

CÁLCULO DAS ENERGIAS DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO ATRAVÉS
DO PÓS-PROCESSAMENTO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO

Rafael Jesus de Moraes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Alvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho, D.Sc.

Dr. Régis Krueel Romeu, Ph.D.

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Prof. Denis José Schiozer, Ph.D.

Dr. Marcos André Duarte Martins, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
ABRIL DE 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MORAES, RAFAEL JESUS DE

Cálculo das energias de reservatórios de
petróleo através do pós-processamento numérico
de simulação de escoamento [Rio de Janeiro]

Xvii, 222 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc.,
Engenharia Civil, 2008)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Avaliação Energética de Reservatórios
2. Pós-processamento numérico
3. Simulação de Reservatórios
4. Termodinâmica aplicada

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

À minha esposa Thays.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. orientador, *Alvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho*, por ter me acompanhado por todas as diferentes etapas de realização desse trabalho, por ter compreendido, me apoiado e incentivado durante todas as fases desse caminho. Pela confiança em mim depositada. Pela sua disponibilidade e prontidão em me atender e sanar de forma precisa as minhas dúvidas.

Ao orientador, colega de trabalho e amigo *Regis Kruehl Romeu*, pela oportunidade de participar do projeto de pesquisa que originou essa dissertação, pelas discussões sempre elucidativas sobre o tema e pela transmissão de conhecimento. Pelos conselhos que ajudaram a facilitar a caminhada.

À colega de trabalho e amiga *Flavia Pacheco*, pela sua valiosa contribuição na realização desta pesquisa e pelo inestimável apoio durante o curso de Formação da Petrobras, sempre me tranquilizando.

Aos colegas de trabalho e amigos *Diego Oliveira* e *José Roberto Rodrigues*, pelo conhecimento importante para o desenvolvimento desse trabalho que pude absorver participando no desenvolvimento de projetos de pesquisa e incentivo durante todas as fases do Mestrado.

Aos colegas de sala *Emilio Coutinho*, pelo companheirismo, apoio e prontidão em me ajudar em questões referentes a esse trabalho e *Alexandre Emerick*, pelo posicionamento crítico ao discutir as implicações desse trabalho e apoio.

Ao gerente da Simulação de Reservatório, *Mauro Becker*, pela oportunidade concedida a mim de trabalhar dedicadamente a este trabalho na sua etapa final, criando possibilidade à conclusão desse. À Petrobras pelo investimento e disponibilização de recursos para o desenvolvimento dessa dissertação.

Aos colegas da Área de Simulação da Geoengenharia de Reservatórios do CENPES pelo apoio e interesse no desenvolvimento desse trabalho.

Ao *Marcos Damiani*, *Clovis Maliska Jr.* e *Rodrigo Luciannetti*, integrantes da empresa ESSS, empresa que trabalhei quando iniciei o Mestrado, pela experiência que pude obter durante o período que lá estive. E aos também integrantes da ESSS *Vinicius Pessoa* e *Diana Albani Siqueira*, pelo apoio na utilização das ferramentas da empresa utilizadas nesse trabalho e em especial ao amigo *Igor Tibes Ghisi*, companheiro de todas as horas, sempre disposto a ajudar, seja no aspecto profissional ou pessoal. Sua competência foi essencial em aspectos importantes dessa dissertação.

Aos meus familiares, pelo apoio, interesse pelo meu trabalho e principalmente por compreender esse período de ausência.

À minha esposa *Thays*, por sempre me passar alegria e reanimar a minha confiança para a conclusão desse trabalho. E também por compreender meus períodos de ausência.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

CÁLCULO DAS ENERGIAS DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO ATRAVÉS DO PÓS-PROCESSAMENTO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO DE FLUXO

Rafael Jesus de Moraes

Abril/2008

Orientadores: Alvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho

Regis Kruehl Romeu

Programa: Engenharia Civil

O conceito de energia, amplamente empregado em outros ramos da engenharia, é precariamente utilizado na Engenharia de Reservatórios de forma qualitativa, e pouco, ou quase nada, utilizado de forma quantitativa. Neste trabalho, desenvolve-se um modelo matemático de cálculo de energia e potência no contexto do escoamento isotérmico *black oil* em reservatórios de petróleo a partir das equações de escoamento multifásico. Porém a dedução das equações é desenvolvida de forma a demonstrar a possibilidade da aplicação da metodologia em outros contextos de escoamento. São discutidas as diferentes formas de interações energéticas presentes no reservatório à luz da Termodinâmica, através de uma revisão desses conceitos, e analogias com outros desenvolvimentos acerca do assunto são realizadas.

Uma especial atenção foi dedicada à implementação do modelo. Além das equações terem sido implementadas com técnicas modernas de programação, também foi desenvolvido um arcabouço de algoritmos e estruturas de dados com o intuito de disponibilizar ferramentas de modo a facilitar a integração de modelos a partir do pós-processamento de simulações numéricas de fluxo. Neste escopo, uma grande gama de métodos pode ser disponibilizada para o auxílio do estudo de reservatórios através da integração de modelos desenvolvidos separadamente.

Foram realizados testes simples a fim de validar tanto o modelo matemático quanto a implementação computacional. O conceito de energia foi aplicado no contexto de otimização dinâmica de vazões. Vantagens da metodologia são apresentadas, bem como sugestões de aplicação do modelo, mostrando seu potencial de utilização.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

ENERGY CALCULATION OF PETROLEUM RESERVOIRS THROUGH
NUMERICAL POS-PROCESSING OF FLOW SIMULATION

Rafael Jesus de Moraes

March/2008

Advisors: Alvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho

Régis Krueel Romeu

Department: Civil Engineering

The energy concept, widely used in other engineering areas, is precariously used in Reservoir Engineering in the qualitative way, and little, or almost nothing, used in the quantitative way. In this work, a mathematical model to calculate energy and power in the context of isothermal *black oil* flow in petroleum reservoirs from the multiphase flow equations is developed. However, the deduction of the equations are developed in such manner that shows the possibility of applying the methodology in other flow scenarios. It is discussed the different forms of energy interactions at the reservoir under the thermodynamics concepts, through a revision of its principles and analogies with other developments around the subject are made.

Special attention was given to the implementation of the model. The equations have been implemented with modern programming techniques, and besides this, it was also developed a set of algorithms and data structures with the purpose to make available a set of tools that facilitate the coupling of models from numerical flow simulations post-processing. In this scope, a large variety of methods can be made available to help the reservoirs studies through coupling of models developed separately.

Simple tests were performed to validate both the mathematical model and computational implementation. The energy concept was applied in dynamic optimization of production scheduling context. Advantages of the methodology are presented, as well as application suggestions of the model, showing the potentiality of using the model.

LISTA DE SÍMBOLOS

Unidades Básicas

Símbolo	Quantidade básica
M	Massa
L	Comprimento
t	Tempo

Subescritos

Símbolo	Definição
α	Fase não molhante
dg	Referente ao gás dissolvido (gás na fase óleo)
esc	Referente à escoamento
φ	Referente à energia de expansão de rocha
fg	Referente ao gás livre (gás na fase gás)
ψ	Fase molhante
Γ	Referente à energia de fronteira
g	Referente à fase gás
G	Referente à força gravitacional
i	Fase do escoamento
inj	Referente à injeção
k	Referente à energia cinética
μ	Referente à energia dissipada pela viscosidade
o	Referente à fase óleo
p	Referente à energia potencial
$prod$	Referente à produção
ref	Referência
ρ	Referente ao fluido
ρ	Referente à energia de expansão de fluido

RC	Condições de reservatório
STC	Condições de superfície
w	Referente à fase água

Superescritos

Símbolo	Definição
.	Derivada no tempo, variação no tempo

Letras Romanas

Símbolo	Definição	Unidade
A	Área	L^2
b	Byte	
c	Compressibilidade	$M^{-1}L^1t^2$
D	Diâmetro	L
B	Fator volume de formação	
$DATUM$	Profundidade de referência	L
e	Energia específica	L^2t^{-2}
E_f	Vetor de fluxo de energia	Mt^{-3}
E	Energia	ML^2t^{-2}
f	Função de ponderação	$ML^{-1}t^{-2}$
F	Força	MLt^{-2}
$F.O.$	Função objetivo	
Fr	Fração recuperada	
g	Magnitude da aceleração gravitacional	LT^{-2}
h	Perda de carga	L
h	Entalpia específica	L^2t^{-2}
H	Entalpia	ML^2t^{-2}
k	Componente do tensor permeabilidade	L^2
K	Tensor permeabilidade absoluta	L^2
k_r	Permeabilidade relativa	L^2
l, L	Distância	L

m	Massa	M
N	Propriedade extensiva	
$\mathbf{n}$	Vetor normal unitário	
n	Número total de fases do modelo	
p	Pressão	$ML^{-1}t^{-2}$
P	Potência	ML^2t^{-3}
Q	Calor	ML^2t^{-2}
Q	Volume produzido ou injetado	L^3
$\tilde{q}$	Vazão mássica	M^3t^{-1}
q	Vazão volumétrica	L^3t^{-1}
R_s	Razão de solubilidade	
S	Saturação	
S_{or}	Saturação de óleo residual	
S_{wi}	Saturação de água irreduzível	
$\mathbf{T}$	Tensor transmissibilidade	L^2
t	Tempo	t
$\mathbf{u}$	Velocidade do escoamento ou superficial	Lt^{-1}
u	Energia interna específica	L^2t^{-2}
U	Energia interna	ML^2t^{-2}
$u.m.$	Unidade monetária	
V	Volume	L^3
$\mathbf{v}$	Velocidade intersticial do escoamento	Lt^{-1}
v	Volume específico	L^3M^{-1}
$\mathbf{x}$	Vetor posição	L
W	Trabalho	ML^2t^{-2}
z	Distância vertical	L

Letras Gregas

Símbolo	Definição	
δ	Diferencial	
Δ	Variação	
φ	Porosidade	
Φ	Potencial	$ML^{-1}t^{-2}$
Γ	Fronteira do domínio de solução	L^2
ρ	Massa específica	ML^{-3}
μ	Viscosidade	$ML^{-1}t^{-1}$
Ω	Domínio de solução	L^3
σ	Tensor tensão	$ML^{-1}t^{-2}$
η	Eficiência energética	
η	Propriedade extensiva	
∇	Operador gradiente	L^{-1}
$\nabla \cdot$	Operador divergente	L^{-1}

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	Introdução	1
1.1	Contextualização	2
1.2	Motivação e Considerações Gerais	4
1.3	Objetivos e Contribuições Presentes no Trabalho	6
1.4	Organização do texto	8
CAPÍTULO 2	Revisão Bibliográfica.....	11
2.1	Estado da Arte	12
2.2	Conceitos Básicos de Termodinâmica.....	17
2.2.1	Energia, Calor e Trabalho.....	17
2.2.2	Sistemas Termodinâmicos.....	19
2.2.3	Formas de energia e de transferência de energia.....	20
2.2.4	A Primeira Lei da Termodinâmica: O Princípio da Conservação da Energia	27
2.3	Mecanismos de Produção de Hidrocarbonetos em Reservatórios de Petróleo.....	32
2.3.1	Mecanismos de Recuperação Primária.....	33
2.3.2	Métodos de Recuperação Suplementar: Convencionais e Especiais.....	35
2.4	Previsão do Comportamento de Reservatórios de Petróleo.....	38
2.4.1	Método do Balanço de Materiais.....	38
2.4.2	Simulação de Reservatórios.....	40
2.4.3	Otimização Dinâmica da Estratégia de Exploração de Reservatórios de Petróleo	54
2.4.4	Pós-Processamento de Dados para Análise	56
CAPÍTULO 3	Modelagem Matemática.....	60
3.1	Considerações Iniciais	61
3.1.1	Aspectos Termodinâmicos	61
3.1.2	Aspectos Matemáticos.....	66
3.2	Cálculo do Trabalho e Energia em Reservatório de Petróleo.....	69
3.2.1	Energia Dissipada pela Viscosidade.....	72
3.2.2	Trabalho sobre a Fronteira.....	73
3.2.3	Energia de Expansão de Rocha e Fluidos.....	74
3.2.4	Trabalho dos Poços.....	78
3.2.5	Eficiência Energética.....	80
3.3	Associação das Parcelas Energéticas com os Mecanismos de Produção e Comparação do Balanço Energético com o Balanço de Materiais.....	81
3.4	Esquema de cálculo discreto das Parcelas Energéticas	84
3.4.1	Energia Dissipada pela Viscosidade.....	85
3.4.2	Trabalho sobre a Fronteira.....	88
3.4.3	Energia de Expansão de Rocha e Fluidos.....	88
3.4.4	Trabalho dos Poços.....	89
CAPÍTULO 4	Modelagem Computacional.....	91
4.1	Considerações Iniciais	92
4.2	Pós-Processamento de Simulação de Fluxo	94

4.3	Técnicas Computacionais	100
4.3.1	Programação multi-paradigma e multi-linguagem	100
4.3.2	Interpretação de Saídas de Simuladores de Fluxo	103
4.3.3	Tecnologias e ferramentas de base	106
4.4	Arcabouço para Pós-Processamento de Simulações	108
4.4.1	Algoritmos e Estruturas de Dados	111
4.5	Implementação do Cálculo das Energias	115
4.6	Otimização do Desempenho Computacional	120
CAPÍTULO 5	Resultados e Discussões.....	123
5.1	Validação do Modelo	124
5.1.1	Fluxo monofásico, Linear, Regime Permanente	124
5.1.2	Fluxo Monofásico, Linear, Regime Permanente, Influxo de Aquífero	128
5.1.3	Fluxo Monofásico, Linear, Regime Transiente	130
5.1.4	Fluxo Bifásico, Unidimensional, Rocha e Fluidos Incompressíveis, Regime Transiente.....	138
5.1.5	Fluxo Bifásico, Bidimensional, Regime Permanente.....	141
CAPÍTULO 6	Aplicações.....	143
6.1	Otimização da Exploração de Reservatórios	144
6.2	Otimização Dinâmica da Estratégia de Exploração Através da Alocação das Vazões de Produção	154
CAPÍTULO 7	Conclusões e Trabalhos Futuros	160
7.1	Conclusões.....	161
7.2	Trabalhos Futuros	164
	Referências Bibliográficas	169
APÊNDICE A	Configuração dos Arquivos de Dados dos Simuladores de Fluxo ECLIPSE e IMEX.....	177
APÊNDICE B	Dicionário de Propriedades Calculadas Pela Simulação de Energia	186
APÊNDICE C	Algoritmos para Cálculo de Propriedades para Pós-processamento	189
APÊNDICE D	Classes-base do Módulo de Pós-Processamento	196
APÊNDICE E	Acoplamento de Modelos a Simuladores de Fluxo	200
APÊNDICE F	Sistemas de Discretização do Domínio, Malhas Computacionais e a Biblioteca Petrolib.....	209
APÊNDICE G	Comparação dos Resultados dos Simuladores para Aplicação no Problema de Alocação Dinâmica de Vazões.....	218

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Expansão de fluido em sistema êmbolo/pistão (a) e o diagrama pV do processo (b).	18
Figura 2.2 – Representação esquemática do (a) trabalho de escoamento e (b) equilíbrio de forças no pistão imaginário (adaptado de ÇENGEL <i>et al.</i> [12])	24
Figura 2.3 – Representação das malhas nos simuladores de escoamento: a cada célula é associado um nó, e nós vizinhos são comunicados por conexões internodais (adaptado de ROMEU [53]).	51
Figura 2.4 - Fluxograma convencional de um simulador de fluxo.....	53
Figura 3.1 – Volume de controle compreendendo todos os componentes do sistema. ..	62
Figura 3.2 – Representação esquemática de um reservatório e sugestão de volume de controle.	63
Figura 3.3 – Volume de controle contornando os poços.	64
Figura 3.4 – Domínio de solução adotado.	64
Figura 3.5 – Expansão de poro em função do aumento da pressão (a). Gráfico do processo (b).	78
Figura 3.6 – Exemplo de “gráfico de energia”, baseado no balanço de materiais, descrevendo a ação relativa de diferentes mecanismos de produção, ao longo do tempo, na exploração de um reservatório particular (reprodução da fig. 6.37 de COSENTINO [17]).	83
Figura 3.7 – Interações energéticas no volume de controle (célula de simulação).	84
Figura 3.8 – Células de simulação que são cruzadas por um poço. Apenas as completadas estão representadas com uma esfera vermelha.	85
Figura 3.9 - Caso de escoamento de geometria genérica resolvido por simulação numérica. A célula central da malha contém um poço. Os tubos e o disco representam, respectivamente, escoamento entre cada duas células vizinhas e escoamento radial dentro da célula com poço.	86
Figura 3.10 - Exemplo de sistema de escoamento radial.	87
Figura 4.1 – Extensão do simulador de fluxo para a integração de um modelo acessório.	96
Figura 4.2 – Fluxograma para integração de modelo através do pós-processamento da simulação de fluxo.....	97
Figura 4.3 – Vizinhança de uma célula de simulação em um esquema 7 pontos (a) e decomposição vetorial referente à célula.	105
Figura 4.4 – Representação de mapas vetoriais segundo convenção adotada. (a) Componente X, (b) componente Y e (c) componente Z.	105
Figura 4.5 – Relação com a frequência de impressão da solução e acurácia do método de pós-processamento. T é o operador de integração numérica.	110

Figura 4.6 – Diagrama UML dos principais componentes do módulo de pós-processamento.	112
Figura 4.7 – Interdependência das propriedades no cálculo da energia dissipativa.	115
Figura 4.8 – Interdependência das propriedades no cálculo da energia de expansão. .	117
Figura 4.9 – Interdependência de propriedades para o cálculo do trabalho de poço....	118
Figura 4.10 – Interdependência de propriedades para o cálculo do trabalho de fronteira.	118
Figura 4.11 – Otimização do desempenho do código – otimização da leitura de dado em arquivo.....	122
Figura 5.1 – Comparação entre a pressão simulada e a pressão analítica para o caso linear, regime permanente.	126
Figura 5.2 – Comparação entre a energia dissipada (após um dia de produção) obtida pela solução analítica e através do pós-processamento da simulação de fluxo....	127
Figura 5.3 – Gráfico de tendência da contribuição de cada parcela energética ao longo da produção.	130
Figura 5.4 – Comparação entre a pressão simulada (símbolos em X) e a pressão obtida a partir da solução analítica (linhas contínuas) para os instantes 30, 180 e 360 dias.	132
Figura 5.5 – Comparação entre a energia dissipada calculada a partir da simulação numérica (símbolos em X) e da obtida a partir da solução analítica (linhas contínuas) para os instantes 30, 180 e 360 dias.....	133
Figura 5.6 – Comparação entre a energia de expansão calculada a partir da simulação numérica (símbolos em X) e da obtida a partir da solução analítica (linhas contínuas) para os instantes 30, 180 e 360 dias.....	133
Figura 5.7 – Gráfico de comparação da energia de expansão de rocha para diferentes compressibilidades de rocha.....	134
Figura 5.8 – Comparação da pressão de fundo de poço (a), do trabalho realizado pelo poço produtor (b) e a energia dissipada no escoamento do fluido no reservatório (c) para diferentes compressibilidades de rocha.....	137
Figura 5.9 – Gráfico de energia para o caso monofásico, unidimensional, fluido e rocha compressíveis.	138
Figura 5.10 – Curvas de permeabilidade relativa água-óleo baseado em Corey com expoentes $m=1$ e $n=1$, $S_{or}=0.3$ e $S_{wi}=0.1$	139
Figura 5.11 – Gráfico de área mostrando a tendência de contribuição de cada parcela energética.....	140
Figura 5.12 – Gráfico de contribuição energética para o caso mais viscoso.....	141
Figura 5.13 – Malha 2D para simulação do modelo bifásico.....	142
Figura 6.1 – Malha de simulação com posição dos três poços e distribuição das permeabilidades.....	145
Figura 6.2 – Distribuição da saturação de água após 6 anos de produção para o caso ruim (a) e caso bom (b).	147

Figura 6.3 – Fração recuperada (vermelho) e corte de água (azul), para os casos “ruim” (com símbolos em “X”) e “bom” (linhas contínuas), em 15 anos.....	147
Figura 6.4 – Pressão de fundo para os poços I-1 (azul), P-1 (verde) e P-2 (vermelho), para os casos “ruim” (com símbolos em “X”) e “bom” (linhas contínuas), em 15 anos.....	148
Figura 6.5 – Potência no poço injetor (a) para o caso ruim e (b) para o caso bom.	149
Figura 6.6 – Eficiência energética acumulada para o caso bom (azul) e ruim (vermelho).	151
Figura 6.7 – Potência dissipada para o deslocamento do óleo (vermelho) e da água (azul) para o (a) caso ruim e (b) caso bom.	152
Figura 6.8 – Gráfico de vazão de óleo para o poço controlado P-1.	155
Figura 6.9 – Frente de avanço de água para o caso otimizado utilizando a eficiência energética (a) e utilizando o VPL (b).	156
Figura 6.10 – Produção acumulada dos poços produtores para os casos otimizados... ..	157
Figura 6.11 – Produção acumulada de óleo (Np) para o campo – casos otimizados. ..	157
Figura 6.12 – Corte de água para os poços P-1 (curvas em azul) e P-2 (curvas em vermelho) para o caso otimizado utilizando eficiência (linha contínua) e utilizando VPL (símbolos em X).....	158
Figura 6.13 – Evolução do ganho na função objetivo.	159
Figura A.1 – Interpolação da transmissibilidade – descontinuidade vertical.....	194
Figura A.2 – Fluxograma do simulador de fluxo com modelo totalmente acoplado. ..	201
Figura A.3 - Fluxograma do simulador de fluxo com um modelo acoplado iterativamente.	202
Figura A.4 – Fluxograma do simulador de fluxo com modelo acoplado explicitamente.	204
Figura A.5 – Fluxograma do acoplamento de modelo externamente ao simulador de fluxo.....	205
Figura A.6 – Acoplamento iterativo externo através da atualização do modelo e da reinicialização da simulação.....	206
Figura A.7 - Fluxograma para acoplamento (abordagem iterativa) externamente ao simulador de fluxo através da API.	207
Figura A.8 – Os sete tipos de malha utilizadas na discretização espacial na simulação de fluxo de reservatórios.	211
Figura A.9 – Estruturas típicas de reservatórios de petróleo (© ExxonMobil).....	212
Figura A.10 – Conectividades adicionais criadas em função de <i>pinch-outs</i>	213
Figura A.11 – Conectividade adicional gerada em função de uma falha geológica. ...	213
Figura A.12 – Conectividades adicionais associadas à utilização de refinamento local de malha.....	214
Figura A.13 – Ilustração do conceito de célula inativa.	215

Figura A.14 – Estrutura combinatória de representação de malha. Células (“C”), arestas (“a”) e vértices (“V”) de uma malha (a) e o correspondente grafo de incidências (b) (Gurtin [6]).	216
Figura A.15 – Requisitos de algoritmos de malha.	217
Figura A.16 – Comparação entre a vazão de óleo dos poços produtores P-1 (azul) e P-2 (vermelho) para a simulação em ECLIPSE (linha contínua) e IMEX (símbolos em X).	219
Figura A.17 - Comparação entre a pressão de fundo (BHP) dos poços produtores P-1 (azul) e P-2 (vermelho) para a simulação em ECLIPSE (linha contínua) e IMEX (símbolos em X).	219
Figura A.18 – Comparação entre a corte de água (WCT) dos poços produtores P-1 (azul) e P-2 (vermelho) para a simulação em ECLIPSE (linha contínua) e IMEX (símbolos em X).	220
Figura A.19 – Distribuição de pressão no reservatório no instante de irrupção da água na simulação IMEX (a), na simulação ECLIPSE (b) e o gráfico cruzado (c).	221
Figura A.20 - Distribuição de saturação de água no reservatório no instante de irrupção da água na simulação IMEX (a), na simulação ECLIPSE (b) e o gráfico cruzado (c).	222

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades e Variáveis Associadas a Nós e Conexões nas malhas de Simulação e Escoamento (ROMEUE [53]).	52
Tabela 4.1 – Pré-processamento necessário para o cálculo energético segundo o simulador utilizado.	119
Tabela 5.1 – Propriedades e dimensões da formação para o caso linear, monofásico, regime permanente.	125
Tabela 5.2 – Efeito da variação da permeabilidade nas parcelas energéticas após um ano de produção.	127
Tabela 5.3 – Efeito da variação da viscosidade nas parcelas energéticas após um ano de produção.	128
Tabela 5.4 – Parcelas energéticas e balanço energético para o caso linear, monofásico, permanente, trabalho de aquífero, após um quinze meses de produção.	129
Tabela 5.5 - Propriedades e dimensões da formação para o caso linear, monofásico, regime transiente.	132
Tabela 5.6 – Parcelas energéticas para o caso monofásico, linear, rocha compressível.	134
Tabela 5.7 – Tabela com parcelas energéticas para modelo com rocha e fluido compressíveis.	137
Tabela 5.8 – Propriedades e dimensões da formação para o caso bidimensional, monofásico, regime permanente.	139
Tabela 5.9 – Parcelas energéticas para o caso linear, escoamento bifásico.	140
Tabela 5.10 – Dimensões e propriedades para o modelo 2D, bifásico.	141
Tabela 5.11 – Resumo das parcelas energéticas.	142
Tabela 6.1 – Propriedades do modelo utilizado para a aplicação em otimização da produção.	145
Tabela 6.2 – Trabalho dos poços após 15 anos.	150
Tabela 6.3 – Energia dissipada pelas fases óleo e água e eficiência energética, após 15 anos.	150
Tabela 6.4 – Parâmetros da otimização.	154
Tabela 6.5 – Comparação entre os VPLs dos casos otimizados com <i>F.O.</i> de VPL e eficiência.	159
Tabela A.1 - Propriedades de malha.	186
Tabela A.2 - Propriedades de sumário.	187
Tabela A.3 – Localização das propriedades de sumário	188

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

“If I have seen further it is by standing on the shoulders of giants” – Isaac Newton

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O objetivo principal da Engenharia de Reservatórios é prever o desempenho do reservatório e indicar estratégias para aumentar sua recuperação final – é com base nessas previsões e nessas indicações que serão tomadas decisões sobre investimentos que chegam a vários bilhões de dólares para campos marítimos. Para esse propósito tão crítico, a simulação de reservatórios é hoje a ferramenta mais poderosa, largamente utilizada pelas grandes companhias. Comparada a ferramentas mais simplificadas (curvas de declínio, balanço de materiais e outras técnicas analíticas), permite um estudo mais detalhado do reservatório, oferecendo enorme flexibilidade, contemplando praticamente todo tipo de variação de parâmetros da rocha e do fluido no espaço e no tempo.

Por meio da simulação numérica do fluxo em reservatórios de petróleo, o engenheiro obtém uma grande quantidade de dados, como distribuições de pressão e saturações de fluidos ao longo do espaço e do tempo. De fato, quando se multiplica o número de variáveis de interesse (da ordem de dezenas) pelo número de células da malha de simulação (da ordem de 10^5) pelo número de intervalos de tempo para os quais esses resultados são gerados (da ordem de 10^2) pelo número de *bytes* para armazenar cada informação (4) chega-se ao tamanho dos arquivos de saída de uma simulação de reservatórios típica, da ordem de 1 Gb. Isso representa uma enorme quantidade de informação para ser analisada, tornando bastante árdua sua interpretação, sempre com muito risco de se negligenciar aspectos importantes dos resultados.

Técnicas e ferramentas computacionais básicas foram desenvolvidas para facilitar o acesso e a interpretação dessas informações. Já é tradicional o uso de curvas e mapas 2D ou 3D para visualização dos resultados através de imagens do modelo. Porém, isso não dispensa o adequado discernimento e conhecimento do problema para poder extrair conclusões relevantes desse verdadeiro mar de dados e informações.

Nesse contexto, é muito desejável um tipo de pós-processamento mais avançado, de mais alto nível, que simplifique a análise dos dados disponibilizando-os ou de uma forma mais direta e concisa ou gerando um novo conjunto de dados que agregue mais

informação útil, favorecendo o controle de qualidade dos resultados, sua interpretação mais profunda e, muito especialmente, a possibilidade de otimização das estratégias projetadas para o desenvolvimento do campo. Essas informações podem fornecer mais subsídio para o engenheiro, com benefícios para a produtividade e qualidade dos seus estudos.

1.2 MOTIVAÇÃO E CONSIDERAÇÕES GERAIS

O conceito de energia é utilizado extensivamente em muitos ramos da Engenharia, porém é precariamente utilizado na Engenharia de Reservatórios. Ainda que o conceito seja utilizado qualitativamente com frequência para indicar o potencial de produção de uma reserva ou para explicar diferentes métodos de recuperação, sua aplicação tende a ser informal e despreziosa: pouco, quase nada, tem sido explorado em termos formais e quantitativos.

De fato, nesse último sentido, encontraram-se muito poucas referências: MATHERON [39] e [40] desenvolve uma interpretação energética da Lei de Darcy, nomeando e explicitando a densidade de potência (potência por unidade de volume) consumida pelas forças viscosas; ROMEU *et al.*¹ (*apud* [55]) citam autores que utilizam de um critério energético para definição e cálculo de permeabilidade equivalente: LE LOC'H [35], DAGAN [19] e INDELMAN e DAGAN [32]. LAKE [34] desenvolve algumas relações sobre energia mecânica, no mesmo sentido que interessa ao presente trabalho.

Impulsionado pelo fato de se tratar de um tema pouco explorado e por projetos e trabalhos motivadores à investigação do conceito de energia aplicado ao estudo de reservatórios, ROMEU *et al.* [55] desenvolveram um modelo matemático de cálculo de energia e potência no contexto do escoamento isotérmico em reservatórios de petróleo.

Baseado nas equações do escoamento em meios porosos, o modelo ainda depende da solução numérica de suas variáveis primárias e de outras propriedades do reservatório e de fluidos. Essa solução é obtida através da leitura e interpretação dos arquivos de saída dos simuladores de fluxo. O *software* Ciclope [24] contém essa funcionalidade e

¹ Este trabalho fará freqüentes referências ao relatório de Romeu *et al* [55], do qual o autor desta dissertação é um dos co-autores. Trata-se de um relatório interno da Petrobras, ainda em construção, que descreve desenvolvimentos associados ao tema desta dissertação, alguns deles iniciados anteriormente, a maioria deles realizados conjuntamente e outros ainda a serem elaborados posteriormente. Em vários aspectos esta dissertação e aquele relatório interno se relacionam e se complementam, considerando a dinâmica de trabalho acadêmico realizado em tempo parcial também como parte de um projeto no Centro de Pesquisas (CENPES) da Petrobras. Naturalmente os dois textos têm diferentes escopos enfatizando-se aqui as contribuições do autor deste trabalho, com várias extensões próprias – de estilo – mais formal e acadêmico aqui.

disponibiliza essas informações para sua manipulação, seja internamente ou através de *scripts* que podem ser realizados em tempo de execução.

Baseado nessa tecnologia, LUCIANETTI [36] estendeu a biblioteca PetroLib [53], usada pelo *software* Ciclope [24]. Essa biblioteca conta com algoritmos e estruturas de dados suficientes para a solução do problema de acidulação biogênica e concentração de H_2S em poços produtores de petróleo, através do pós-processamento da simulação numérica de reservatórios gerada por diversos simuladores comerciais (por exemplo, ECLIPSE [62] e IMEX [16]). Neste trabalho, cada simulador tratado conta com uma implementação individual do problema, em função dos dados de solução disponibilizados pelos arquivos de saída, que são diferentes para cada simulador.

DAMIANI [18], baseado nas extensões realizadas por LUCIANETTI [36], realizou um trabalho para determinação dos padrões de fluxo do escoamento dentro de um reservatório de petróleo, também através do pós-processamento das informações de resultado de fluxo obtidas por um simulador numérico por diferenças finitas e disponibilizou a metodologia no Ciclope [24].

EMERICK *et al.* [23] integraram um modelo petroelástico ao simulador de fluxo IMEX [16] através da implementação do modelo no próprio código do simulador, estendendo as suas funcionalidades (simulador de fluxo integrado). Um trabalho como este também foi realizado por FANCHI [25], por exemplo.

Incentivado pela investigação da quantificação da energia do reservatório e pela necessidade da implementação de outros modelos, como os já citados, criou-se a necessidade de se estudar e desenvolver ferramentas e métodos computacionais para a avaliação prática de uma classe de problemas: modelos computacionais acessórios à simulação de fluxo em reservatórios de petróleo úteis ao desenvolvimento e gerenciamento desses.

1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES PRESENTES NO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho foi de revisar, validar e disponibilizar o modelo matemático desenvolvido por ROMEU *et al.* [55] (ver nota de rodapé 1) para o cálculo energético de reservatórios de petróleo através do pós-processamento numérico do resultado de simulações de fluxo, segundo as principais tecnologias presentes nos simuladores de reservatórios comerciais atuais.

Tal finalidade foi respaldada por outro objetivo, o de desenvolver um modelo computacional capaz de tratar de forma genérica a classe de problemas multi-física que o resultado do modelo integrado não altera a solução da simulação de fluxo através do pós-processamento de seu resultado, independente do simulador de fluxo pelo qual são obtidas as informações necessárias aos modelos.

Atenção especial foi despendida na implementação computacional a fim de torná-la flexível, extensível e manutenível o suficiente para a integração de outros modelos matemáticos, e, de outro lado, funcional, eficiente e robusta o suficiente para o tratamento de modelos reais de simulação, cujos resultados de simulações envolvem uma quantidade considerável de dados. Procurou-se utilizar as vantagens das linguagens e paradigmas de programação modernos, a fim de garantir a fácil extensão e manutenção, sem perder eficiência.

De fato, demandas geradas no transcorrer da implementação do modelo proposto conduziram a uma considerável evolução do *software* Ciclope [24] com a criação de novas funcionalidades e extensões de sua biblioteca de base, a PetroLib [53], principalmente no que diz respeito à leitura dos arquivos de solução, algoritmos, estrutura de dados e ferramentas de visualização e análise.

Como será discutido no decorrer do texto, os simuladores de fluxo não gravam diretamente em seus arquivos de saída todas as propriedades que eles calculam ou utilizam. Assim, para a realização do cálculo energético, diversos algoritmos tiveram que ser implementados para calcular (ou recalcular) essas propriedades ou resultados

intermediários ausentes nos arquivos de saída, disponibilizando na biblioteca inúmeros algoritmos que podem ser reaproveitados na implementação de outros modelos.

Tentou-se ainda ressaltar a potencialidade do modelo desenvolvido, indicando possíveis aplicações da metodologia associadas ao melhoramento do gerenciamento de reservatórios de petróleo, através de análises quantitativas das parcelas energéticas envolvidas no processo de exploração de petróleo e da otimização energética desse processo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além desta introdução, seguem-se sete capítulos e seis apêndices.

Na Revisão Bibliográfica (CAPÍTULO 2) são tratados assuntos de Engenharia de Reservatório e Termodinâmica cujo conhecimento é pertinente, senão imprescindível, ao tema deste trabalho. São revistos os mecanismos de produção de petróleo, e é proposta uma classificação dos métodos levando em consideração a energia envolvida nos processos. São revisitados aspectos fundamentais da Termodinâmica, como formas de energia e o Princípio de Conservação de Energia, um dos princípios mais importantes da Física. Descreve-se também o Estado da Arte no tema mais particular dessa dissertação, o que se encontrou disponível até a conclusão deste trabalho que está relacionado ao tema, ainda que, como já foi discutido anteriormente, parece ter sido muito pouco explorado na mesma linha proposta aqui. A notação original dos textos consultados será eventualmente modificada a fim de manter a homogeneidade deste texto, respeitando as convenções introduzidas na Lista de Símbolos (p. vii).

