
            f(i) = - f(i)
            do 194 j=1,n
        194     f(i) = f(i) + g(i,j)*del(j)
        196 continue
        call thomas(n,g,f,del2)
        do 198 i=1,n
        198     del(i) = del(i) + del2(i)
C
        goto 208
C
C        RESOLUCAO DO SISTEMA PENTADIAGONAL
C
C        CONVERTE G(I,J) EM ACIND) PARA SOLUCAO DO GBAND
C
        203 I = 0
            IND = 0
        202 I = I + 1
            IF (I.GT.N) GOTO 206
            IF (I.LE.NY) J = 0
            IF (I.GT.NY) J = I - NY - 1
            IF (I.GE.N-NY) L = N
            IF (I.LT.N-NY) L = NY + I
        204 J = J + 1
            IND = IND + 1
            ACIND) = G(I,J)
            IF (J.EQ.L) GOTO 202
            GOTO 204
        206 CONTINUE
C

```

```

CALL GBAND (A,F,DEL,N,NY,EPS,IERR,O)
do 166 i=1,n
  f(i) = - f(i)
  do 164 j=1,n
164   f(i) = f(i) + g(i,j)*del(j)
166 continue
CALL GBAND (A,F,DEL2,N,NY,EPS,IERR,O)
do 168 i=1,n
168   del(i) = del(i) + del2(i)
C
C   ATUALIZACAO DA PRESSAO PARA A NOVA ITERACAO
C
208 DO 210 I=1,NX
  DO 210 J=1,NY
    IJ = (I-1)*NY + J
210   PCI,J) = PCI,J) + damp * DEL(IJ)
C
C   CALCULO DAS COMPOSICOES E DA SATURACAO DA AGUA
C
DO 400 I = 1,NX
  DO 400 J = 1,NY
    IJ = (I-1)*NY + J
C
    IF (I.NE.1) GOTO 222
    DEN = 0.0d0
    SW(IJ) = 0.0d0
    DO 218 M = 1,NCOMP
218   Z(IJ,M) = 0.0d0
    GOTO 240
222 AUX = PCI-1,J) - PCI,J)
    IF (AUX.LE.0.d0) GOTO 230
    DEN = AUX * (TC(IJ-NY) + TG(IJ-NY)) * AUXX
    SW(IJ) = AUX * TW(IJ-NY) * AUXX
    DO 225 M=1,NCOMP
      IF (I.NE.2) GOTO 223
      XX = XNC(IJ-NY,M)
      YY = YNC(IJ-NY,M)
      GOTO 225
223 IF (NTP.EQ.0) THEN
      XX = 1.5d0 * XNC(IJ-NY,M) - 0.5d0 * XNC(IJ-NY)*2,M)
      YY = 1.5d0 * YNC(IJ-NY,M) - 0.5d0 * YNC(IJ-NY)*2,M)
      IF (XX.GT.DMAX1(XNC(IJ,M),XNC(IJ-NY,M))) THEN
        XX = DMAX1 ( XNC(IJ,M),XNC(IJ-NY,M) )
      ENDIF
      IF (YY.GT.DMAX1(YNC(IJ,M),YNC(IJ-NY,M))) THEN
        YY = DMAX1 ( YNC(IJ,M),YNC(IJ-NY,M) )
      ENDIF
      IF (XX.LT.DMIN1(XNC(IJ,M),XNC(IJ-NY,M))) THEN
        XX = DMIN1 ( XNC(IJ,M),XNC(IJ-NY,M) )
      ENDIF
      IF (YY.LT.DMIN1(YNC(IJ,M),YNC(IJ-NY,M))) THEN
        YY = DMIN1 ( YNC(IJ,M),YNC(IJ-NY,M) )
      ENDIF
    ELSE
      XX = XNC(IJ-NY,M)
      YY = YNC(IJ-NY,M)
    ENDIF
225 Z(IJ,M) = AUX * (TC(IJ-NY) * XX + TG(IJ-NY) * YY) * AUXX

```

```

GOTO 240
230 DEN = AUX * (TOCIJ) + TGCIJ)) * AUXX
SWCIJ) = AUX * TWCIJ) * AUXX
DO 235 M=1, NCOMP
  IF (I.NE.NX) GOTO 233
  XX = XNCIJ, MD
  YY = YNCIJ, MD
  GOTO 235
233 IF (NTP.EQ.O) THEN
  XX = 1.5d0 * XNCIJ, MD - 0.5d0 * XNCIJ+NY, MD
  YY = 1.5d0 * YNCIJ, MD - 0.5d0 * YNCIJ+NY, MD
  ELSE
  XX = XNCIJ, MD
  YY = YNCIJ, MD
  ENDIF
235 ZCIJ, MD = AUX * (TOCIJ) * XX + TGCIJ) * YY) * AUXX
C
240 IF (I.EQ.NX) GOTO 260
AUX = PCI+1, J) - PCI, J)
IF (AUX.LE.O.d0) GOTO 250
DEN = DEN + AUX * (TOCIJ+NY) + TGCIJ+NY)) * AUXX
SWCIJ) = SWCIJ) + AUX * TWCIJ+NY) * AUXX
DO 245 M=1, NCOMP
  IF (I.NE.NX-1) GOTO 243
  XX = XNCIJ+NY, MD
  YY = YNCIJ+NY, MD
  GOTO 245
243 IFCNTP.EQ.O) THEN
  XX = 1.5d0 * XNCIJ+NY, MD - 0.5d0 * XNCIJ+NY*2, MD
  YY = 1.5d0 * YNCIJ+NY, MD - 0.5d0 * YNCIJ+NY*2, MD
  IF (XX.GT.DMAX1(XNCIJ, MD, XNCIJ+NY, MD)) THEN
  XX = DMAX1 ( XNCIJ, MD, XNCIJ+NY, MD)
  ENDIF
  IF (YY.GT.DMAX1(YNCIJ, MD, YNCIJ+NY, MD)) THEN
  YY = DMAX1 ( YNCIJ, MD, YNCIJ+NY, MD)
  ENDIF
  IF (XX.LT.DMIN1(XNCIJ, MD, XNCIJ+NY, MD)) THEN
  XX = DMIN1 ( XNCIJ, MD, XNCIJ+NY, MD)
  ENDIF
  IF (YY.LT.DMIN1(YNCIJ, MD, YNCIJ+NY, MD)) THEN
  YY = DMIN1 ( YNCIJ, MD, YNCIJ+NY, MD)
  ENDIF
  ELSE
  XX = XNCIJ+NY, MD
  YY = YNCIJ+NY, MD
  ENDIF
245 ZCIJ, MD = ZCIJ, MD + AUX * (TOCIJ+NY) * XX + TGCIJ+NY) * YY)
+ * AUXX
GOTO 260
250 DEN = DEN + AUX * (TOCIJ) + TGCIJ)) * AUXX
SWCIJ) = SWCIJ) + AUX * TWCIJ) * AUXX
DO 255 M=1, NCOMP
  IF (I.NE.1) GOTO 253
  XX = XNCIJ, MD
  YY = YNCIJ, MD
  GOTO 255
253 IF (NTP.EQ.O) THEN
  XX = 1.5d0 * XNCIJ, MD - 0.5d0 * XNCIJ-NY, MD

```

```

        YY = 1.5d0 * YNCIJ,M - 0.5d0 * YNCIJ-NY,M
    ELSE
        XX = XNCIJ,M
        YY = YNCIJ,M
    ENDIF
255   ZCIJ,M = ZCIJ,M + AUX * (TOCIJ) * XX + TGCIJ * YY * AUXX
C
260   IF (J.EQ.1) GOTO 280
        AUX = PCI,J-1 - PCI,J
        IF (AUX.LE.0.d0) GOTO 270
        DEN = DEN + AUX * (TOCIJ-1) + TGCIJ-1 * AUXY
        SWCIJ = SWCIJ + AUX * TWCIJ-1 * AUXY
        DO 265 M=1,NCOMP
            IF (J.NE.2) GOTO 263
            XX = XNCIJ-1,M
            YY = YNCIJ-1,M
            GOTO 265
263   IF (NTP.EQ.0) THEN
            XX = 1.5d0 * XNCIJ-1,M - 0.5d0 * XNCIJ-2,M
            YY = 1.5d0 * YNCIJ-1,M - 0.5d0 * YNCIJ-2,M
            IF (CXX.GT.DMAX1(XNCIJ,M,XNCIJ-1,M)) THEN
                XX = DMAX1 ( XNCIJ,M,XNCIJ-1,M)
            ENDIF
            IF (CYY.GT.DMAX1(YNCIJ,M,YNCIJ-1,M)) THEN
                YY = DMAX1 ( YNCIJ,M,YNCIJ-1,M)
            ENDIF
            IF (CXX.LT.DMIN1(XNCIJ,M,XNCIJ-1,M)) THEN
                XX = DMIN1 ( XNCIJ,M,XNCIJ-1,M)
            ENDIF
            IF (CYY.LT.DMIN1(YNCIJ,M,YNCIJ-1,M)) THEN
                YY = DMIN1 ( YNCIJ,M,YNCIJ-1,M)
            ENDIF
        ELSE
            XX = XNCIJ-1,M
            YY = YNCIJ-1,M
        ENDIF
265   ZCIJ,M = ZCIJ,M + AUX * (TOCIJ-1) * XX + TGCIJ-1 * YY
        +
        * AUXY
        GOTO 280
270   DEN = DEN + AUX * (TOCIJ) + TGCIJ * AUXY
        SWCIJ = SWCIJ + AUX * TWCIJ * AUXY
        DO 275 M=1,NCOMP
            IF (J.NE.NY) GOTO 273
            XX = XNCIJ,M
            YY = YNCIJ,M
            GOTO 275
273   IF (NTP.EQ.0) THEN
            XX = 1.5d0 * XNCIJ,M - 0.5d0 * XNCIJ+1,M
            YY = 1.5d0 * YNCIJ,M - 0.5d0 * YNCIJ+1,M
        ELSE
            XX = XNCIJ,M
            YY = YNCIJ,M
        ENDIF
275   ZCIJ,M = ZCIJ,M + AUX * (TOCIJ) * XX + TGCIJ * YY * AUXY
C
280   IF (J.EQ.NY) GOTO 300
        AUX = PCI,J+1 - PCI,J
        IF (AUX.LE.0.d0) GOTO 290

```