Na seção 2.4 são apresentadas as técnicas de previsão do comportamento de reservatórios de petróleo utilizadas na indústria, com ênfase na Simulação de Reservatórios, técnica alvo e motora deste trabalho. Descrevem-se conceitos importantes de simulação de reservatórios utilizados no cálculo energético em reservatórios de petróleo. Também são comentadas técnicas disponíveis de pós-processamento dos resultados da simulação. Os pós-processadores são ferramentas fundamentais ao Engenheiro de Reservatório para analisar a grande quantidade de dados proveniente dos simuladores de fluxo. É apresentado ainda o conceito de pós-processamento numérico, ou seja, o tratamento numérico dos resultados da simulação matemática a fim de obter mais informações auxiliares ao estudo de um campo, conceito em que foi baseada a implementação do modelo proposto.

No CAPÍTULO 3, Modelagem Matemática, é apresentado o modelo de cálculo do trabalho e energia em reservatórios de petróleo proposto por ROMEU *et al.* [55]. Aqui o modelo é apresentado de forma a deixar clara a capacidade de aplicá-lo a qualquer simulação de fluxo em meios porosos, apesar do fato de que, neste trabalho, apenas

simulações bifásicas água-óleo, bidimensionais, rocha e fluidos ligeiramente compressíveis, foram tratadas.

No CAPÍTULO 4, Modelagem Computacional, é apresentada a metodologia adotada para a implementação do cálculo energético. São descritas as técnicas computacionais e de programação utilizadas para a implementação do modelo, bem como detalhes da interface necessária entre o simulador de fluxo e o programa que realiza o pós-processamento das informações. É descrito também como essas informações estão disponíveis nos arquivos de saída do simulador e como essas informações devem ser tratadas.

Os resultados são discutidos no CAPÍTULO 5, onde são apresentados exemplos de validação do modelo e da implementação, bem como uma aplicação simples, porém de bastante interesse, indicando o potencial da ferramenta. No CAPÍTULO 6 são sugeridas aplicações da metodologia, como a otimização da produção através da otimização da eficiência energética do processo.

No CAPÍTULO 7 são apresentadas as conclusões, onde as contribuições do trabalho são sumarizadas, além de sugestões de direções para pesquisas futuras.

Um conjunto de apêndices acompanha o texto principal para disponibilizar outras informações pertinentes acerca do tema abordado, bem como para documentar idéias consideradas e temas estudados, não tratados completamente no presente trabalho, mas que podem subsidiar futuras pesquisas.

Dois Apêndices descrevem as informações necessárias para a utilização da ferramenta implementada: no APÊNDICE A, são descritas as palavras-chave que devem estar contidas no arquivo de entrada do simulador de fluxo para gravar as propriedades necessárias ao pós-processamento no arquivo de saída; e, no APÊNDICE B, são descritas as propriedades que resultam do pós-processamento baseado no cálculo energético.

No APÊNDICE C são apresentados os algoritmos implementados no arcabouço para pós-processamento de forma a estarem disponíveis para serem utilizados em futuras

utilizações do esquema de pós-processamento numérico. O APÊNDICE D apresenta as classes base que devem ser estendidas para a integração de algum outro modelo à simulação de fluxo.

No APÊNDICE E são discutidas ainda as formas de acoplamento de modelos ao simulador de fluxo, apresentando opções distintas de acoplamento segundo o nível de interação do modelo com o simulador de fluxo e o nível de intrusividade do modelo ao simulador. Tais acoplamentos representam possíveis extensões do esquema de pós-processamento aqui implementado, demonstrando o potencial geral de utilização do ferramental disponibilizado.

No APÊNDICE F são brevemente discutidas algumas das particularidades da modelagem de reservatórios, bem como o seu tratamento na biblioteca PetroLib [53].

No APÊNDICE G é apresentada a comparação entre os modelos de simulação do caso estudado na seção 6.2. Uma vez que as simulações são realizadas em simuladores distintos, certos cuidados com as suas configurações devem ser tomadas. Neste apêndice são descritos quais cuidados foram tomados e são apresentados comparações entre os resultados das simulações.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Precise definition of basic concepts forms a sound foundation for the development of a science and prevents possible misunderstandings.” – Yunus Çengel

2.1 ESTADO DA ARTE

ROMEY *et al.* [55] fazem um minucioso levantamento bibliográfico sobre a utilização do termo energia na Engenharia de Petróleo. Foram levantadas informações na *web*, livros especializados no assunto e artigos relacionados. A partir das informações colhidas as, abordagens da utilização do termo energia foram categorizadas.

Em linhas gerais, foi observada:

- uma intensa utilização qualitativa, freqüentemente despretensiosa ou até mesmo imprecisa, para a explanação de mecanismos de recuperação de petróleo;
- uma escassa utilização quantitativa, que às vezes se confunde com o emprego de balanço de materiais.

Nos textos onde o termo energia é mencionado apenas qualitativamente, cita-se muito mas não se define, quantitativamente, nem a energia natural nem a energia disponível do reservatório ao longo da sua exploração. Trabalha-se apenas com a intuição qualitativa do quanto o reservatório é capaz de produzir em função de sua energia natural, ou em função da energia fornecida através do influxo de fluidos (água ou hidrocarbonetos), ou associada à expansão de rocha e fluidos, mas sempre referenciados aos mecanismos de produção de hidrocarbonetos em reservatórios de petróleo². Tais menções podem ser encontradas, por exemplo, em BEAR [5], COSENTINO [17], ROSA *et al.* [57], TAREK *et al.* [67] e THOMAS [68]. A intenção mais próxima de se quantificar a energia ocorre quando esta é associada à pressão do reservatório, referida como a manifestação mais sensível da energia do reservatório (THOMAS [68]). Mas, do ponto de vista físico, energia e pressão são grandezas claramente distintas.

Uma discussão pioneira sobre a energia disponível no reservatório foi apresentada primeiramente por SCHILTIUS [60], que introduziu o conceito do Balanço de Materiais³, utilizando o termo energia para qualificar os processos envolvidos na

² Uma revisão sobre mecanismos de produção de hidrocarbonetos em reservatórios de petróleo é apresentada na Seção 2.3.

³ Uma revisão sobre Balanço de Materiais é apresentada na Seção 2.4.1.

recuperação de hidrocarbonetos, conotação que é identificada na maioria dos textos relacionados.

Porém, uma quantificação correta, elaborada em termos próprios de energia mecânica, aparece discutida pelos autores MATHERON ([39] e [40]), LAKE [34] e DAGAN [19].

MATHERON ([39] e [40]) apresenta um significado energético da lei de Darcy. Em um contexto de descrição probabilística do meio poroso, Matheron parte da escala microscópica (de poros e grãos), onde assume válida a equação de Navier, para mostrar a gênese da Lei de Darcy em uma escala macroscópica. Em seguida, desenvolvendo uma interpretação energética da lei de Darcy, ele nomeia e explicita a densidade de potência (isto é, potência por unidade de volume) consumida pelas forças viscosas

$$\frac{dP}{dV} = -\mathbf{u} \cdot \nabla p. \quad (2.1)$$

Essa relação é apresentada também em duas outras versões, como uma função quadrática ou do gradiente de pressão ou da velocidade, quando se substitui um ou outro desses dois vetores pela lei de Darcy. Mais adiante, Matheron se serve desse conceito para calcular permeabilidades equivalentes. Mais especificamente, ele prova que as médias aritmética e harmônica da permeabilidade são, respectivamente, os limites máximo e mínimo da permeabilidade equivalente de qualquer meio heterogêneo.

A adoção de um critério energético para definição e cálculo de uma permeabilidade equivalente é aplicada por outros autores mais, citados por ROMEU [52], *apud* [55]: LE LOC'H [35], DAGAN ([19], §3.4.1), INDELMAN e DAGAN [32]. Por exemplo, uma relação quase idêntica à equação (2.1), diferindo apenas por usar a altura piezométrica (*hydraulic head*, ou simplesmente *head*) em vez de pressão, é chamada por DAGAN [19] de “função de dissipação”, definida como “energia por unidade de peso de fluido dissipada por fricção”. Dagan apresenta essa função de dissipação também como uma função quadrática da velocidade ou do gradiente de altura piezométrica e a aplica, fazendo referência a outros autores, no cálculo de limites para a permeabilidade equivalente.

Todas essas considerações aplicam-se especificamente para escoamento incompressível em regime permanente.

LAKE [34] apresenta uma formulação para o balanço de energia em reservatórios de petróleo, com foco na aplicação em métodos térmicos de recuperação, com ênfase na temperatura. Porém desenvolve algumas relações sobre energia mecânica. O balanço de energia é apresentado como

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{total} u + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho_i |\mathbf{u}_i|^2 \right) dV + \nabla \cdot \mathbf{E}_f dV = P \quad (2.2)$$

onde o termo do somatório representa energia cinética por unidade de volume, para cada fase i do sistema; o termo de concentração de energia interna envolve a massa específica total do meio permeável (massa total fluindo mais fases estacionárias, tudo dividido pelo volume bruto); o termo de fluxo de energia envolve convecção, condução e radiação; e P representa o que este autor chama de termo fonte⁴. Esse termo, especificamente, requer mais elaboração do que os outros. Ele envolve apenas componentes de trabalho, na ausência de fontes externas de aquecimento. Calor de reação, de vaporização e de solução, quando presentes (no caso de alguns processos de recuperação especial), são implicitamente considerados nos termos de concentração e de fluxo. Lake decompõe seu termo fonte em duas parcelas

$$P = P_{\mu} + P_G. \quad (2.3)$$

A primeira parcela é chamada de taxa de trabalho realizado contra o campo de pressão. Considerando um elemento infinitesimal do campo de fluxo multifásico (*representative element of fluid*, ou simplesmente REV) e multicomponente que atravessa uma área dA , tomando o trabalho como o produto força vezes distância, e, portanto, a taxa de trabalho como o produto força vezes velocidade, tem-se

⁴ O símbolo para potência, P , foi substituído nesse texto pelo símbolo do texto original $\dot{W}$ (onde o ponto sobre o símbolo de trabalho denota taxa, ou seja, o mesmo que potência) para futuras comparações. Bem como o símbolo pV , que referencia o trabalho realizado pela pressão para deslocar um elemento de fluido, pelo símbolo μ , pelo mesmo motivo.

$$dP_\mu = - \sum_{i=1}^{N_i} p_i dA \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_i \quad (2.4)$$

onde o termo $p_i dA$ é a força exercida pela pressão na fase i . O sinal negativo satisfaz a convenção usual de que o trabalho é positivo quando realizado para dentro do sistema, onde $\mathbf{n}$ é o vetor normal unitário externo. Integrando sobre toda a superfície do sistema e usando o teorema da divergência, tem-se

$$P_\mu = - \int_{\Omega} \sum_{i=1}^n \nabla \cdot (p_i \mathbf{u}_i) dV. \quad (2.5)$$

Para obter a taxa de trabalho associada às forças gravitacionais, toma-se o produto escalar entre os vetores velocidade e o vetor aceleração da gravidade

$$dP_G = \sum_{i=1}^n \rho_i \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{g} dV, \quad (2.6)$$

onde

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

O sinal é positivo porque o trabalho é realizado pelo fluido movendo-se contra a gravidade. Note-se a distinção entre a forma das equações (2.4) e (2.6): no primeiro caso, trata-se de forças de superfície; no segundo caso, de forças de campo. A integração da equação (2.6) sobre todo o volume resulta em

$$P_G = \int_{\Omega} \sum_{i=1}^n \rho_i \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{g} dV. \quad (2.8)$$

ROMEY *et al.* [55], em um texto cuja elaboração está associada a este trabalho de dissertação (ver nota de rodapé 1), apresentam fórmulas e métodos de cálculo de várias parcelas energéticas em diferentes contextos, derivando desde um simples caso unidimensional, incompressível e regime permanente até o caso mais completo onde os modelos *black oil* comuns na simulação de reservatórios de petróleo são contemplados,

levando a construção e compreensão do conhecimento quantitativo da energia do reservatório. Para tanto foi utilizada uma abordagem segundo o cálculo variacional, semelhante à utilizada para a modelagem discreta de equações através do método de Elementos Finitos (HUGHES, [31]). A função de ponderação utilizada escolhida, convenientemente, é o produto pressão pelo fator volume de formação. Dessa forma é possível reescrever as equações que descrevem o escoamento de fluidos em meios porosos em termos de energia.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS DE TERMODINÂMICA

A Termodinâmica pode ser definida como a ciência da energia (ÇENGEL *et al.* [12]). Ela não só descreve os esforços em converter calor em potência, mas também todos os aspectos da energia e transformação de energia. Serão descritos nessa seção aspectos fundamentais da termodinâmica, como formas de energia e o Princípio de Conservação de Energia, um dos princípios mais importantes da Física.

2.2.1 Energia, Calor e Trabalho

Energia pode ser vista como a habilidade de causar mudanças (ÇENGEL *et al.* [12]); uma quantidade abstrata definida como a capacidade que um sistema físico, um corpo ou uma substância tem de realizar trabalho.

Energia pode cruzar a fronteira de um sistema fechado de duas formas distintas: calor e trabalho.

Calor é definido como a forma de energia transferida entre dois sistemas (ou entre um sistema e sua vizinhança) em função de uma diferença de temperatura (ÇENGEL *et al.* [12]). Transferência de calor é, portanto, a transferência de energia térmica. Logo, em Termodinâmica, calor tem o mesmo significado que transferência de calor. Há três formas de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Trabalho é definido como a transferência de energia associada a uma força agindo ao longo de uma distância. De forma geral, é qualquer troca energética entre sistema e vizinhança que não é devida a uma diferença de temperatura.

Por definição (SMITH *et al.* [64]), a quantidade de trabalho é dada pela equação

$$dW = Fdl \quad (2.9)$$

onde F é a força que age ao longo da linha de deslocamento dl . Integrando a equação (2.9) encontramos o trabalho de um processo finito. Se tomarmos, convenientemente, como exemplo a compressão ou expansão de um fluido confinado, tem-se

$$dW = pA d\frac{V}{A}. \quad (2.10)$$

Se A é constante,

$$dW = p dV \quad (2.11)$$

ou na forma integral

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (2.12)$$

Este processo pode ser ilustrado pelo exemplo clássico da termodinâmica da compressão de um fluido em um sistema pistão/êmbolo, como ilustrado na Figura 2.1.

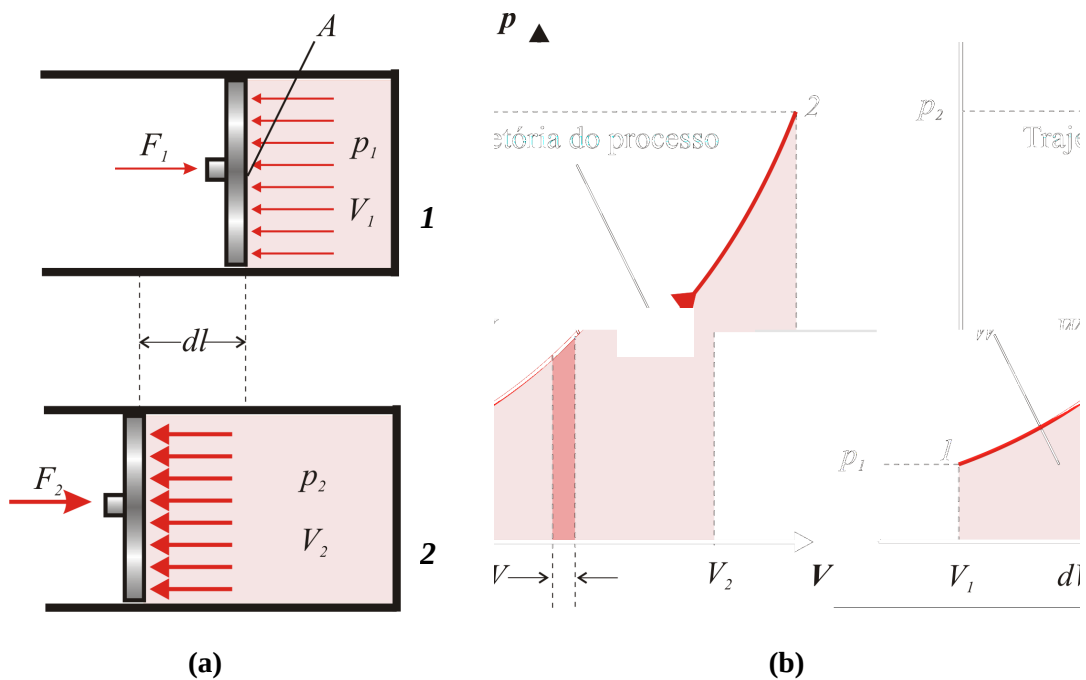


Figura 2.1 – Expansão de fluido em sistema êmbolo/pistão (a) e o diagrama pV do processo (b).

O resultado da integral depende do caminho do processo, isto é, de como a pressão varia entre os pontos (p_1, V_1) e (p_2, V_2) de um gráfico pV : mais exatamente, o trabalho W é a área do gráfico sob esse caminho (Figura 2.1). Esse caminho, por sua vez, depende de como a temperatura do gás varia durante o processo.

2.2.2 Sistemas Termodinâmicos

Um sistema Termodinâmico, ou simplesmente Sistema, é definido como uma quantidade de matéria ou como uma região no espaço escolhida para estudo. A massa ou região fora do sistema é chamada vizinhança. A superfície, real ou imaginária, que separa o sistema de sua vizinhança é chamada de fronteira, que pode ser móvel ou fixa, ou seja, pode expandir-se ou contrair-se.

Sistemas podem ser considerados fechados ou abertos, dependendo se uma massa fixa ou volume fixo no espaço é escolhido para estudo. Um sistema fechado (ou massa de controle) consiste em uma quantidade fixa de massa, e não há massa cruzando sua fronteira. Mas energia, na forma de calor ou trabalho, pode cruzar a fronteira e o volume de um sistema fechado não é necessariamente constante.

Um sistema aberto, ou volume de controle, é uma região no espaço escolhida apropriadamente. Normalmente compreende uma região que envolve fluxo de massa. Ambas massa e energia podem cruzar as fronteiras do sistema. As fronteiras do volume de controle são chamadas de superfície de controle e podem ser reais e imaginárias.

De uma forma geral, qualquer região arbitrária no espaço pode ser selecionada como um volume de controle. Não há regras concretas para a seleção de volumes de controle, mas uma escolha apropriada certamente torna a análise mais fácil.

Convenção de Sinais

Calor e trabalho são quantidade direcionais, e portanto as descrições completas de suas interações requerem a especificação de sua magnitude e sentido. A convenção formal de sinais geralmente aceita é:

“Calor transferido para um sistema e trabalho feito por um sistema são positivos; calor transferido de um sistema e trabalho feito sobre um sistema é negativo” (ÇENGEL *et al.* [12]).

Neste trabalho a convenção utilizada será o contrário para tratar de forma mais conveniente o problema. Por exemplo, trabalho realizado por um poço injetor (ou seja

“trabalho feito sobre um sistema”) é considerado positivo, uma vez que se está fornecendo energia através de trabalho ao sistema.

2.2.3 Formas de energia e de transferência de energia

Energia pode existir em diferentes formas e a soma de todas as suas constituintes é a energia total E do sistema. Na verdade, a Termodinâmica fornece apenas o valor da mudança da energia total de um sistema e não um valor absoluto desta.

São reconhecidas duas formas de energia: macroscópica e microscópica. As formas macroscópicas são aquelas que o sistema possui como um todo em relação a alguma referência externa, relacionadas ao movimento e à influência de algum efeito externo, como gravidade ou tensão superficial. A energia de um sistema associada ao movimento macroscópico de um corpo é igual ao trabalho necessário para acelerar sua massa m até a velocidade u :

$$E_k = \frac{1}{2}mu^2. \quad (2.13)$$

A energia associada à posição de um sistema no campo gravitacional de aceleração g é igual ao trabalho para elevar sua massa m até uma altura z acima de uma referência estabelecida:

$$E_p = mgz. \quad (2.14)$$

As formas microscópicas de energia são aquelas relacionadas à estrutura molecular do sistema e ao grau de atividade molecular, e são independentes de referências externas. A soma de todas as formas de energia microscópicas é chamada de energia interna do sistema, simbolizada pela letra U . A energia interna está relacionada à estrutura molecular e ao grau de atividade molecular e pode ser vista como a soma das energias cinética e potencial das moléculas. Ela é a combinação das energias sensível, latente, química e nuclear de um sistema avaliado a nível molecular (ÇENGEL *et al.* [12]).

A mudança de energia contida em um sistema Termodinâmico vale (ÇENGEL *et al.* [12])

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta U. \quad (2.15)$$

De uma forma geral, a energia pode ser dividida em energia útil e energia inútil, aquela que seria degradada, ou dissipada, ou seja, não seria aproveitada. Essa energia degradada é representada como a variação da energia interna, que *a priori* é função da temperatura. Ela é uma energia desorganizada, resultado do movimento aleatório das moléculas de fluido, que não pode ser aproveitada como trabalho útil. A energia útil é a energia mecânica.

Energia Mecânica

Muitos sistemas de engenharia são projetados para transportar fluidos de um lugar a outro, com vazão, velocidade e diferença de altura especificadas. Esses sistemas podem produzir trabalho mecânico ou consumir trabalho mecânico durante o processo, sem envolver conversão de energia nuclear, química ou térmica em energia mecânica. Da mesma forma, não há transferência de calor em quantidades significativas, e os sistemas operam essencialmente a temperatura constante. Tais sistemas podem ser analisados de forma conveniente considerando apenas as formas mecânicas de energia e os efeitos de atrito que causam perda de energia mecânica (ou seja, conversão em energia térmica que, em geral, não pode ser utilizada para nenhuma finalidade útil).

A energia mecânica pode ser definida como a forma de energia que pode ser convertida completa e diretamente em trabalho mecânico por um dispositivo mecânico ideal. As energias cinética e potencial são as formas conhecidas de energia mecânica. Entretanto, energia térmica não é energia mecânica, uma vez que não pode ser convertida direta e completamente em trabalho (Segunda Lei da Termodinâmica). Além dessas formas de energia, a pressão de um fluido em escoamento também está associada à sua energia mecânica. Na verdade, a unidade de pressão, no sistema internacional de unidades, Pa é equivalente a $Pa = N/m^2 = N \cdot m/m^3 = J/m^3$, que é energia por unidade de volume, e o produto $p v$ ou seu equivalente p/ρ tem unidade J/kg , que é energia por unidade de massa. A pressão, por si só, não é uma forma de energia. Mas uma força de pressão agindo sobre um fluido ao longo de uma distância produz trabalho, chamado de trabalho de escoamento, em uma quantidade p/ρ por unidade de massa. O trabalho de escoamento é expresso em termos de propriedades do fluido, sendo conveniente

imaginá-lo como parte da energia do fluido e chamá-lo de energia de pressão. Assim, a energia mecânica de um fluido em escoamento pode ser expressa por unidade de massa como (FOX *et al.* [27])

$$e_{mec} = \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \quad (2.16)$$

onde $\frac{p}{\rho}$ é a energia de pressão, $\frac{v^2}{2}$ é a energia cinética, e gz é a energia potencial do fluido, todas por unidade de massa. Este trinômio é conhecido como Equação de Bernoulli.

Portanto, a energia mecânica de um fluido não varia durante o escoamento se sua pressão, densidade, velocidade e altura permanecerem constantes. Na ausência de perdas, a variação da energia mecânica representa o trabalho mecânico fornecido ou extraído do fluido.

Perda de carga

Em mecânica dos fluidos e, mais especificamente, em Hidráulica, é bem conhecida a equação de Bernoulli, que se deduz a partir da conservação de energia ou da conservação da quantidade de movimento (FOX *et al.* [27]):

$$\left(\frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_1 = \left(\frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_2 = \text{constante} \quad (2.17)$$

Isto é, ao longo de um tubo de corrente, a soma das alturas cinética, piezométrica e geométrica em uma seção 1 é igual à mesma soma em uma seção 2 ou em qualquer outra seção. As parcelas dessa soma são termos de energia (cinética, de pressão e potencial) divididos pelo peso específico do fluido. As hipóteses usadas são: (1) escoamento permanente; (2) fluido incompressível; (3) escoamento em um tubo de corrente; (4) escoamento sem atrito: não é considerada a influência da viscosidade.

Porém, são muitos os casos de interesse em que essa última hipótese não se aplica, observando-se uma “perda de carga”, h_L , entre uma seção e outra do escoamento:

$$\left(\frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_1 - \left(\frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_2 = h_L \quad (2.18)$$

A perda de carga resulta basicamente da viscosidade⁵ μ — uma medida do atrito interno entre camadas de fluido que escoam com diferentes velocidades, ou seja, uma medida da resistência à deformação do fluido. A perda de carga representa uma perda de energia mecânica, convertida em energia térmica dentro do sistema (parcela da energia interna) ou dissipada como calor para fora do sistema, tudo sempre expresso em energia por unidade de peso do fluido. Assim, em um tubo por onde escoar água, a perda de carga gera certo aquecimento da água e do tubo, embora esse aquecimento possa ser quantitativamente insignificante (AZEVEDO NETTO e ALVAREZ [3], seção 13.13, *apud* ROMEU *et al.* [55]).

Trabalho de escoamento e energia de um fluido em escoamento

Quando há fluxo de massa através das fronteiras de um volume de controle, uma certa quantidade de trabalho é necessária para empurrar a massa para dentro ou para fora do volume de controle. Esse trabalho é conhecido como trabalho de escoamento, ou energia de escoamento. Ele é necessário para a manutenção de um escoamento contínuo através de um volume de controle.

Para obter uma equação para o trabalho de escoamento, considere um elemento fluido com volume V mostrado na Figura 2.2.

⁵ Para regime laminar, a perda de carga é devida inteiramente à viscosidade; para regime turbulento, ela é o efeito combinado da viscosidade e da inércia [Azevedo e Alvarez [3], seção 11.5].

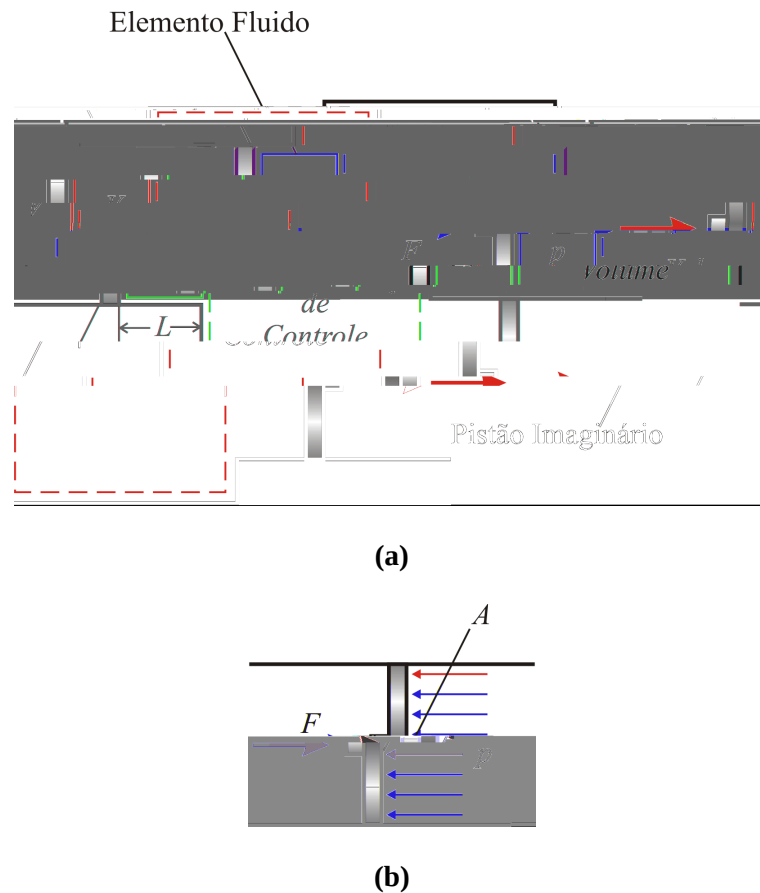


Figura 2.2 – Representação esquemática do (a) trabalho de escoamento e (b) equilíbrio de forças no pistão imaginário (adaptado de ÇENGEL *et al.* [12])

O fluido que está imediatamente a montante força esse elemento fluido a entrar no volume de controle; assim, ele pode ser visto como um pistão imaginário. O elemento de fluido pode ser assumido suficientemente pequeno de forma que suas propriedades sejam uniformes. Se a pressão do fluido é p , e a seção transversal do elemento fluido é A , então a força F aplicada ao elemento fluido pelo pistão imaginário é igual a pA .

Para empurrar todo o elemento fluido para dentro do volume de controle, essa força deve agir por uma distância L . Assim, o trabalho realizado para empurrar o elemento de fluido através da fronteira (ou seja, o trabalho de escoamento) é

$$W_{esc} = FL = pAL = pV \quad (2.19)$$

O trabalho de escoamento é expresso em termos de propriedades. Na verdade, ele é o produto de duas propriedades do fluido. Por esse motivo, pode ser visto como uma

combinação de propriedades (como entalpia) e se referem a ele como energia de escoamento, energia de pressão, energia transportada pelo escoamento ou energia de transporte, em vez de trabalho de escoamento (ÇENGEL *et al.* [12]). Também pode ser visto que o produto pV apenas representa energia de fluidos em escoamento, e não representa nenhuma forma de energia dos sistemas em que não ocorre escoamento (fechados). Assim, ele deve ser tratado como trabalho.

O volume de fluido que cruza o volume de controle pode ser expresso em termos da vazão volumétrica (ou simplesmente vazão)

$$\hat{q} = \int_{\Gamma} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA = u_{\text{méd}} A \quad (2.20)$$

ou em termos da vazão mássica

$$\dot{m} = \int_{\Gamma} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA = \rho u_{\text{méd}} A = \rho \hat{q}. \quad (2.21)$$

onde $u_{\text{méd}}$ é velocidade média do fluido normal à seção Γ , A é a área dessa seção, e $\mathbf{n}$ é o vetor normal à superfície da seção. Combinando as equações (2.19) a (2.21) temos

$$W_{\text{fluxo}} = pV = p(\hat{q}\Delta t) = p\left(\frac{\dot{m}}{\rho}\Delta t\right) = (pv)\dot{m}\Delta t = \int_{\Gamma} (pv)\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA\Delta t \quad (2.22)$$

Logo, a energia total de um fluido em escoamento, que entra ou sai de um volume de controle, possui uma forma adicional de energia – a energia de escoamento pV , como já foi discutido. Portanto, a energia total por unidade de massa de um fluido em escoamento torna-se

$$\theta = pv + e = pv + (u + e_k + e_p) \quad (2.23)$$

Mas o termo $pv + u$, é uma combinação de propriedades (como aludido anteriormente) definida como a entalpia, h . Logo a equação (2.23) se torna

$$\theta = h + \frac{v^2}{2} + gz. \quad (2.24)$$

Com o uso da entalpia em vez da energia interna para representar a energia de um fluido em escoamento, não é necessário se preocupar com o trabalho de escoamento. A entalpia leva em conta automaticamente a energia necessária para empurrar o fluido para dentro ou para fora do volume de controle. Na verdade, esse é o principal motivo para definir a propriedade entalpia.

Trabalho realizado por tensões normais e cisalhantes na superfície de controle

Da definição de trabalho dada pela equação (2.9), podemos obter a taxa em que esse trabalho (ou potência) é realizado pela força F fazendo (FOX *et al.* [27])

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F \cdot dl}{\Delta t} = F \cdot v.$$

A taxa de trabalho realizado sobre um elemento de área, dA , da superfície de controle, pelas tensões normais, vale

$$dF \cdot v = \sigma_{nn} dA \cdot v.$$

Uma vez que o trabalho que sai através das fronteiras do volume de controle é o negativo do trabalho realizado sobre o volume de controle, a taxa total de trabalho para fora do volume de controle, decorrente das tensões normais, é dada por

$$\dot{W} = - \int_{SC} \sigma_{nn} dA \cdot v = - \int_{SC} \sigma_{nn} v \cdot dA \quad (2.25)$$

Na maioria dos escoamentos (FOX *et al.* [27]), e no escoamento em meio poroso aqui tratado (MASSARANI [38]), a tensão normal é o negativo da pressão termodinâmica, $-p$, logo,

$$\dot{W} = \int_{SC} p v \cdot dA \quad (2.26)$$

O mesmo desenvolvimento pode ser realizado de forma análoga para as tensões de cisalhamento, porém para uma superfície de controle perpendicular a V , o trabalho de cisalhamento é nulo (FOX *et al.* [27]), como é o tratamento no caso de escoamento em meios porosos.

Eficiência

É comum se querer avaliar o desempenho de processos de conversão de energia como uma forma de conhecer o quanto da energia fornecida a um sistema é realmente aproveitada para o processo que se deseja realizar. Esta avaliação é alcançada através do conceito de *eficiência*. Segundo ÇENGEL *et al.* [12], *eficiência* pode ser entendida como o grau de sucesso com o qual um processo de transferência ou conversão de energia é realizado. Ela pode ser expressa em termos do resultado desejado e do fornecimento necessário. Matematicamente,

$$eficiência = \frac{resultado\ desejado}{fornecimento\ necessário} \quad (2.27)$$

Este conceito é extremamente útil para otimizar os recursos energéticos de forma a maximizar a conversão da energia fornecida ao sistema em trabalho útil.

Mas o conceito de eficiência não se limita apenas à Termodinâmica. Como veremos na seção 2.3.2, o conceito de eficiência é utilizado na Engenharia de Reservatórios para avaliar o desempenho no processo de exploração de uma reserva, porém em termos de volume e não de energia.

2.2.4 A Primeira Lei da Termodinâmica: O Princípio da Conservação da Energia

A Primeira Lei da Termodinâmica, que nada mais é que uma expressão do Princípio da Conservação da Energia, estabelece que, durante uma interação, energia pode passar de uma forma para outra mas a quantidade total de energia se mantém constante. A Primeira Lei estabelece a energia como uma propriedade termodinâmica. A mudança na energia de um corpo ou em qualquer outro sistema é igual à diferença entre a entrada de energia e a saída de energia.

Equação de balanço de energia

A energia, uma quantidade contável capaz de ser transportada, pode ser descrita através do esquema matemático conhecido como equação de balanço.

Para deduzirmos a equação de balanço de energia, tomamos um volume de controle arbitrário no espaço tridimensional, envolvido por uma superfície de controle, dotados das propriedades descritas na seção 2.2.2, cujo centro de massa é estacionário (não há variações em suas energias cinética e potencial globais). Sobre este volume de controle são observadas as seguintes interações energéticas:

- Entrada e saída de energia do volume de controle por transporte através da superfície de controle, cuja taxa líquida é representada por $\dot{E}_T$
- Variação da energia com o tempo devido ao transporte e à geração, cuja taxa instantânea no volume de controle é representada por $\frac{dE_{VC}}{dt}$

Essas grandezas respeitam a convenção de sinais adotada (seção 2.2.2). Logo, matematicamente,

$$\dot{E}_T = \frac{dE_{VC}}{dt}. \quad (2.28)$$

O termo de transporte é composto de diversas parcelas, indicando diferentes modos cuja energia pode atravessar a superfície de controle. As correntes de entrada e saída contribuem em função de suas energias interna, potencial e cinética, a uma taxa igual a $\left(U + \left(1/2\right)v^2 + zg\right)\dot{m}$, onde v é a velocidade média da corrente, z é a elevação em relação a um nível de referência e g a aceleração da gravidade. A movimentação de entrada e saída, onde uma massa do fluido é empurrada para dentro do volume de controle por outra massa de fluido, contribui para a energia de transporte com o trabalho realizado para empurrar esse fluido, cuja taxa de trabalho vale $(pV)\dot{m}$ e cujo trabalho líquido vale $\Delta[(pV)\dot{m}]_{tc}$. Outra forma de trabalho está associada à expansão e contração do volume de controle, cuja taxa é representada por $\dot{W}$.

O termo de acúmulo é simplesmente a taxa de variação no tempo da energia interna total no interior do volume de controle. Logo, o balanço de energia é escrito como

$$\frac{d(mU)_{VC}}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{1}{2}u^2 + zg \right) \dot{m} \right]_{tc} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.29)$$

onde $H = U + pV$ é a entalpia do sistema.

A restrição da equação (2.29) é que o volume de controle é estacionário, as variações das energias cinética e potencial do fluido no interior do volume de controle podem ser omitidas.

Teorema de Transporte de Reynolds Aplicado ao Transporte de Energia

O Teorema de Transporte de Reynolds define a formulação para volume de controle de cada lei física básica (conservação de massa, segunda Lei de Newton, primeira e segunda leis da Termodinâmica e princípio da quantidade de movimento angular) a partir da formulação para sistema. Para o sistema, temos que

$$N_{sistema} = \int_{M(sistema)} \eta dm = \int_{V(sistema)} \eta \rho dV \quad (2.30)$$

onde N designa qualquer propriedade extensiva⁶ e η sua propriedade intensiva⁷ correspondente.

FOX *et al.* [27] apresentam a derivação da equação (2.30) relacionando a taxa de variação de qualquer propriedade extensiva arbitrária do sistema com as variações temporais dessa propriedade associadas com o volume de controle, chegando a

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{sistema} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \eta \rho dV + \int_{\Gamma} \eta \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA. \quad (2.31)$$

⁶ Propriedades extensivas são valores que dependem do tamanho – ou extensão – do problema.

⁷ Propriedades intensivas são independentes da massa do sistema, por exemplo, temperatura.

O termo $\left. \frac{dN}{dt} \right|_{\text{sistema}}$ é a taxa de variação total da propriedade extensiva do sistema, $\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \eta \rho dV$ é a taxa de variação com o tempo da propriedade extensiva dentro do volume de controle e $\int_{\Gamma} \eta \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA$ é a taxa líquida de fluxo da propriedade extensiva através da superfície de controle.

Para o caso particular da conservação de energia

$$N = E, \quad (2.32)$$

$$\eta = e = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad (2.33)$$

e

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{sistema}}. \quad (2.34)$$

Substituindo as equações (2.32) a (2.34) na equação (2.31), chegamos a (FOX *et al.* [27])

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE_{\text{sistema}}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} e \rho dV + \int_{\Gamma} e \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA \quad (2.35)$$

que nada mais é que a equação da conservação, ou Primeira Lei da Termodinâmica.

Neste ponto é conveniente, para futuras comparações, a separação do trabalho de escoamento dos outros trabalhos envolvidos no processo. Dessa forma, da equação (2.35), utilizando a definição de trabalho de escoamento (equação (2.22)), temos

$$\begin{aligned}
\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_{\text{outros}}}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} e \rho dV + \int_{\Gamma} e \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA + \frac{dW_{\text{esc}}}{dt} = \\
&= \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} e \rho dV + \int_{\Gamma} e \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA + \int_{\Gamma} (pv) \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA = \quad (2.36) \\
&= \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} e \rho dV + \int_{\Gamma} (e + pv) \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA
\end{aligned}$$

onde,

$\frac{dQ}{dt}$ é a taxa de variação total de calor do sistema.

$\frac{dW_{\text{outros}}}{dt}$ é a taxa de variação de trabalho (ou potência) total do sistema.

$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} e \rho dV$ é a taxa de variação com o tempo da energia dentro do volume de controle.

$\int_{\Gamma} (e + pv) \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA$ é a taxa líquida de fluxo de energia através da superfície de controle.

2.3 MECANISMOS DE PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS EM RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

Os fluidos contidos em uma rocha-reservatório devem dispor de certa quantidade de energia para que possam ser produzidos e essa energia, que recebe o nome de energia natural ou primária, é o resultado de todas as situações e circunstâncias geológicas pelas quais a jazida passou até se formar completamente (THOMAS [68]).

De um modo geral, a produção ocorre devido a dois efeitos principais (THOMAS [68]):

- descompressão, com a expansão volumétrica dos fluidos contidos no reservatório e contração do volume poroso;
- deslocamento de um fluido por outro, como por exemplo a invasão da zona de óleo pelo influxo de água de um aquífero adjacente.

Ao conjunto de fatores que fazem desencadear esses efeitos dá-se o nome de Mecanismo de Produção de Reservatório (THOMAS [68]). Há vários mecanismos de produção, isto é, existem diferentes formas de se fornecer ou retirar energia do reservatório. Se essa energia for de origem exclusivamente natural (sem outra ação humana que a simples abertura de poços produtores), chamamos este processo de recuperação primária. Caso a energia natural do reservatório não seja suficiente para a recuperação aceitável dos hidrocarbonetos contidos nele, sua energia pode ser suplementada por uma série de processos, tais como injeção de água e gás. A esse conjunto de processos é dado o nome de Métodos de Recuperação.

Então, a produção de um reservatório pode ser entendida a partir dos mecanismos de fornecimento de energia para mover o óleo para o poço.

Serão apresentados os mecanismos de produção seguindo uma classificação em relação a energia utilizada pelo processo. Se o processo utiliza apenas a energia natural do reservatório, este é classificado como Mecanismo de Recuperação Primária. Se o processo utiliza outro tipo de energia suplementar, este é classificado com o Mecanismo de Recuperação Suplementar. A energia utilizada para produzir o reservatório pode

influenciar consideravelmente o fator de recuperação, o quociente entre o volume de óleo que poderá ser produzido e o volume original.

2.3.1 Mecanismos de Recuperação Primária

A recuperação é dita primária quando estão em jogo apenas mecanismos naturais para a recuperação de óleo, ou seja, a produção de hidrocarbonetos é realizada sem a utilização de nenhum outro recurso para suplementar a energia natural do reservatório. Para TAREK [67], existem basicamente 6 mecanismos de recuperação primária:

- expansão de rocha e líquido;
- depleção⁸;
- capa de gás;
- influxo de água;
- drenagem por gravidade (segregação gravitacional);
- combinação.

Expansão de Rocha e Líquido

Quando a pressão inicial do reservatório está acima da pressão de bolha⁹, o reservatório é chamado "reservatório de óleo sub-saturado". Sob essa circunstância, apenas óleo cru, água conata e rocha são os materiais existentes. Com a queda da pressão, a rocha e o fluido se expandem devido às suas respectivas compressibilidades. A compressibilidade de rocha do reservatório é resultado de dois fatores:

- expansão dos grãos individuais de rocha;
- compactação da formação.

Como a expansão dos fluidos e a redução no volume poroso decorrem do decaimento da pressão do reservatório, o óleo cru e a água serão forçados a escoar para fora do espaço poroso para os poços. Como os fluidos e a rocha são apenas ligeiramente compressíveis, o reservatório irá sofrer um rápido declínio da pressão.

⁸ ou Mecanismo de Gás em Solução (Thomas [68])

⁹ Pressão na qual se inicia o aparecimento da fase gasosa ao despressurizar-se uma substância no estado líquido, a uma dada temperatura.

Essa é considerada a força propulsora menos eficiente e representa apenas uma porcentagem pequena da recuperação do óleo *in situ* (TAREK [67]).

Depleção

Neste tipo de reservatório, a principal fonte de energia resulta da liberação de gás do óleo cru com subsequente expansão de gás com a redução da pressão do reservatório. Com a queda da pressão abaixo da pressão de bolha, bolhas de gás são liberadas. Essas bolhas se expandem e forçam o óleo cru para fora do espaço poroso.

Esse mecanismo é usualmente pouco mais eficiente do que o anterior. Ele é o resultado direto da formação de saturação de gás no reservatório.

Capa de Gás

Reservatórios regidos por capa de gás apresentam uma capa de gás com pouco ou nenhum influxo de água. A energia natural disponível para produzir o óleo cru é provida das seguintes fontes:

- expansão da capa de gás;
- expansão do gás em solução à medida que é liberado.

Apresenta um fator de recuperação consideravelmente maior que o devido à depleção, atribuído também ao fato que não há formação de saturação de gás no reservatório ao mesmo tempo.

Influxo de Água

Muitos reservatórios são delimitados em uma porção ou em toda sua periferia por formações saturadas com água, os aquíferos. A extensão relativa desses aquíferos pode ser tão grande quando comparada ao reservatório aos quais estão conectados a ponto de parecer infinita para todos os propósitos práticos. Ou podem ser tão pequenos que seus efeitos no desempenho do reservatório são negligenciáveis. Sua comunicação hidráulica com a zona de óleo são muito variáveis também.

O aquífero pode ser confinado inteiramente por rocha impermeável de forma que o reservatório e o aquífero formam uma única unidade volumétrica fechada. Em outros casos, o aquífero pode aflorar em um ou mais lugares, podendo ser reabastecido por água da superfície.

A produção é função da movimentação da água para dentro do espaço poroso originalmente ocupado por óleo, substituindo o óleo e o deslocando para os poços produtores.

O fator de recuperação proveniente deste mecanismo costuma ser muito maior que o devido a qualquer outro mecanismo de produção.

Segregação Gravitacional

A segregação gravitacional corresponde à manifestação do efeito da gravidade, que arranja os fluidos dentro do reservatório de acordo com suas massas específicas e ajuda no desempenho dos outros mecanismos.

Combinado

Este mecanismo ocorre em situações quando mais de um mecanismo atua simultaneamente no mesmo reservatório, sem que um predomine sobre o outro.

2.3.2 Métodos de Recuperação Suplementar: Convencionais e Especiais

Os métodos de recuperação suplementares são aplicados para obter uma produção maior do que se obteria contando apenas com a energia natural do reservatório.

Não há uma nomenclatura bem definida na literatura para classificar os métodos de recuperação. Ora tentou-se uma classificação em relação às etapas cronológicas em que os diferentes métodos (de recuperação primária, secundária, terciária) são aplicados, ora uma classificação em relação a natureza do processo (não miscível, miscível, etc). Ambas são susceptíveis à confusão.

A descrição seguinte foi baseada em THOMAS [68], que considera o nível de conhecimento tecnológico do método.

- Os primeiros métodos de recuperação baseavam-se no fornecimento de pressão ao reservatório por meio da injeção de um fluido cujas finalidades eram deslocar o fluido residente no meio poroso e ocupar o espaço deixado nele. A esses métodos dá-se o nome de Métodos Convencionais de Recuperação. Nestes métodos busca-se, com a injeção de fluido (água ou gás), um comportamento estritamente mecânico cuja finalidade é deslocar o óleo para fora do meio poroso, sem qualquer interação, térmica ou química, entre os fluidos ou entre os fluidos e a rocha. Os fatores relacionados a estes métodos são, principalmente, ao projeto de injeção, ou seja, a disposição dos poços produtores e injetores, o esquema de injeção e o tipo de fluido injetado (água ou gás).
- Outros métodos ainda foram criados a fim de, basicamente, sanar limitações dos métodos convencionais. A esses métodos dá-se o nome de Métodos Especiais de Recuperação. Eles agem segundo duas estratégias principais. Uma é diminuir a viscosidade do óleo residente, pois quando a viscosidade do fluido injetado é muito menor que a do fluido a ser deslocado, o primeiro se move muito mais facilmente no meio poroso, encontrando caminhos preferenciais e se dirigindo rapidamente para os poços produtores, deixando para trás o óleo contido no reservatório. A outra é diminuir tensões interfaciais, para que a capacidade do fluido injetado de deslocar o fluido residente seja aumentada. Os métodos de recuperação especiais podem se classificados em três categorias (THOMAS [68]):
 - o Métodos térmicos: visam a diminuição da viscosidade do óleo através do seu aquecimento, aumentando a sua mobilidade e facilitando o seu deslocamento pelo fluido deslocante. O aquecimento pode se fazer principalmente por injeção de vapor ou por combustão *in situ*;
 - o Métodos miscíveis: visam reduzir substancialmente ou até mesmo eliminar as tensões interfaciais, aumentando a mobilidade do fluido residente, por meio da injeção de fluidos miscíveis (por exemplo, dióxido de carbono);
 - o Métodos químicos: visam uma certa interação química entre o fluido injetado e o fluido do reservatório e não existe um único objetivo como nos outros métodos;
 - o Outros métodos: que não se enquadram nos citados acima, como microbiológicos e magnéticos.

Todos os métodos, de alguma forma, tentam alterar as interações energéticas nos fluidos, entre os fluidos e entre rochas e fluidos.

2.4 PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

2.4.1 Método do Balanço de Materiais

A equação de balanço de materiais (EBM) é uma ferramenta básica dos engenheiros de reservatório. Aplicada apropriadamente, ela pode servir para:

- estimar os volumes iniciais de hidrocarbonetos *in situ*;
- calcular o influxo de água;
- prever a pressão do reservatório;
- prever a produção do reservatório;
- prever o fator de recuperação primária.

A EBM trata o reservatório como um tanque (região única) caracterizado por propriedades homogêneas de rocha e descrito por uma pressão média variável no tempo. Quer dizer, não se considera a variação espacial de pressão através do reservatório. Por isso, a EBM é comumente referida como um modelo 0-dimensional (0-D). Claro que estas hipóteses são irreais: os reservatórios são heterogêneos e há considerável variação nas pressões ao longo do reservatório. Ainda assim, é demonstrando que o modelo tipo tanque é capaz de prever aspectos importantes do comportamento do reservatório se os dados necessários estiverem disponíveis (COSENTINO [17]).

O conceito da EBM, introduzido por SCHILTIUS [60], é baseado apenas no princípio de balanço volumétrico: a variação acumulada dos fluidos é igual aos efeitos combinados de expansão de fluidos, compactação do volume poroso e influxo de água. Em sua forma mais simples, a equação pode ser escrita em uma descrição volumétrica como:

$$\text{volume inicial} = \text{volume retirado} + \text{volume remanescente} \quad (2.37)$$

Em condições de reservatório, a equação (2.37) pode ser expandida a partir da compreensão dos mecanismos envolvidos na produção (ROSA [57]):

$$\begin{aligned}
& \text{Variação do volume de óleo original e do gás associado} \\
& + \\
& \text{Variação do volume de gás da capa} \\
& + \\
& \text{Variação do volume de água conata na zona de óleo} \\
& + \\
& \text{Variação do volume de água contata na capa de gás} \\
& + \\
& \text{Variação do volume de poros} \\
& + \\
& \text{Injeção acumulada de água} \\
& + \\
& \text{Injeção acumulada de gás} \\
& + \\
& \text{Influxo acumulado de água} \\
& = \\
& \text{Produção de fluidos (óleo, gás e água) medida} \\
& \text{nas condições atuais (p,T) do reservatório}
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Em termos matemáticos, a equação (2.38) pode ser escrita como¹⁰

$$\begin{aligned}
& N(B_t - B_{ti}) + \frac{mNB_{ti}}{B_{gic}}(B_{gc} - B_{gic}) + \frac{NB_{ti}S_{wio}}{1 - S_{wio}} \left(\frac{B_{tw} - B_{twi}}{B_{twi}} \right) + \\
& \frac{mNB_{ti}S_{wig}}{1 - S_{wig}} \left(\frac{B_{tw} - B_{twi}}{B_{twi}} \right) + \left(\frac{NB_{ti}}{1 - S_{wio}} + \frac{mNB_{ti}}{1 - S_{wig}} \right) c_f \Delta p + W_{inj} B_{winj} + G_{inj} B_{ginj} + W_e \\
& = N_p [B_t - (R_{si} - R_s) B_g] + N_p (R_p - R_s) B_g + W_p B_w
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Essa equação geral pode ser simplificada quando casos particulares estão em questão, a depender dos mecanismos de produção mais atuantes no reservatório (ROSA [57]).

O simulador de reservatórios ECLIPSE [61] oferece uma opção para gravar no arquivo de saída uma análise do balanço de materiais. Nesse caso o simulador quantifica a

¹⁰ O detalhamento da dedução de cada uma das parcelas que compõem a equação (2.39) pode ser encontrado em Rosa [57], no apêndice E.

proporção de óleo produzido por cada processo físico dentre os acima descritos, acumulando durante a simulação. Essas informações são disponibilizadas em forma de curvas que representam o balanço para todo o campo. Uma descrição desta opção pode ser encontrada em SCHLUMBERGER [62]¹¹, onde são explicados cada mecanismo de recuperação e suas correspondentes formulações matemáticas, tal como foram implementados, visto que as informações utilizadas para os cálculos são obtidas no próprio resultado da simulação. Essa opção é referida aqui também por ser análoga ao que é proposto nesta dissertação para o balanço de energia.

Modelos de aquífero

Existem vários modelos para o cálculo do influxo de água proveniente de aquífero (ROSA [57]): van Everdingen & Hurst, Fetkovich, Hurst modificado, Carter-Tracy, Leung e Allard & Chen. Trata-se de modelos analíticos, cuja validade é limitada a casos onde hipóteses mais ou menos restritas são respeitadas.

Por exemplo, o modelo de Fetkovich se aplica a aquíferos finitos e admite que o fluxo do aquífero para o reservatório se dá sob o regime pseudopermanente. O modelo de van Everdingen & Hurst é composto de modelos clássicos de influxo para dois tipos de aquífero: radial e linear. Sua solução baseia-se no fato das equações diferenciais que descrevem o fluxo no aquífero serem as mesmas que descrevem o fluxo de fluidos no reservatório. Porém, como não se tem controle sobre a vazão no contato reservatório-aquífero, a equação diferencial que rege o fluxo no aquífero é resolvida supondo que a pressão no contato mantenha-se constante. O modelo de Carter-Tracy é aplicável a qualquer geometria de fluxo, desde que se conheça a solução para a pressão adimensional em função do tempo para a geometria de aquífero considerada; é o método de Everdingen & Hurst modificado, que não requer o teorema de superposição utilizado na solução matemática rigorosa do modelo original.

2.4.2 Simulação de Reservatórios

A simulação numérica de reservatórios é hoje o método padrão para previsão do comportamento de reservatórios de petróleo. Sem dúvida é a ferramenta que consegue tratar do maior número de complexidades no problema.

¹¹ A descrição da opção está no Capítulo 43, “*Recovery Mechanisms*”, página 686.

Nesta seção é apresentado o modelo matemático do sistema utilizado para simular computacionalmente um reservatório de petróleo. A movimentação de fluidos dentro do meio poroso é governada pela conservação de massa, quantidade de movimento e energia (uma discussão sobre essas leis pode ser encontrada, por exemplo, em MALVERN [37]), como qualquer outro problema de Mecânica dos Fluidos. Porém, em vez de aplicar diretamente a equação de quantidade de movimento, é utilizada a Lei de Darcy (DARCY [20]), uma abordagem semi-empírica que descreve uma relação linear entre a velocidade do fluido e o gradiente da altura piezométrica.

Existem dois tipos de modelagem do fluido importantes na engenharia de reservatório (AZIZ [4]): composicional e *black oil*. No primeiro, considera-se o fluxo monofásico ou multifásico onde mais de dois componentes de hidrocarbonetos são utilizados. No segundo, considera-se fluxo multifásico onde o sistema de hidrocarbonetos pode ser aproximado por dois componentes, um componente não volátil (óleo) e um componente volátil (gás) solúvel na fase óleo. Ambos modelos são apresentados nesta seção.

Diversos métodos numéricos podem ser aplicados para a solução dessas equações. Ainda nesta seção serão apresentadas algumas características do método de discretização CVFD (*Control Volume Finite Difference*), utilizado pelos simuladores comerciais disponíveis atualmente, visando mostrar algumas características do método importantes para o desenvolvimento e entendimento do trabalho.

Formulação Matemática

Do ponto de vista matemático, o problema é definido em um domínio $\Omega \subset R^3$, com contorno Γ equipado com um vetor normal unitário externo $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$. O vetor posição é representado por $\mathbf{x} = (x, y, z)$.

Equações Governantes

O problema de escoamento multifásico e isotérmico de fluidos imiscíveis em regime transiente através de meios porosos é governado pelas equações da continuidade e do movimento, respectivamente (MASSARANI [38]),

$$\frac{\partial(\phi S_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{u}_i) - \tilde{q}_i = 0, \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial(\phi \rho_i \mathbf{v}_i)}{\partial t} + \mathbf{v}_i \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{v}_i) - \nabla \cdot \sigma_i = \rho_i \mathbf{g}, \quad (2.41)$$

onde $\mathbf{u}_i$ é a velocidade de escoamento, $\mathbf{v}_i$ é a velocidade intersticial de escoamento, ρ_i é a massa específica, $\tilde{q}_i$ é a vazão mássica por unidade de volume, s_i é a saturação e σ_i é o tensor tensão, todas em relação à fase i . A porosidade do meio é ϕ e $\mathbf{g}$ é o vetor campo gravitacional (equação (2.7)).

A velocidade superficial de escoamento, utilizada amplamente em substituição à velocidade intersticial, é medida desconsiderando a presença da matriz porosa (MASSARANI [38] *apud* MENDONÇA [41]). As velocidades superficial e intersticial se relacionam como

$$\mathbf{u}_i = \phi \mathbf{v}_i \quad (2.42)$$

Na modelagem de um problema constituído por n fases são necessárias equações da continuidade e do movimento para cada fase existente.

A equação da quantidade de movimento (2.41), usualmente é substituída pela Lei de Darcy (AZIZ *et al.* [4]). Para HELMIG [29], a utilização da Lei de Darcy representa a transição da escala microscópica para a escala macroscópica. Esta aproximação é válida para problemas de escoamentos de fluidos envolvendo formações geológicas, como por exemplo reservatórios de petróleo e aquíferos (PERRY *et al.* [44]), cujo escoamento é lento, com número de Reynolds, grandeza que expressa o balanço entre os efeitos convectivos e os efeitos viscosos, menor que um (HELMIG [29]).

A Lei de Darcy, generalizada para o caso de escoamento multifásico de fluidos imiscíveis, tem a forma (AZIZ e SETTARI [4])

$$\mathbf{u}_i = -\frac{k_{ri}}{\mu_i} \mathbf{K} (\nabla p_i + \rho_i \mathbf{g}), \quad (2.43)$$

onde k_{ri} é a permeabilidade relativa, que é a capacidade de transmissão de um fluido em presença de outros no meio poroso, μ_i é a viscosidade dinâmica, todos em relação à fase i . Se a direção da coordenada vertical for para baixo (isto é, a profundidade z) podemos escrever (AZIZ e SETTARI [4] e CHEN *et al.* [13])

$$\rho_i \mathbf{g} = -\rho_i g \nabla z \quad (2.44)$$

onde g é a magnitude da aceleração gravitacional. Substituindo a equação (2.44) na equação (2.43), temos

$$\mathbf{u}_i = -\frac{k_{ri}}{\mu_i} \mathbf{K} (\nabla p_i - \rho_i g \nabla z) \quad (2.45)$$

Na equação (2.43), $\mathbf{K}$ é o tensor permeabilidade absoluta, ou simplesmente permeabilidade

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}. \quad (2.46)$$

A permeabilidade (absoluta) é a capacidade de transmissão de um fluido que satura 100% o meio poroso. É usual considerar o tensor permeabilidade absoluta simétrico (SCHLUMBERGER [62]), isto é, $k_{xy} = k_{yx}, k_{yz} = k_{zy}, k_{zx} = k_{xz}$.

É conveniente escrever a equação da conservação de forma que o termo gravitacional não apareça explicitamente. Isto é possível através da definição do pseudo-potencial, introduzido por HUBBERT [30] *apud* AZIZ [4], CHEN *et al.* [13]

$$\Phi_i = \int_{p_{ref}}^p \frac{1}{\rho_i g} dp - z \quad (2.47)$$

Para um fluido estático, a variação da pressão CHEN *et al.* [13]

$$\Phi_i = p_i - \rho_i g z. \quad (2.48)$$

O potencial real, quer dizer, a pressão piezométrica, só pode ser utilizada para escoamentos incompressíveis (AZIZ e SETTARI [4]). Sob essa situação, quando ρ_i constante e ainda $p_{ref} = 0$, o pseudo-potencial e a pressão piezométrica se relacionam pela expressão

$$\Phi'_i = \rho_i g \Phi_i. \quad (2.49)$$

Logo, a Lei de Darcy (equação(2.45)) pode ser escrita como, fazendo $\gamma_i = \rho_i g$,

$$\mathbf{u}_i = -\frac{k_{ri}}{\mu_i} \mathbf{K} \gamma_i \nabla \Phi_i \quad (2.50)$$

Substituindo a Lei da Darcy (equação (2.43)) na equação de continuidade (equação (2.40)), temos

$$\frac{\partial(\phi S_i \rho_i)}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\rho_i \frac{k_{ri}}{\mu_i} \mathbf{K} (\nabla p_i - \rho_i g \nabla z) \right) - \tilde{q}_i = 0, \quad (2.51)$$

ou em termos do potencial

$$\frac{\partial(\phi S_i \rho_i)}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\rho_i \frac{k_{ri}}{\mu_i} \mathbf{K} \gamma_i \nabla \Phi_i \right) - \tilde{q}_i = 0. \quad (2.52)$$

Essa é a forma geral das equações para o caso de escoamento multifásico de fluidos imiscíveis através de meios porosos.

O modelo matemático completo para o problema deve ainda contar com duas relações suplementares. Uma relaciona as saturações das fases, a fração de volume poroso ocupado por elas,

$$\sum_{i=1}^n S_i = 1, \quad (2.53)$$

e a outra relaciona as pressões das fases através do conceito de pressão capilar, uma descontinuidade na pressão do fluido que ocorre ao longo da interface entre dois fluidos imiscíveis dentro do meio poroso, como consequência da tensão existente na interface. A pressão capilar é uma função da saturação do fluido e pode ser expressa como

$$p_{c\alpha\psi} = p_\alpha - p_\psi = f(S_1, \dots, S_n) \forall \alpha, \psi, \alpha \neq \psi. \quad (2.54)$$

Nas equações (2.53) e (2.54) n representa o número de fases existentes no sistema. Na equação (2.54), α é a fase não molhante e ψ a fase molhante.

Em processos multifásicos a pressão capilar pode ser expressa como uma função da saturação apenas da fase molhante e da direção da mudança de saturação (drenagem ou embebição) (CHEN *et al.* [13]). Vários autores apresentam diferentes relações entre as curvas de pressão capilar e a saturação da fase molhante. MENDONÇA [41] apresenta um apanhado de alguns desses modelos.

O Modelo Black Oil

O modelo *black oil* (ou Modelo β) (AZIZ e SETTARI [4]) assume que há no máximo 3 fases distintas no escoamento: óleo, água e gás. Os fluidos estão em temperatura constante e em equilíbrio termodinâmico em todo o reservatório. Sob essas condições o comportamento de pressão-volume-temperatura (PVT) do sistema pode ser expresso pelos fatores de volume de formação B . O fator de volume de formação para uma fase i é definido como

$$B_i = \frac{V_i|_{RC}}{V_i|_{STC}}. \quad (2.55)$$

As densidades das fases em condições de reservatórios (RC) e em condições de superfície (STC) podem ser expressas em função de seus fatores de formação de volume como

$$\rho_i = \frac{1}{B_i} (\rho_i|_{STC}). \quad (2.56)$$

Substituindo a equação (2.56) na equação (2.51) e dividindo a equação pela massa específica da fase em condições de superfície e dividindo o termo fonte pelo respectivo fator volume de formação da fase, pois usualmente as vazões são especificadas em condições de superfície, temos

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_i}{B_i} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{k_{ri}}{B_i \mu_i} \mathbf{K} \left(\nabla p_i - \frac{g \nabla z}{B_i} \right) \right) - \frac{q_i}{B_i} = 0, \quad (2.57)$$

a equação do escoamento da fase i do modelo *black oil*.

Os fatores de volume de formação para as fase óleo, água e gás, as fases presentes em um modelo *black oil*, são, respectivamente

$$B_o = \frac{(V_o + V_{dg})|_{RC}}{V_o|_{STC}}, \quad (2.58)$$

$$B_w = \frac{V_w|_{RC}}{V_w|_{STC}}, \quad (2.59)$$

$$B_g = \frac{V_g|_{RC}}{V_g|_{STC}}. \quad (2.60)$$

A transferência de massa da fase gás para a fase óleo é definida pela razão gás-óleo

$$R_s = \frac{V_{dg}}{V_o} \Big|_{STC}, \quad (2.61)$$

que expressa a quantidade de gás dissolvida no óleo.

Escrevendo também as massas específicas para as fases do modelo em questão,

$$\rho_o = \frac{1}{B_o} (\rho_o|_{STC} + R_s \rho_g|_{STC}), \quad (2.62)$$

$$\rho_w = \frac{1}{B_w}(\rho_{wSTC}), \quad (2.63)$$

$$\rho_g = \frac{R_s}{B_o}(\rho_{gSTC}). \quad (2.64)$$

Reescrevendo a Equação (2.57) para as fases óleo e água obtemos

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} \mathbf{K} \left(\nabla p_o - \frac{g \nabla z}{B_o} \right) \right) - \frac{q_o}{B_o} = 0 \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{k_{rw}}{B_w \mu_w} \mathbf{K} \left(\nabla p_w - \frac{g \nabla z}{B_w} \right) \right) - \frac{q_w}{B_w} = 0 \quad (2.66)$$

que são, respectivamente, as equações para o escoamento da fase óleo e fase água do sistema.

Como o componente gás existe tanto na fase gás quanto dissolvido na fase óleo, sua massa total no sistema, seu fluxo de massa total e termo fonte valem, respectivamente,

$$\phi \rho_g S_g = \phi \left[S_{fg} \rho_{fg} + S_o \rho_{dg} \right], \quad (2.67)$$

$$\rho_g \mathbf{v}_g = \rho_{fg} \mathbf{v}_{fg} + \rho_{dg} \mathbf{v}_o, \quad (2.68)$$

$$q_g = q_{fg} + q_o R_s. \quad (2.69)$$

Substituindo as equações (2.67), (2.68) e (2.69) na equação(2.57), chegamos à equação para o escoamento da fase gás do sistema

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \left(\frac{R_s}{B_o} S_o + \frac{S_g}{B_g} \right) \right) - \nabla \cdot \left(\frac{R_s}{B_o} \frac{k_{ro}}{\mu_o} \mathbf{K} \left(\nabla p_o - \frac{g \nabla z}{B_o} \right) + \frac{1}{B_g} \frac{k_{rg}}{\mu_g} \mathbf{K} \left(\nabla p_g - \frac{g \nabla z}{B_g} \right) \right) - \frac{q_{fg}}{B_g} - R_s \frac{q_o}{B_o} = 0 \quad (2.70)$$

A transmissibilidade é definida como

$$\mathbf{T}_i = \rho_i \frac{k_{ri}}{\mu_i} \mathbf{K} = \frac{1}{B_i} \frac{k_{ri}}{\mu_i} \mathbf{K} = \frac{\lambda_i}{B_i} \mathbf{K}, \quad (2.71)$$

onde λ_i é a mobilidade da fase i .

As pressões das fases água e gás são obtidas escrevendo a equação (2.54) para as respectivas fases

$$p_{cow} = p_o - p_w \therefore p_w = p_o - p_{cow}, \quad (2.72)$$

$$p_{cog} = p_g - p_o \therefore p_g = p_o + p_{cog}. \quad (2.73)$$

e reescrevendo a equação (2.53) para fases presentes no sistema

$$S_o + S_w + S_g = 1, \quad (2.74)$$

chegamos a formulação matemática completa para o escoamento multifásico imiscível em meios porosos, utilizando como relação constitutiva a Lei de Darcy, para um modelo *black oil*.

Modelo de Rocha e Fluidos Ligeiramente Compressíveis

As equações governantes do escoamento de fluidos em um meio poroso, como foi apresentado, dependem de propriedades de rocha e fluidos deste meio.

Tomando como hipótese que os fluidos são ligeiramente compressíveis, é possível assumir que a compressibilidade do fluido definida por (AZIZ e SETTARI [4])

$$c_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \bigg|_T \quad (2.75)$$

é constante dentro de um intervalo de pressão de interesse. Integrando, temos

$$\rho = \rho_{ref} e^{c_p(p-p_{ref})} \quad (2.76)$$

que usando a expansão em série de Taylor, vemos que

$$\rho = \rho_{ref} \left[1 + c_p (p - p_{ref}) + \frac{1}{2!} c_p^2 (p - p_{ref})^2 + \dots \right]$$

e aproximando apenas pelo termo linear, chegamos a

$$\rho \approx \rho_{ref} \left[1 + c_p (p - p_{ref}) \right]. \quad (2.77)$$

A compressibilidade da rocha é definida por

$$c_\varphi = \frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dp} \quad (2.78)$$

que depois de feita a integração se torna

$$\varphi = \varphi_{ref} e^{c_\varphi(p-p_{ref})} \quad (2.79)$$

onde φ_{ref} é a porosidade a uma pressão de referência p_{ref} . Usando uma expansão em série de Taylor, vemos que

$$\varphi = \varphi_{ref} \left[1 + c_\varphi (p - p_{ref}) + \frac{1}{2!} c_\varphi^2 (p - p_{ref})^2 + \dots \right]$$

e aproximando apenas pelo termo linear, temos que

$$\varphi \approx \varphi_{ref} \left[1 + c_\varphi (p - p_{ref}) \right] \quad (2.80)$$

onde c_φ é comparável à compressibilidade da água e tal como pode ser assumido como constante (AZIZ e SETTARI [4]).

Modelo de Aquífero

Em estudos de simulação numérica de reservatórios, os aquíferos podem ser representados de duas formas: aquíferos analíticos ou aquíferos numéricos. Dois tipos de aquíferos são utilizados largamente em simulações de reservatórios (CMG [14]): o modelo de Carter-Tracy e o de Fetkovich, ambos brevemente descritos na seção 2.4.1. Aquíferos numéricos são representados pela inclusão de células adicionais na malha de simulação. Os aquíferos numéricos são representados computando termos fonte nas células da malha do reservatório com as quais eles se conectam. Critérios para a escolha do modelo de aquífero podem ser encontrados em, por exemplo, (CMG [15] e SCHLUMBERGER [62]), bem como as vantagens e desvantagens de utilização dos modelos.