```

DEN = DEN + AUX * (TOCIJ+1) + TGCIJ+1)) * AUXY
SWCIJ) = SWCIJ) + AUX * TWCIJ+1) * AUXY
DO 285 M=1, NCOMP
  IF (J.NE.NY-1) GOTO 283
  XX = XNCIJ+1, MD
  YY = YNCIJ+1, MD
  GOTO 285
283  IF (CNTP.EQ.0) THEN
      XX = 1.5d0 * XNCIJ+1, MD - 0.5d0 * XNCIJ+2, MD
      YY = 1.5d0 * YNCIJ+1, MD - 0.5d0 * YNCIJ+2, MD
      IF (CXX.GT.DMAX1(XNCIJ, MD, XNCIJ+1, MD)) THEN
          XX = DMAX1 ( XNCIJ, MD, XNCIJ+1, MD)
      ENDIF
      IF (CYY.GT.DMAX1(YNCIJ, MD, YNCIJ+1, MD)) THEN
          YY = DMAX1 ( YNCIJ, MD, YNCIJ+1, MD)
      ENDIF
      IF (CXX.LT.DMIN1(XNCIJ, MD, XNCIJ+1, MD)) THEN
          XX = DMIN1 ( XNCIJ, MD, XNCIJ+1, MD)
      ENDIF
      IF (CYY.LT.DMIN1(YNCIJ, MD, YNCIJ+1, MD)) THEN
          YY = DMIN1 ( YNCIJ, MD, YNCIJ+1, MD)
      ENDIF
  ELSE
      XX = XNCIJ+1, MD
      YY = YNCIJ+1, MD
  ENDIF
285  ZCIJ, MD = ZCIJ, MD + AUX * (TOCIJ+1) * XX + TGCIJ+1) * YY)
      +
      * AUXY
      GOTO 300
290  DEN = DEN + AUX * (TOCIJ) + TGCIJ)) * AUXY
      SWCIJ) = SWCIJ) + AUX * TWCIJ) * AUXY
      DO 295 M=1, NCOMP
          IF (J.NE.1) GOTO 293
          XX = XNCIJ, MD
          YY = YNCIJ, MD
          GOTO 295
293  IF (CNTP.EQ.0) THEN
          XX = 1.5d0 * XNCIJ, MD - 0.5d0 * XNCIJ-1, MD
          YY = 1.5d0 * YNCIJ, MD - 0.5d0 * YNCIJ-1, MD
      ELSE
          XX = XNCIJ, MD
          YY = YNCIJ, MD
      ENDIF
295  ZCIJ, MD = ZCIJ, MD + AUX * (TOCIJ) * XX + TGCIJ) * YY) * AUXY
C
300  DEN = DEN + QHCIJ) + VOLCIJ)/DT * FINCIJ) * (ROONCIJ) *
      +
      SONCIJ) + ROGNCIJ) * SGNCIJ) )
      DO 310 M=1, NCOMP
          ZCIJ, MD = ZCIJ, MD + QMCIJ, MD + VOLCIJ)/DT * FINCIJ) * ZNCIJ, MD
          +
          * (ROONCIJ) * SONCIJ) + ROGNCIJ) * SGNCIJ))
310  ZCIJ, MD = ZCIJ, MD / DEN
      ROWCIJ) = ROSCW * (1.d0 + CW * (PCI, J) - 14.7d0*CP)) / PMW
      SWCIJ) = (SWCIJ) + QWCIJ) + VOLCIJ)/DT * FINCIJ) * ROWNCIJ)
      +
      * SWNCIJ)) / (VOLCIJ)/DT * FICIJ) * ROWCIJ))
400  CONTINUE

```



```

C
C   CALCULO DAS SATURACOES DE OLEO E GAS
C
DO 450 I=1,NX
DO 450 J=1,NY
IJ = (I-1)*NY + J
REAL12 = SNGL (PCI,J) / CP)
DO 440 M=1,NCOMP
440 REAL17CMD = SNGL (ZCIJ,MD)
CALL GPASTM
CALL CONVERTE(XI,YI,VOCIJ),VGCIJ),QUAL,ROOCIJ),ROGCIJ),CD,NCOMP)
DO 441 M=1,NCOMP
XCIJ,MD = XICMD
441 YCIJ,MD = YICMD
IF (QUAL.EQ.0.0d0) GOTO 442
VCIJ) = 1.d0/ ((1.d0- QUAL)/QUAL * PMG /PMO + 1.d0)
GOTO 444
442 VCIJ) = 0.0d0
C
C   So,Sg   eq 28-31
C
444 IF (VCIJ).NE.0.) GOTO 446
SOCIJ) = 1.d0 -SWCIJ)
GOTO 449
446 IF (VCIJ).NE.1.d0) GOTO 448
SOCIJ) = 0.d0
GOTO 449
448 SOCIJ) = (1.d0- SWCIJ)) * (1.d0- VCIJ)) * ROGCIJ)/( (1.d0- VCIJ))
+
* ROGCIJ) + VCIJ) * ROOCIJ) )
449 SGCIJ) = 1.d0 - SWCIJ) - SOCIJ)
ALFACIJ) = TETA*ROWCIJ)*SWCIJ) + ROOCIJ)*SOCIJ) + ROGCIJ)*SGCIJ)
FICIJ) = POR * (1.d0+ CR * (PCI,J) - 14.7d0*CP))
450 CONTINUE
C
C   TESTE DE CONVERGENCIA
C
CALL TESTE(TEST,N)
WRITE(*,201) ITER,TEST
201 FORMAT(' ITERACAO ',I2,'   NORMA ',E10.2)
C
C   : CALCULO DA TOLERANCIA
C
TOL = EPI
C
IF (TEST.LE.TOL) GOTO 500
ITER = ITER + 1 ;
IF (ITER.GT.ITEMAX) GOTO 800
GOTO 200
C
500 CONTINUE
C
C   CONTROLE DO INTERVALO DE TEMPO
C
CALL TSTEP
IF (IDT.EQ.1) GOTO 100
C
C   CALCULO DO BALANCO DE MATERIAIS
C

```

```

CALL MATBAL
C
C
C
ATUALIZACAO DAS VARIAVEIS PARA O PROXIMO INTERVALO DE TEMPO
DO 600 I=1,NX
DO 600 J=1,NY
IJ = (I-1) * NY + J
PNCI,J) = PCI,J)
SONCIJ) = SOCIJ)
SGNCIJ) = SGCIJ)
SWNCIJ) = SWCIJ)
ALFANCIJ) = ALFACIJ)
FINCIJ) = FICIJ)
ROONCIJ) = ROOCIJ)
ROGNCIJ) = ROGCIJ)
ROWNCIJ) = ROWCIJ)
DO 610 M=1,NCOMP
ZNCIJ,M) = ZCIJ,M)
XNCIJ,M) = XCIJ,M)
610 YNCIJ,M) = YCIJ,M)
600 CONTINUE
C
C
C
IMPRESSAO DOS RESULTADOS
CUMOIL = CUMOIL + QOSC * DT/ct
CUMGAS = CUMGAS + QGSC * DT/1000/ct
DO 700 M = 1,NCOMP
700 VOLIPCMD = 0.0DO
VOLIPW = 0.0DO
DO 702 IJ = 1,N
AUX = VOLCIJ) * FICIJ) * (ROOCIJ) * SOCIJ) + ROGCIJ) * SGCIJ)
VOLIPW = VOLIPW + VOLCIJ) * FICIJ) * ROWCIJ) * SWCIJ)
DO 701 M = 1,NCOMP
701 VOLIPCMD = VOLIPCMD + AUX * ZCIJ,M)
702 CONTINUE
DO 703 M = 1,NCOMP
QiCMD = QiCMD + QMC1,M)*DT
703 QpCMD = QpCMD + QMCnx,M)*DT
WRITE(*,790) I, J, QOSC, SOCI, SOCND, ZC1,1), ZC1,NCOMP),
+
ERROW, CERROCMD, M=1, NCOMP)
: WRITE(*,792) PCI,1)/CP, PCnx,NY)/CP

IPRINT = IPRINT + 1
IF (IPRINT.EQ.NFLAG) THEN
IPRINT = 0

WRITE(2,705) TEMPO/CT
WRITE(2,765) QOSC, QGSC/1000, CUMOIL, CUMGAS
WRITE(2,715)
DO 704 M=1,NCOMP
WRITE(2,725) M, ERROCMD, QiCMD, QpCMD, VOLIPCMD, VOLHIDCMD
704 CONTINUE
WRITE(2,735) ERROW, QwCIJ), QwCIJ), VOLIPW, VOLWAT
WRITE(2,745)
DO 706 I=1,N
WRITE(2,755) I, PCI,1)/CP, SOCI, SGCI, SWCI, ZCI,1), ZCI,3)
706 CONTINUE

```

```

WRITEC(3,795)iter,QOSC,SO(1),So(n),ERROW,CERROCMD,M=1,NCOMP)
WRITEC(4,791)(Z(L,1),L=1,nx)
WRITEC(5,791)(Z(L,NCOMP),L=1,nx)
WRITEC(6,793)(PCL,1)/CP,L=1,nx)

```

```

ENDIF

```

```

705 FORMAT(80C'*'),/,20x,' Tempo (dias) = ',F6.0,/
715 format(9X,'BALANCO',6X,4C'MOLES',7X),/, 'COMP. ',4X,'DE MAT. ',6X,
+ 'INJ. ',8X,'PROD. ',5X,'IN PLACE',4X,'INICIAIS',/,5C'-'),
+ 5(3X,9C'-')))

```

```

725 FORMAT(I3,2X,5(3X,E9.3))

```

```

735 FORMAT(2X,'W',2X,5(3X,E9.3),/ /)

```

```

745 format('BLOCO PRESSAO SO',8X,'SG',8X,'SW',7X,'Z(1)',6X,
+ 'Z(3)',/, '-----',5(2X,'-----'))

```

```

755 FORMAT(1X,I3,4X,F7.2,2X,5(F7.4,3X))

```

```

765 FORMAT('POCO OLEO GAS OLEO ACUM. GAS ACUM.
+ /, (STB/D) (Mscf/D) (STB) (MMscf)
+ /, '-----'
+ /,7X,E9.3,2X,E9.3,4X,E10.4,4X,E9.3,/

```

```

C

```

```

790 FORMAT(15,F8.2,1X,6(F8.6,1X))

```

```

791 FORMAT(40F7.5,1X)

```

```

792 FORMAT(2(F16.5,1X))

```

```

793 FORMAT(40(F9.3,1X))

```

```

794 FORMAT(4F8.6,1X)

```

```

795 FORMAT(15,F8.2,1X,8(F8.6,1X))

```

```

C

```

```

IF (TEMPO.GE.TMAX) GOTO 800
TEMPO = TEMPO + DT
GOTO 100

```

```

C

```

```

800 CLOSE(2)
CLOSE(3)
CLOSE(4)
CLOSE(5)
CLOSE(6)

```

```

DO 810 I=1,3

```

```

810 WRITE(*,'(1X,A1)')CHAR(7)
STOP
END

```

```

C

```

```

C ***** SUBROTINA INIREAD *****
C LEITURA DOS DADOS E INICIALIZACAO DAS VARIAVEIS
C

```

```

C

```

```

C

```

```

C

```

```

SUBROUTINE INIREAD

```

```

C

```

```

IMPLICIT REAL*8 CA-H,K,O-Q,S-Z

```

```

REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+ ROOI,ROGI,ROWI

```

```

CHARACTER*4 CHARA4(15)

```

```

CHARACTER*8 CHARA8(25)

```

```

COMMON/ENT/CHARA4,CHARA8,INTE01,INTE02,INTE03,INTE04(25),

```

```

1 INTE05,INTE06,INTE07,INTE08,INTE09,INTE10,INTE11(25),

```

```

2 REAL01(25),REAL02(25),REAL03(25),REAL04(25),REAL05(25),

```

```

3 REAL06(25),REAL07(25),REAL08(25),REAL09,REAL10,REAL11,

```

```

4          REAL12, REAL13, REAL14, REAL15, REAL16, REAL17(25)
COMMON/SAI/INTE12, REAL71, REAL72, REAL73, REAL74, REAL75, REAL76,
1          REAL77, REAL78, REAL79, I CONV, REALX(25), REALY(25)
COMMON /TMS/ TOC(50), TGC(50), TWC(50), TC(50), PC(50,10), ALFA(50), FI(50),
+          TETA, VOLC(50), DFIA, VC(50), DELTAP
COMMON /COMP/ ZC(50,10), YC(50,10), XC(50,10), NCOMP
COMMON /VAZ/ QWC(50), QHC(50), QMC(50,10), QOC(50), QGC(50)
COMMON /PRT/ NDAY, ITEMAX, IPRINT, DX, DY, XL, YL, DAYPRTC(30),
+          CP, CT, CQ, CD, NFLAG
COMMON /TSC/ IDT, DT, DPLIM, DSLIM, DPMAX, DSMAX
COMMON /JACOB/ GC(50,50)
COMMON /SAT/ SOC(50), SGC(50), SWC(50)
COMMON /DENS/ ROOC(50), ROGC(50), ROWC(50)
COMMON /PROPI/ SOI, SGI, SWI, PI, FII
COMMON /PROP1/ TEMPO, ITER, NX, NY, N, AUXX, AUXY, KM, EPI, NTP
COMMON /PROP2/ RAUX, PMAX, PMIN, CR, CW, POR, DZ, ROSCW, PROIND
COMMON /PROP3/ KROC(50), KRG(50), KRWC(50), VOC(50), VGC(50), VISW, NK
COMMON /PROP4/ TMAX, TK, DTMAX, QOMIN, QOMAX, QOSC, QGSC
COMMON /PROPN/ SONC(50), SGNC(50), SWNC(50), PNC(50,10), ZNC(50,10),
+ XNC(50,10), YNC(50,10), ROONC(50), ROGNC(50), ROWNC(50), ALFANC(50), FINC(50)
COMMON /PERM/ SSC(20), KKOWC(20), KKWC(20), KKG(20), KKO(20), KROWI
COMMON /MOL/ PMC(10), PMO, PMW, PMG
COMMON /MATB/ ERROC(10), ERROW, ERROCC(10), ERROCW, ERTOT, VOLINI
COMMON /PW/ PWELL(50), DTN, CUMOIL, CUMGAS, GASINJ
COMMON /PRT2/ VOLHID(10), VOLIPC(10), Qi(10), Qp(10), VOLIPW, VOLWAT
DIMENSION XI(10), YI(10), ZI(10), ROSC(10), XX(50)

```

```

C          READC(1,15) XL, YL, DZ, POR, PI, SOI, SGI, SWI, KX, KY, CR, CW, RWELL, PMAX,
+          PMIN, QOMAX, QOMIN, DPLIM, DSLIM, DTMAX, TMAX, DT, TK, EPI,
+          epi2, SWC, ROSCW, DELTAP, PMW, VISW, RE

```

```

C          READC(1,25) NX, NY, ITEMAX, NPRO, NINJ, NFLAG, NDAY, NK, NCOMP, MODELO,
+          NTP

```

```

C          EPIAUX = 0.0d0
          DO 10 I=1, NINJ
            READC(1,35) N1, N2
            ni = (N1-1)*NY+N2
            READC(1,95) QWC(ni)
            do 7 L=1, NCOMP
              read(1,95) QMC(ni,L)
              EPIAUX = EPIAUX + QMC(ni,L)

```

```

7          continue
10         continue
          EPIAUX = EPIAUX + QWC(ni)
          EPI = EPI * EPIAUX
          if (epi.eq.0.0d0) epi = epi2
          READC(1,5)

```

```

C          DO 12 I=1, NPRO
            READC(1,85) N1, N2, QOC((N1-1)*NY+N2)
            CONTINUE
            READC(1,5)
            DO 20 J=1, NCOMP
              READC(1,45) ZI(J), PMC(J), INTE11(J)
              PMC(J) = PMC(J) / 1000.d0
20         CONTINUE

```