Métodos Numéricos para Solução das Equações Governantes

Para os casos mais gerais as equações que governam o escoamento no reservatório não podem ser resolvidas por métodos analíticos. Recorre-se, então, a modelos numéricos resolvidos por computadores digitais. Desde os anos 50, quando os computadores digitais se tornaram amplamente disponíveis, modelos numéricos são utilizados para prever, entender, e otimizar processos físicos de escoamento de fluidos em reservatórios de petróleo. Uma descrição sobre a evolução desses métodos, bem como a indicação de suas vantagens e desvantagens pode ser encontrada em CHEN *et al.* [13].

Os simuladores comerciais atuais, quase todos, utilizam um modelo de discretização das equações bastante tradicional. Suas soluções são baseadas no método CVFD (*Control Volume Finite Difference*). Esse método, diferente do método de diferenças finitas convencional (MDF), permite que malhas irregulares (suas células não têm necessariamente o mesmo tamanho e forma) sejam utilizadas na discretização do espaço. Porém, como no MDF, as malhas são estruturadas, quer dizer, adotam um padrão implícito de conectividades, têm a mesma topologia, com um número determinado de lados e vizinhos laterais, e seu espaço físico pode ser naturalmente mapeado em um espaço computacional, definidos por índices.

Além da sua forma, o objeto malha ainda carrega as propriedades associadas a cada uma de suas posições. As principais formas de representá-las são: associar as propriedades a

nós da malha ou associar propriedades a células da malha. Na caracterização de reservatórios a segunda abordagem é a mais adotada (ROMEUE [53]). As propriedades associadas dessa forma representam valores médios das células, tomadas como constantes em seu domínio.

Neste contexto, internamente nos simuladores de escoamento, a malha de células é convertida em uma rede formada por dois tipos de elementos: nós e conexões internodais. A cada centro de célula é associado um nó, que se comunica com os nós vizinhos da estrutura da malha por conexões internodais Figura 2.3.

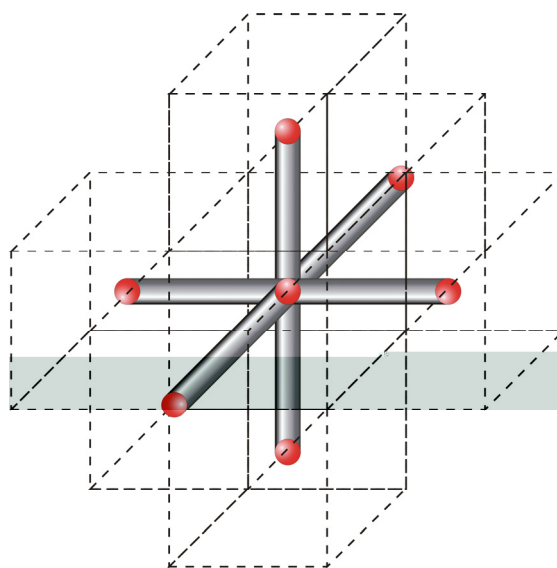


Figura 2.3 – Representação das malhas nos simuladores de escoamento: a cada célula é associado um nó, e nós vizinhos são comunicados por conexões internodais (adaptado de ROMEUE [53]).

Todas as propriedades e variáveis usadas na simulação são atribuídas ou aos nós ou às conexões internodais, como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades e Variáveis Associadas a Nós e Conexões nas malhas de Simulação e Escoamento (ROMEUE [53]).

	Propriedades	Variáveis
Nós	Centro de Gravidade Volume poroso Compressibilidade	Pressões Saturações
Conexões	Transmissibilidades	Fluxos

Uma outra função de interesse da malha é a exibição dos resultados da simulação em regiões de interesse.

Simuladores de Reservatório

Em geral, um simulador de fluxo convencional deve atender ao fluxograma ilustrado na Figura 2.4.

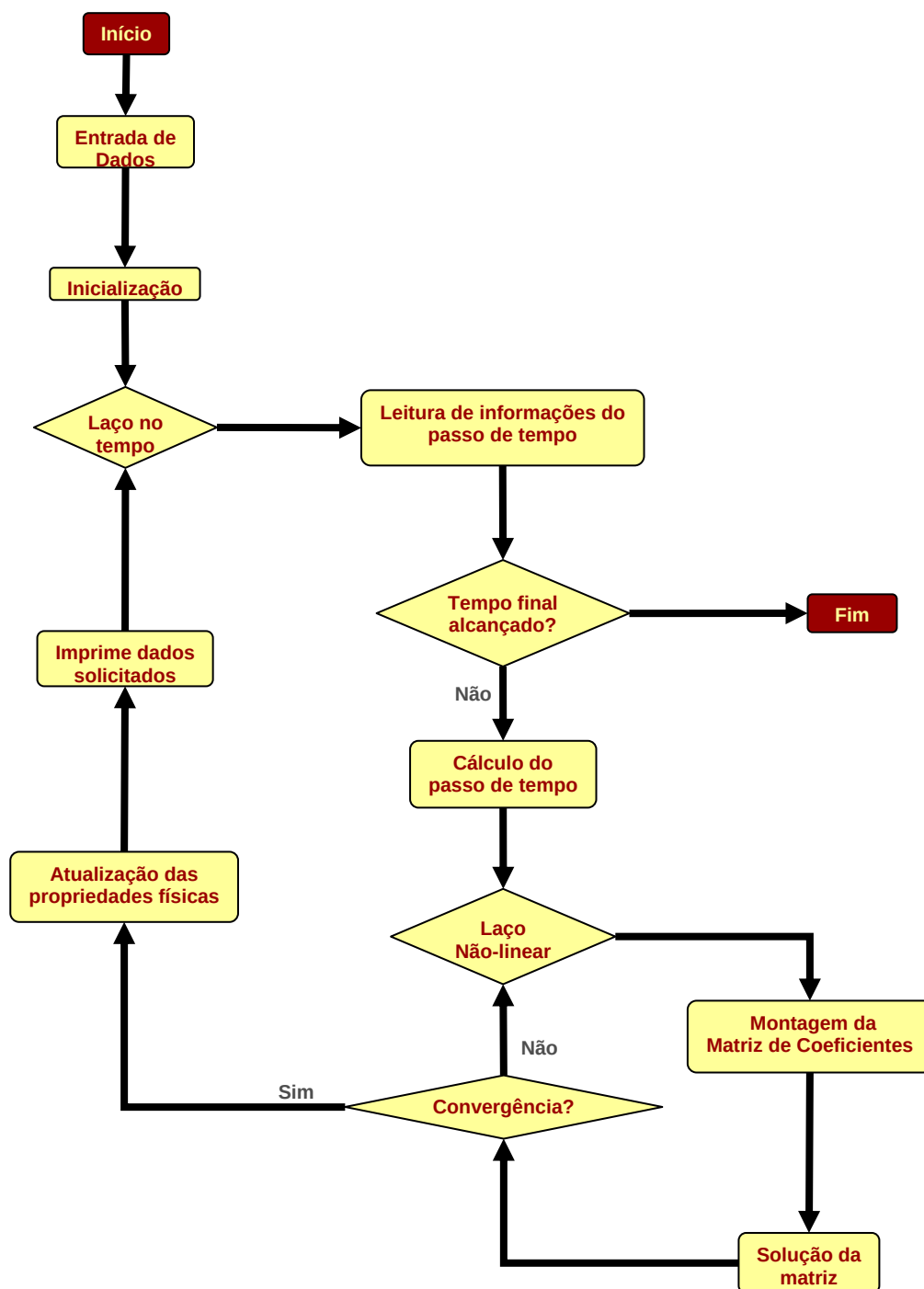


Figura 2.4 - Fluxograma convencional de um simulador de fluxo.

De forma resumida e esquemática, o fluxograma funciona como se segue: a entrada de dados é realizada através de arquivos-texto que são editados a mão ou através de softwares de pré-processamento, como o *Builder* [14], o pré-processador do simulador IMEX. Este arquivo contém todos os dados do modelo: malha, propriedades petrofísicas, inicialização, dados dos fluidos, informações dos poços e cronograma de

exploração. O modelo é inicializado (são resolvidos o equilíbrio entre os fluidos, calculadas as transmissibilidades internodais, calculado o volume poroso, etc.). A simulação do reservatório ao longo do tempo é realizada através da leitura das informações de controles, etc., contidas em seções específicas para cada data determinada. Até que a data final seja alcançada, a cada passo de tempo, é realizada a solução do escoamento no reservatório, um problema não-linear, resolvendo as variáveis primárias do modelo (pressão de óleo e saturações, em geral). Uma vez convergido para a solução do passo de tempo, as variáveis físicas do modelo são atualizadas (como densidades, viscosidades, etc). As informações requisitadas para serem contidas no arquivo de saída são então impressas.

Os simuladores disponibilizam nestes arquivos de saída de dados para a reinicialização de uma simulação e para integração de softwares de terceiros¹² para pós-processamento. Alguns deles disponibilizam uma documentação fornecendo o formato de seu arquivo de saída, como é o exemplo do ECLIPSE [63].

2.4.3 Otimização Dinâmica da Estratégia de Exploração de Reservatórios de Petróleo

A atividade de Engenharia de Petróleo se vê cotidianamente envolvida numa série de problemas de otimização em variados contextos. Em todas as etapas da cadeia de trabalho da indústria de óleo e gás é possível dedicar-se a problemas que necessitam de otimização, em maior ou menor escala, com maior ou menor complexidade. Dentro da Engenharia de Reservatório, há um grande interesse ligado à Otimização Dinâmica das Vazões de Produção e Injeção dos poços, considerando restrições das vazões totais da plataforma (OLIVEIRA [42]).

OLIVEIRA *et al.* [43] estudou algoritmos de otimização que não utilizam a informação das derivadas – da função objetivo (*F.O.*) ou das restrições – aplicados a modelos completos de simulação de reservatórios. O melhor desempenho dentre os algoritmos foi obtido pelo *Derivative Free Optimization* (DFO) (disponível em [10]), que obteve resultados expressivos na função objetivo com um número de simulações bem inferior aos demais.

¹² ou *third party software*.

O DFO, desenvolvido por CONN *et al.* [11], é considerado para minimização de funções não lineares suficientemente suaves, com muitas variáveis e sem disponibilidade da informação sobre as derivadas da função. Sob condições razoáveis, este algoritmo é globalmente convergente. O principal elemento desse algoritmo é a aproximação da *F.O.* por um modelo quadrático que é usado para resolver um problema de minimização restrito à região de confiança.

A partir dos melhores resultados de otimização obtidos por OLIVEIRA [42] percebe-se uma tendência à uniformização da frente de saturação de água, condizendo com indicações da literatura, bem como uma redução da diferença entre os tempos de irrupção de água nos dois poços. Exemplos da uniformização da frente de saturação através da aplicação de diversos algoritmos de otimização e casos podem ser observados em OLIVEIRA [42].

No estudo realizado por OLIVEIRA *et al.* [43], foi utilizado como *F.O.* uma versão simplificada do cálculo do VPL (valor presente líquido) do fluxo de caixa da operação do campo

$$f(\mathbf{x}_{p,t}) = \sum_{\tau=0}^T \left[\frac{1}{(1+d)^\tau} \cdot FC_\tau(\mathbf{x}_{p,t}) \right] \quad (2.81)$$

onde:

d é a taxa de desconto aplicada ao capital;

T é o tempo final (horizonte de tempo do projeto ou tempo de concessão do projeto);

FC_τ é o fluxo de caixa no tempo τ , tal que

$$FC_t(\mathbf{x}_{p,\tau}) = \sum_{l=0,w,wi} (P_{l,\tau} - C_{l,\tau}) \cdot q_{l,\tau} \cdot \Delta t$$

onde:

P_l é o preço de venda da fase l e aplica-se apenas ao óleo (o);

q_l é o vazão de produção ou injeção da fase l e aplica-se a fase óleo (o), água produzida (w) e injetada (wi);

C_l é o custo de manuseio de cada fase l - óleo (o), água produzida (w) e injetada (wi).

Em substituição a esse objetivo, foi utilizada a eficiência energética acumulada (equação (3.35)) até o momento de erupção da água.

As variáveis de controle são as vazões dos poços a cada intervalo de tempo. Através de opções de cada simulador, é especificado o rateio para distribuição das vazões de produção/injeção de grupos de modo a atender a uma meta para vazão total de produção/injeção. Então, ao longo de um número determinado de intervalos de tempo, é possível modificar o rateio de vazão dos poços¹³.

São consideradas restrições de limite das variáveis de controle, função da máxima e mínima vazão que cada poço pode operar. Adicionalmente, aplicam-se restrições da plataforma à vazão total de líquido produzido e à vazão total de injeção. Essas restrições são tratadas implicitamente na formulação do problema, já que estão definidas no simulador de fluxo. De acordo com a definição aplicada ao simulador de fluxo, a plataforma é mantida operando sempre em seus limites, de modo que temos duas restrições em igualdade no problema implicitamente definidas.

2.4.4 Pós-Processamento de Dados para Análise

A modelagem de reservatórios incorporou um grande número de funcionalidades especiais que permitem flexibilidade ao usuário. O resultado da simulação usualmente envolve alguns milhares de células, mas já não é incomum encontrar modelos que usam mais de centenas de milhares de células.

¹³ Diferentemente do que foi feito no experimento da seção 6.1, onde apenas a vazão no início da produção era controlada.

Para justificar o esforço de uma modelagem acurada, é necessário que ferramentas se tornem disponíveis para processar e analisar conjuntos de dados significativamente grandes. Para tanto, os modelos computacionais permitem a saída para arquivos que podem ser visualizados ou impressos em formatos de tabela e arquivos de saída binários muito maiores para pós-processamento. Independente se a modelagem é *black oil*, composicional ou térmica, mapas de propriedades distribuídas ao longo de todo o dado volumétrico podem estar disponíveis para visualização e análise.

MARSHAL *et al.*, *apud* SOUSA e MIRANDA [65], identificam três modelos de visualização interativa que podem ser aplicados levando em consideração o nível de interação entre a execução da simulação e a visualização das imagens desses resultados. São eles *tracking*, *steering* e pós-processamento. No modelo *tracking*, as imagens são visualizadas durante o cálculo numérico, e a única interação possível é abortar a simulação. No modelo *steering* há um controle direto da simulação durante sua execução, permitindo o usuário modificar os parâmetros da simulação durante o processo de visualização. Finalmente, no modelo de pós-processamento, um conjunto de dados é primeiro criado a partir da simulação. Depois, este conjunto de dados é utilizado como entrada para um sistema de visualização para saída gráfica e interação. Não há interações com os parâmetros do simulador e ou imagens geradas durante a execução da simulação. A principal vantagem deste modelo é que o dado pode ser examinado repetidamente utilizando diferentes técnicas de mapeamento.

Um pós-processamento muito utilizado na disciplina de simulação é a visualização. Esta ferramenta permite analisar graficamente os resultados numéricos, antes analisados através de longas tabelas numéricas de difícil interpretação, através de curvas e mapas de propriedades, quase impeditiva o seu aproveitamento prático à medida que o número de células da malha aumenta, fornecendo, primeiramente, de forma qualitativa, informações valiosas acerca da simulação.

Ferramentas de visualização permitem verificar a real forma que o modelo computacional se comporta, envolvendo respostas do reservatório baseada na simulação, determinando os mecanismos por trás da recuperação. Além disso, permite definir a forma física e estratificação dos reservatórios em adição à descrição dos comportamentos do fluxo dos fluidos e energia. Modelos de visualização 2D ainda são

freqüentemente utilizados para analisar resultados de simulação. Entretanto, a visualização de estruturas tri-dimensionais é essencial para o claro entendimento de eventos.

São identificados na literatura desenvolvimentos de ferramentas de pós-processamento na área de simulação de reservatórios. Porém, esses desenvolvimentos são focados para disponibilizar um pré e/ou pós-processador para um determinado simulador de fluxo, seja esse comercial ou um desenvolvimento interno de alguma empresa. Como exemplos dessas iniciativas podem ser citados o *Results* da CMG[15], ROGERS *et al.* [48], REGTIEN [49] e SANDOVAL [59].

SOUSA e MIRANDA [65] enumeram os requisitos básicos de uma arquitetura para pós-processamento (visualização):

- Aquisição de dados: manipulação dos arquivos de saída gerados por simuladores numéricos;
- Reconstrução dos dados: geometria do reservatório e propriedades são convertidas em um modelo passível de manipulação;
- Visualização dos dados: opções de visualização que permitam ao usuário a interagir com o modelo de reservatório.

REGTIEN *et al.* [49] apresentam a ferramenta *FrontEnd*, um *software* que serve como plataforma para simulações dinâmicas e aplicações de engenharia de reservatório. Quando acoplado ao simulador de fluxo *MoRes*¹⁴, ele pode ser utilizado para simulação interativa (o mesmo conceito que *steering*), permitindo ao engenheiro visualizar qualquer dos resultados enquanto o simulador está processando. A qualquer momento, entretanto, a simulação pode ser interrompida, mudar a entrada (por exemplo, controles de poço) e daí continuar. Exceto para a dimensão da malha e o número máximo de fases e componentes, todo dado pode ser alterado antes ou até mesmo depois da inicialização do reservatório.

Segundo este autor, tal simulação interativa aumenta a eficiência do engenheiro significativamente, pois, como os resultados estão disponíveis imediatamente, resultados

¹⁴ Trata-se do simulador de fluxo interno da empresa de petróleo SHELL.

incorretos podem ser detectados no ato, permitindo o usuário abortar a rodada e portanto liberar recurso computacional e cenários hipotéticos podem ser executados muito mais rápidos. Não é mais necessário esperar que o engenheiro reúna um conjunto de dados em um editor de textos ou em pré-processadores dedicados, submeter a rodada em modo lote, esperar pela sua execução e então investigar os resultados utilizando um programa de pós-processamento.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

“There is nothing more practical than a good theory” – L. Boltzmann

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O modelo matemático aqui descrito foi concebido por ROMEU *et al.* [55], em um trabalho ao qual esta tese se associou (ver nota de rodapé 1). Neste trabalho os autores desenvolvem expressões matemáticas e identificam as interações energéticas calculáveis a partir de um modelo *black oil* de escoamento em meios porosos através de casos de crescente complexidade do ponto de vista físico e indicam métodos de cálculo para os diversos termos de energia mecânica envolvidos no escoamento do reservatório. No desenvolvimento das formulações é utilizada a modelagem *black oil*, a mais comum na prática. Os casos descritos na modelagem original do problema servirão como exemplos de validação do modelo, descritos na seção 5.1.

Para a dedução dos diversos termos de energia mecânica envolvidos no escoamento do reservatório é utilizada uma metodologia comumente aplicada no Método dos Elementos Finitos (ainda que nenhuma aproximação utilizando Elementos Finitos seja utilizada) baseada no cálculo variacional. Parte-se da equação do escoamento multifásico em meios porosos e, partir de manipulações matemáticas, sem nenhuma consideração inicial sobre as parcelas e formas de energia presentes no reservatório, chega-se à equação de balanço de energia mecânica no reservatório, identificada através de análise dimensional. As expressões matemáticas são dadas por certas integrais, plenamente desenvolvidas aqui. Ao final, cada parcela será identificada como uma espécie de interação energética. A implementação computacional das expressões energéticas desenvolvidas nesse capítulo é discutida no CAPÍTULO 4.

3.1.1 Aspectos Termodinâmicos

Fazendo uso dos conceitos termodinâmicos introduzidos na seção 2.2 e conhecendo os mecanismos de produção que podem estar presentes em um reservatório de petróleo (seção 2.3), podemos caracterizar suas possíveis interações energéticas.

Os fenômenos termodinâmicos presentes nos reservatórios estão intimamente ligados aos mecanismos de produção apresentados na seção 2.3. É fácil notar que o fato de depletar o reservatório ou injetar fluidos nele implica na diminuição ou aumento de sua

capacidade de produção de fluidos nele contidos. Ou seja, o potencial energético do reservatório aumenta ou diminui em função de troca de massa e energia. A capacidade de capturar esses fenômenos está associada à escolha do volume de controle.

Como dito na seção 2.2 a escolha do volume de controle para a análise do sistema é teoricamente arbitrário, porém sua escolha adequada é de fundamental importância para um estudo prático. Diversas formas alternativas de escolher o volume de controle para a análise energética de um reservatório de petróleo mostram-se interessantes, cada uma com suas vantagens e desvantagens.

Uma primeira alternativa seria a escolha do volume de controle incluindo todos os componentes atuantes no sistema: capa de gás, reservatório de petróleo e aquífero, como mostrado na Figura 3.1. Exceto pela ação dos poços, todas as variações de energia nesse caso são observadas dentro do volume de controle, não há energia cruzando sua fronteira. Logo, não há trabalho de aquífero, capa de gás, etc, sendo realizado sobre ou pelo sistema. Variações de energia associadas a mecanismos internos ao sistema, dentro do volume de controle, como expansão de rocha e fluido, são capturados.

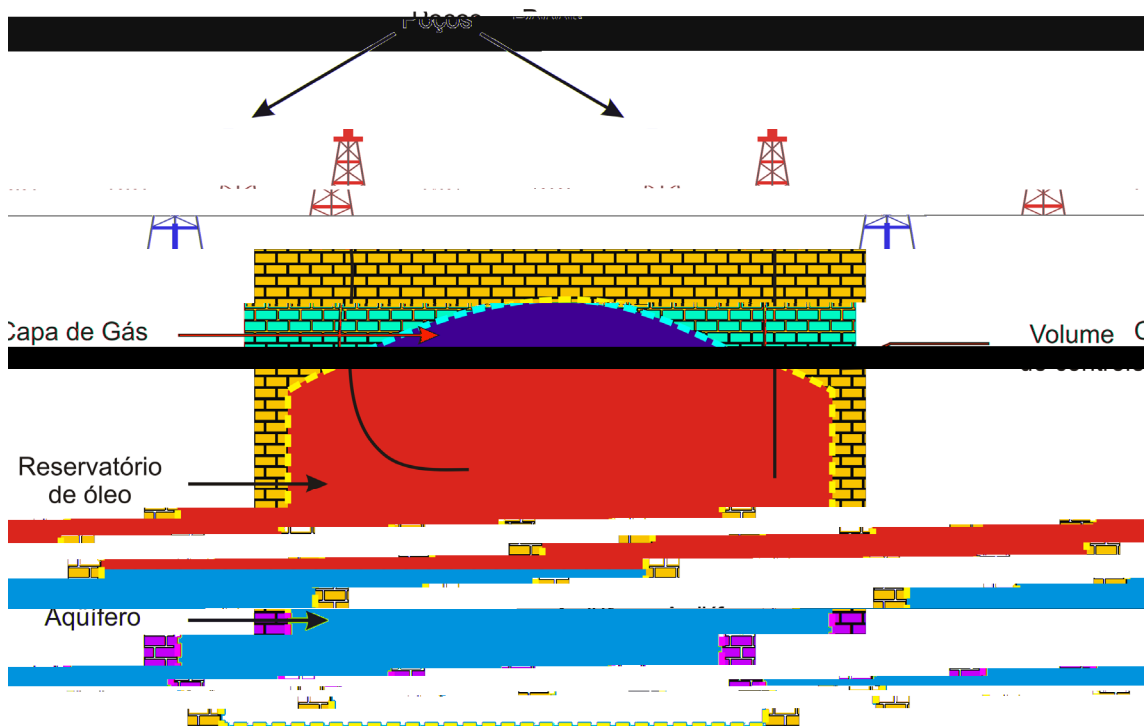


Figura 3.1 – Volume de controle compreendendo todos os componentes do sistema.

Na Figura 3.2 é mostrada outra alternativa, em que o volume de controle é selecionado de modo que apenas esse compreenda apenas a zona de óleo e os poços nele perfurados, excluindo capa de gás e aquífero originais.

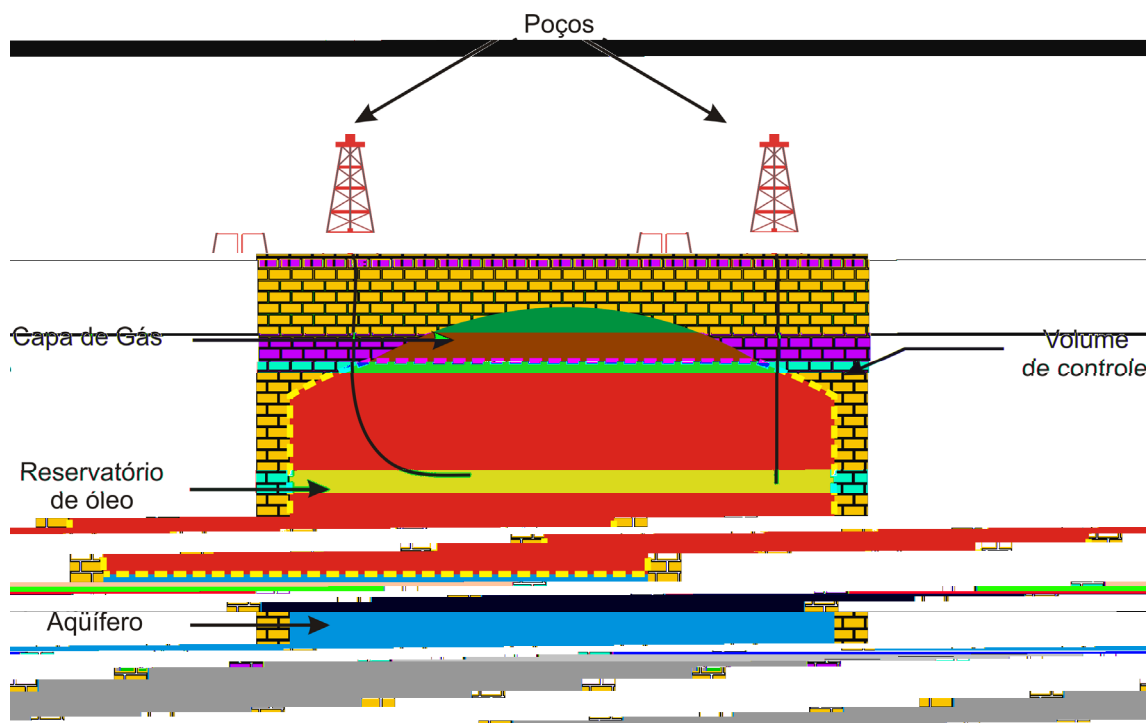


Figura 3.2 – Representação esquemática de um reservatório e sugestão de volume de controle.

Com o volume de controle selecionado desta forma, é possível reconhecer o trabalho realizado pela capa de gás sobre o volume de controle devido a sua expansão e o trabalho realizado pelo aquífero sobre o volume de controle, também devido a sua expansão. Nesta opção, como na opção representada na Figura 3.1, a injeção e produção de fluidos são tratadas como termos fonte.

Uma outra forma de escolher o volume de controle pode ser contornar com a sua fronteira os poços que participam do sistema (Figura 3.3). Desta forma é possível identificar a energia que cruza a fronteira em função da vazão dos poços, ou seja, o trabalho que entra ou que sai através deles.

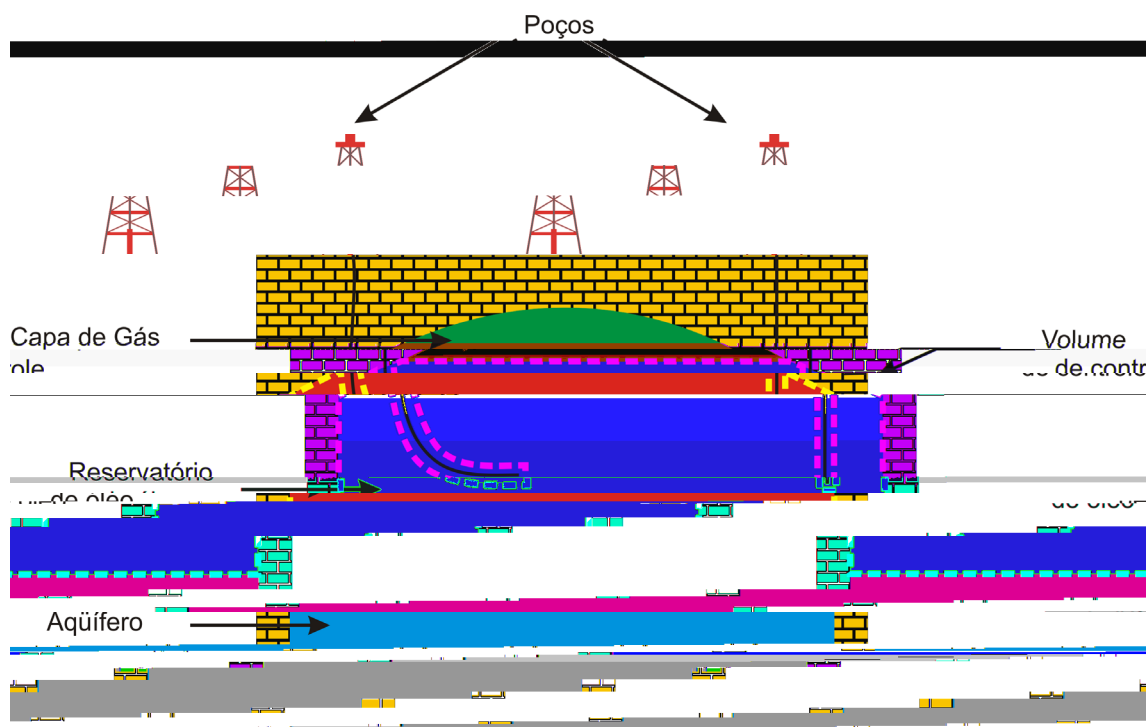


Figura 3.3 – Volume de controle contornando os poços.

Existem ainda diversas formas de selecionar o volume de controle: compreendendo todo o sistema capa de gás, reservatório de petróleo e aqüífero, não incluindo os poços no volume de controle, etc. Não serão representadas todas essas possíveis configurações, uma vez que a configuração representada na Figura 3.3 tem especial interesse para o desenvolvimento que será apresentado na seção 3.2.

O domínio de solução adotado é o volume de controle escolhido ilustrado na Figura 3.3, mostrado com mais detalhes na Figura 3.4.

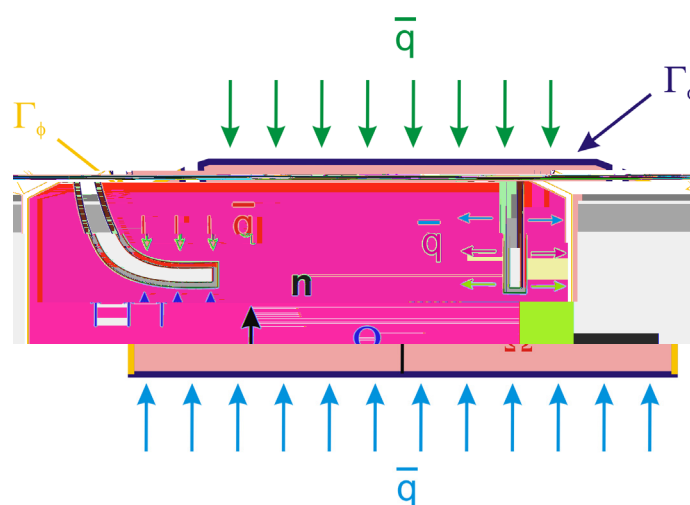


Figura 3.4 – Domínio de solução adotado.

O sistema rocha-fluido que ocupa o domínio Ω delimitado pela superfície de fronteira $\Gamma = \Gamma_q \cup \Gamma_\phi$, cujo vetor normal $\mathbf{n}$ aponta para dentro¹⁵ do sistema em cada posição. Conforme a situação e a conveniência, considerando o que foi discutido anteriormente, o domínio Ω pode ser definido de forma a incluir ou a excluir aquíferos e capas de gás ou mesmo de forma a incluir apenas uma parte arbitrária da zona de óleo, por interesse de alguma análise particular. Nesses últimos casos, o fluido pode entrar e sair do sistema não apenas pelos poços injetores e produtores, mas também atravessando porções permeáveis da fronteira, Γ_q .

Adotado, convenientemente, este volume de controle, o reservatório é um sistema aberto, de fronteira fixa (se não levarmos em consideração efeitos geomecânicos, como subsidência): há fluxo de massa cruzando suas fronteiras. Pode haver influxo de massa proveniente de poços injetores de fluidos (água, gás ou polímeros) quando neste há algum esquema de recuperação suplementar, ou proveniente de aquíferos adjacentes ao reservatório. Massa é retirada do sistema por meio de poços produtores.

A rocha reservatório — e não só o espaço poroso — faz parte do sistema, e, como sua fronteira é tratada como indeformável, a variação do tamanho dos poros, por efeito da compressibilidade da rocha, será tratada diretamente como variação da energia armazenada no sistema e não como trabalho (troca de energia entre sistema e vizinhança) por mudança no volume do sistema. Na interação entre sistema e vizinhança, a única variação volumétrica se dá por conta da entrada ou saída de fluidos pelos poços e pelas porções permeáveis da fronteira, associadas a trabalho de escoamento (seção 2.2.3).

O processo termodinâmico é adiabático (não há transferência de calor entre o reservatório e sua vizinhança), porém não é isotérmico devido à diferença de temperatura entre os fluidos *in situ* e os injetados. Porém, a discussão sobre possíveis variações térmicas dentro do sistema e possíveis trocas térmicas entre sistema e vizinhança é mais sutil. Basicamente, o sistema é tratado como isotérmico, principalmente no sentido em que se ignoram alterações das propriedades de rocha e fluido em função de alguma variação (admitida ou não) de temperatura. Também não se

¹⁵ consistentemente com a convenção adotada de sinais para vazão, trabalho e calor, tudo positivo quando passa da vizinhança para dentro do sistema (seção 2.2.2).

trata aqui de métodos térmicos de recuperação, como injeção de vapor e combustão *in situ*. Enfim, não se faz nenhuma modelagem de temperatura. Vale destacar que a modelagem *black oil* não prevê variação de temperatura no reservatório. Por outro lado, são bem reconhecidas as implicações energéticas do escoamento viscoso, conforme discutidas na seção 2.2.3: para vencer a resistência viscosa dentro do meio poroso, dissipa-se energia, que, em última instância, será armazenada como energia interna (normalmente implicando aumento de temperatura do sistema) ou será transferida como calor para a vizinhança. Essa parcela energética será convenientemente caracterizada aqui como “energia dissipada”. A energia dissipada, com esse nome, ainda está presente no sistema no momento da análise, um momento que é — pense-se assim — anterior à sua destinação final, sobre a qual a análise simplesmente não se interessa. Mas, a rigor, por coerência com a hipótese de que as propriedades de rocha e fluido não variam em função de temperatura, parece melhor reconhecer que a temperatura do sistema não muda mesmo e que a energia se dissipa (quase) instantaneamente como calor — ou que tudo se passa como se assim fosse. Ainda assim, prefere-se tratar esse termo como energia dissipada e não como calor, por ser mais expressivo e mais geral.

3.1.2 Aspectos Matemáticos

Lema Fundamental do Cálculo das Variações

Se uma integral $\int_{x_1}^{x_2} f(x) \cdot \eta(x) \cdot dx$ for nula para qualquer $\eta(x)$ (contínua e anulando-se em x_1 e x_2), então $f(x) = 0$ no intervalo $\rightarrow$ Lema Fundamental do Cálculo das Variações.

A função $\eta(x)$ é uma função qualquer desde que pertença ao espaço H^1 , das funções cujo gradiente têm norma quadrática integrável no espaço de interesse, isto é, $\int_{\Omega} |\nabla f|^2 dV < \infty$ (RIBEIRO [51]).

Funções que satisfazem esse requisito são chamadas **funções- H^1** , e escreve-se $f \in H^1$, e o conjunto de funções que têm norma quadrática integrável e respeita as condições de contorno do problema é chamado **funções-teste**, e escreve-se $\wp = \{u \mid u \in H^1, u = \bar{u} \text{ em } \Gamma\}$, onde $\bar{u}$ é o valor da função de contorno.

Outro conjunto de funções, chamado de **funções de ponderação**, ou **variações**, é bastante similar às funções-testes, porém devem satisfazer a condição $w = 0$ em Γ , e escreve-se $\varpi = \{w \mid w \in H^1, w = 0 \text{ em } \Gamma\}$.

Por definição, para empregar a regra de integração por partes é necessário e suficiente que as funções $\eta(x)$ e $f(x)$ sejam apenas diferenciáveis por partes no intervalo considerado.

Função Delta de Dirac

A distribuição Delta de Dirac (EDWARD e PENNEY [22]) ou, como costuma ser impropriamente chamada, a função Delta de Dirac, toma valor nulo em todo o seu domínio exceto em $x = 0$, ponto no qual é infinito. Esta função é normalmente representada por $\delta(x)$. Note-se que, a rigor, o Delta de Dirac não é uma função mas sim uma distribuição.

A intuição que reside por trás da chamada distribuição delta de Dirac é que a mesma representa a densidade de uma grandeza concentrada em um único ponto. Assim, se por exemplo, temos um ponto material de massa m localizado na posição x_0 da reta real dizemos que a densidade de massa desse ponto é dada por

$$\rho(x) = m\delta(x - x_0), \quad x, x_0 \in \mathbb{R} \quad (3.1)$$

onde $\delta(x)$, $x \in \mathbb{R}$, é a chamada distribuição delta de Dirac.

Nesse caso esperamos que $\rho(x) = 0$ se $x \neq x_0$ (pois o ponto material está concentrado apenas no ponto x_0) e que $\int_{-\infty}^{\infty} \rho(x) dx = m$ (pois a massa total é m). Concluimos que $\delta(x)$ deveria satisfazer a hipótese de ser nula para todo $x \neq 0$ e divergir em $x = 0$, pois nesse ponto teríamos de ter uma concentração infinita, e de tal forma que

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1. \quad (3.2)$$

Mais ainda, se f é uma função contínua (em verdade outras propriedades devem ser requeridas) desejar-se-ia também que

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx = f(x_0). \quad (3.3)$$

A versão discreta desta distribuição é chamada Delta de Kronecker.

3.2 CÁLCULO DO TRABALHO E ENERGIA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO

A dedução das equações para o cálculo de energia em reservatórios de petróleo é realizada a partir da equação do escoamento multifásico em meios porosos para a fase i (equação (2.51)), escrita em termos da velocidade de Darcy

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \phi S_i) - \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{u}_i) - \tilde{q}_i = 0. \quad (3.4)$$

Dividindo toda a equação (3.4) pela massa específica em condições de superfície e utilizando a relação (2.56)

$$B_i = \frac{\rho_i|_{STC}}{\rho_i}$$

temos que

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_i}{B_i} \right) - \frac{\tilde{q}_i}{B_i} = 0 \quad [T^{-1}] \quad (3.5)$$

Dotada das condições de contorno apropriadas ao problema de escoamento em meios porosos, a equação (3.4) é a forma forte, ou clássica, do problema (HUGHES [31])

Através do Lema Fundamental do Cálculo das Variações, enunciado anteriormente, pode-se dizer que a equação

$$\int_{\Omega} f_i \left[\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_i \phi}{B_i} \right) - \tilde{q}_i \right] d\Omega = 0 \quad [f][L^3 T^{-1}] \quad (3.6)$$

é equivalente à equação (3.4), para f_i , dita função de ponderação, dotada das propriedades necessárias e $[f]$ representando a dimensão da função f . Esta é dita a forma variacional ou forma fraca do problema (HUGUES [31]).

Desenvolvendo a equação (3.6),

$$\int_{\Omega} f_i \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \right) d\Omega - \int_{\Omega} f_i \frac{\partial \left(\frac{S_i \varphi}{B_i} \right)}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} f_i \tilde{q}_i d\Omega = 0,$$

integrando o 1º termo da equação por partes e usando o teorema da divergência, temos

$$\int_{\Omega} \nabla f_i \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} d\Omega - \int_{\Gamma} f_i \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \mathbf{n} dA - \int_{\Omega} f_i \frac{\partial \left(\frac{S_i \varphi}{B_i} \right)}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} f_i \tilde{q}_i d\Omega = 0.$$

Uma vez que f_i é uma função arbitrária, pode-se adotar

$$f_i = \Phi_i B_i \quad [\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$$

e assumindo que tal função é dotada das propriedades mencionadas na seção 3.1.2, temos

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \nabla (\Phi_i B_i) \rho_i \mathbf{u}_i d\Omega - \int_{\Gamma} \Phi_i B_i \rho_i \mathbf{u}_i \mathbf{n} dA - \\ & \int_{\Omega} \Phi_i B_i \frac{\partial (\rho_i S_i \varphi)}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \Phi_i B_i \tilde{q}_i d\Omega = 0 \quad [\text{ML}^2\text{T}^{-3}] \end{aligned} \quad (3.7)$$

A função f_i é convenientemente adotada como o produto do potencial pelo fator volume de formação da fase i , pois, como discutido na seção 2.2.3, o produto pressão por massa específica tem dimensão de energia por unidade de massa. Mais ainda, o produto pressão por vazão mássica tem dimensão de potência. Ou seja, a equação (3.7) representa o trabalho realizado (ou de energia transformada) por unidade de tempo envolvido no escoamento em reservatório de petróleo. O potencial foi escolhido em vez da pressão para que correções em função de efeitos gravitacionais, conforme utilizado

na modelagem de reservatórios, sejam levadas em consideração. A multiplicação pelo fator de formação de volume tem a ver com o entendimento físico do problema: os trabalhos são realizados no reservatório, com os fluidos ocupando volumes em condições de reservatório, o que, por si só, indica a utilização dos fatores de volume de formação no cálculo dos termos energéticos.

A energia total do sistema é obtida integrando a equação (3.7) no tempo e somando-se as parcelas de todos os componentes do escoamento. Logo,

$$\sum_{i=1}^n \left(\int_t^{t+\Delta t} \left(\int_{\Omega} \nabla(\Phi_i B_i) \rho_i \mathbf{u}_i d\Omega - \int_{\Gamma} \Phi_i B_i \rho_i \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{n} dA - \int_{\Omega} \Phi_i B_i \frac{\partial(\rho_i S_i \varphi)}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \Phi_i B_i \tilde{q}_i d\Omega \right) dt \right) = 0 \quad [\text{ML}^2\text{T}^{-2}] \quad (3.8)$$

Os termos da equação (3.8) serão identificados e descritos individualmente nas seções 3.2.4 a 3.2.1.

Comparação entre a equação da conservação de energia baseada no Teorema de transporte de Reynolds e a equação proposta

A equação (2.36)

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_{\text{outros}}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \epsilon \rho dV + \int_{\Gamma} \epsilon \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA + \int_{\Gamma} (pv) \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA$$

e a equação (3.8), tomado para apenas um componente

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int_{\Omega} \nabla(\Phi_i B_i) \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} d\Omega - \int_{\Gamma} \Phi_i B_i \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \cdot \mathbf{n} dA - \int_{\Omega} \Phi_i B_i \frac{\partial \left(\frac{S_i \varphi}{B_i} \right)}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \Phi_i B_i \frac{q_i}{B_i} d\Omega \right) dt = 0$$

O primeiro termo do lado esquerdo da equação (2.36) é zero, uma vez que nas hipóteses para o escoamento no reservatório é admitido que este não troca calor com a vizinhança (processo adiabático).

O segundo termo da equação (3.8), o trabalho de fronteira, é exatamente o trabalho de escoamento, o último termo da equação (2.36).

O termo $\frac{dW_{\text{outros}}}{dt}$, que representa qualquer trabalho realizado ou recebido pelo sistema, para o caso particular que aqui tratamos se resume ao trabalho de poços.

Desenvolvendo o segundo termo do lado direito da equação (2.36), utilizando a definição da energia total do escoamento de um fluido (2.24), temos

$$\int_{\Gamma} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA .$$

Uma vez que a variação da energia potencial é nula (não há mudança de altura do volume de controle), a variação da energia cinética é desprezível (escoamento lento e variação na velocidade na entrada e na saída da superfície de controle muito pequena) e não haja variação da energia interna (coerente com a hipótese de processo adiabático e isotérmico), temos que

$$\int_{\Gamma} p v \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.9)$$

Logo, as equações (3.9) e (2.36) são equivalentes. Sendo assim, além do observado através da análise dimensional, através da comparação da equação aqui deduzida e a equação de Transporte de Reynolds é possível concluir que a equação (3.9) se trata do balanço de energia mecânica do reservatório de petróleo.

3.2.1 Energia Dissipada pela Viscosidade

A energia necessária para vencer a resistência viscosa ao escoamento é dada pelo 1º termo da equação (3.8):

$$\Delta E_{\mu} = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega} \nabla(\Phi_i B_i) \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} d\Omega \quad (3.10)$$

cujas potência equivalente, que é a derivada no tempo da energia, vale

$$P_\mu = \frac{d\Delta E_\mu}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} \int_\Omega \nabla(\Phi_i B_i) \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} d\Omega dt = \sum_{i=1}^n \int_\Omega \nabla(\Phi_i B_i) \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} d\Omega. \quad (3.11)$$

Se tomarmos o caso particular para um único componente, incompressível, ou seja, $B_i = 1$, escoamento unidimensional, de forma que o potencial da fase é simplesmente a pressão, ou seja, $\Phi_i = p_i$, a equação (3.11) se resume à

$$\int_\Omega u \cdot \nabla p d\Omega \quad (3.12)$$

que é exatamente o resultado obtido por Matheron, apresentado na seção 2.1, equação (2.1).

Substituindo a relação $\frac{\mathbf{u}_i}{B_i} = \frac{q_i}{A_n}$, onde A_n é a área normal ao escoamento, na equação (3.11), temos que

$$P_\mu = \sum_{i=1}^n \int_\Omega \nabla(\Phi_i B_i) \frac{q_i}{A_n} d\Omega \quad (3.13)$$

3.2.2 Trabalho sobre a Fronteira

A energia que atravessa a fronteira do reservatório através do influxo de fluido é representada pelo segundo termo da equação (3.8)

$$W_\Gamma = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} - \int_\Gamma \Phi_i B_i \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \mathbf{n} dA dt. \quad (3.14)$$

Procedendo de forma análoga à manipulação realizada na seção 3.2.1

$$P_\Gamma = \frac{dW_\Gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} - \int_\Gamma \Phi_i B_i \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \mathbf{n} dA dt \right)$$

$$P_\Gamma = \sum_{i=1}^n - \int_\Gamma \Phi_i B_i \frac{\mathbf{u}_i}{B_i} \mathbf{n} dA$$

$$P_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n - \int_{\Gamma} \Phi_i B_i \frac{q_i}{A} \mathbf{n} dA \quad (3.15)$$

Como feito para a energia dissipada pela viscosidade, se analisarmos a equação (3.15) na mesma situação simplificada, temos que

$$P_{\Gamma} = pq . \quad (3.16)$$

Ou em termos de energia (trabalho)

$$W_{\Gamma} = \int_t^{t+\Delta t} P_{\Gamma} dt = \int_t^{t+\Delta t} pq dt \quad (3.17)$$

O volume produzido ou injetado no reservatório pode ser calculado pela relação

$$Q = q\Delta t . \quad (3.18)$$

Aproximando a integral no tempo e utilizando a relação (3.18), temos

$$W_{\Gamma} = pQ . \quad (3.19)$$

A equação (3.19) nada mais é do que o trabalho de escoamento apresentado na seção 2.2.3, equação (2.19).

3.2.3 Energia de Expansão de Rocha e Fluidos

As contribuições da rocha e fluido são obtidas separadamente integrando o 3º termo da equação (3.8). Desenvolvendo,

$$\Delta E_{\varphi\rho} = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} - \int_{\Omega} \Phi_i B_i \frac{\partial(\rho_i S_i \varphi)}{\partial t} d\Omega dt \quad (3.20)$$

utilizando a regra da cadeia,

$$\Delta E_{\varphi\rho} = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} \left(- \int_{\Omega} \Phi_i B_i \left(\varphi \frac{\partial(\rho_i S_i)}{\partial t} + \rho_i S_i \frac{\partial(\varphi)}{\partial t} \right) d\Omega \right) dt$$

$$\Delta E_{\varphi\rho} = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} \left(- \int_{\Omega} \Phi_i B_i \varphi \frac{\partial(\rho_i S_i)}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \Phi_i B_i \rho_i S_i \frac{\partial\varphi}{\partial t} d\Omega \right) dt \quad (3.21)$$

Por conveniência, serão identificados aqui separadamente as contribuições energéticas referentes à expansão de rocha e à expansão de fluidos. Ambas serão desenvolvidas individualmente nas seções seguintes.

Energia de Expansão de Rocha

Trata-se do segundo termo da equação (3.21):

$$\Delta E_{\varphi} = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega} \Phi_i S_i \frac{\partial\varphi}{\partial t} d\Omega dt \quad (3.22)$$

Invertendo a ordem das integrais, temos

$$\Delta E_{\varphi} = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \int_t^{t+\Delta t} \Phi_i S_i \frac{\partial\varphi}{\partial t} dt d\Omega$$

Essa integral pode ser expressa em termos de variação de porosidade (que, no intervalo de tempo Δt , varia de ϕ_{t_1} a ϕ_{t_2} , por efeito de compressibilidade), isto é

$$\Delta E_{\varphi} = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \int_{\varphi^t}^{\varphi^{t+\Delta t}} \Phi_i S_i d\varphi d\Omega \quad (3.23)$$

onde φ é função da pressão.

Se tratarmos aqui, novamente, de simplificações no modelo para uma comparação mais clara, no contexto do escoamento monofásico ($S_i = 1$), unidimensional ($\Phi_i = p_i$) e assumindo que o fluido é ligeiramente compressível, de forma que a relação representada pela equação (2.80) é válida, cujo diferencial em relação a pressão vale

$$d\varphi = c_\varphi \varphi_{ref} dp_i. \quad (3.24)$$

Substituindo equação (3.24) na equação (3.23) e fazendo as simplificações propostas, temos

$$\begin{aligned} \Delta E_\varphi &= \int_\Omega \int_{p^t}^{p^{t+\Delta t}} p_i c_\varphi \varphi_{ref} dp_i d\Omega. \\ \Delta E_\varphi &= \int_\Omega c_\varphi \varphi_{ref} \int_{p^t}^{p^{t+\Delta t}} p_i dp_i d\Omega = \int_\Omega c_\varphi \varphi_{ref} \left[\frac{(p^{t+\Delta t})^2 - (p^t)^2}{2} \right] d\Omega = \\ &= \int_\Omega \varphi_0 c_\varphi \frac{(p^{t+\Delta t} - p^t)(p^{t+\Delta t} + p^t)}{2} d\Omega = \int_\Omega \Delta_t \varphi \frac{(p^{t+\Delta t} + p^t)}{2} d\Omega \end{aligned}$$

onde $\Delta_t \varphi = \varphi^{t+\Delta t} - \varphi^t$. Definindo $\bar{p} = (p^{t+\Delta t} + p^t)/2$ como a pressão média contra a qual a expansão do volume foi realizada, temos

$$\Delta E_\varphi = \int_\Omega \bar{p} \Delta_t \varphi d\Omega. \quad (3.25)$$

A equação (3.25) é análoga à equação (2.12), da seção 2.2.1, a não ser pelo fato de se tratar aqui da variação do volume poroso. Ou seja, trata-se do trabalho (aqui no caso energia, pois o poro faz parte do volume de controle, e não o é) realizado pela expansão/contração do volume poroso.

Energia de expansão de fluidos

Trata-se do primeiro termo da equação (3.21):

$$\Delta E_\rho = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} - \int_\Omega \Phi_i B_i \varphi \frac{\partial (\rho_i S_i)}{\partial t} d\Omega dt \quad (3.26)$$

Invertendo a ordem das integrais, temos

$$\Delta E_\rho = \sum_{i=1}^n \int_\Omega \int_t^{t+\Delta t} \Phi_i B_i \varphi \frac{\partial (\rho_i S_i)}{\partial t} dt d\Omega$$

Utilizando a regra da cadeia e rearranjando os termos, temos

$$\Delta E_\rho = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \left(\int_t^{t+\Delta t} B_i \Phi_i \varphi S_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} dt + \int_t^{t+\Delta t} B_i \Phi_i \varphi \rho_i \frac{\partial S_i}{\partial t} dt \right) d\Omega \quad (3.27)$$

Primeiramente, desenvolveremos o primeiro termo da equação (3.27)

$$\sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \int_t^{t+\Delta t} B_i \Phi_i \varphi S_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} dt d\Omega$$

Realizando a troca de variáveis adequada, temos

$$\sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \int_{\rho^t}^{\rho^{t+\Delta t}} B_i \Phi_i \varphi S_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} d\rho_i d\Omega. \quad (3.28)$$

A equação (3.28) é semelhante à equação (3.23). É possível realizar as mesmas simplificações e, ao invés de utilizar a relação de rocha ligeiramente compressível, utilizar a relação de fluido ligeiramente compressível (equação (2.77)), chegamos a mesma conclusão que a exposta para o caso da energia de expansão de rocha.

Agora, desenvolvendo do segundo termo da equação (3.27)

$$\sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \int_t^{t+\Delta t} B_i \Phi_i \varphi \rho_i \frac{\partial S_i}{\partial t} dt d\Omega.$$

Realizando a troca de variáveis adequada, temos

$$\sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \int_{S^t}^{S^{t+\Delta t}} B_i \Phi_i \varphi \rho_i \partial S_i d\Omega. \quad (3.29)$$

As equações aqui desenvolvidas não serão aqui combinadas de forma a fornecer a expressão completa para o cálculo da energia de rocha e fluidos. Essa expressão será desenvolvida na seção 3.4, de uma forma mais compreensiva do que se fosse apresentada neste ponto do desenvolvimento.

A Figura 3.5 ilustra o processo de variação da pressão de poros. Quanto maior a pressão de poros, maior será a porosidade da formação. A única forma de se aumentar a porosidade em função do aumento da pressão de poros é através do aumento da massa específica do fluido no interior da matriz rochosa, uma vez que não há troca de calor.

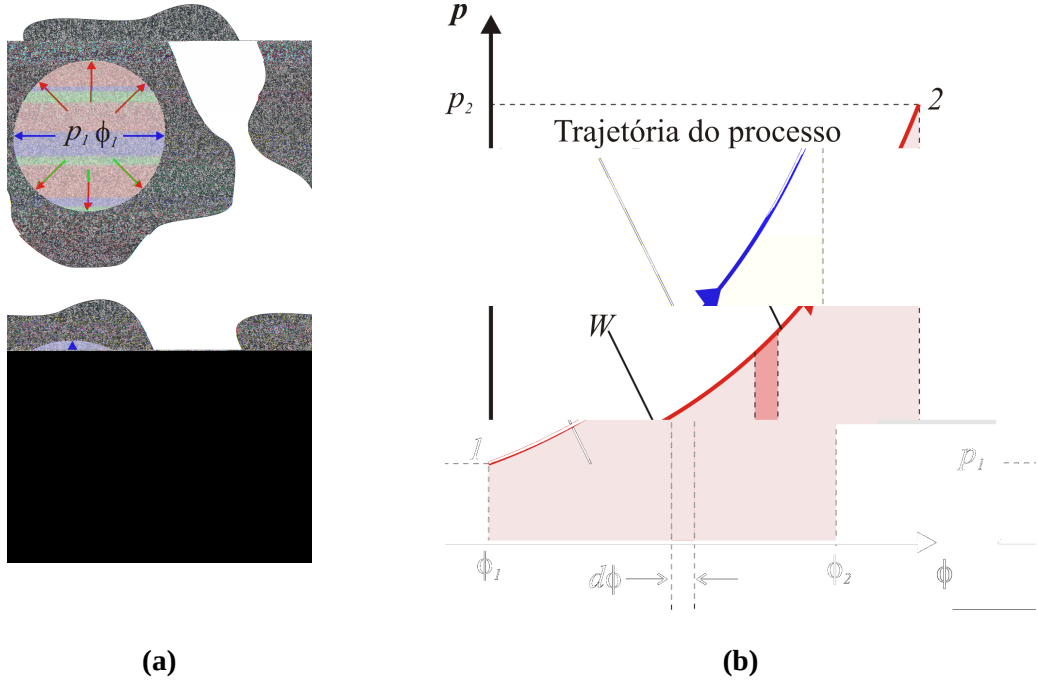


Figura 3.5 – Expansão de poro em função do aumento da pressão (a). Gráfico do processo (b).

3.2.4 Trabalho dos Poços

$$W_{well} = \sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} \left(- \int_{\Omega} \Phi_i B_i \tilde{q}_i d\Omega \right) dt \quad (3.30)$$

A potência é obtida derivando o trabalho no tempo

$$P_{well} = \frac{dW_{well}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^n \int_t^{t+\Delta t} \left(- \int_{\Omega} \Phi_i B_i \tilde{q}_i d\Omega \right) dt \right)$$

$$P_{well} = \sum_{i=1}^n - \int_{\Omega} \Phi_i B_i \tilde{q}_i d\Omega \quad (3.31)$$

O termo $\tilde{q}$ é expresso em formas de densidade de vazão

$$\tilde{q} = \sum_{ipoço=1}^{npoços} q_{ipoço} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ipoço}) \quad (3.32)$$

onde $ipoço$ representa o i -ésimo poço do modelo de fluxo e $npoços$ o número total de poços do modelo. A função $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ipoço})$ é a distribuição Delta de Dirac, apresentada na seção 3.1.2.

Substituindo a equação (3.32) na equação (3.31) e utilizando a propriedade da distribuição Delta de Dirac ilustrada na equação (3.3)

$$\begin{aligned} P_{well} &= \sum_{i=1}^n \sum_{ipoço=1}^{npoços} - \int_{\Omega} \Phi_i B_i q_{ipoço} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ipoço}) d\Omega \\ P_{well} &= - \sum_{i=1}^n \sum_{ipoço=1}^{npoços} \Phi_i B_i \tilde{q}_i \end{aligned} \quad (3.33)$$

A potência total proveniente dos poços é resultado do somatório da contribuição de todos os poços do modelo de fluxo. O trabalho correspondente vale

$$W_{well} = - \int_t^{t+\Delta t} \sum_{i=1}^n \sum_{ipoço=1}^{npoços} \Phi_i B_i \tilde{q}_i dt \quad (3.34)$$

Se realizarmos as mesmas simplificações realizadas na seção 3.2.2 para a energia de fronteira, não conduzida aqui por uma questão de redundância, chegaremos a uma expressão semelhante à equação (3.19). Logo, a equação (3.34) trata-se de um trabalho de escoamento.

De fato, na representação proposta pela Figura 3.4, os poços estão fora do reservatório, W_{well} atua sobre a fronteira Γ e, a rigor, faz parte de W_{Γ} . Mas é uma parte que, por conveniência e convenção, será tratada separadamente de W_{Γ} .

3.2.5 Eficiência Energética

Como dito na seção 2.2.3, uma forma de se avaliar o quanto da energia fornecida a um sistema é realmente aproveitada para o processo que se deseja realizar é utilizando o conceito de eficiência.

No contexto de Engenharia de Reservatórios o resultado desejado é a produção do maior volume de óleo possível, que é função do deslocamento desse fluido no meio poroso. Logo, uma idéia natural é definir uma eficiência energética do deslocamento do óleo instantânea ou acumulada. A parcela energética referente ao deslocamento do óleo é a energia dissipada pela viscosidade em relação a esse fluido. Tomando o quociente entre esse valor e a energia total envolvida no processo de exploração, obtemos a eficiência

$$\eta_o = \frac{\Delta E_{\mu,o}}{\Delta E_{total}} \quad (3.35)$$

Essa eficiência, entre 0 e 1, deve funcionar como indicador da qualidade da estratégia de exploração, agora em termos próprios de energia e não em termos de volume, como é usual se utilizar (seção 2.3.2).

3.3 ASSOCIAÇÃO DAS PARCELAS ENERGÉTICAS COM OS MECANISMOS DE PRODUÇÃO E COMPARAÇÃO DO BALANÇO ENERGÉTICO COM O BALANÇO DE MATERIAIS

Resumidamente, as interações energéticas presentes no reservatório de petróleo, associadas aos mecanismos de produção, podem ser enumeradas:

- trabalho entregue ao reservatório em forma de trabalho de fluxo pelos poços injetores;
- trabalho retirado do reservatório em forma de trabalho de fluxo pelos poços produtores;
- influxo de água proveniente de aquíferos, entregando trabalho na forma de trabalho de fluxo;
- trabalho entregue ao reservatório na forma de trabalho de expansão através da expansão dos gases na capa de gás;
- variação da energia em função da expansão/contração rocha e fluidos.

Porém, outra parcela energética não associada a nenhum mecanismo de produção é identificada através da modelagem: a variação de energia em função da sua dissipação para deslocar o fluido no interior do reservatório.

Como apresentado na seção 2.4.1, o método do balanço de materiais expressa o balanço de massa, ou de volume, em um reservatório de petróleo. Reescrevendo a equação (2.38) em uma notação mais compacta, temos

$$\Delta V_{fluidos} + \Delta V_{poros} + V_{inj} + V_{aq} = V_{prod}. \quad (3.36)$$

Partindo da equação (3.36) é possível obter o balanço energético para o reservatório. Os termos energéticos correspondentes são obtidos através da multiplicação dos volumes pelas pressões atuantes. Logo,

$$\bar{p}\Delta V_{fluidos} + \bar{p}\Delta V_{poros} + p_{inj}V_{inj} + p_{aq}V_{aq} = p_{prod}V_{prod}. \quad (3.37)$$

As pressões associadas aos volumes injetados e produzidos dependem da operação de cada poço. Sendo a energia associada o somatório de todas essas contribuições, temos

$$\bar{p}\Delta V_{fluidos} + \bar{p}\Delta V_{poros} + \sum_{p=1}^{n_{poços}} (p_{inj} V_{inj})_p + p_{aq} V_{aq} = \sum_{p=1}^{n_{poços}} (p_{prod} V_{prod})_p. \quad (3.38)$$

Os dois primeiros termos são inerentes à energia de expansão de fluidos e rocha, respectivamente, associados aos mecanismos de produção atribuído a esse fenômeno ; o terceiro termo e o lado direito da equação dizem respeito às energias entregue e retirada do reservatório através dos poços injetores e produtores, respectivamente; a injeção de água está associada a utilização de mecanismos suplementares de recuperação; o quarto termo da equação representa a energia fornecida ao reservatório através do influxo de água de aquífero contíguo ao reservatório, referente ao mecanismo primário de produção influxo de água.

Obviamente, esse balanço energético sofre das mesmas limitações do método do balanço de materiais já enumeradas na seção 2.4.1, pois foi derivado deste.

Porém, esta equação não traduz a energia associada a dissipação de energia em função de forças viscosas. Poderíamos dizer que esta equação traduz a situação ideal de escoamento, onde não há perda de energia. Toda energia fornecida ao reservatório é convertida em energia mecânica, ou útil, utilizada para deslocar o fluido de interesse, e nenhuma energia estaria sendo perdida convertida em energia interna.

Como visto da seção 2.1, ambigüidades em relação ao emprego do termo Energia estão presentes na literatura. Seria possível propor uma solução ao equívoco cometido por COSENTINO [17], quando ele apresenta um gráfico de contribuições de cada mecanismo de produção o chamando de “gráfico de energia” (Figura 3.6): multiplicar os valores para cada contribuição pela pressão associada ao mecanismo. Mas vemos aqui que apenas isso ainda não seria suficiente do ponto de vista de um processo de exploração real: esta modelagem não leva em conta as perdas de energia, o modelo seria ideal do ponto de vista de transformação de trabalho em energia mecânica.

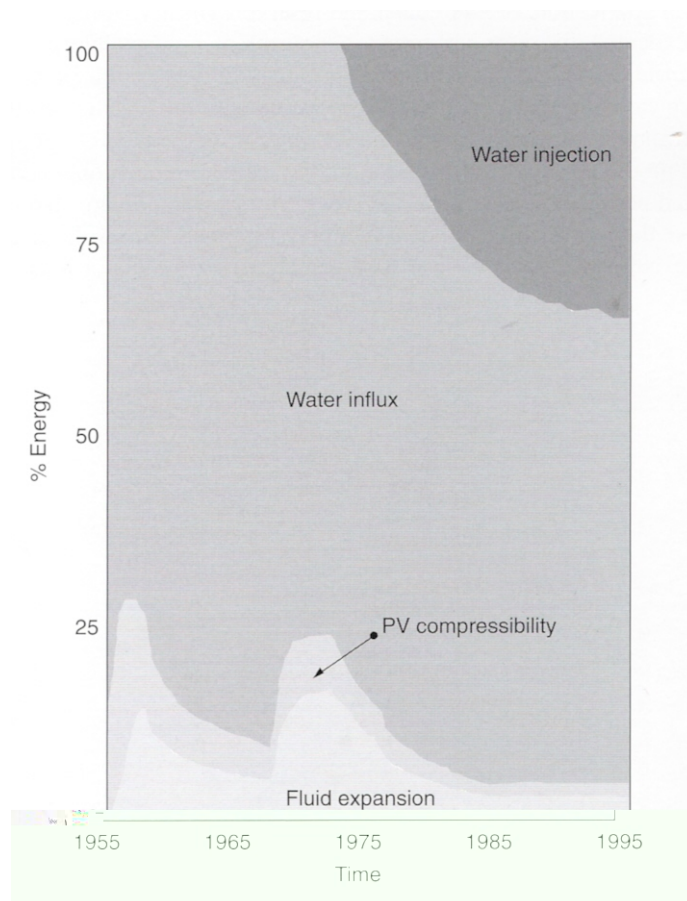


Figura 3.6 – Exemplo de “gráfico de energia”, baseado no balanço de materiais, descrevendo a ação relativa de diferentes mecanismos de produção, ao longo do tempo, na exploração de um reservatório particular (reprodução da fig. 6.37 de COSENTINO [17]).

Sob este ponto de vista fica clara uma das simplificações do modelo *black oil*, a hipótese de escoamento isotérmico, já que pelo simples fato de haver escoamento, energia útil está sendo dissipada ou convertida em energia interna, o que implica no aumento da temperatura do sistema.

3.4 ESQUEMA DE CÁLCULO DISCRETO DAS PARCELAS ENERGÉTICAS

A Figura 3.7 demonstra as interações energéticas em um volume de controle para o caso mais geral que poderia ocorrer em uma célula de simulação: há um poço completado nesta, uma de suas faces coincide com a fronteira do reservatório, que por sua vez está em contato com um aquífero, e apenas para facilitar a compreensão, o trabalho de escoamento que entra e sai do volume de controle está representado apenas em uma direção. A variação do volume é apenas uma representação da energia de expansão: em uma simulação a célula não é deformada em função da variação de seu volume poros.

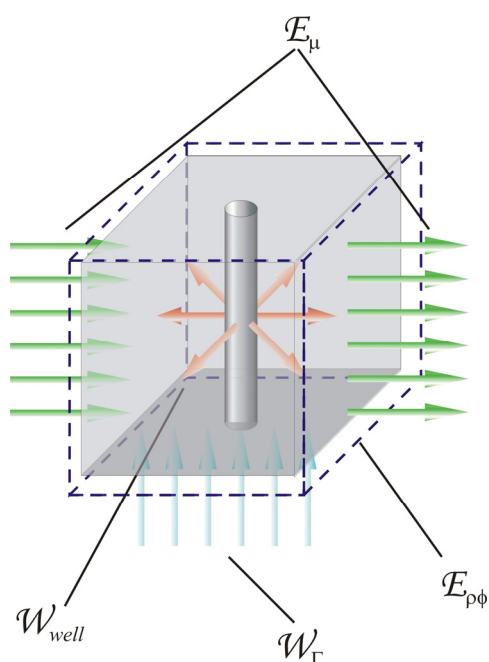


Figura 3.7 – Interações energéticas no volume de controle (célula de simulação).

O cálculo do trabalho de poços é realizado apenas onde o poço está completado na malha de simulação. Por exemplo, no caso do poço ilustrado na Figura 3.8, apesar do poço cruzar quatro células da malha ele apenas está completado em três (representado pela esfera vermelha). Essas são as células onde há fluxo em função da injeção/produção de fluidos.

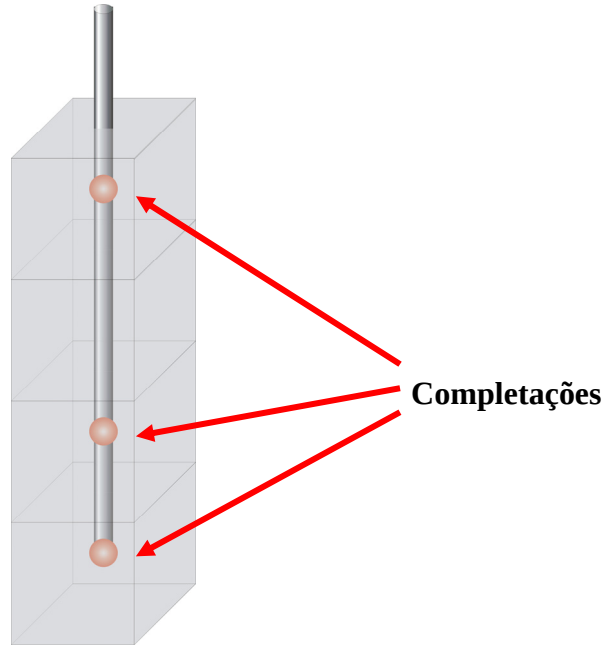


Figura 3.8 – Células de simulação que são cruzadas por um poço. Apenas as completadas estão representadas com uma esfera vermelha.

Desta forma, como a energia é uma grandeza integral escalar, a energia total do reservatório é o somatório das contribuições energéticas de cada célula do modelo de simulação. Logo, o balanço discreto de energia vale

$$\sum_{c=1}^{ncélulas} (\Delta E_{\mu})_c + \sum_{c=1}^{ncélulas} (\Delta E_{\phi\rho})_c = \sum_{c=1}^{ncélulas} \sum_{i_{comp}=1}^{ncomp} \delta_{c,i_{comp}} W_{well_{i_{comp}}} + \sum_{c=1}^{ncélulas} \sum_{i\Gamma=1}^{n\Gamma} \delta_{c,i\Gamma} W_{\Gamma_{i\Gamma}} \quad (3.39)$$

onde $\delta_{c,i_{comp}}$ e $\delta_{c,i\Gamma}$ são distribuições do tipo Delta de Kronecker, que valem 1 apenas nas células onde há poço completado e nas células cuja alguma de suas faces é permeável, respectivamente.

As seções seguintes desenvolvem as fórmulas de cálculo deduzidas nas seções 3.2.1 a 3.2.4, no espaço discreto de solução.