```

      NY = 1
    ENDIF
    N=NX*NY
    IF (PROIND.NE.0.0d0) GOTO 31
      RO=.14d0*DX*DSQRT(1.d0+(DX/DY)**2)
      RAUX = DLOGCRO/RWELL)
      PROIND = 2.d0 * 3.1416d0 * KM * DZ / RAUX
31  TETA = 0.15d0
      FII = POR * (1.d0+ CR * (PI - 14.7d0*CP))
      ROWI = ROSCW * (1.d0 + CW * (PI - 14.7d0*CP)) / PMW
      REAL09 = SNGL(TK)
      REAL12 = SNGL(PI/CP)
      DO 34 I = 1, NCOMP
34  REAL17(I) = SNGL(ZI(I))
C
      CALL GPASIM
      CALL CONVERTE (XI, YI, VISO, VISG, QUAL, ROOI, ROGI, CD, NCOMP)
      IF (QUAL.EQ.0.0d0) GOTO 36
      VINI = 1.d0 / ((1.d0 - QUAL) / QUAL * PMG / PMO + 1.d0)
      GOTO 38
36  VINI = 0.0d0
38  SOI = (1.d0 - SWI) * (1.d0 - VINI) * ROGI / ((1.d0 - VINI)
+      * ROGI + VINI * ROOI)
      SGI = 1.d0 - SWI - SOI
      ALFAI = TETA*ROWI*SWI + ROOI*SOI + ROGI*SGI
      VOLWAT = 0.0d0
      VOLINI = 0.0d0
      DO 40 M=1, NCOMP
40  VOLHIDCMD = 0.0d0
C
C
C
      INICIALIZAO DAS PROPRIEDADES DA GRADE
      DO 50 I=1, NX
        DO 50 J=1, NY
          IJ = (I-1)*NY + J
          IF (MODELO.EQ.0) THEN
            VOLC(IJ) = 3.14159d0 * DZ * ( DEXP ( 2*XXC(IJ+1) ) -
+            DEXP ( 2*XXC(IJ) ) )
          ELSE
            VOLC(IJ) = DX*DY*DZ
          ENDIF
          AUX = VOLC(IJ) * FII * (ROOI * SOI + ROGI * SGI)
          VOLWAT = VOLWAT + VOLC(IJ) * FII * (ROWI * SWI)
          VOLINI = VOLINI + AUX + VOLWAT
          DO 44 M=1, NCOMP
44  VOLHIDCMD = VOLHIDCMD + AUX * ZI(M)
          F(I, J) = PI
          P(I, J) = PI
          F*ELLC(IJ) = P*MAX
          SOC(IJ) = SOI
          SGC(IJ) = SGI
          SWC(IJ) = SWI
          RONC(IJ) = ROOI
          SGNC(IJ) = SGI
          SWNC(IJ) = SWI
          ROONC(IJ) = ROOI
          ROGNC(IJ) = ROGI
          ROWNC(IJ) = ROWI

```

```

ROOCIJD = ROOI
ROGCIJD = ROGI
ROWCIJD = ROWI
VOCIJD = VISO
VGCIJJ = VISG
VCIJD = VINI
ALFACIJD = ALFAI
FICIJD = FII
ALFANCIJD = ALFAI
FINCIJD = FII
QHCIJD = 0.0d0
DO 48 M=1, NCOMP
    ZNCIJ,MD = ZICMD
    ZCIJ,MD = ZICMD
    XNCIJ,MD = XICMD
    YNCIJ,MD = YICMD
48    QHCIJD = QHCIJD + QMCIJ,MD
    QWCIJD = QWCIJD * CQ * ROSCW / PMW
    QOCIJD = QOCIJD * CQ
50    CONTINUE

```

C

```

5    FORMATC/
15   FORMATC///,31(15X,F10.0,/ )
25   FORMATC11(15X,I3,/ ,/ )
35   FORMATC2(2X,I2)
45   FORMATC2(2X,F10.0),2X,I3)
55   FORMATC2X,F10.0)
65   FORMATC5C2X,F10.0)
75   FORMATC9C15X,I3,/ ,7(15X,F10.0,/ )
85   FORMATC2(2X,I2),(2X,F10.0)
95   format(2X,F10.0)
    RETURN
    END

```

C

```

C ***** SUBROTINA INIPRINT *****
C                                     PRINT DATA
C

```

```

SUBROUTINE INIPRINT
IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+   ROOI,ROGI,ROWI
COMMON /VAZ/ QWC50,QHC50,QMC50,10,QOC50,QGC50
COMMON /PRT/ NDAY,ITEMAX,IPRINT,DX,DY,XL,YL,DAYPRTC30,
+   CP,CT,CQ,CD,NFLAG
COMMON /PROPI/ SOI,SGI,SWI,PI,FII
COMMON /PROP1/ TEMPO,ITER,NX,NY,N,AUXX,AUXY,KM,EPI,NTP
COMMON /PROP2/ RAUX,PMAX,PMIN,CR,CW,POR,DZ,ROSCW,PROIND

```

```

C
SKIN=0.d0
PC=0.d0
WRI TEC(2,15)
WRI TEC(2,25)XL,YL,DZ,PP,QOMAX,QOMIN,PMIN,DSLIM,DPLIM,CR,CW,FII,
+   RWELL,SKIN,PC,SGI,SOI,SWI,(CKX*1.D15),CKY*1.D15)
15  FORMATC////,3X,60C' * '),2C/,3X,' * ',58C' '),' * '),/,3X,
+   ' *
      SIMULACAO DE RESERVATORIOS
+   /,3X,' * ',58C' '),' * ',/,3X,
+   ' *
      TESE
+   2C/,3X,' * ',58C' '),' * '),/,3X,

```

```

+ '*
+ /,3X,'*',58C' ),'*/,/3X,
+ '*
+ 3C/,3X,'*',58C' ),'*/,/3X,
+ '*
+ /,3X,'*',58C' ),'*/,/3X,
+ '*
+ 2C/,3X,'*',58C' ),'*/,/3X,60C'*) ,////)
25 FORMAT(5X,'DADOS INICIAIS ',//,3X,
+ 'DIMENSAO - COMPRIMENTO.....',F7.0,' m',/,3X,
+ ' LARGURA.....',F7.0,' m',/,3X,
+ ' PROFUNDIDADE.....',F7.0,' m',/,3X,
+ 'PRESSAO INICIAL DO RESERVATORIO.....',F7.0,' Pa',/,3X,
+ 'MAXIMA PRODUCAO DE OLEO.....',F7.0,' ',/,3X,
+ 'MINIMA PRODUCAO DE OLEO.....',F7.0,' ',/,3X,
+ 'MINIMA PRESSAO NO POCO.....',F7.0,' Pa',/,3X,
+ 'MAXIMA VARIACAO DE SATURACAO NO ',/,3X,
+ ' INTERVALO DE TEMPO.....',F7.2,/,3X,
+ 'MAXIMA VARIACAO DE PRESSAO NO ',/,3X,
+ ' INTERVALO DE TEMPO.....',F7.0,' Pa',/,3X,
+ 'COMPRESSIBILIDADE DA ROCHA.....',F7.0,' 1/Pa',/,3X,
+ 'COMPRESSIBILIDADE DA AGUA.....',F7.0,' 1/Pa',/,3X,
+ 'POROSIDADE A 14.7 psi .....',F7.2,/,3X,
+ 'RAIO DO POCO.....',F7.2,' m',/,3X,
+ 'SKIN .....',F7.0,/,3X,
+ 'PRESSAO CAPILAR.....',F7.0,' Pa',/,3X,
+ 'SATURACAO DE GAS INICIAL.....',F7.2,/,3X,
+ 'SATURACAO DE OLEO INICIAL.....',F7.2,/,3X,
+ 'SATURACAO DE AGUA INICIAL.....',F7.2,/,3X,
+ 'PERMEABILIDADE DIRECAO.....',F7.0,' md',/,3X,
+ ' DIRETIO.....',F7.0,' md',/,3X,
+ 3C/)
RETURN
END

```

***** SUBROTINA TRANS *****
CALCULA AS TRANSMISSIVIDADES

```

SUBROUTINE TRANS(n)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+ ROOI,ROGI,ROWI
CHARACTER*4 CHARA4(15)
CHARACTER*8 CHARA8(25)
COMMON /TMS/ TOC(50),TGC(50),TWC(50),TC(50),PC(50,10),ALFAC(50),FIC(50),
+ TETA,VOLC(50),DFIA,VC(50),DELTAP
COMMON /SAT/ SOC(50),SGC(50),SWC(50)
COMMON /DENS/ ROOC(50),ROGC(50),ROWC(50)
COMMON /PROP3/ KROC(50),KRC(50),KRWC(50),VOC(50),VGC(50),VISW,NK
COMMON /PROP4/ TMAX,TK,DTMAX,QOMIN,QOMAX,QOSC,QGSC

COMMON /PROPN/ SONC(50),SGNC(50),SWNC(50),PNC(50,10),ZNC(50,10),
+ XNC(50,10),YNC(50,10),ROONC(50),ROGNC(50),ROWNC(50),ALFANC(50),FINC(50)
COMMON /PERM/ SSC(20),KKOWC(20),KKWC(20),KKGC(20),KKOGC(20),KROWI

```



```

DO 10 I=1,N
  CALL PERELCI)
  IF (SOCID).EQ.0.0D0) THEN
    TOCID) = 0.0D0
  ELSE
    TOCID) = KROCID) * ROOCID) / VOXID)
  ENDIF
  IF (SGCID).EQ.0.0D0) THEN
    TGCID) = 0.0D0
  ELSE
    TGCID) = KRGCID) * ROGCID) / VGXID)
  ENDIF
  TWCID) = KRWCID) * ROWCID) / VISW
10  TCID) = TOCID) + TGCID) + TETA*TWCID)
  RETURN
  END

```

```

C
C ***** SUBROTINA CALCULO *****
C          CALCULA O JACOBIANO E A FUNCAO " F "
C          PARA A RTESOLUCAO DA EQUACAO DA PRESSAO
C

```

```

SUBROUTINE CALCULO

```

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+ ROOI,ROGI,ROWI
CHARACTER*4 CHARA4(15)
CHARACTER*8 CHARAS(25)
COMMON/ENT/CHARA4,CHARAS,INTE01,INTE02,INTE03,INTE04(25),
1      INTE05,INTE06,INTE07,INTE08,INTE09,INTE10,INTE11(25),
2      REAL01(25),REAL02(25),REAL03(25),REAL04(25),REAL05(25),
3      REAL06(25),REAL07(25),REAL08(25),REAL09,REAL10,REAL11,
4      REAL12,REAL13,REAL14,REAL15,REAL16,REAL17(25)
COMMON/SAI/INTE12,REAL71,REAL72,REAL73,REAL74,REAL75,REAL76,
1      REAL77,REAL78,REAL79,ICONV,REALX(25),REALY(25)
COMMON /TMS/ TOC(50),TGC(50),TWC(50),TC(50),PC(50,10),ALFAC(50),FI(50),
+ TETA,VOL(50),DFIA,VC(50),DELTAP
COMMON /COMP/ ZC(50,10),YC(50,10),XC(50,10),NCOMP
COMMON /CONV/ FC(50)
COMMON /VAZ/ QWC(50),QHC(50),QMC(50,10),QXC(50),QG(50)
COMMON /PRT/ NDAY,ITEMAX,IPRINT,DX,DY,XL,YL,DAYPRTC(30),
+ CP,CT,CQ,CD,NFLAG
COMMON /TSC/ IDT,DT,DPLIM,DSLIM,DPMAX,DSMAX
COMMON /JACOB/ GC(50,50)
COMMON /SAT/ SOX(50),SG(50),SW(50)
COMMON /DENS/ ROOC(50),ROGC(50),ROWC(50)
COMMON /PROP1/ TEMPO,ITER,NX,NY,N,AUXX,AUXY,KM,EPI,NTP
COMMON /PROP2/ RAUX,PMAX,PMIN,CR,CW,POR,DZ,ROSCW,PROIND
COMMON /PROP3/ SONC(50),SGNC(50),SWNC(50),PNC(50,10),ZNC(50,10),
+ XNC(50,10),YNC(50,10),ROONC(50),ROGNC(50),ROWNC(50),ALFANC(50),FINC(50)

COMMON /PROP4/ KROC(50),KRGC(50),KRWC(50),VOX(50),VG(50),VISW,NK
COMMON /PROP5/ TMAX,TK,DTMAX,QOMIN,QOMAX,QOSC,QGSC
COMMON /PERM/ SSC(20),KKOWC(20),KKWC(20),KKGC(20),KKOGC(20),KROWI
COMMON /PW/ PWELL(50),DTN,CUMOIL,CUMGAS,GASINJ

```

```

F -> FUNCAO DA PRESSAO

```

```

C      G -> JACOBIANO
C      CALCULO DOS TERMOS DE FLUXO
C
      DO 300 I=1,NX
      DO 300 J=1,NY
      IJ=(I-1)*NY + J
      IF (I.NE.1) GOTO 20
      FCIJ) = 0.0d0
      GCIJ,IJ) = 0.0d0
      GOTO 40
20    AUX = PCI-1,J) - PCI,J)
      IF (AUX.LE.0.d0) GOTO 30
C
      FCIJ) = -AUX * TCIJ-NY) * AUXX
      GCIJ,IJ) = - TCIJ-NY) * AUXX
      GCIJ,IJ-NY) = TCIJ-NY) * AUXX
      GOTO 40
30    FCIJ) = -AUX * TCIJ) * AUXX
      GCIJ,IJ) = - TCIJ) * AUXX
      GCIJ,IJ-NY) = TCIJ) * AUXX
C
40    IF (I.EQ.NX) GOTO 60
      AUX = PCI+1,J) - PCI,J)
      IF (AUX.LE.0.) GOTO 50
      FCIJ) = FCIJ) - AUX * TCIJ+NY) * AUXX
      GCIJ,IJ) = GCIJ,IJ) - TCIJ+NY) * AUXX
      GCIJ,IJ+NY) = GCIJ,IJ+NY) + TCIJ+NY) * AUXX
      GOTO 60
50    FCIJ) = FCIJ) - AUX * TCIJ) * AUXX
      GCIJ,IJ) = GCIJ,IJ) - TCIJ) * AUXX
      GCIJ,IJ+NY) = GCIJ,IJ+NY) + TCIJ) * AUXX
C
60    IF (J.EQ.1) GOTO 80
      AUX = PCI,J-1) - PCI,J)
      IF (AUX.LE.0.d0) GOTO 70
      FCIJ) = FCIJ) - AUX * TCIJ-1) * AUXY
      GCIJ,IJ) = GCIJ,IJ) - TCIJ-1) * AUXY
      GCIJ,IJ-1) = GCIJ,IJ-1) + TCIJ-1) * AUXY
      GOTO 80
70    FCIJ) = FCIJ) - AUX * TCIJ) * AUXY
      GCIJ,IJ) = GCIJ,IJ) - TCIJ) * AUXY
      GCIJ,IJ-1) = GCIJ,IJ-1) + TCIJ) * AUXY
C
80    IF (J.EQ.NY) GOTO 100
      AUX = PCI,J+1) - PCI,J)
      IF (AUX.LE.0.d0) GOTO 90
      FCIJ) = FCIJ) - AUX * TCIJ+1) * AUXY
      GCIJ,IJ) = GCIJ,IJ) - TCIJ+1) * AUXY
      GCIJ,IJ+1) = GCIJ,IJ+1) + TCIJ+1) * AUXY
      GOTO 100
90    FCIJ) = FCIJ) - AUX * TCIJ) * AUXY
      GCIJ,IJ) = GCIJ,IJ) - TCIJ) * AUXY
      GCIJ,IJ+1) = GCIJ,IJ+1) + TCIJ) * AUXY
C
100  CONTINUE
C
C      CALCULO DE "F" E DAS DERIVADAS PARA O JACOBIANO
C      TERMOS DE FONTE E ACUMULACAO

```



```

SUBROUTINE THOMASCN,a,b,x
IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
DIMENSION x(50),aa(50),bb(50),cc(50),qq(50),gg(50)
+      ,b(50),a(50,50)
do 3 ij=1,n
aa(ij)=a(ij,ij)
if (ij.ne.n) bb(ij)=a(ij,ij+1)
if (ij.ne.1) cc(ij)=a(ij,ij-1)
3 continue
w1 = aa(1)
gg(1)=b(1)/w1
do 1 i=2,n
qq(i-1)=bb(i-1)/w1
w1=aa(i)-cc(i)*qq(i-1)
1 gg(i)=(b(i)-cc(i)*gg(i-1))/w1
x(n)=gg(n)
do 2 i=2,n
j=n-i+1
2 x(j)=gg(j)-qq(j)*x(j+1)
return
end

```

```

C
C ***** SUBROTINA GBAND *****
C SOLUCAO DE SISTEMA DE EQUACOES COM MATRIZ DE BANDA SEM
C PIVOTAMENTO - AZIZ & SETTARI - PAGINA 444
C

```

```

SUBROUTINE GBANDCA,D,X,N,M,EPS,IERR,IFRST
IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+      ROOI,ROGI,ROWI
DIMENSION AC(1),DC(1),X(1)
IERR = 0
J = 1
DO 10 I=1,N
IE = M
IF (I+M-N) 21,21,22
22 IE = N - I
21 IEAUX = M
IF (I-M) 23,23,24
23 IEAUX = I
24 IE1 = IE + IEAUX
MBIG = IE
J1 = J + IE1
J2 = J1
IF (IFRST.GT.0) GOTO 27
IF (DABS(C(J)) - EPS) 25,25,27
25 IERR = IERR + 1
27 IF (MBIG) 10,10,26
26 DO 30 JO=1,MBIG
S = AC(J1)/AC(J)
IF (IFRST.GT.0) GOTO 35
DO 30 LK=1,MBIG
JK = J1 + LK
JK = J + LK
30 AC(J1K) = AC(J1K) - AC(JK)*S
35 CONTINUE
IAUX = JO + I
DC(IAUX) = DC(IAUX) - DC(I)*S

```

```

      IE = M
      IFCIAUX+M-N) 31,31,32
32  IE = N - IAUX
31  IEAUX = M
      IFCIAUX-MD 33,33,34
33  IEAUX = IAUX
34  IE1 = IE + IEAUX
20  J1 = J1 + IE1
10  J = J2 + 1
      J = J - M - 1
      NP1 = N + 1
      DO 40 IINV=1,N
      I = NP1 - IINV
      IE = M
      IF (I+M-N) 41,41,42
42  IE = N - I
41  MBIG = IE
      XCID = DCID
      IF (MBIG) 44,44,43
43  DO 50 LK=1,MBIG
      IK = I+LK
      JK = J+LK
50  XCID = XCID - XCIK)*ACJK
44  XCID = XCID/ACJ
      IE = M
      IF (I+M-NP1) 51,51,52
52  IE = NP1 - I
51  IEAUX = M
      IFCI-1-MD 53,53,54
53  IEAUX = I - 1
54  IE1 = IE + IEAUX
      J = J - IE1 - 1
40  CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

C
C ***** SUBROTINA PEREL *****
C                   CALCULA PERMEABILIDADES RELATIVAS
C