3.4.1 Energia Dissipada pela Viscosidade

Podemos escrever a equação (3.13) como

$$P_{\mu} = \sum_{i=1}^n \int_{\xi}^{\xi+\Delta\xi} \frac{d}{d\xi} (\Phi_i B_i) \frac{q_i}{A_n} A_n d\xi$$

onde ξ é a direção do escoamento. No domínio Cartesiano, $\xi = x, y, z$. Como q_i é constante na face da célula normal ao escoamento, podemos escrever

$$P_\mu = \sum_{i=1}^n q_i \int_{\xi}^{\xi+\Delta\xi} \frac{d}{d\xi} (\Phi_i B_i) d\xi$$

Calculando a integral

$$P_\mu = \sum_{i=1}^n q_i \left[(\Phi_i B_i)_\xi - (\Phi_i B_i)_{\xi+\Delta\xi} \right] \quad (3.40)$$

Na equação (3.40), q_i é a vazão que atravessa as faces normais ao escoamento de duas células vizinhas.

No caso discreto, é preciso considerar duas situações de fluxo convivendo na malha de simulação (Figura 3.9):

- fluxo linear nas interfaces entre cada duas células adjacentes da malha;
- fluxo radial dentro das células que contêm algum poço ativo.

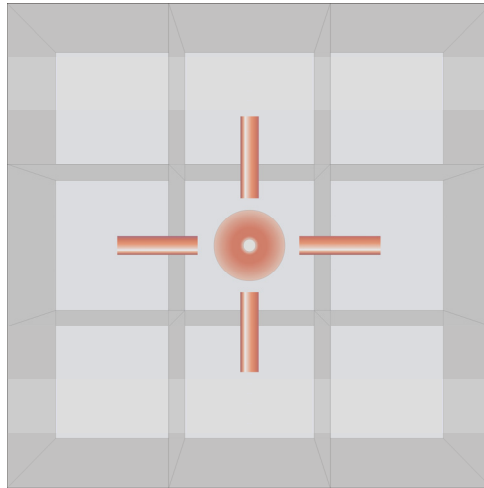


Figura 3.9 - Caso de escoamento de geometria genérica resolvido por simulação numérica.

A célula central da malha contém um poço. Os tubos e o disco representam, respectivamente, escoamento entre cada duas células vizinhas e escoamento radial dentro da célula com poço.

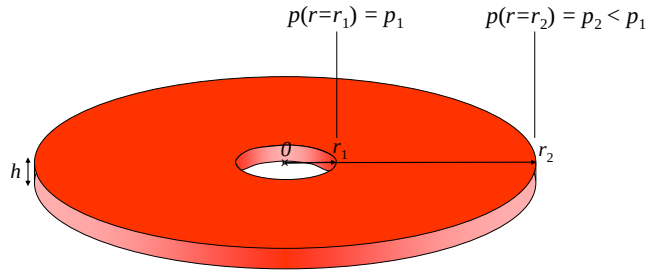


Figura 3.10 - Exemplo de sistema de escoamento radial.

Para escoamento 1-D radial no sistema homogêneo descrito na Figura 3.10, o módulo da velocidade diminui com o raio (já que há uma vazão constante atravessando uma superfície cilíndrica de raio crescente),

$$u(r) = \frac{q}{2\pi hr} = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (3.41)$$

e a vazão e o volume circulados são dados por:

$$q = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{\Delta_\xi p}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (3.42)$$

$$Q = q \Delta t \quad (3.43)$$

Assim, a potência e o trabalho realizado pelas forças viscosas valem:

$$\begin{aligned} P_{\mu, \nabla p} &= \int_{\Omega} u \frac{dp}{dr} dV = \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{q}{2\pi hr} \right) \left(-\frac{\mu}{k} \frac{q}{2\pi hr} \right) 2\pi hr dr = -\left(\frac{q}{2\pi h} \right)^2 \left(\frac{\mu}{k} \right) (2\pi h) \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{1}{r} \right) dr = \\ &= -\left(\frac{q}{2\pi h} \right)^2 \left(\frac{\mu}{k} \right) (2\pi h) \ln(r_2 / r_1) = -q \left(\frac{q\mu}{2\pi kh} \ln(r_2 / r_1) \right) = -q \Delta_\xi p \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\Delta E_{\mu, \nabla p} = P_{\mu, \nabla p} \Delta t = (-q \Delta_\xi p) \Delta t = -Q \Delta_\xi p \quad (3.45)$$

Esse resultado aproxima o escoamento radial dos poços por um escoamento 1-D linear.

O termo Δp é calculado através da diferença da pressão da célula e da pressão da completção.

3.4.2 Trabalho sobre a Fronteira

Podemos escrever a equação (3.15) como

$$P_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n - \int_{\Gamma} \Phi_i B_i \frac{q_i}{A} \mathbf{n} dA = - \sum_{i=1}^n \Phi_i B_i q_i \quad (3.46)$$

uma vez que é conhecida a área normal ao fluxo (a superfície do volume de controle que é permeável em relação à vizinhança, a face da célula em questão).

Para o cálculo de potências e trabalhos em um subdomínio da malha de simulação, é preciso calcular as pressões ao longo da fronteira em que ocorre fluxo. Uma discussão sobre essa questão será feita na seção 4.5.

3.4.3 Energia de Expansão de Rocha e Fluidos

A equação (3.23), no caso discreto, pode ser escrita como

$$\Delta E_{\varphi} = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \int_{\varphi^t}^{\varphi^{t+\Delta t}} \Phi_i S_i d\varphi d\Omega = V \sum_{i=1}^n \int_{\varphi^t}^{\varphi^{t+\Delta t}} \Phi_i S_i d\varphi \quad (3.47)$$

uma vez que a integração é realizada em um volume de controle conhecido, a célula de simulação e que as propriedades são constantes em todo o volume de controle, são constantes em todo o domínio, logo $\int_{\Omega} d\Omega = V_{célula} = V$.

Assumindo que não há variações do potencial e da saturação dado um diferencial de porosidade, temos

$$\Delta E_{\varphi} = \sum_{i=1}^n \Phi_i S_i V \Delta_t \varphi \quad (3.48)$$

onde $\Delta_i \phi$ é a variação da porosidade com o tempo. O produto $V \Delta_i \phi$ é a variação do volume poroso no tempo.

Podemos interpretar esse resultado como a contribuição energética do fluido i à energia total de expansão de rocha, onde a sua contribuição fica aparente pela ponderação da variação total da energia $\Phi_i V \Delta_i \phi$ pela sua saturação.

Agora, serão desenvolvidas as parcelas 4 1 Tf6.9448 0 Tc29

modelo. Da forma como o simulador trabalha, essas grandezas permanecem constantes no intervalo de tempo Δt .

CAPÍTULO 4

MODELAGEM COMPUTACIONAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como visto na seção 2.4.4 é comum utilizar o termo pós-processamento como sinônimo de visualização de dados (resultados) de maneira geralmente muito direta. Mas pós-processamento, em seu sentido mais amplo, é qualquer tratamento após a simulação numérica, podendo envolver uma gama muito maior de aplicações, incluindo procedimentos mais avançados de mineração de dados, visualização da informação (no sentido de uma extensão da mera visualização de dados), etc. O tratamento dos dados de saída de uma simulação permite ao engenheiro obter valiosas informações e extrair conhecimento acerca do experimento numérico.

A visualização científica é um arranjo gráfico dos dados que pode destacar imediatamente certos aspectos qualitativos dos resultados, mas que não dispensa a interpretação do engenheiro; depende de seu discernimento e conhecimento do problema. De fato, os resultados de uma simulação podem ainda ser mais trabalhados, fornecendo outras grandezas quantitativas ao engenheiro, e novas perspectivas para a análise do problema estudado.

Neste sentido, o cálculo das energias de reservatórios de petróleo são calculadas através do pós-processamento numérico dos resultados da simulação numérica do fluxo no reservatório de petróleo. Os métodos de cálculo desenvolvidos no CAPÍTULO 3, que envolvem integrais que são resolvidas por aproximações numéricas, são resolvidos através dessa metodologia. A implementação computacional desse pós-processamento, que contou com especial atenção a fim de tornar o código robusto e de contar com os predicados de um código computacional de qualidade (expansível, manutenível, etc), é descrita nesse capítulo.

Formas mais avançadas de integração de um modelo acessório, como o cálculo das energias, à simulação de fluxo para o tratamento de outras físicas associadas ao processo de exploração de um campo envolvem o acoplamento desses modelos ao simulador. Existem várias formas de se realizar esse acoplamento. O tratamento e a classificação de problemas multi-física são discutidos por FELIPPA *et al.* [26]. É um texto que revisa de forma didática os procedimentos para a análise particionada de

sistemas mecânicos. Tais sistemas são decompostos em partições adequadas à simulação computacional, e essa decomposição é orientada por considerações físicas, funcionais ou computacionais.

No APÊNDICE E são discutidos os possíveis níveis de acoplamento e ilustradas as diferentes alterações no simulador de fluxo, bem como exemplos de utilização das diferentes abordagens, como exemplo do potencial de utilização e extensão do esquema de pós-processamento aqui implementado.

4.2 PÓS-PROCESSAMENTO DE SIMULAÇÃO DE FLUXO

Na simulação convencional de reservatórios não são utilizadas todas as físicas envolvidas no processo de exploração de um campo. Por exemplo, efeitos térmicos (devido à injeção de fluidos levemente mais frios que o fluido residente) ou geomecânicos, costumam ser negligenciados. Isso é feito em parte porque tais fenômenos não são percebidos como muito relevantes no estudo de determinado caso, em parte porque os simuladores mais comuns não comportam tal física ou porque exigiriam de métodos computacionalmente muito caros. Além de físicas que aproximam mais os modelos da realidade, físicas que auxiliam decisões sobre o desenvolvimento do reservatório também poderiam ser utilizadas, como, por exemplo, modelos para cálculo das variações de impedância associadas às variações de saturação e de pressão, para aplicações de sísmica 4D. Sua utilização ou não também depende das razões anteriormente citadas.

De forma geral, esses modelos são acessórios ao modelo de fluxo, podendo ou não alterar o seu resultado. Modelagens geomecânicas ou térmicas alteram o resultado da simulação de fluxo, uma vez que seus efeitos afetam as propriedades de rocha e fluidos, com impacto, em alguma medida, sobre as variáveis primárias da solução (pressões e saturações). Já a modelagem petroelástica, usada nos estudos integrados para simular a resposta da sísmica (4D) ao longo da produção do campo, não altera o resultado da simulação de fluxo, apenas depende das propriedades calculadas por este.

Um mesmo modelo pode ser acoplado ao simulador de fluxo de diferentes formas, alcançando às vezes praticamente os mesmos objetivos. Um exemplo é a opção disponível no ECLIPSE [62] para modelar efeitos de temperatura. Em função da diferença de temperatura entre o fluido de injeção e o reservatório, as viscosidades dos fluidos são modificadas, bem como o estado de tensões, que alteram as propriedades da rocha. O simulador escreve em seu arquivo de saída a distribuição de temperatura, que pode ser utilizada por um programa externo para modelar o efeito da mudança de temperatura na rocha reservatório. Porém essa opção é acoplada ao simulador *black oil*, (ECLIPSE 100) e ao simulador composicional (ECLIPSE 300) de formas diferentes. No simulador *black oil* o modelo é tratado como um traçador (*tracer*), uma abordagem

análoga à ilustrada no fluxograma da Figura A.4 (APÊNDICE E). Ou seja, nesse caso a equação de conservação de energia é resolvida no final de cada passo de tempo convergido, e as temperaturas das células são atualizadas; as novas temperaturas são então usadas para calcular as viscosidades dos fluidos para o próximo passo de tempo. Já no simulador composicional, a equação de conservação de energia é resolvida simultaneamente às equações do escoamento. Claro que a diferença de abordagem pode implicar em diferenças entre as soluções e essas diferenças podem ou não ser quantitativamente relevantes para os objetivos do estudo. No caso da abordagem explícita, no bloco “*Atualização das propriedades físicas*” do fluxograma Figura 2.4 é o momento quando as viscosidades são alteradas.

FANCHI [25] apresenta um modelo de fluxo integrado que combina as capacidades de um simulador de fluxo tradicional com um modelo petrofísico e utiliza uma abordagem do tipo “*forward modeling*” para o acoplamento íntimo entre o simulador de fluxo tradicional e o algoritmo petrofísico. Ele define “*forward modeling*” como o cálculo de atributos a partir de propriedades do reservatório. Este tipo de modelagem pode ser realizada através da extensão de um simulador de fluxo existente, ou através de *workflows* independentes utilizados em diferentes pacotes de *softwares* ou pode ser realizado através de *software* desenvolvido para simplificar o processo de transferência de dados (por exemplo, o Resolve [46]).

A extensão do simulador de fluxo é representada pela Figura 4.1. A linha tracejada entre os blocos significa que nestas etapas há apenas um desvio do fluxograma normal do simulador para que o modelo integrado seja calculado. O simulador apenas desvia de seu fluxograma normal se a opção de cálculo do modelo acessório for selecionada.

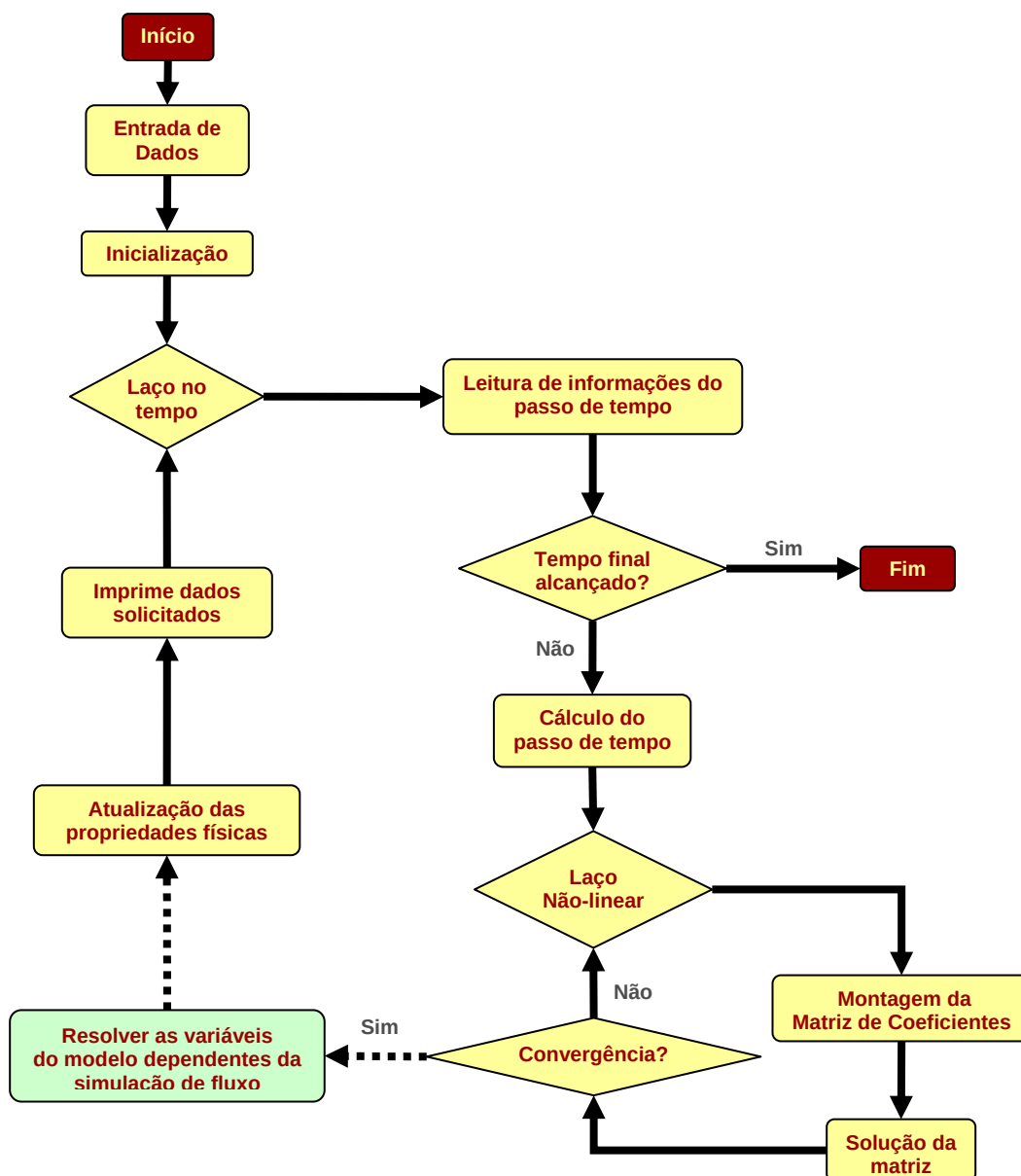


Figura 4.1 – Extensão do simulador de fluxo para a integração de um modelo acessório.

Tal nível de integração, como um pós-processamento dos dados provenientes da simulação de fluxo, pode ser realizada externamente ao simulador. Tal estratégia tem como principal vantagem dispensar alterações no simulador de fluxo: basta que o simulador forneça a saída das propriedades necessárias para os cálculos realizados pelo modelo, ou que ele forneça uma interface (*API*¹⁶) para o acesso a esses dados.

Logo, o pós-processamento pode ser realizado com o simulador sendo encarado como uma caixa-preta. O único conhecimento exigido sobre o simulador é o modo como ele

¹⁶ Sigla para *application protocol interface*.

grava os resultados nos arquivos de saída. O fluxograma desta abordagem é ilustrado na Figura 4.2.

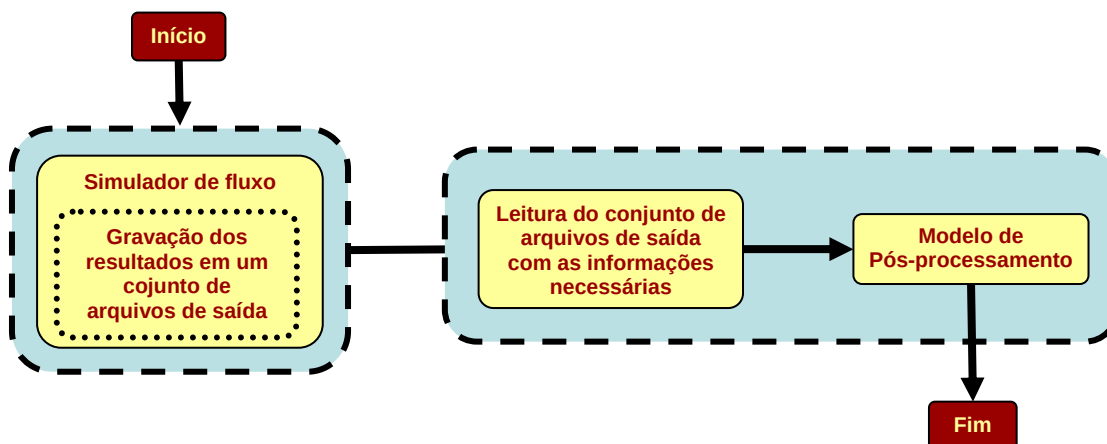


Figura 4.2 – Fluxograma para integração de modelo através do pós-processamento da simulação de fluxo.

As vantagens da integração como um pós-processamento são as mesmas identificadas na seção 2.4.4: uma vez implementado o modelo em um *software* a parte, este estará disponível para ser utilizado a partir da saída de qualquer simulador de fluxo, desde que os mapas de saída requeridos estejam disponíveis; além disso, podem-se analisar quantas vezes for necessário o mesmo modelo, sem a necessidade de rodar novamente o simulador de fluxo.

Níveis de integração

O Engenheiro de Reservatórios pode necessitar de um conjunto diverso de ferramentas computacionais para realizar o estudo de um campo. A integração dos dados destas diferentes ferramentas pode ser realizada através de níveis distintos, determinados pelo comportamento da ferramenta.

Cada ferramenta candidata a participar dessa integração deve disponibilizar seu próprio conjunto de mecanismos de integração e extensibilidade. A situação ideal seria que o simulador de reservatórios fosse capaz de integrar-se com tantas quantas ferramentas fossem necessárias ao estudo.

AMSDEN [2] descreve uma classificação dos níveis de integração possíveis entre diferentes ferramentas:

Sem integração: o *software* não compartilha nem requer dados de outras ferramentas. Esta ausência de integração é observada nos simuladores de reservatório tradicionais, até bem recentemente, quando, naquela visão, apenas os resultados da simulação atendiam por si mesmas todas as necessidades da análise.

Invocação: o simulador de fluxo é configurado para inicializar uma ferramenta que disponibiliza um determinado recurso. Integração por invocação pode ser a melhor forma de começar uma integração de ferramentas existentes, especialmente ferramentas baseadas em arquivos que têm interface de acordo com a aplicação que a hospeda. Possibilita uma integração simples para interação com recursos baseados em arquivos.

Compartilhamento de dados: permite que o dado manipulado pelo simulador esteja disponível por outras ferramentas. Exige três requisitos: um método de acesso, que determina como aplicativos acessam os dados de outros aplicativos; um protocolo de intercâmbio, que especifica a forma como o dado é acessado (às vezes a forma que o dado-fonte é acessado não é ideal para a aplicação que o acessa); facilidades de transformação, utilizadas para transformar o dado a fim de torná-lo mais útil para o aplicativo que requer o dado. Este tipo de integração aumenta significativamente a integração em relação à integração por invocação, porém cada ferramenta deve ser responsável pelo dado que utiliza, decodificá-lo, entendê-lo e manter sua integridade. Isto pode limitar o acoplamento à capacidade da ferramenta de manter-se atualizada em relação aos seus respectivos modelos de dados e ferramentas associadas. Cada ferramenta dependente do dado deve recriar o comportamento da ferramenta que fornece o dado que é necessário à integração, podendo resultar em potenciais erros.

Integração através de API: permite o acesso ao dado através de uma API específica da ferramenta. Essas APIs fornecem meios de alto nível para capturar semânticas reutilizáveis e simplificar o desenvolvimento de ferramentas (clientes) fornecendo encapsulamento de dados. Isto é possível apenas disponibilizando uma API que acessa o modelo do simulador de reservatórios. A separação da especificação de suas interfaces

de suas implementações e formatos de dados de armazenamento permite ao simulador atualizar sua implementação minimizando os efeitos em suas ferramentas associadas.

Integração através de UI (User Interface): permite que uma ferramenta participe de outras ferramentas como se elas foram desenvolvidas como um único aplicativo. A integração das ferramentas é realizada especificando, em tempo de execução, quais ferramentas que devem ser integradas. Permite que os componentes não sejam distribuídos como um único pacote. Suas ferramentas podem ser atualizadas e distribuídas de forma independente.

Ferramentas integradas necessitam de uma plataforma de serviços, *frameworks* e padrões que permitam o desenvolvimento dos aplicativos propriamente ditos, enquanto reutiliza uma infra-estrutura comum. A plataforma Eclipse [21] – não confundir com o simulador ECLIPSE [61] – fornece um grande número de serviços, *APIs* e *frameworks* que permite integração de ferramenta efetiva e escalonável. Em particular há um simulador de reservatório de nova geração que já utiliza essa plataforma. Trata-se do *PumaFlow*, simulador de reservatórios de Beicip, que utiliza o *framework ICarre*, que é baseado na plataforma Eclipse.

O nível de integração a ser utilizado depende, entre outros fatores, dos recursos de comunicação disponíveis do programa em que se deseja integrar o modelo. No estágio de desenvolvimento dos simuladores comerciais atualmente utilizados (por exemplo, ECLIPSE [61] e IMEX [16]) a forma de comunicação disponível é a baseada em arquivos.

4.3 TÉCNICAS COMPUTACIONAIS

4.3.1 Programação multi-paradigma e multi-linguagem

Na implementação do presente trabalho procurou-se utilizar as vantagens das linguagens e paradigmas de programação mais modernos, a fim de garantir extensibilidade e manutenibilidade, sem perda de eficiência.

Paradigmas de programação

Programação orientada a objetos, STROUSTRUP [66], (ou POO) é um paradigma de programação baseado na composição e interação entre diversas unidades de *software* chamadas objetos. Um conceito básico para a utilização deste paradigma é a classe. Cada classe determina o comportamento (definidos nos métodos) e estados possíveis (atributos) de seus objetos, assim como o relacionamento entre outros objetos. Os atributos são as características de um objeto, a estrutura de dados que irá representar a classe. Os métodos definem as habilidades de um objeto. Mecanismos de herança (mecanismo pelo qual uma classe pode estender outra classe), associação (mecanismo pelo qual um objeto utiliza os recursos do outro), polimorfismo (mecanismo pelo qual uma classe derivada pode invocar métodos de sua classe base com a mesma assinatura, mas com comportamento distintos) e sobrecarga (utilização do mesmo nome para símbolos ou métodos com operações e funcionalidades distintas) conferem à POO um maior poder para manutenção, reutilização e extensão do código (GAMMA *et al.* [28]).

Porém, o polimorfismo apresenta uma característica negativa para a utilização da POO na computação científica. A decisão de qual método que deve ser selecionado, de acordo com o tipo de classe derivada, é tomada em tempo de execução, através do mecanismo de execução tardia. Esse mecanismo torna mais lenta a execução de códigos desenvolvidos sob esse paradigma de execução. Essa característica de perda de desempenho – que pode ser grave no contexto da programação científica – é mais notável quando se trata de uma função que é chamada repetidas vezes durante a execução de um programa. Essa desvantagem pode ser superada utilizando a programação genérica, BURRUS *et al.* [9].

A programação genérica, ALEXANDRESCU [1], REIS e JÄRVI [50], STROUSTRUP [66] (ou programação orientada a algoritmos) tem por princípio a completa separação entre as estruturas de dados e os algoritmos a elas aplicados. Os algoritmos são escritos de forma a se adaptar através da especificação das partes variáveis que são definidas na instância (criação) do algoritmo, tornando o código genérico. Para efeitos práticos, o paradigma permite que um parâmetro assuma diferentes tipos de dados desde que certas regras sejam mantidas, como subtipos e assinaturas das funções. Isso requer a identificação de conceitos abstratos que definam os requisitos que um determinado algoritmo exige dos tipos em que ele opera (quanto menos forem os requisitos, mais genérico é o algoritmo). O conceito de *templates* e a *Standard Template Library*, STL, popularizaram o paradigma (JOSUTTIS [33]).

Uma vez que o compilador identifique, por exemplo, duas chamadas de uma mesma função, com os tipos dos parâmetros diferentes, o compilador instancia, em tempo de compilação, uma versão da função para cada tipo de chamada. E se o compilador considerar adequado, essas funções podem ser expandidas no próprio local onde foram utilizadas, não exigindo tempo adicional para sua execução. Este recurso minimiza o problema que a POO apresenta devido ao mecanismo de polimorfismo (BURRUS *et al.* [9]).

Os conceitos básicos que permitem tal segregação dos algoritmos e dos dados são: *containers*, *functors* e *iterators* (JOSUTTIS [33]). *Containers* são estruturas de dados genéricas, que colecionam dados de determinado tipo. Funções-objeto (*functors* ou funtores) são classes que sobrecarregam o operador de função (`operator()`) e permitem acessar e manipular dados colecionados por um *container*. São ainda capazes de manter e obter informação em funções passadas para outras funções. Iteradores (*iterators*) são uma espécie de ponteiros generalizados, que permitem a indireção para busca, acesso e alteração de dados em um *container*.

Linguagens de Programação

Uma linguagem de programação pode ser convertida, ou traduzida, em código de máquina por compilação ou interpretação. Se o método utilizado traduz todo o código fonte, para só depois executar o programa, então se diz que o programa foi compilado e que o mecanismo utilizado para a tradução em linguagem de máquina é um compilador. A versão compilada do programa é armazenada, de forma que o programa pode ser executado um número indefinido de vezes sem necessitar uma nova compilação, o que compensa o tempo gasto na compilação. Por outro lado, se o código fonte é traduzido na medida em que vai sendo executado, num processo de tradução de trechos seguidos de sua execução imediata, diz-se que o programa foi interpretado e que o mecanismo utilizado para a tradução é um interpretador. Programas interpretados são geralmente mais lentos do que os compilados, mas são também geralmente mais flexíveis, já que podem interagir com o ambiente mais facilmente (freqüentemente linguagens interpretadas são chamadas também de *script*).

Abordagem híbrida

Para a realização deste trabalho, usaram-se duas estratégias complementares. Os métodos que exigem mais esforço computacional foram implementados em uma linguagem de alto desempenho, no caso C++ (STROUSTRUP [66]). Os procedimentos que exigem menos esforço foram implementados em uma linguagem de alto nível, interpretada, de resolução dinâmica de tipo, no caso Python [47]. Essa abordagem multi-linguagem aproveita a alta produtividade e flexibilidade, oferecida pela linguagem interpretada, sem perder eficiência, garantida pela linguagem C++.

Porém, a simples utilização do C++ não é garantia de eficiência. Para que sua eficiência seja garantida e consiga ser tão eficiente como outras linguagens de mesma classificação, como o FORTRAN, técnicas modernas de programação devem ser utilizadas (VELDHUIZEN [70] e [71]). Porém o C++, por projeto, sofre de uma perda de eficiência em função do esquema de indireção de memória que utiliza. Mesmo considerando um paradigma de programação procedural, seu uso implica perda de eficiência quando comparada com outras linguagens de mesma classificação. Mas, quando se usa uma abordagem multi-paradigma sua utilização se torna extremamente interessante, uma vez que sua eficiência é garantida através da programação genérica,

com a vantagem da maior manutenibilidade e extensibilidade do código, através da POO.

4.3.2 Interpretação de Saídas de Simuladores de Fluxo

Diferentes simuladores gravam resultados em diferentes formatos. Isso cria dificuldades que podem ser superadas por programas auxiliares para filtrar a informação e produzir arquivos de dados compatíveis com o modelo de visualização utilizado. A interpretação correta das informações gravadas é um desafio para a implementação de métodos integrados externamente ao simulador.

Em geral, os simuladores disponibilizam as saídas em arquivos de dois tipos: formatados e não formatados. Arquivos formatados contêm as informações em formato ASCII. São simples de interpretar e é possível ler o seu conteúdo diretamente: trata-se de um simples arquivo texto. Porém consomem mais espaço e sua leitura é lenta. Arquivos não formatados contêm informações em formato binário. Sua interpretação direta não é simples. Mas requerem muito menos memória do que arquivos formatados e sua leitura pode ser feita de forma rápida quando comparada à leitura de arquivos formatados.

Os arquivos de resultados de uma simulação, de forma geral, contêm os seguintes tipos de dados (SCHLUMBERGER [63]):

- Dado Vetorial: compreendem, por exemplo, conjuntos de números para construção de gráficos lineares, como produção acumulada do campo ao longo do tempo. Dados tabulares, como permeabilidades relativas versus saturações, também estão dispostos nesse formato de dados.
- Dados de Geometria: Geometria da malha definida por coordenadas dos vértices das células.
- Dados de conteúdo da malha: Um *array* de variáveis de solução que são definidos para cada célula a cada passo de tempo que é requerida a gravação. Propriedades de malha de inicialização do modelo também são disponibilizados neste formato.

As propriedades (dados de solução ou dados de inicialização), de uma forma geral, podem estar contidas em diferentes posições da malha: nós, arestas, faces ou centro das células. A representação dessas propriedades depende, basicamente, do esquema de discretização utilizado para a solução numérica¹⁷. No caso particular de um esquema de discretização CVFD utilizado em simuladores convencionais, mesmo as propriedades fisicamente associadas a faces, são representadas nos centros de células seguindo uma convenção. Duas propriedades que seguem essa convenção são a transmissibilidade e o fluxo entre duas células: a componente vetorial em uma dada direção d para a célula i de uma célula vizinha n é

$$\vartheta_{ni} = \vartheta(i, j, k) \quad (4.1)$$

já que os fluxos nas fronteiras é nulo em função da condição de contorno. A indexação para os mapas de trabalho e energia dissipada seguem a mesma convenção.

Cada propriedade vetorial tem seus vetores, originalmente representados nas faces das células, decompostos em suas três componentes (Figura 4.3) e cada uma delas representadas como propriedades escalares seguindo a convenção apresentada (Figura 4.4).

¹⁷ Uma breve apresentação dos métodos de discretização foi apresentada na Seção 2.4.2

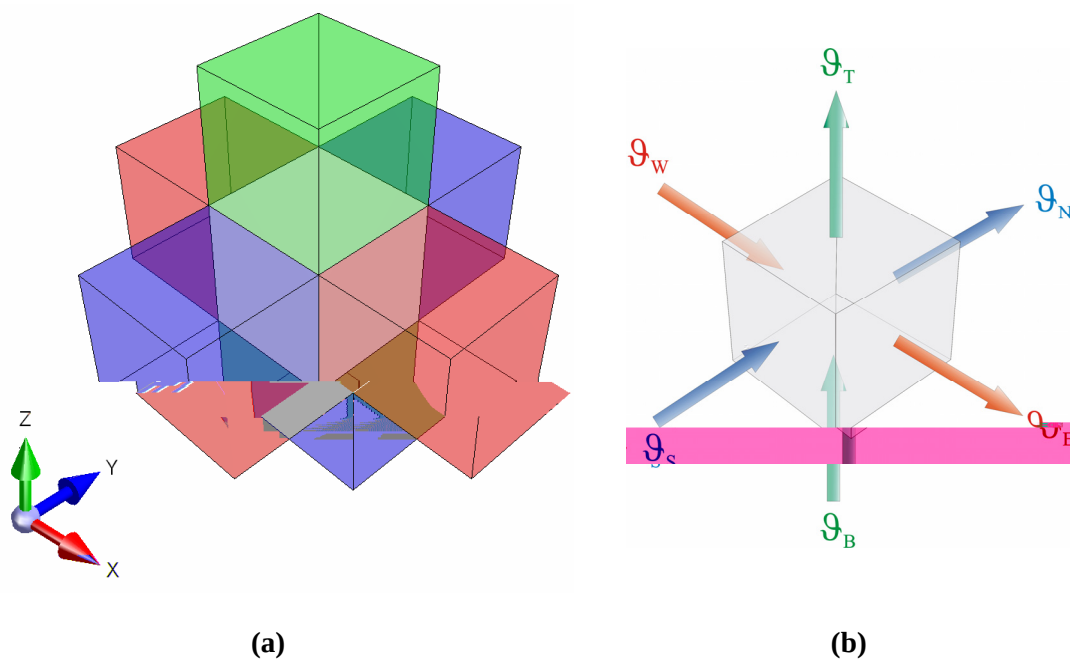


Figura 4.3 – Vizinhança de uma célula de simulação em um esquema 7 pontos (a) e decomposição vetorial referente à célula.

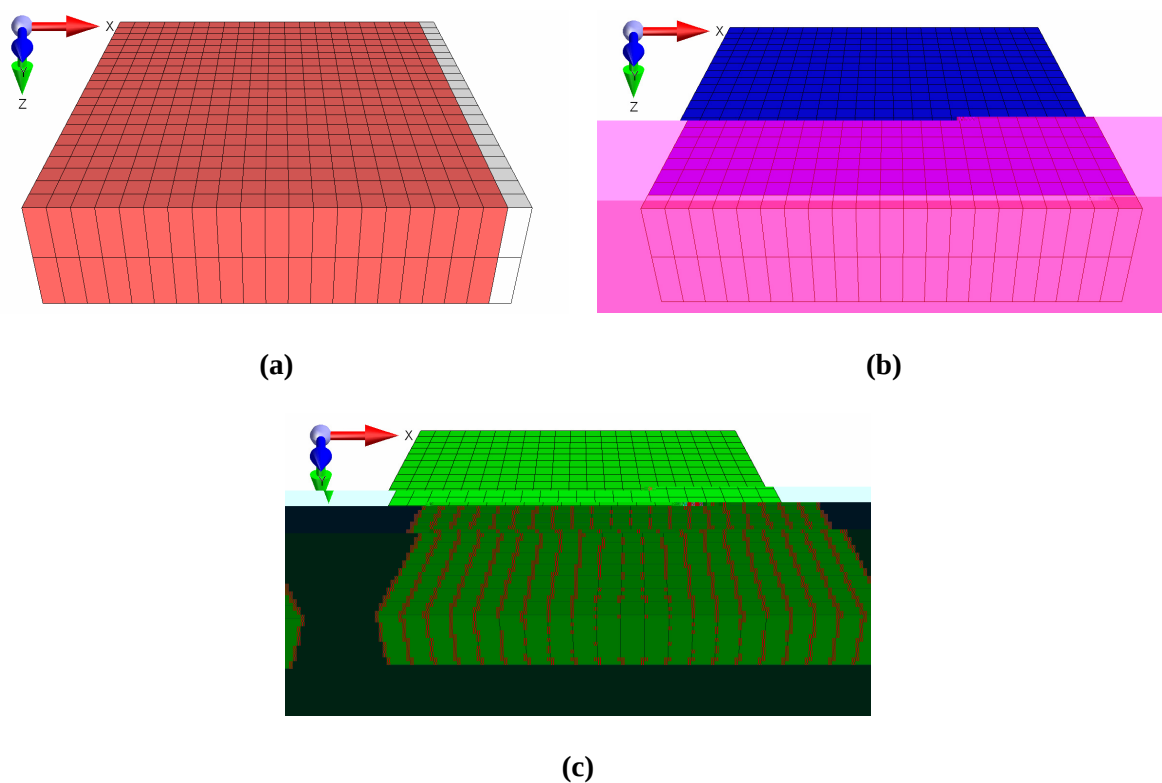


Figura 4.4 – Representação de mapas vetoriais segundo convenção adotada. (a) Componente X, (b) componente Y e (c) componente Z.

Diferentes simuladores comerciais e pós-processadores associados usam diferentes estratégias para gravação e preparação de dados para o pós-processamento. A estratégia usada pelos programas da CMG [15] consiste em gravar um mínimo de informação, mas exigindo maior esforço de pós-processamento. O Results [15] processa os resultados do simulador IMEX para obter propriedades importantes na análise de reservatórios (por exemplo, corte de água). Tem como vantagem tornar menos custosas as simulações de fluxo, sendo calculadas apenas as quantidades necessárias para o cálculo das variáveis primárias do problema (saturações e pressões das fases) e outras variáveis cuja solução do fluxo depende. Todas informações adicionais podem ser obtidas através do pós-processamento numérico das propriedades calculadas. Em contrapartida, simuladores como o Eclipse calculam, à medida que são requisitadas, as propriedades ao longo da simulação de fluxo, tornando o processo de simulação mais custoso. Além do cálculo envolvido para a obtenção das propriedades, mais tempo é requerido para a gravação dessas informações em arquivo para o pós-processamento visual dos dados.

4.3.3 Tecnologias e ferramentas de base pinch-outs3.3

Baseado nos conceitos identificados por BERTI [6], foi desenvolvida a biblioteca PetroLib, que trata do armazenamento, manipulação, visualização e escrita e leitura genérica de dados dos diferentes tipos de malhas de reservatório e de suas propriedades.

A biblioteca entende esses conceitos para

Nr9(R6(r56.7(so)1.(se))TJ4TT2 1 Tf115436 0 0 115448id)1236-0.000m D-0.0008 T9-070loes D()-3

A biblioteca oferece a tecnologia de leitura e gravação de dados de malha nos mais distintos formatos, sendo capaz de ler e gravar os dados em qualquer formato definido pelo usuário. Este nível de flexibilidade é atingido através de um modelo de leitor/gravador genérico, que manipula arquivos ASCII. Todos os formatos ASCII de simuladores de fluxo comerciais seriam, então, apenas configurações diferentes do leitor/gravador genérico.

Esse leitor/gravador genérico baseia-se na definição de átomos reconhecíveis no arquivo de dados. Cada átomo define um conjunto de informações pertinentes ao problema. A localização desses átomos dentro do arquivo pode ocorrer através de busca sequencial ou por palavra-chave.

O acesso a toda essa tecnologia é realizado através do *software* Ciclope. Desenvolvido em linguagem Python, ele é uma ferramenta para manipulação e visualização de dados de geologia e simulação de reservatórios.

Nele são disponibilizadas especializações do modelo de leitor genérico para diversos simuladores comerciais, de particular interesse aqui o IMEX e o ECLIPSE. Baseado nos

4.4 ARCABOUÇO PARA PÓS-PROCESSAMENTO DE SIMULAÇÕES

A biblioteca de base ainda conta com um módulo específico que contém algoritmos e estruturas de dados para possibilitar o pós-processamento de simulações. Esse módulo foi desenvolvido através de contribuições de trabalhos já citados (DAMIANI [18] e LUCIANETTI [36]), fornecendo abstrações para o tratamento numérico de poços, conjunto de malhas, tabelas de propriedades.

Uma extensão desse módulo foi feita neste trabalho, através da inclusão de novos algoritmos e a formalização da metodologia de pós-processamento numérico.

Para que tais algoritmos exógenos ao núcleo do simulador sejam possíveis de utilização, uma estrutura de dados bem organizada e de interface (*API*) bem definida deve estar disponível. Isto permite ao usuário criar seus próprios procedimentos e ainda facilita a prototipagem de algoritmos, principalmente quando estes são simples (por exemplo, cálculo do mapa de saturação de óleo baseado nas saturações de água e gás).

Porém esses algoritmos podem crescer de complexidade tanto quanto o modelo a ser implementado for elaborado. Isso pode implicar em perda de eficiência uma vez que as instruções do algoritmo devem ser interpretadas em tempo de execução.

Um arcabouço de estruturas de dados e algoritmos identificados úteis para o pós-processamento desses dados viabiliza a implementação de modelos mais elaborados, uma vez estipulados dados necessários e os protocolos para o funcionamento genérico desses modelos.

Como uma abordagem mais abrangente do problema do pós-processamento de simulações de reservatórios, foi criado na biblioteca PetroLib um módulo que contém algoritmos e estruturas de dados para trabalhar com as informações de saída dos simuladores.

Os requisitos levantados para a criação da biblioteca foram:

Generalidade: os algoritmos de pós-processamento devem trabalhar com a saída de qualquer simulador de fluxo de forma indistinta. Como discutido no CAPÍTULO 3, é necessário que determinadas propriedades estejam presentes no estado U . O requisito mínimo para o cálculo proposto é que U contenha um conjunto mínimo de *gridfunctions*, porém nem todos os simuladores dispõem dessa informação a serem escritas em seus arquivos de resultados. Sendo assim faz-se necessário calcular esses mapas a partir das propriedades básicas que, normalmente, são disponibilizadas pelas saídas dos simuladores. Isso implica que, antes de ser aplicado um algoritmo de pós-processamento, deve ser garantido que todas as propriedades necessárias para o seu cálculos estejam presentes na malha. O atendimento desse requisito por vezes implica em alguma perda de eficiência. Às vezes certas propriedades devem ser transformadas de modo a serem disponibilizadas da forma como o pós-processamento as espera através de um pré-processamento.

Conversão de unidades: as propriedades calculadas devem respeitar o sistema de unidades da simulação, caso haja necessidade de alguma conversão, essa deve ser feita sem alterar a *gridfunction* original. *Functors* baseados nas *gridfunctions* convertem os valores dessas em tempo de execução, sem alterar o mapa original.

Flexibilidade: trabalhar com simulações monofásico ou multifásica, n-dimensional de forma otimizada. Para tanto, os algoritmos devem se comportar de forma a não contar com informações referentes à geometria e número de fases.

Extensibilidade: Deve ser facilmente extensível, de forma a atender o acoplamento de qualquer modelo que atenda os requisitos da abordagem integração externa (pós-processamento). Para isso, uma classe-base representando a abstração de pós-processamento é disponibilizada.

Acurácia e eficiência: a solução das parcelas energéticas envolvem integrações no tempo. A forma como é resolvida essa integral depende da frequência de impressão da solução no arquivo de saída: é através da leitura desses arquivos que são obtidos os valores das propriedades. Deve ser garantida a aderência da solução do problema

tratado no pós-processamento com a simulação de fluxo. Para que a solução do cálculo proposto esteja em conformidade com a simulação é necessário que sejam impressos todos os passos de tempo utilizados pelo simulador para a solução do problema ao longo do tempo de forma que as equações sejam resolvidas e a solução seja carregada ao longo do tempo de forma correta, ou ao menos cometendo erros da mesma ordem de grandeza das cometidas pelo simulador.

A Figura 4.5 ilustra o problema da aproximação numérica da integração e os possíveis erros cometidos. No gráfico, T representa o operador de integração numérica, dependente da função $f(t)$ e do passo de tempo utilizado na integração. As áreas associadas às integrações numéricas são distintas da obtida através da integração da função contínua devido às aproximações particulares do método e do tamanho do passo de tempo adotado. Caso o passo de tempo de impressão dt_{imp} seja maior que o passo de tempo utilizado na simulação dt_{sim} , maiores ou menores erros ao integrar a solução podem estar sendo cometidos, a depender do comportamento da solução.

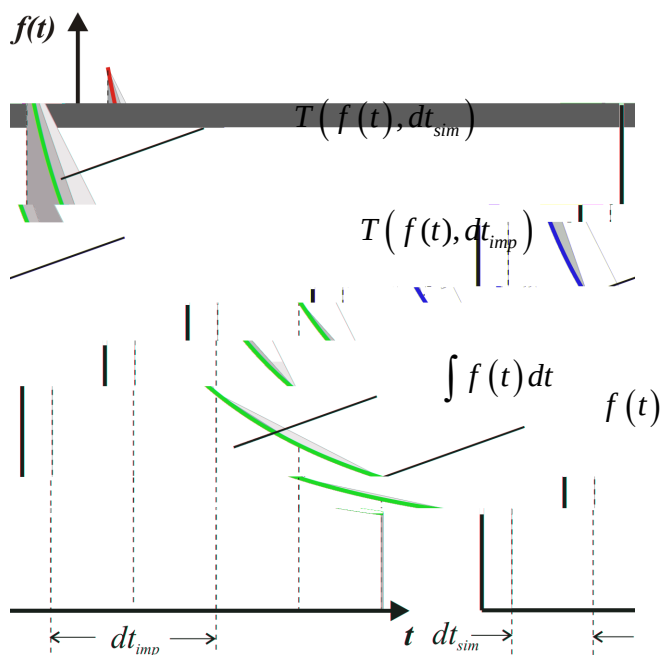


Figura 4.5 – Relação com a frequência de impressão da solução e acurácia do método de pós-processamento. T é o operador de integração numérica.

Porém como foi comentado na seção 2.4.4, uma grande quantidade de informação pode ser gerada a cada passo de tempo. O requisito de que todos os passos de tempo sejam impressos gera uma quantidade de informação muito grande, o que na etapa de pós-

processamento pode ser uma desvantagem devido à quantidade de informações que devem ser lidas e do tempo gasto para isso. Um tratamento especial em relação ao acesso desses dados será abordado na seção 4.6.

As etapas do algoritmo ora são realizadas na biblioteca PetroLib, ora no software Cyclope. Essa distinção é feita utilizando o critério de eficiência apresentado na seção 4.3.1.

Essa intercambialidade entre as linguagens é feita através de *bindings*¹⁸ entre as linguagens C++ e Python (utilizando a biblioteca Boost [7]), e através de *wrappers* de funções em C++ para o Python.

Na seção 4.4.1 serão apresentadas as principais estruturas de dados implementadas para a viabilização do esquema de pós-processamento capaz de permitir a incorporação de modelos acessórios de forma a atender os requisitos apresentados.

4.4.1 Algoritmos e Estruturas de Dados

A Figura 4.6 apresenta o diagrama de classes, representada em UML¹⁹, dos principais componentes do módulo de pós-processamento, a arquitetura da biblioteca.

¹⁸ Na ciência da computação, *binding* é a criação de uma simples referência a algo mais complicado e usado com frequência, para não ter que repeti-la.

¹⁹ UML (*Unified Modeling Language*) é uma linguagem de modelagem que permite ao desenvolvedor visualizar o programa através de diagramas padronizados.

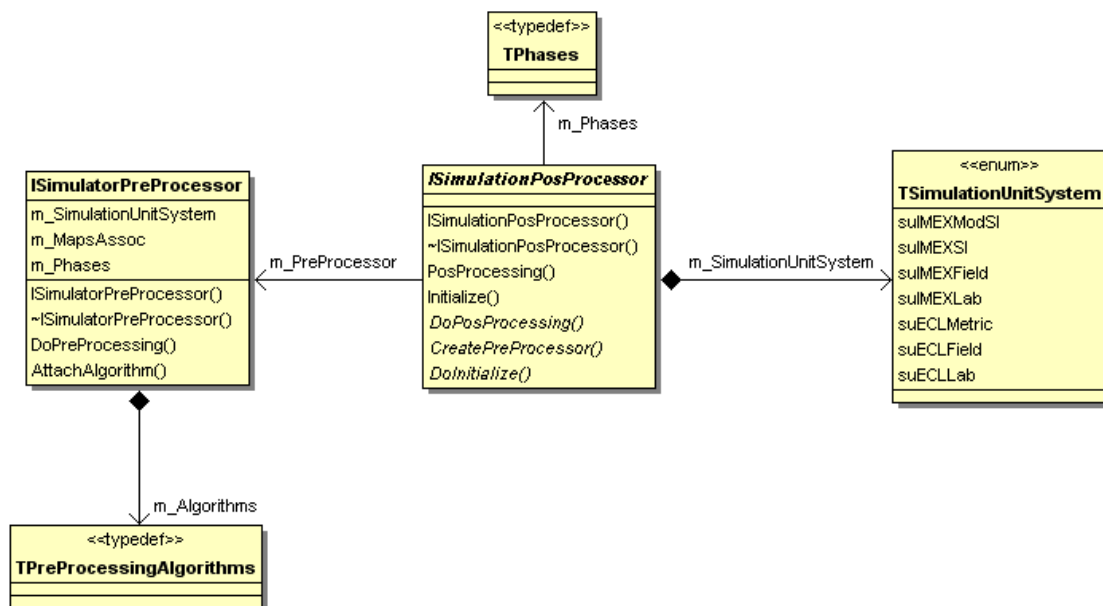


Figura 4.6 – Diagrama UML dos principais componentes do módulo de pós-processamento.

Pseudo-código do esquema de pós-processamento

A metodologia utilizada para o pós-processamento é apresentado a seguir. O algoritmo implementado é explicado e apresentado simultaneamente, a fim de torná-lo claro e não necessitar da utilização dos tipos utilizados no código.

Entrada: simulação
 Saída: simulação atualizada, arquivo de saída

- 1: Cria modelo de pós-processamento
 - 1.1: Inicializa estrutura de dados
 - 1.2: Cria pré-processador baseado no simulador utilizado para obter resultados
- 2: Calcula propriedades do modelo
 - 2.1: Para cada passo de tempo calculado pelo simulador de fluxo
 - 2.1.1: Lê as malhas e suas propriedades do arquivo e monta o conjunto de malhas
 - 2.1.2: Para cada malha no conjunto de malhas
 - 2.1.2.1: Aplica algoritmos de pré-processamento para criar propriedades de pré-requisito
 - 2.1.2.2: preenche cada container de energia utilizando o algoritmo Fill parametrizado pelo functor apropriado
 - 2.1.3: Calcula as propriedades de sumário
- 3: Escreve propriedades e curvas de sumário no arquivo de saída

Os passos 1.1, 1.2, 2.1.2, 2.1.2.1, 2.1.2.2 são implementados em C++, na biblioteca de base (a PetroLib [53]) pois são etapas que exigem grande esforço computacional. Os passos 1, 2.1, 2.1.1, 2.1.3 e 3 são implementados em Python, no *software* Cyclope [24],

pois não são métodos que não exigem tanto esforço computacional e podem ser implementados em uma linguagem de mais alto nível, que oferece uma maior agilidade para o desenvolvimento do código.

Pré-Processador

O módulo `PreProcessor` contém objetos que aplicam os algoritmos necessários sobre o resultado da simulação para serem obtidas as propriedades necessárias para os cálculos a serem realizados pelo Pós-Processador. A fim de não ser realizado cálculo desnecessário é informado ao pré-processador quais as *gridfunction* de pré-requisito para o pós-processamento que será realizado. As classes de pré-processamento têm a seguinte assinatura:

O pré-processador do simulador é responsável por fazer as conversões necessárias das *gridfunctions*, sem alterar as originais, com o objetivo de manter as *gridfunctions* da simulação com as unidades do sistema de unidades original. Ele deve ainda criar as *gridfunctions* necessárias ao modelo de pós-processamento baseado nos requisitos do algoritmo deste. O dado membro `m_Algorithms` coleciona todos os algoritmos necessários para criar as *gridfunction* que faltam ao resultado da simulação. Esses algoritmos são adicionados através do método `AttachAlgorithm`. O método `DoPreProcessing` itera sobre a coleção de algoritmos, calculando as *gridfunctions* restantes ao modelo.

Pós-Processador

A estrutura `TSimulationPhases` informa as fases presentes na simulação; a estrutura `TPreProcessorGridFunctions` informa as propriedades necessárias para determinado pós-processamento. Essas estruturas de dados evitam a criação desnecessária de *gridfunctions*, evitando assim processamento e alocação de memória desnecessária.

Algoritmos

A classe base para qualquer algoritmo é a `Algorithm`, que representa a simples funcionalidade de calcular para todas as células determinada propriedade. O método `Calculate` instancia o *functor* adequado para o cálculo e utiliza o algoritmo `Fill`.

que itera sobre todas as células do modelo preenchendo a *gridfunction* com a propriedade calculada.

Funtores

Cada uma das formas de energia identificadas na modelagem matemática do problema tem sua fórmula de cálculo implementada em um functor. Cada functor armazena as *gridfunctions*, passadas através de sua construtora, que necessita para realizar o seu cálculo e sobrecarrega o operador função onde é implementado a fórmula de cálculo.

Os *functors* calculam, para cada célula, o valor da propriedade. A *gridfunction* é preenchida através de um algoritmo que itera em cada uma de suas células e aplica o cálculo implementado no functor. O algoritmo é ilustrado a seguir.

ENTRADA: um estado baseado em células $U : G^d \mapsto \mathbb{R}^p$ (Solução aproximada da EDP)

SAÍDA: uma propriedade baseada nas células: $G^d \mapsto \mathbb{R}^p$

1: para todas as células $c \in G$, faça

2: $p(c) = \text{functor}(c, U)$

Esse algoritmo requer um conjunto pequeno de conceitos:

- *GridFunction*: seu requisito é ter um iterador que percorra seus elementos (as células), cujo elemento para o qual ele aponta possa ter seu valor modificado;
- *Functor*: seu requisito é ter o operador função e que ele retorne um valor que será atribuído àquela célula.

4.5 IMPLEMENTAÇÃO DO CÁLCULO DAS ENERGIAS

Por uma questão de escopo, foi implementado o modelo *black oil* bifásico e bidimensional. Porém a dedução das equações (CAPÍTULO 3) mostra a possibilidade da utilização do modelo no caso *black oil* completo (tridimensional e trifásico com vaporização e solução de componentes), ou até mesmo em um modelo composicional.

As propriedades primárias para o cálculo das parcelas de energia podem não estar

Os multiplicadores de transmissibilidade em cada direção são propriedades estáticas, dados de entrada da simulação, informados no arquivo de configuração do modelo para cada face interna das células de simulação. Dessa forma, seguem a mesma convenção de representação nas células que os fluxos e as transmissibilidades.

A viscosidade, permeabilidade relativa e fator de formação de volume são informados no formato de tabelas que são interpoladas em função da variação de pressão e saturações e seus valores são calculados para cada célula de simulação. Dependendo do simulador, propriedades escalares são escritas no arquivo de saída contendo essa interpolação em função da pressão de cada célula.

As profundidades das células podem ser estimadas como o centro dessas, quer dizer, como apenas uma informação geométrica.

Atenção especial deve ser dada às informações de vazões. As vazões podem ser disponibilizadas tanto em condições de superfície quanto em condições de reservatório. Simuladores como o IMEX têm a opção de fornecer as vazões de poços em ambas as condições. Uma vez que o simulador permita a impressão das informações em condições de reservatório, será essa o requisito quando esse simulador for utilizado. Caso o simulador forneça apenas em condições de superfície, essa informação será levada para condições de reservatório.

Da mesma forma, na Figura 4.8 é ilustrado o fluxograma de cálculo da energia de expansão de rocha e fluidos (seção 3.4.3).

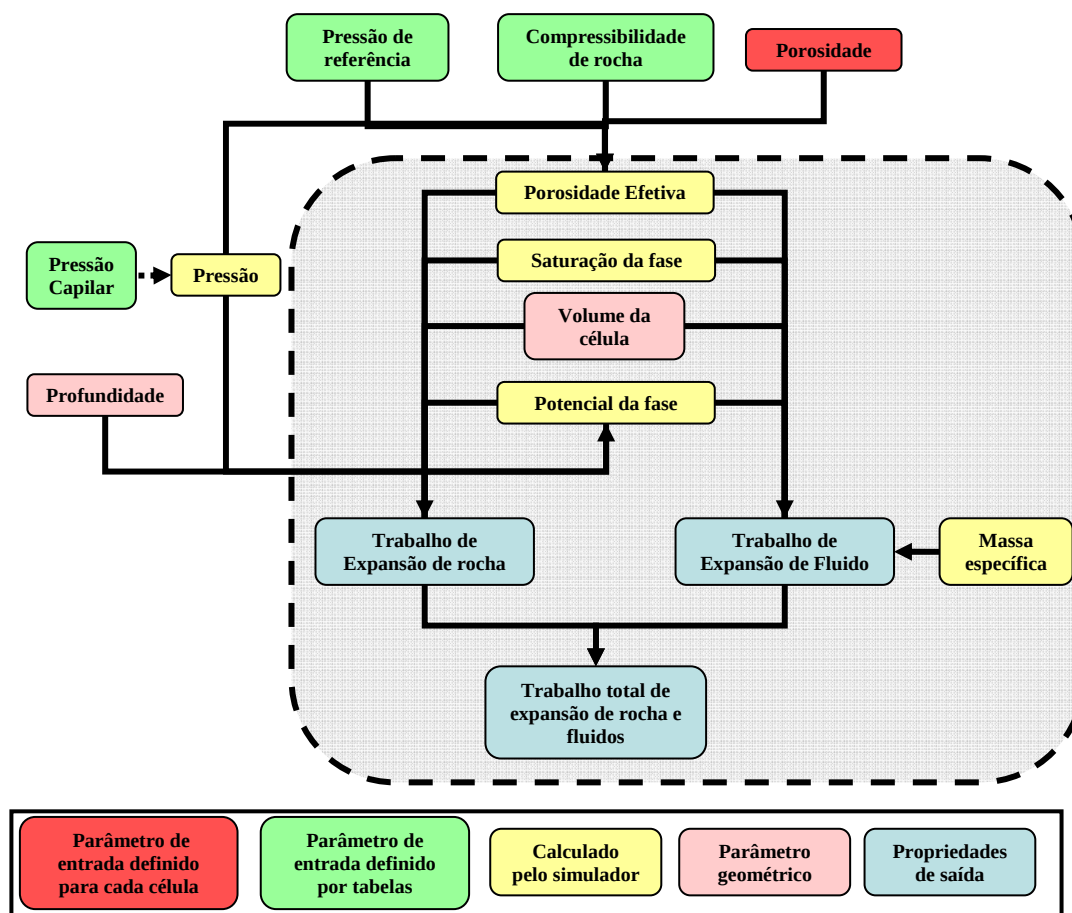


Figura 4.8 – Interdependência das propriedades no cálculo da energia de expansão.

Aqui é possível exemplificar a perda de eficiência em função da generalidade. O volume da célula e a porosidade efetiva são necessários para o cálculo da variação do volume poroso no tempo. Um simulador pode fornecer diretamente o volume poroso e não seria necessário calculá-lo em função das propriedades citadas. Porém isso geraria implementações diferentes para cada tipo de simulador, em função das propriedades disponíveis no seu arquivo de saída. Porém é possível calcular a porosidade efetiva apenas dividindo o volume poroso pelo volume da célula, o cálculo inverso, num pré-processamento. Ainda que essa conta direta deva ser feita novamente no momento de calcular a energia de expansão, isso garante que o mesmo método de cálculo seja utilizado para esse simulador.

O fluxograma para o cálculo de energia de poço está ilustrado na Figura 4.9.

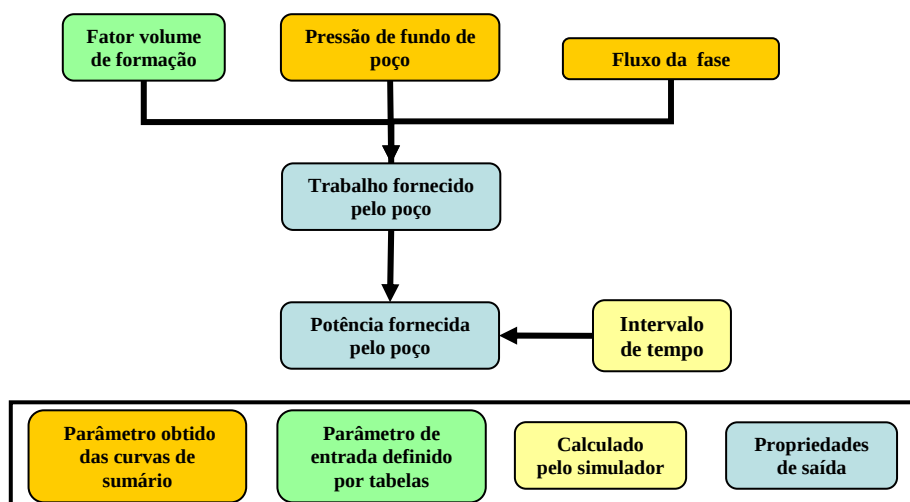


Figura 4.9 – Interdependência de propriedades para o cálculo do trabalho de poço.

Aqui são necessárias propriedades presentes nos vetores de sumário, curvas de propriedades no tempo, e tabelas de fator volume de formação contra pressão para cada fase do escoamento. A tabela é utilizada para obter o valor do fator volume de formação na pressão de fundo que o poço opera, através de uma interpolação linear.

O fluxograma para o cálculo de energia de fronteira está ilustrado na Figura 4.10.

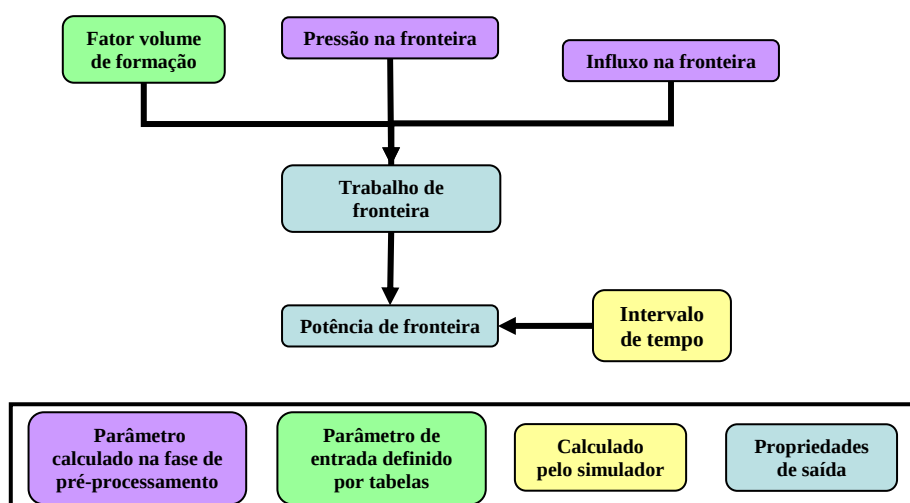


Figura 4.10 – Interdependência de propriedades para o cálculo do trabalho de fronteira.

O cálculo do trabalho sobre a fronteira, para o caso de aquífero, poderia ser feito, a princípio, de duas maneiras. Uma delas seria utilizar as informações das curvas de sumário para obter o influxo de água proveniente do aquífero e a pressão atuante deste. Porém, nem todos os modelos de aquífero fornecem a pressão atuante; na verdade apenas a utilização de um dos modelos, o de Fetkovich. Isso restringiria a utilização da metodologia a apenas esse modelo e ainda a apenas modelos analíticos. Mais ainda, restringiria a apenas energia de fronteira proveniente de aquíferos, não atendendo ao cálculo da energia de fronteira proveniente da capa de gás, ou da energia que cruza a fronteira de um volume de controle arbitrário. Outra solução, a adotada, é utilizar as pressões e os influxos nas faces das células de fronteiras em contato com a vizinhança (aquífero, capa de gás, ou até mesmo uma vizinhança arbitrariamente definida). Como os simuladores costumam informar apenas as pressões no centro das células, é preciso, nesses casos, elaborar um cálculo de interpolação. O algoritmo é descrito no APÊNDICE C.

São apresentadas na Tabela 4.1 as propriedades que devem ser calculadas através do pré-processamento do resultado de simulação de fluxo baseado no simulador de reservatórios utilizado e na parcela energética.

Tabela 4.1 – Pré-processamento necessário para o cálculo energético segundo o simulador utilizado.

	Energia dissipada	Energia de Expansão	Energia de fronteira
ECLIPSE	Fator volume de formação	Fator volume de formação Porosidade efetiva Saturação de óleo	Influxo de água de aquífero
IMEX	Transmissibilidade Fluxo Fator volume de formação Potencial	Fator volume de formação	Influxo de água de aquífero

A classe que trata do pós-processamento das energias do reservatório trata-se de uma extensão da classe base `ISimulationPostProcessor` (apresentada no APÊNDICE D). Em seus métodos são implementados os cálculos descritos na seção 3.4.

4.6 OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL

O cálculo de energia como pós-processamento exige do engenheiro que, além do tempo gasto na simulação de reservatório, que pode ser grande (modelos de simulação podem levar horas para rodar), ele gaste um tempo adicional para a execução do modelo energético. Esse tempo pode ser inclusive maior que o próprio tempo da simulação de fluxo. Com o intuito de reduzir esse tempo adicional, um pequeno esforço foi dispendido a fim de reduzir o tempo de simulação dos pós-processamento.

Sabe-se que o acesso a dados mais lento disponível na arquitetura atual dos computadores é o acesso a disco. De posse dessa informação, a otimização mais imediata é reduzir o acesso a disco para buscar dados nos arquivos de resultado de simulação.

O esforço computacional para leitura dos dados no arquivo pode ser estimado através da quantidade de dados contidos no arquivo. A complexidade do algoritmo de leitura é linear, ou seja, $O(n)$, onde n é o número de dados de entrada do algoritmo, quer dizer, a quantidade de dados que deve ser lida. A quantidade de dados referentes às propriedades da malha contida no arquivo de simulação é proporcional ao número de células (n_{cells}), ao número de propriedades transientes (n_{tp}) e ao número de passos de tempo (n_{ts}). Logo, é correto escrever que a complexidade do algoritmo de leitura é $O(n_{ts} \cdot n_{tp} \cdot n_{cells})$ ²⁰.

Para um dado modelo, o número de células é fixo. Os simuladores fornecem a possibilidade de configurar o número de passos de tempo e quais as propriedades transientes que se deseja gravar em arquivo. Porém, gravar os passos de tempo em uma frequência diferente daquela utilizada para a solução do escoamento implica em perda de acurácia na solução (seção 4.4), e escolher apenas as propriedades que deverão ser utilizadas no pós-processamento pode dificultar outras análises adicionais. Porém, o leitor especializado da PetroLib para o simulador ECLIPSE tem uma opção para

²⁰ Em notação O , ou *Big O Notation*, $O(k \cdot n) = O(n)$, $k \in \mathbb{R}$.

configurar a leitura das propriedades transientes da simulação de forma a ler apenas as propriedades que se têm interesse.

Para avaliar essa possível otimização, realizou-se um experimento numérico que consistiu na realização de dez pós-processamentos utilizando a otimização de leitura e dez pós-processamentos sem a utilização da otimização da leitura para a tomada do tempo de execução do modelo computacional. O caso selecionado foi o modelo utilizado na aplicação descrita na seção 6.1. A malha de simulação é construída por 2601 células. Sem a otimização de leitura, o algoritmo de leitura deve ler um total de 22 propriedades transientes a cada passo de tempo, enquanto que com a otimização deve ler apenas 12. O número total de passos de tempo utilizados para a solução do fluxo é 642. O computador utilizado foi um Intel Pentium D 3.6 GHz (Dual Core) com 4 GB de memória RAM e 220 GB de HD (sistema SATA).

Na Figura 4.11 é possível observar comparativamente a parcela no tempo de computação de cada etapa do algoritmo. No gráfico, **“Leitura dos dados no arquivo”** diz respeito apenas à função que lê no arquivo os dados de propriedades transientes. Não está sendo considerado, por exemplo, leitura das curvas de produção, uma vez que o modelo tem apenas 3 poços e a otimização proposta implica apenas na leitura de propriedades; **“Pós-processamento”** diz respeito ao cálculo propriamente dito das parcelas energéticas; **“Escrita dos dados em arquivo”** é a escrita em arquivo das propriedades calculadas pelo pós-processamento; **“Montagem da estrutura de dados”** se refere à criação e montagem da malha e seus componentes; **“Outras funções”** são métodos que participam do algoritmo, agrupadas pois individualmente não implicam em uma parcela significativa do tempo computacional.