```

```

SUBROUTINE PEREL(IJ)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+      ROOI,ROGI,ROWI
COMMON /SAT/ SOX(50),SG(50),SW(50)
COMMON /DENS/ ROOC(50),ROGC(50),ROWC(50)
COMMON /PROP3/ KROC(50),KRG(50),KRWC(50),VOC(50),VGC(50),VISW,NK
COMMON /PROP1/ SONC(50),SGNC(50),SWNC(50),PNC(50,10),ZNC(50,10),
+ XNC(50,10),YNC(50,10),ROONC(50),ROGNC(50),ROWNC(50),ALFANC(50),FINC(50)
COMMON /PERM/ SSC(20),KKOWC(20),KKWC(20),KKG(20),KkogC(20),KROWI
DO 100 IJ=1,N
  IF ((SOX(IJ).EQ.SONC(IJ)).AND.(SG(IJ).EQ.SGNC(IJ))) GOTO 100
  SH = 1.d0 - SW(IJ)
  SL = 1.d0 - SG(IJ)
  CALL INTERP(SS,KKOW,NK,SH,KROW)
  CALL INTERP(SS,KKW,NK,SW(IJ),KRWC(IJ))
  CALL INTERP(SS,KKG,NK,SG(IJ),KRG(IJ))
  CALL INTERP(SS,Kkog,NK,SL,KROG)

```

```

      KROCIJ) = (KROW + KRWCIJ) * (KRGCIJ) + KROG) / KROWI - KRWCIJ)
+      - KRGCIJ)
      IF (KROCIJ).LT.0.d0) KROCIJ) = 0.0d0
      IF (KROCIJ).LE.1.d0) GOTO 100
      AUXK = KROW
      CALL INTERPCSS,KKOW,NK,SOCIJ),KROW)
+      KROCIJ) = KROW + KROG - KROWI + SL * (KROWI - AUXK) *
      (KROWI - KROG) / KROWI
      IF (KROCIJ).GT.1.d0) KROCIJ) = 1.d0
100 CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

C
C ***** SUBROTINA INTERP *****
C INTERPOLACAO LINEAR
C
C X vetor independente
C Y vetores dependentes
C N numero maximo de valores de X
C XX argumento
C YY valores das funcoes interpoladas
C

```

```

      SUBROUTINE INTERP (X,Y,N,XX,YY)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
      REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+      ROOI,ROGI,ROWI
      DIMENSION X(20),Y(20)
      IF (XX.GT.X(N)) GOTO 98
      IF (XX.LT.X(1)) GOTO 99
      I=1
30 I=I+1
      IF (XX.GT.X(I)) GOTO 30
      YL = (Y(I)-Y(I-1))/(X(I)-X(I-1))
      YY = Y(I-1) + (XX-X(I-1)) * YL
      RETURN
98 YY=Y(N)
      RETURN
99 YY=Y(1)
      RETURN
      END

```

```

C
C ***** SUBROTINA CONVERTE *****
C CONVERCAO DE VARIAVEIS E UNIDADES DO GPASIM
C

```

```

      SUBROUTINE CONVERTE (X,Y,VISO,VISG,QUAL,DENSO,DENSG,CD,NCOMP)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
      REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+      ROOI,ROGI,ROWI
      COMMON/SAI/INTE12,REAL71,REAL72,REAL73,REAL74,REAL75,REAL76,
1      REAL77,REAL78,REAL79,I CONV,REALX(25),REALY(25)
      COMMON /MOL/ PM(10),PMO,PMW,PMG
      DIMENSION X(10),Y(10)
      VISO = DBLE(REAL74) * 0.001d0
      VISG = DBLE(REAL75) * 0.001d0
      QUAL = DBLE(REAL76)
      PMO = 0.0d0
      PMG = 0.0d0
      DO 10 I=1,NCOMP

```

```

        XCI) = DBLECREALXCI))
        YCI) = DBLECREALYCI))
        PMO = PMO + XCI) * PMCI)
10      PMG = PMG + YCI) * PMCI)
        IF (PMO.NE.0.0d0) GOTO 20
        DENSO = 0.0d0
        GOTO 30
20      DENSO = DBLECREAL78) * CD / PMO
        IF (PMG.NE.0.0d0) GOTO 30
        DENSG = 0.d0
        GOTO 40
30      DENSG = DBLECREAL79) * CD / PMG
40      CONTINUE
        RETURN
        END

```

```

C
C ***** SUBROTINA MATBAL *****
C                               BALANCO DE MATERIAIS
C

```

```

SUBROUTINE MATBAL
IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+      ROOI,ROGI,ROWI
COMMON /TMS/ TOC(50),TG(50),TWC(50),TC(50),PC(50,10),ALFAC(50),FIC(50),
+      TETA,VOL(50),DFIA,VC(50),DELTAP
COMMON /COMP/ ZC(50,10),YC(50,10),XC(50,10),NCOMP
COMMON /VAZ/ QWC(50),QHC(50),QMC(50,10),QOC(50),QG(50)
COMMON /TSC/ IDT,DT,DPLIM,DSLIM,DPMAX,DSMAX
COMMON /SAT/ SOC(50),SGC(50),SWC(50)
COMMON /DENS/ ROOC(50),ROGC(50),ROWC(50)
COMMON /PROPI/ SOI,SGI,SWI,PI,FII
COMMON /PROP1/ TEMPO,ITER,NX,NY,N,AUX,X,AUX,Y,KM,EPI,NTP
COMMON /PW/ PWELL(50),DTN,CUMOIL,CUMGAS,GASINJ
COMMON /PROP2/ SONC(50),SGNC(50),SWNC(50),PNC(50,10),ZNC(50,10),
+      XNC(50,10),YNC(50,10),ROONC(50),ROGNC(50),ROWNC(50),ALFANC(50),FINC(50)
COMMON /MOL/ PMC(10),PMO,PMW,PMG
COMMON /MATB/ ERROC(10),ERROW,ERROCC(10),ERROCW,ERTOT,VOLINI
ERROW = 0.d0
DO 10 M=1,NCOMP
10      ERROCMD = 0.d0
      DO 100 I=1,N
        ERROW = ERROW + VOL(I) * (FIC(I) * ROWC(I) * SWC(I) - FINC(I) *
+      ROWNC(I) * SWNC(I)) + QWC(I) * DT
        DO 50 M=1,NCOMP
          ERROCMD = ERROCMD + VOL(I) * (FIC(I) * (ROOC(I) * SOC(I) * XCI,M) +
+      ROGC(I) * SGC(I) * YCI,M) - FINC(I) * (ROONC(I) *
+      SONC(I) * XNCI,M + ROGNC(I) * SGNC(I) * YNCI,M)) +
+      QMCI,M * DT
50      CONTINUE
100     CONTINUE
        ERROW = ERROW / VOLINI
        ERROCW = ERROCW + ERROW
        DO 150 M = 1,NCOMP
          ERROCMD = ERROCMD / VOLINI
          ERROCCM = ERROCCM + ERROCMD
150     CONTINUE
        RETURN
        END

```

```

C
C ***** SUBROTINA VAZAO *****
C          CALCULO DOS TERMOS DE VAZAO E DERIVADAS
C

```

```

SUBROUTINE VAZAO (IJ,I,J,DOHD)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,O-Q,S-Z)
REAL*8 ROO,ROG,ROW,RAUX,RO,RWELL,ROSCW,ROON,ROGN,ROWN,ROOSC,ROGSC,
+   ROOI,ROGI,ROWI
CHARACTER*4 CHARA4(15)
CHARACTER*8 CHARA8(25)
COMMON/ENT/CHARA4,CHARA8,INTE01,INTE02,INTE03,INTE04(25),
1   INTE05,INTE06,INTE07,INTE08,INTE09,INTE10,INTE11(25),
2   REAL01(25),REAL02(25),REAL03(25),REAL04(25),REAL05(25),
3   REAL06(25),REAL07(25),REAL08(25),REAL09,REAL10,REAL11,
4   REAL12,REAL13,REAL14,REAL15,REAL16,REAL17(25)
COMMON/SAI/INTE12,REAL71,REAL72,REAL73,REAL74,REAL75,REAL76,
1   REAL77,REAL78,REAL79,ICONV,REALX(25),REALY(25)
COMMON /TMS/ TOC(50),TGC(50),TWC(50),TC(50),PC(50,10),ALFAC(50),FI(50),
+   TETA,VOLC(50),DFIA,VC(50),DELTAP
COMMON /COMP/ ZC(50,10),YC(50,10),XC(50,10),NCOMP
COMMON /VAZ/ QWC(50),QHC(50),QMC(50,10),QXC(50),QGC(50)
COMMON /PRT/ NDAY,ITEMAX,IPRINT,DX,DY,XL,YL,DAYPRT(30),
+   CP,CT,CQ,CD,NFLAG
COMMON /SAT/ SOC(50),SGC(50),SWC(50)
COMMON /DENS/ ROOC(50),ROGC(50),ROWC(50)
COMMON /PROP1/ TEMPO,ITER,NX,NY,N,AUXX,AUXY,KM,EPI,NTP
COMMON /PROP2/ RAUX,PMAX,PMIN,CR,CW,POR,DZ,ROSCW,PROIND
COMMON /PROP3/ KROC(50),KRC(50),KRWC(50),VOC(50),VGC(50),VISW,NK
COMMON /PROP4/ TMAX,TK,DTMAX,QOMIN,QOMAX,QOSC,QGSC
COMMON /PW/ PWELL(50),DTN,CUMOIL,CUMGAS,GASINJ
COMMON /PROPN/ SONC(50),SGNC(50),SWNC(50),PNC(50,10),ZNC(50,10),
+   XNC(50,10),YNC(50,10),ROONC(50),ROGNC(50),ROWNC(50),ALFANC(50),FINC(50)
COMMON /PERM/ SSC(20),KKOWC(20),KKWC(20),KKGC(20),KKOGC(20),KROWI
COMMON /MOL/ PMC(10),PMO,PMW,PMG
DIMENSION XSC(10),YSC(10)

```

```

ROGAUX = REAL09
REAL09 = 60.0
R12AUX = REAL12
REAL12 = 14.7
IF (KROC(IJ).EQ.0.0D0) THEN
  FO = 0.0D0
ELSE
  FO = 1.0D0 / (1.0D0 + ROG(IJ) * KRGC(IJ) * VOC(IJ) / ROOC(IJ) /
    KROC(IJ) / VGC(IJ) )
ENDIF

```

```

DO 10 M = 1,NCOMP
10 REAL17(M) = SNGLC(XNC(IJ),M)*FO + SNGLC(YNC(IJ),M)*(1.0D0 - FO)
PMOAUX = PMO
PMGAUX = PMG

```

```

CALL GPASIM
CALL CONVERTE (XSC,YSC,VI50,VISG,QUAL,ROOSC,ROGSC,CD,NCOMP)
IF (QUAL.EQ.0.0) GOTO 12
VN = 1.d0 / ((1.d0 - QUAL)/QUAL * PMG / PMO + 1.d0)
GOTO 14
12 VN = 0.0d0
14 QH(IJ) = 0.0d0

```



```

IF (PCI,J).GT.PMIN) GOTO 18
WRITE(*,16)
16  FORMAT(' PRESSAO MINIMA ATINGIDA')
STOP

18  IF (PCI,J).GE.PMAX) GOTO 30
    OMOL = ROOSC * QOCIJ)
    IF (VN.EQ.1.d0) THEN
      GMOL = 0.0d0
    ELSE
      GMOL = VN * OMOL / (1.d0- VN)
    ENDIF
    DO 20 M=1, NCOMP
      QMCIJ,M) = REAL17CM) * (OMOL + GMOL)
      QHCIJ) = QHCIJ) + QMCIJ,M)
20  CONTINUE
    DQH = 0.0d0
    QOSC = QOCIJ) / CQ
    GOTO 50

30  PWELL(IJ) = PMAX

34  KROAUX = KROCIJ)
    KRG AUX = KRGCIJ)
    KRWAUX = KRWC IJ)
    SOCIJ) = 2* SOCIJ) - SONCIJ)
    SGC IJ) = 2* SGC IJ) - SGNCIJ)
    SWCIJ) = 2* SWCIJ) - SWNCIJ)
    CALL PEREL(IJ)
    KROCIJ) = 0.5d0 * (KROAUX + KROCIJ))
    KRGCIJ) = 0.5d0 * (KRG AUX + KRGCIJ))
    KRWC IJ) = 0.5d0 * (KRWAUX + KRWC IJ))

C
DO 40 M=1, NCOMP
  IF (VOCIJ).EQ.0.0D0) THEN
    QMCIJ,M) = PROIND * KRGCIJ) * ROGC IJ) / VGC IJ) * YNCIJ,M) *
+      (PWELL(IJ) - PCI,J))
  ELSE
    QMCIJ,M) = PROIND * (KROCIJ) * ROOCIJ) / VOCIJ) * XNCIJ,M) +
+      KRGCIJ) * ROGC IJ) / VGC IJ) * YNCIJ,M)) * (PWELL(IJ) - PCI,J))
  ENDIF
  QHCIJ) = QHCIJ) + QMCIJ,M)
40  CONTINUE

    OMOL = QHCIJ) * (1.0D0-VN)
    GMOL = QHCIJ) * VN

    IF (VN.EQ.1.0D0) THEN
      QOSC = 0.0D0
      DQH = - PROIND * (KRGCIJ) * ROGC IJ) / VGC IJ))
    ELSE
      QOSC = OMOL / ROOSC / 1.84013E-06
      DQH = - PROIND * (KROCIJ) * ROOCIJ) / VOCIJ) + KRGCIJ) *
+      ROGC IJ) / VGC IJ))
    ENDIF
    KROCIJ) = KROAUX
    KRGCIJ) = KRG AUX
    KRWC IJ) = KRWAUX

```

SOCIJ) = (SOXIJ) + SON(IJ)) * 0.5d0
Sg(IJ) = (Sg(IJ) + SgN(IJ)) * 0.5d0
Sw(IJ) = (Sw(IJ) + SwN(IJ)) * 0.5d0

50 QGSC = GMOL / ROGSC / 3.277413E-04
PMO = PMOAX
PMG = PMGAX
REAL09 = RO9AUX
REAL12 = R12AUX
RETURN
END

C
C ***** FIM DO PROGRAMA *****
C

ANEXO C

 ***** ARQUIVO DE DADOS DO PROGRAMA TESE *****

XL > 76.196d0< (m) COMPRIMENTO
 YL > 30.479d0< (m) LARGURA
 DZ > 15.239d0< (m) PROFUNDIDADE
 POR > .3d0 < PPOROSIDADE
 PI > 2000.d0 < (psia) PRESSAO INICIAL
 SOI > .8d0 < SATURACAO INICIAL DE OLEO
 SGI > .0d0 < SATURACAO INICIAL DE GAS
 SWI > .2d0 < SATURACAO INICIAL DE AGUA
 KX > 200.d0 < (md) PERMEABILIDADE - DIRECAO X
 KY > 200.d0 < (md) PERMEABILIDADE - DIRECAO Y
 CR > .000004d0< (1/psi) COMPRESSIBILIDADE DA ROCHA
 CW > .000003d0< (1/psi) COMPRESSIBILIDADE DA AGUA
 RWELL > 0.1d0 < (m) RAI0 DO POCO
 PMAX > 5000.d0 < (psia) PRESSAO MAXIMA
 PMIN > 1000.d0 < (psia) PRESSAO MINIMA
 QOMAX > 1000.d0 < (STB/D) VAZAO MAXIMA
 QOMIN > 100.d0 < (STB/D) VAZAO MINIMA
 DPLIM > 100.d0 < (psia) MAXIMA VARIACAO DE PRESSAO
 DSLIM > 0.1d0 < MAXIMA VARIACAO DE SATURACAO
 DTMAX > 3.d0 < (dias) INTERVALO DE TEMPO MAXIMO
 TMAX > 210.d0 < (dias) TEMPO FINAL
 DT > 3.00d0 < (dias) INTERVALO DE TEMPO
 TEMPERATURA > 160.d0 < (oF) mudar tambem entrada do GPASIM
 EPI > 0.00100d0< TOLERANCIA
 EPI2 > 0.00100d0< TOLERANCIA
 SWC > .2d0 < SATURACAO DE AGUA IRREDUTIVEL
 ROSCW > 1000.d0 < (Kg/m3) DENSIDADE DA AGUA - CONDIC0ES PADRAO
 DELTAP > 10.00d0< (psia) PARA CALCULO DAS DERIVADAS NUMERICAS
 PMW > 18.d0 < PESO MOLECULAR DA AGUA
 VISW > .41d0 < (cp) VISCOSIDADE DA AGUA
 RE > 300.0d0 < (m) RAI0 EXTERNO DO RESERVATORIO
 PR. INDEX > 4.810D-09< INDICE DE PRODUTIVIDADE
 DAMP > 1.0 < FATOR DE AMORTECIMENTO

 NX > 20<
 NY > 01<
 ITEMAX > 15< NUMERO MAXIMO DE ITERACOES
 NPRO > 1 < NUMERO DE POCOS - PRODUCAO
 NINJ > 1 < NUMERO DE POCOS - INJECAO
 NFLAG > 1 < IMPRIME A CADA NFLAG INTERVAL0S DE TEMPO
 NDAY > 10< NUMERO DE VEZES A IMPRIMIR
 NK > 17< NUMERO DE LEITURAS - PERMEABILIDADES
 NCOMP > 3< NUMERO DE COMPONENTES
 MODELO > 1< 0 -> RADIAL 1-> CARTESIANO
 NTP > 0< 0 -> 2-POINT UPSTREAM 1 -> 1-POINT UPSTREAM

 I J QW ***** INJECAO *****
 <> 1<> 1<>
 <> 0.d0 <>
 <> .915332D0<> Q1
 <> .228833D0<> Q2
 <> .000000D0<> Q3

 I J QO ***** PRODUCAO *****
 <> 1<> 1<> -78.d0 <> (STB/D)

 Z(I) P MOL. INTE11
 <> .2d0 <> 16.043d0<> 02<> METANO
 <> .2d0 <> 58.124d0<> 05<> ISO BUTANO
 <> .8d0 <> 142.286d0<> 14<> N DECANO

LEITURA DO VETOR DE IMPRESSAO

<> 365.d0 <>
 <> 730.d0 <>
 <> 1095.d0 <>
 <> 1460.d0 <>
 <> 1825.d0 <>
 <> 2190.d0 <>
 <> 2555.d0 <>
 <> 2920.d0 <>
 <> 3285.d0 <>
 <> 3650.d0 <>

SAT	KORWCSO	KRWC(SW)	KRGCSG)	KROGCSL)
<> -0.1d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>
<> .15d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>
<> .20d0 <>	<> .02d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>
<> .25d0 <>	<> .04d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>	<> .0d0 <>
<> .28d0 <>	<> .052d0 <>	<> .0d0 <>	<> .006d0 <>	<> .0d0 <>
<> .30d0 <>	<> .06d0 <>	<> .003d0 <>	<> .01d0 <>	<> .0d0 <>
<> .40d0 <>	<> .11d0 <>	<> .02d0 <>	<> .03d0 <>	<> .0d0 <>
<> .50d0 <>	<> .20d0 <>	<> .08d0 <>	<> .08d0 <>	<> .0d0 <>
<> .52d0 <>	<> .28d0 <>	<> .092d0 <>	<> .104d0 <>	<> .0d0 <>
<> .60d0 <>	<> .35d0 <>	<> .14d0 <>	<> .20d0 <>	<> .03d0 <>
<> .65d0 <>	<> .40d0 <>	<> .18d0 <>	<> .30d0 <>	<> .045d0 <>
<> .70d0 <>	<> .56d0 <>	<> .22d0 <>	<> .40d0 <>	<> .12d0 <>
<> .72d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> .242d0 <>	<> .44d0 <>	<> .16d0 <>
<> .80d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> .33d0 <>	<> .60d0 <>	<> .31d0 <>
<> .90d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> .53d0 <>	<> .80d0 <>	<> .60d0 <>
<> 1.00d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> 1.00d0 <>
<> 1.10d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> 1.00d0 <>	<> 1.00d0 <>

ENTRADAS GPASIM

INTE01 > 1 < eq. de estado --> 1- PR 2- SRK
 INTE02 > 1 < calculo das propriedades
 INTE03 > 0 < numero de comp. hipoteticos
 INTE05 > 3 < numero total de componentes
 INTE06 > 05< opcao de calculo
 INTE07 > 3 < opcao de relatorio de saida
 INTE08 > 1 < unidades de entrada (1-mol/h 2-lbs/h 3-bbl/h)
 INTE09 > 1 < origem de calculo
 INTE10 > 1 < origem de entalpia e entropia
 REAL09 > 160. < temperatura inicial
 REAL10 > 0. < temperatura final
 REAL11 > 0. < incremento de temperatura
 REAL12 > 4800. < pressao inicial - "mudar pi"
 REAL13 > 0. < pressao final
 REAL14 > 0. < incremento de pressao
 REAL15 > 1. < fracao L/F

BIBLIOGRAFIA

- [ABR80] Au, A.D.K., Behie, A., Rubin, B. and Vinsome, P.K.W., "Techniques for Fully Implicit Reservoir Simulation", SPE 9302, Setembro, 1980
- [ABW60] Amyx, J. W., Bass, D.M. and Whiting, R.L., "Petroleum Reservoir Engineering", McGraw Hill, 1960.
- [ADF82] Acs, G., Dollschall, S. and Farkas, E., "General Purpose Compositional Model", SPE 10515, 1982.
- [AS79] Aziz, K. and Settari, A. "Petroleum Reservoir Simulation", Applied Science Publishers Ltd., London, 1979.
- [Bur79] Burcik, E. J., "Properties of Petroleum Reservoir Fluids", John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [Coa76] Coats, K.H., "Simulation of Steamflooding with Distillation and Solution Gas", SPE 5015, Outubro 1976.
- [Coa78] Coats, K.H., "A Highly Implicit Steamflood Model", SPE Journal, 369, Outubro 1978.
- [Coa80] Coats, K.H., "An Equation of State Compositional Model", SPEJ, 363-376, Outubro 1980.
- [Coa82] Coats, K.H., "Reservoir Simulation : State of Art", JPT, 1633-1642, Agosto 1982.
- [Coa85] Coats, K.H., "Simulation of Gas Condensate

Reservoir Performance", SPEJ, 1870-1886, 1985.

- [CJR74] Cook, R.E., Jacoby, R.H. and Ramesh, A.B., "A Beta-Type Reservoir Simulator for Approximating Compositional Effects During Gas Injection", SPEJ, vol.14, pp 471-481, 1974.
- [Cri77] Crichlow, H.B., "Modern Reservoir Engineering : A Simulation Approach", Prentice Hall, New Jersey, 1977.
- [FF79] Fussel, L.T. and Fussel, D.D., "An Iterative Technique for Compositional Models", SPEJ, 211-220, Agosto 1979.
- [Fra86] Franchi, J.R., "Boast-DCR : Black Oil and Condensate Simulation on an IBM-PC", SPE 15297, 1986.
- [FY78] Fussel, D.D. and Yanosik, J.L., "An iterative Sequence for Phase Equilibrium Calculations Incorporating the Redlich-Kwong EOS", SPEJ, 173-182, Junho 1978.
- [Hel81] Helfferich, F.G., "Theory of Multicomponent, Multiphase Displacement in Porous Media", SPEJ, 51-62, Fevereiro 1981.
- [Hua85] Huan, G.R., "A Flash Black Oil Model", SPE 15297, 1985.
- [Jon85] Jones, J.R., "Computation Analysis of Single Well Responses for Gas Condensate Systems", The University of Tulsa, 1985.

- [JR88] Jones, J.R. e Raghavan R., "Interpretation of Flowing Well Response in Gas-Condensate Wells", SPE Formation Evaluation, 578-594,, Setembro 1988.
- [JR89] Jones, J.R. e Raghavan R., "Interpretation of Buildup Gas-Condensate Wells", SPE Formation Evaluation, 93-104, Março 1989.
- [JST58] Jossi, J.A., Stiel L.I., and Thodos G., "The Viscosity of Pure Substances in the Dense Gaseous and Liquid Phases", A.I.C.H.F. Journal, vol.8, nº 1, pag 59-62, 1958.
- [KB83] Kenyon, O.E. and Behie, A., "Third SPE Comparative Solution Project : Gas Cycling of Retrograde Condensate Reservoirs", SPE 12278, 1983.
- [Ken83] Kendall, R.P. et al, "Development of a Multiple Application Reservoir Simulator for Use on a Vector Computer", SPE 11483, 1983.
- [Kum87] Kumar, S., "Gas Production Engineering", Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 1987.
- [KVS78] Kazemi, H., Vestal, C.R. and Shank, G.D., "An Efficient Multicomponent Numerical Simulation", SPEJ, 355-368 ,Outubro 1978.
- [LY85] Lo, T.S. and Youngren G.K., "A New Approach to Limited Compositional Simulation : Direct Solution of the Phase Equilibrium Equations", SPE 13518, 1985.
- [Man82] Mansoori, J., "Discussion of Compositional Modeling

- with an Equation of State", SPE Journal, 202-203, Abril 1982.
- [Mc73] McCain, W.D., Jr., "The Properties of Petroleum Fluids", Pen Well, 1973.
- [NAL83] Nghiem, L.X., Aziz, K. and Li Y.K., "A Robust Iterative Method for Flash Calculations Using the SRK or the PR Equation of State", SPEJ, 521-530, Junho 1983.
- [NFA81] Nghiem, L.X., Fong, D.K. and Aziz, K., "Compositional Modelig with an Equation of State", SPEJ, 687-698, Dezembro 1981.
- [Ngh82] Nghiem, L.X., "Author's Reply to Discussion of Compositional Modeling with an Equation of State", SPE Journal, 204, Abril 1982.
- [NWFA85] Nutakki R., Wong T., Firoozabadi A., Aziz K., "Development of General Purpose Simulators", Stanford University, Stanford, California, Julho 1985.
- [Ode81] Odeh, A.S., "Comparison of Solution to a Three-Dimensional Black-Oil Reservoir Simulation Problem", JPT, pp 13-25, Janeiro 1981.
- [Pea77] Peaceman, D.W., "Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation", Elsevier Scientific Publishing Co., New York, 1977.
- [Ped84] Pedrosa, Jr. O. A., "Use of Hybrid Grid in Reservoir Simulation", Stanford University, Stanford, California, Dezembro 1984.
- [PFTV86] Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S. A.,

- Vetterling, W.T., "Numerical Recipes", Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [Sta81] Standing, M.B., "Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems", Millet the Printer Inc., Dallas, 1981.
- [SV86] Shank, G.D and Vestal, C.R., "Practical Technics in Two-Pseudo Component Black-Oil Simulation", SPE 15156, 1986.
- [TLS83] Thele, K.J., Lake, L.W., Sepehrnoori K., "A Comparation of the Three Equation-of-State Compositional Simulator", In Seventh SPE Symposium on Reservoir Simulation, San Francisco, n° 12245, Novembro 1983.
- [Wat86] Watts, J.W., "A Compositional Formulation of the Pressure and Saturation Equations", SPEJ, 243-252, Maio 1986.
- [Won88] Wong, T.W., "Compositional and Black Oil Modelling with Emphasis on the Volume Balance Method", Stanford University, Stanford, California, Fevereiro 1988.
- [YS83] Young, L.C. and Stephenson, R.E., "A Generalized Compositional Approach for Reservoir Simulation", SPE Journal 727-742, Outubro 1983.