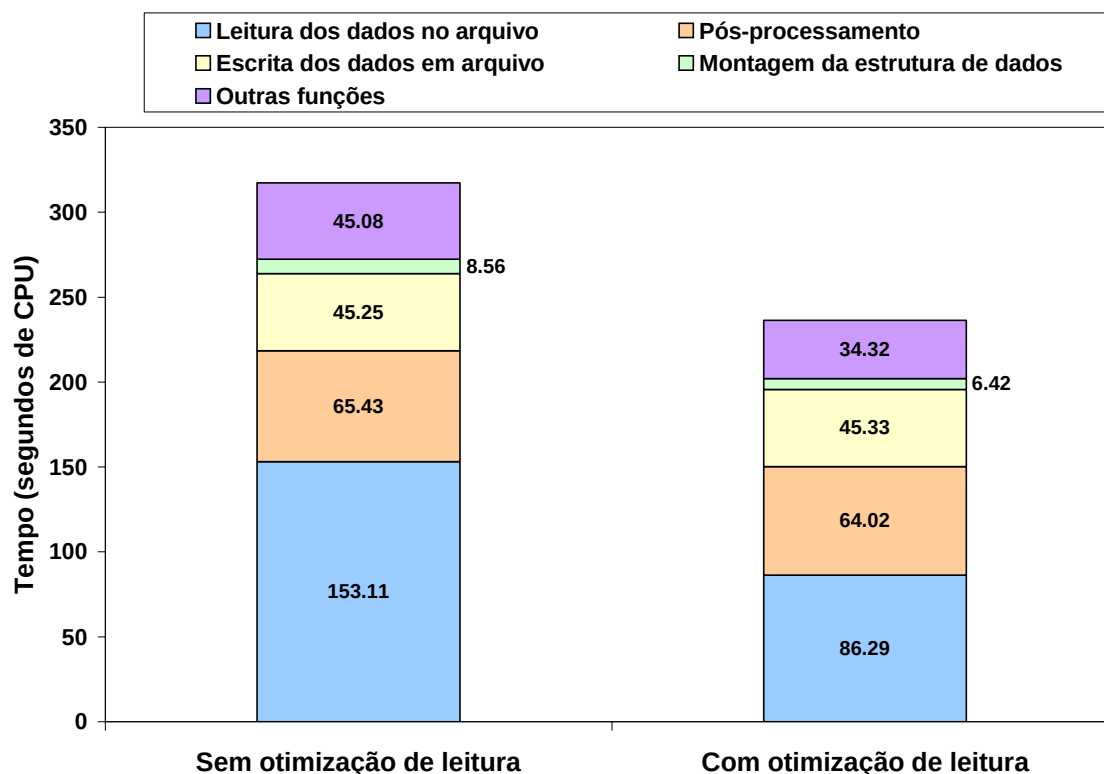


Figura 4.11 – Otimização do desempenho do código – otimização da leitura de dado em arquivo.

A menos da leitura de dados no arquivo, as outras etapas do algoritmo sofreram pouca ou nenhuma alteração em seu tempo de execução, como poderia se esperar. Porém, com a otimização, o tempo total de simulação caiu de 317,42 segundos para 236,38 segundos de *CPU*, um ganho relativo de 26% no tempo de execução do algoritmo. É claro que esta otimização diz respeito quase que exclusivamente à otimização da leitura de dados, cuja etapa teve um ganho relativo de 44%. Outros ganhos em relação ao tempo de execução foram devidos a implicações diretas ou indiretas dessa otimização; por exemplo, o ganho na montagem da estrutura de dados, etapa que se beneficia do fato de ter menos informação para ser criada na aplicação.

O experimento e a solução adotada, apesar de simples, fornecem uma clara idéia do que é talvez o problema mais pertinente do esquema do pós-processamento: o consideravelmente alto tempo de execução devido ao acesso a dados no arquivo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

“Thermodynamics is a funny subject. The first time you go through it, you don’t understand it at all. The second time you go through it, you think you understand it, except for one or two points. The third time you go through it, you know you don’t understand it, but by that time you are so used to the subject, it doesn’t bother you anymore” – Arnold Sommerfeld

5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

Não se conhece nenhum programa computacional com desenvolvimento análogo a este que pudesse servir para comparação de resultados. Então, a forma utilizada para validar a implementação do modelo foi o cálculo do balanço de energia em situações simples em que os resultados pudessem ser facilmente verificados. Em especial, a condição de fechamento do balanço, com erro numérico abaixo de uma tolerância diminuta, serviu sempre como controle básico dos resultados.

Foi adotado um esquema de validação através da aplicação do método em casos de crescente complexidade, e comparando-se as respostas, quando possível, com soluções conhecidas, começando com escoamento monofásico em meio homogêneo, regido pela equação da difusividade hidráulica (ROSA *et al.* [58]):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.1)$$

ou

$$\nabla^2 p = \eta \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.2)$$

onde o termo

$$\eta = \frac{\phi \mu c_t}{k} \quad (5.3)$$

é chamado de constante de difusividade hidráulica.

5.1.1 Fluxo monofásico, Linear, Regime Rermanente

Para este caso em particular, a equação da difusividade hidráulica se resume a

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = 0 \quad (5.4)$$

e condições de contorno

$$\begin{cases} x = 0 \rightarrow p(x) = p_w \\ x = L \rightarrow p(x) = p_e \end{cases} \quad (5.5)$$

A solução da equação (5.4) submetida às condições de contorno definidas na equação (5.5), nos levam à seguinte expressão (ROSA *et al.* [58])

$$p(x) = p_w + \frac{q_w \mu L}{kA} \left(\frac{x}{L} \right). \quad (5.6)$$

Neste caso a vazão é constante ao longo da formação e igual a

$$q(x) = \frac{kA}{\mu} \frac{p_e - p_w}{L}. \quad (5.7)$$

Para o caso testado, os valores das propriedades e dimensões do modelo estão descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Propriedades e dimensões da formação para o caso linear, monofásico, regime permanente.

Comprimento da formação	1.000 m
Espessura da formação	10 m
Largura da formação	10 m
Permeabilidade da formação	1.000 mD
Vazão de produção e injeção	10 m ³ /dia
Viscosidade do fluido	0,504 cP
Pressão de produção	25 MPa

O gráfico apresentado na Figura 5.1 ilustra a comparação da distribuição da pressão ao longo da formação entre a simulação numérica e a solução analítica.

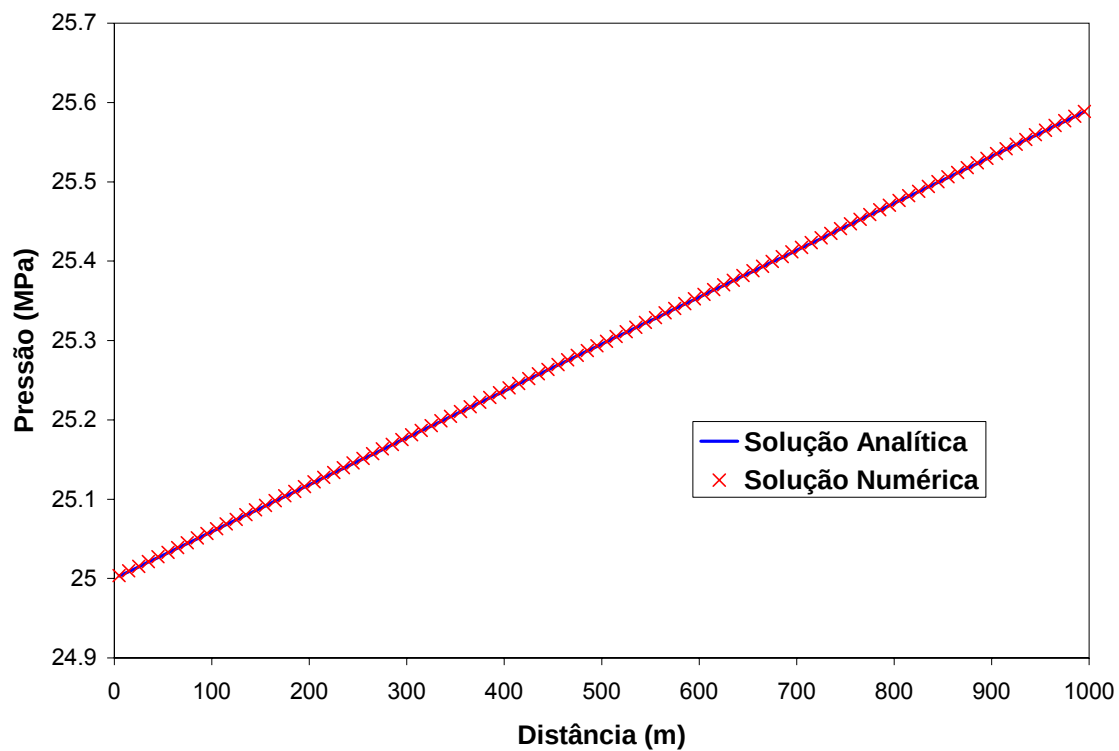


Figura 5.1 – Comparação entre a pressão simulada e a pressão analítica para o caso linear, regime permanente.

O gráfico apresentado na Figura 5.2 ilustra a comparação da distribuição da energia dissipada no escoamento ao longo da formação para a simulação e para a solução analítica.

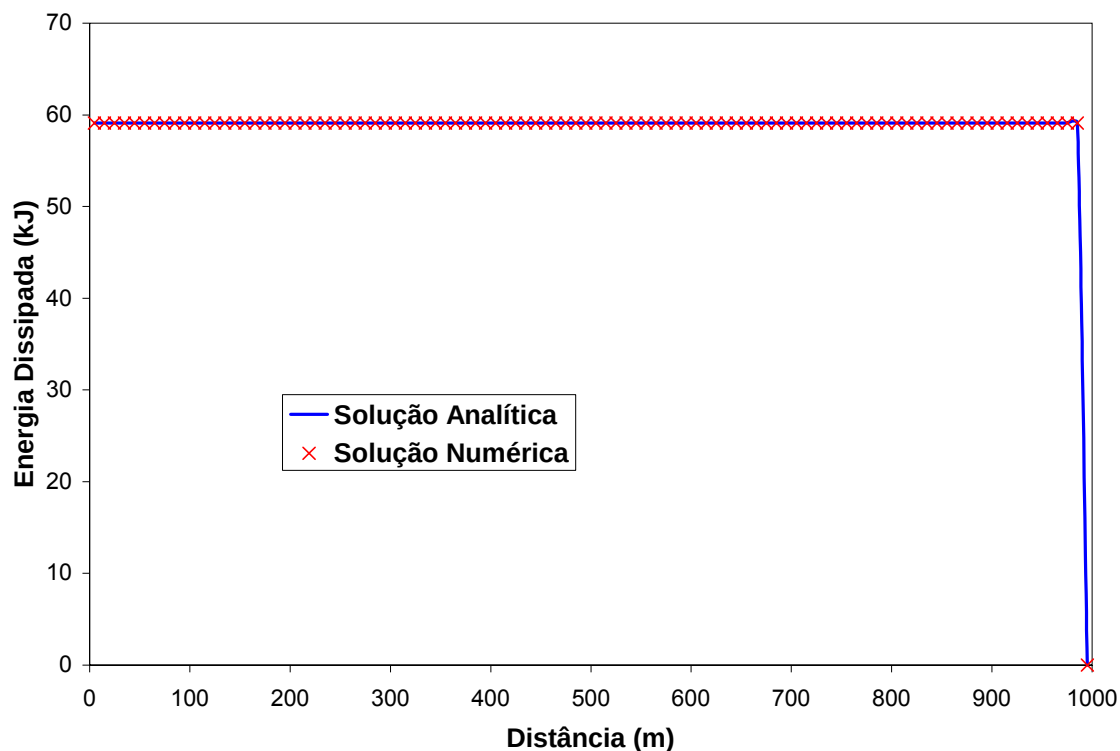


Figura 5.2 – Comparação entre a energia dissipada (após um dia de produção) obtida pela solução analítica e através do pós-processamento da simulação de fluxo.

O balanço energético para este caso fecha com um erro de apenas 7.49E-10 kJ.

A fim de avaliar a coerência do comportamento físico do modelo foram realizados alguns testes de sensibilidade muito simples, variando a permeabilidade da formação e a viscosidade do fluido, parâmetros que influenciam diretamente a energia dissipada. Os resultados são apresentados nas Tabela 5.2 e

Tabela 5.3, mostram-se perfeitamente consistentes.

Tabela 5.2 – Efeito da variação da permeabilidade nas parcelas energéticas após um ano de produção.

	$k = 1000 \text{ mD}$	$k = 100 \text{ mD}$
$\Delta E_{\mu} \text{ (kJ)}$	21.329,79	213.297,91
$W_{well} \text{ (kJ)}$	21.329,79	213.297,91
Balanço de Energia (kJ)	7,49E-10	2,88E-09

Tabela 5.3 – Efeito da variação da viscosidade nas parcelas energéticas após um ano de produção.

	$\mu = 0,504 \text{ cP}$	$\mu = 0,252 \text{ cP}$
$\Delta E_{\mu} \text{ (kJ)}$	21.329,73	10.664,86
$W_{well} \text{ (kJ)}$	21.329,73	10.664,86
Balço de Energia (kJ)	7,49E-10	8,37E-11

Este simples exercício chama a atenção para as implicações de produzir um reservatório “mais fechado” ou com um fluido mais viscoso. Antes o que se tinha apenas a impressão qualitativa quando dito que seria necessário mais energia para se explotar um reservatório com baixa permeabilidade ou com um fluido mais viscoso, agora é possível observar que, para este simples caso, para uma formação com mobilidade (permeabilidade/viscosidade) dez vezes menor é necessário uma energia dez vezes maior para desenvolvê-lo.

O fato de ser necessário maior fornecimento de energia a um reservatório “mais fechado” ou com fluido mais viscoso é normalmente verificado através de maior necessidade de injeção ou baixo fator de recuperação, uma conclusão indireta, sem dúvida atribuída à caracterização do reserv

Foi utilizado um modelo de aquífero analítico do tipo Fetkovich e seus parâmetros (volume inicial, influxo, etc.) são configurados de forma a manter constante a pressão média do reservatório ao longo da produção.

Na Tabela 5.4 são mostradas as parcelas energéticas envolvidas no processo, bem como o balanço energético, após quinze meses de produção.

Tabela 5.4 – Parcelas energéticas e balanço energético para o caso linear, monofásico, permanente, trabalho de aquífero, após um quinze meses de produção.

ΔE_{μ} (kJ)	26.497,03
W_r (kJ)	1.120.498,97
W_{well} (kJ)	-1.094.001,93

O trabalho de poços, negativo neste caso, representa a energia retirada do reservatório em função da produção de fluidos do único poço do modelo.

Vale aqui observar novamente o correto fechamento do balanço de energia: o trabalho fornecido pelo aquífero, a menos da energia dissipada no escoamento, é igual ao trabalho fornecido pelo reservatório para o poço produtor, a menos de um erro de com um erro de apenas 8,33E-9 kJ.

A Figura 5.3 ilustra a contribuição de cada parcela em termos de potência relativa, ou seja, a potência atribuída a cada parcela energética envolvida no processo de exploração (neste caso trabalho sobre a fronteira, trabalho de poços e energia dissipada pela viscosidade) em relação à energia total do processo, ao longo da simulação de fluxo.

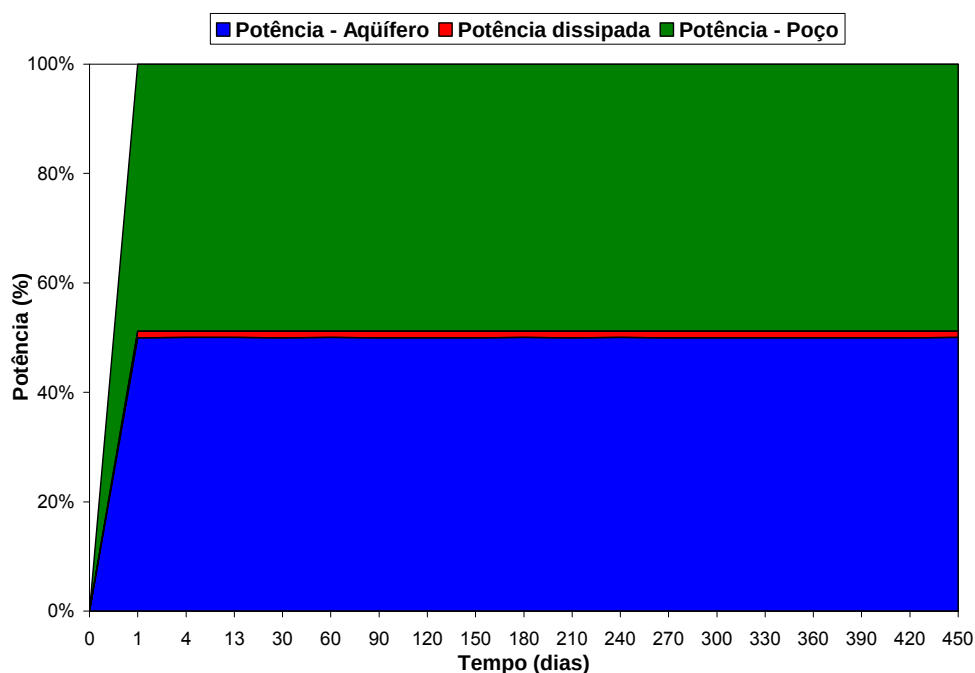


Figura 5.3 – Gráfico de tendência da contribuição de cada parcela energética ao longo da produção.

Neste caso, grande parte da energia fornecida pelo aquífero é aproveitada para produção do fluido *in situ*, sendo pouca energia dissipada no escoamento deste.

5.1.3 Fluxo Monofásico, Linear, Regime Transiente

Para este caso a equação da difusividade hidráulica se resume a

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.8)$$

sob a condição inicial que todo o sistema encontra-se à mesma pressão p_i para $t = 0$, ou seja

$$p(x, 0) = p_i, x > 0 \quad (5.9)$$

e com condições de contorno

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{q_w \mu}{kA}, t > 0 \\ \lim_{x \rightarrow \infty} p(x, t) = p_i \end{cases} \quad (5.10)$$

Ou seja, a vazão é constante no ponto $x = 0$, e a pressão permanece sempre igual à inicial no limite externo. Tal condição implica um reservatório infinito. Do ponto de vista da simulação numérica, essa condição é alcançada com um domínio suficientemente grande em relação aos tempos investigados de forma que a fronteira oposta à produção não perceba a variação de pressão imposta pela produção de fluido.

A solução para a equação (5.8) submetidas às condições das equações (5.9) e (5.10) é dada pela expressão (ROSA *et al.* [58])

$$p(x, t) = p_i - \frac{q_w \mu L}{kA} \left[\sqrt{\frac{4\eta t}{\pi L^2}} e^{-x^2/4\eta t} - \left(\frac{x}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4\eta t}} \right) \right] \quad (5.11)$$

onde erfc é a função erro complementar, definida por

$$\operatorname{erfc}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi}^{\infty} e^{-z^2} dz \quad (5.12)$$

e η , chamada de constante de difusividade hidráulica, vale

$$\eta = \frac{k}{\phi \mu c_t} \quad (5.13)$$

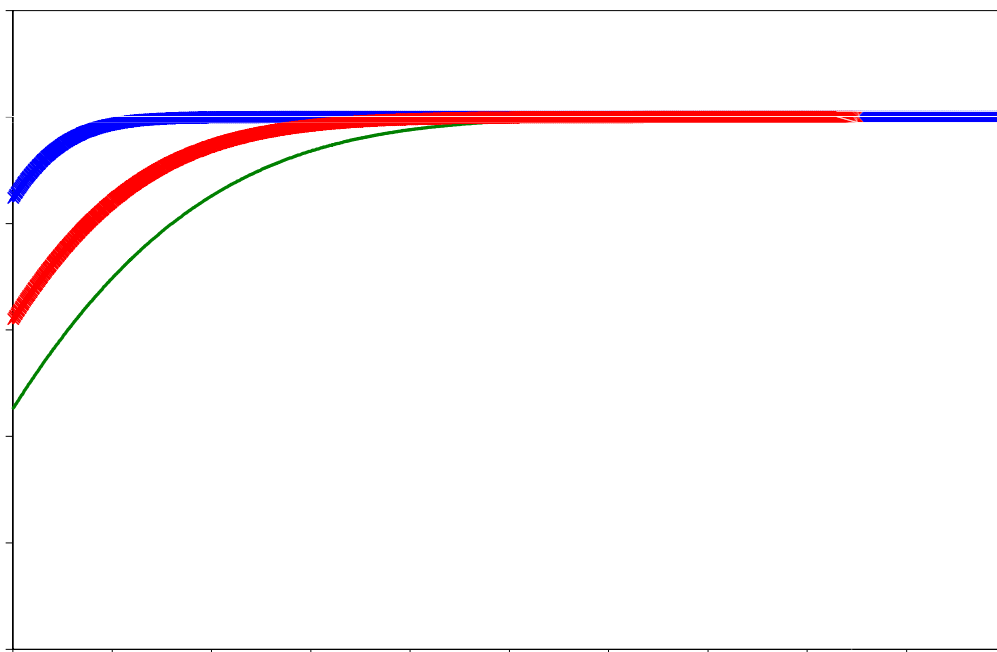
As propriedades e dimensões da formação estão apresentadas na Tabela 5.5.

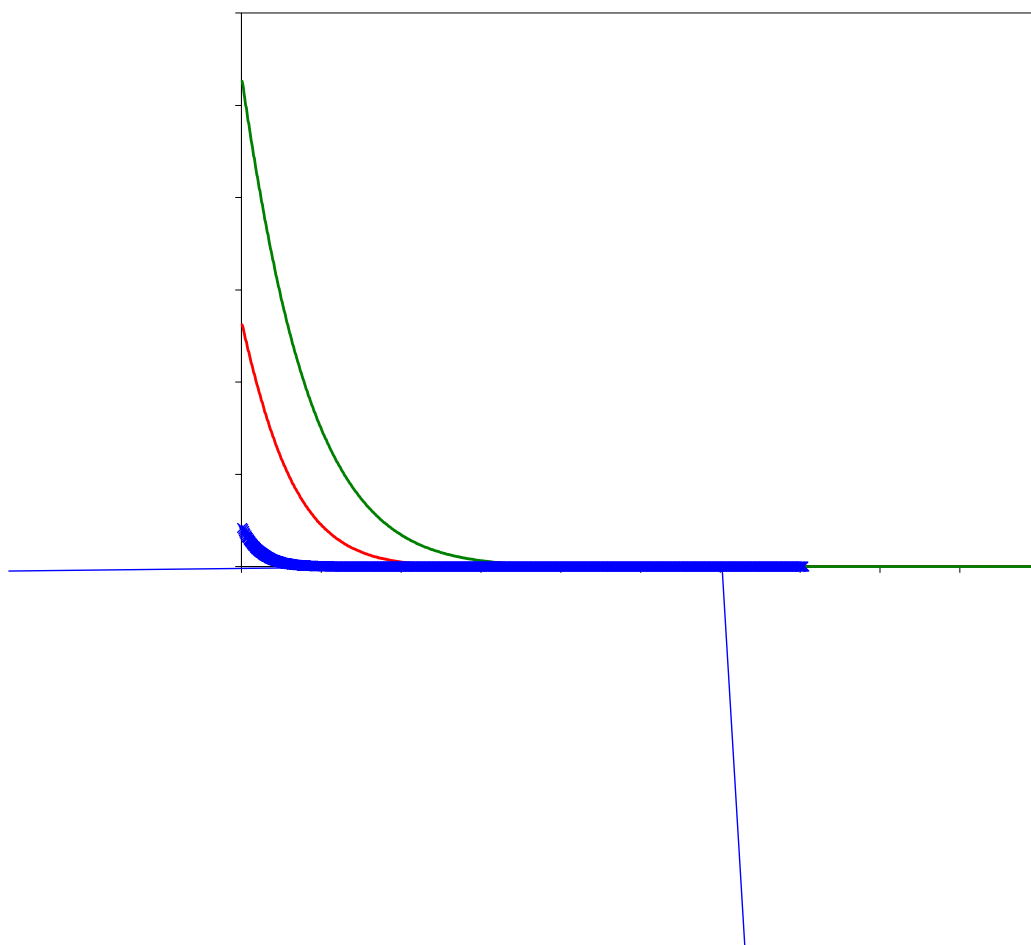
Tabela 5.5 - Propriedades e dimensões da formação para o caso linear, monofásico, regime transiente.

Comprimento da formação	50 km
Largura da formação	200 m
Espessura da formação	20 m
Compressibilidade da formação	$50 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$
Porosidade da formação	0,18
Permeabilidade da Formação	100 mD
Viscosidade do Fluido	0,504
Vazão de produção	100 m ³ /dia

Rocha compressível, fluido incompressível

Na Figura 5.4 é apresentada a comparação entre a simulação numérica e a solução analítica para pressão obtida utilizando a equação (5.11).





Aqui neste caso o balanço energético também é verificado, como é mostrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Parcelas energéticas para o caso monofásico, linear, rocha compressível.

ΔE_{ϕ}	3.76×10^5 MJ
ΔE_{μ}	-7.56×10^5 MJ
W_{well}	-3.80×10^5 MJ

Verificada a coerência entre os cálculos obtidos de formas distintas, fez-se uma análise de sensibilidade à energia de expansão de rocha à compressibilidade da formação a fim de avaliar a coerência da formulação.

Na Figura 5.7 são mostradas as curvas da energia de expansão de rocha para compressibilidades de rocha distintas.

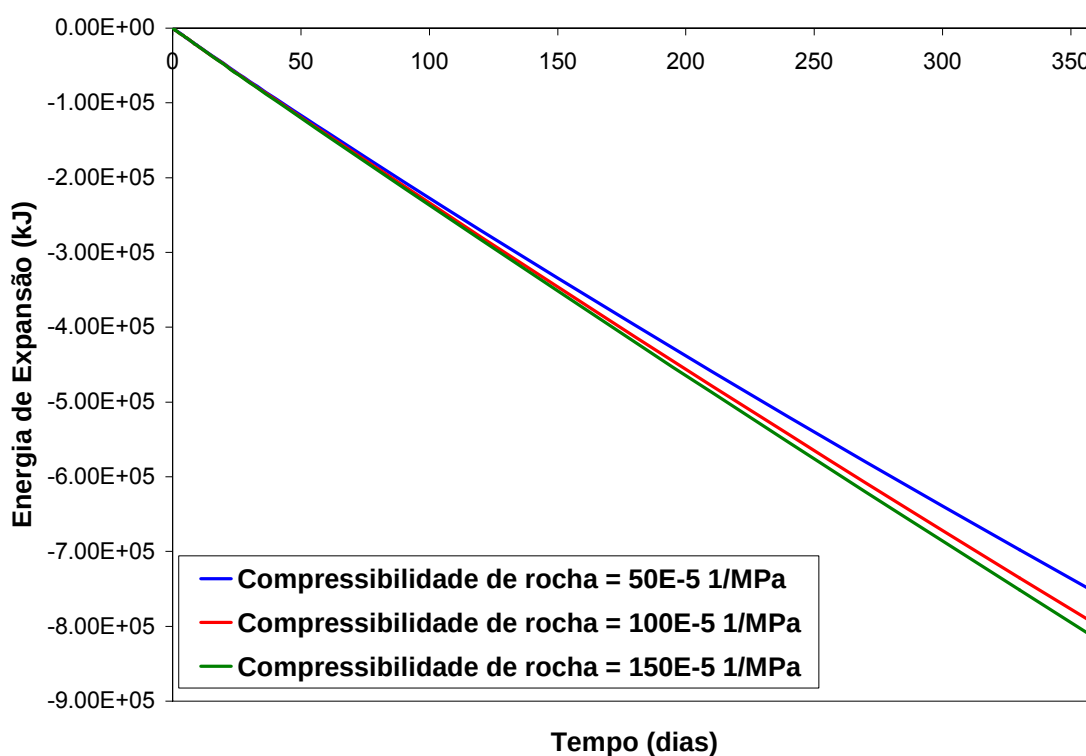


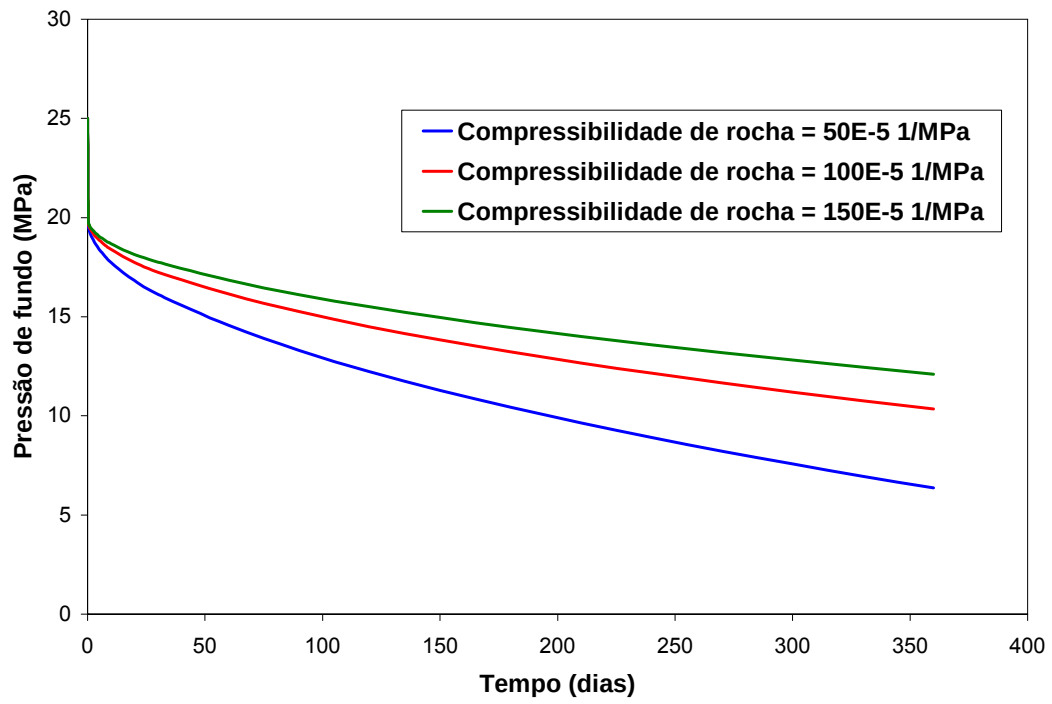
Figura 5.7 – Gráfico de comparação da energia de expansão de rocha para diferentes compressibilidades de rocha.

De fato, quanto maior for a compressibilidade de rocha, maior é a energia disponível no reservatório para produzir o fluido nele contido em função da contração do volume poroso.

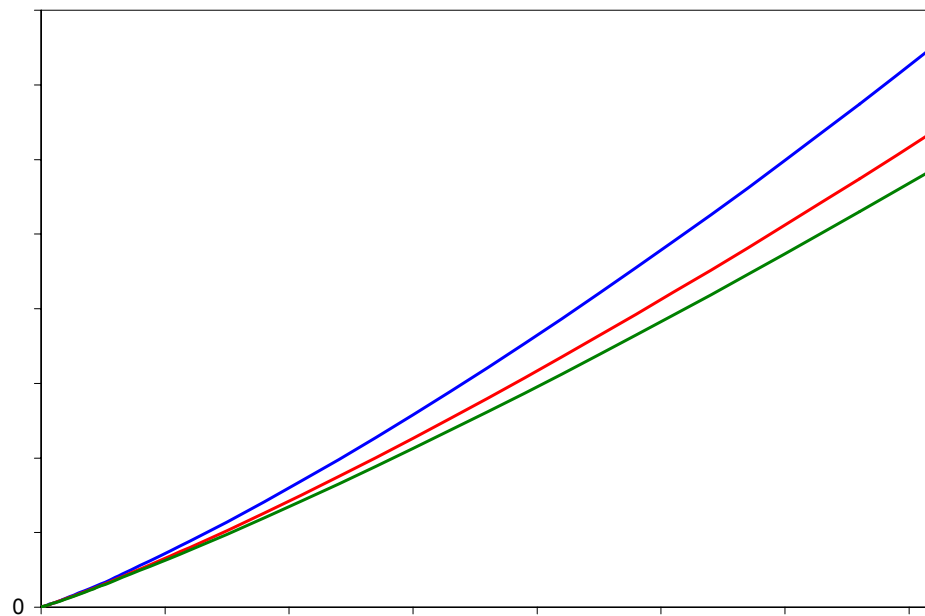
O efeito da variação da energia de expansão de rocha também é percebido nos poços. À medida que a compressibilidade da rocha aumenta, a pressão de fundo do poço produtor, necessária para atender a produção requerida, diminui, a fim de exercer um maior diferencial de pressão, suficiente para atender à condição especificada de vazão (Figura 5.8 (a)).

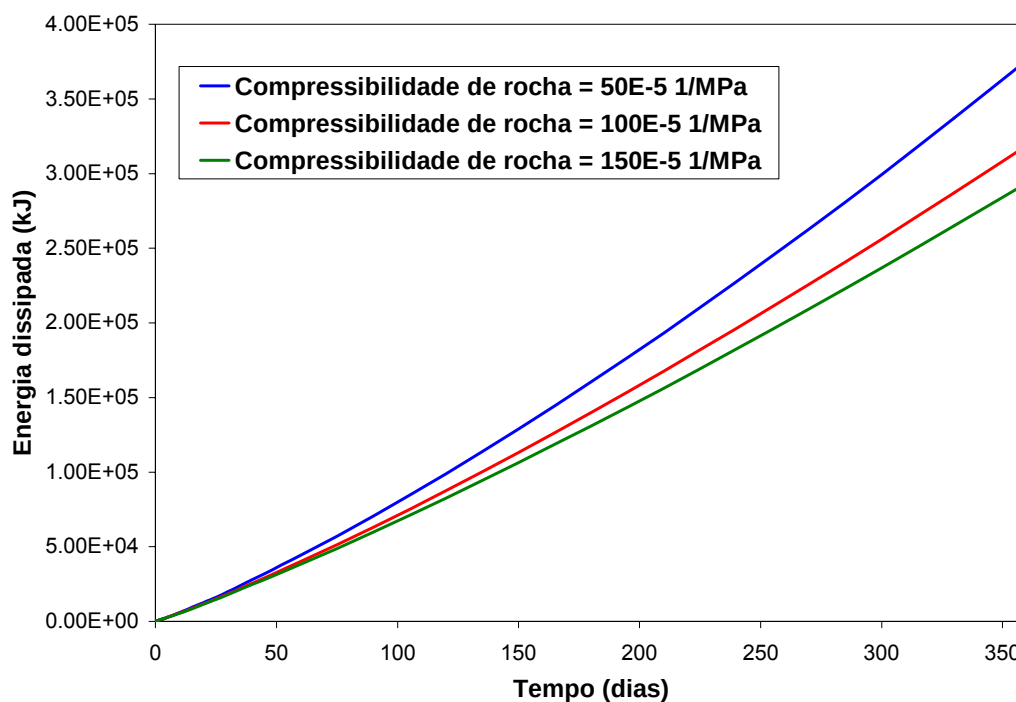
O escoamento em um meio com menor compressibilidade se realiza em um meio que oferece maior perda de carga. Logo, a energia dissipada para realizar o escoamento do fluido é maior (Figura 5.8 (b)).

Assim, apesar de haver maior energia disponível proveniente da contração de poros, em função da maior perda de carga oferecida em meios menos compressíveis, um maior trabalho é necessário ser realizado pelo poço produtor (Figura 5.8 (c)).



(a)





(c)

Figura 5.8 – Comparação da pressão de fundo de poço (a), do trabalho realizado pelo poço produtor (b) e a energia dissipada no escoamento do fluido no reservatório (c) para diferentes compressibilidades de rocha.

Rocha Rocha e Fluido compressíveis

Na Tabela 5.7 são apresentadas de forma resumida as parcelas energéticas envolvidas no processo, onde novamente é possível observar o balanço energético.

Tabela 5.7 – Tabela com parcelas energéticas para modelo com rocha e fluido compressíveis.

ΔE_{μ}	$3,40 \times 10^5$ MJ
ΔE_{ϕ}	$-2,61 \times 10^5$ MJ
ΔE_{ρ}	$-5,22 \times 10^5$ MJ
W_{well}	$-4,43 \times 10^5$ MJ

Conduz-se aqui uma possível correção no “Gráfico de Energia” apresentado por COSENTINO [17], Figura 3.6. O gráfico apresentado na Figura 5.9 representa realmente um gráfico de energia, apresentado a parcela relativa de cada energia representada no processo.

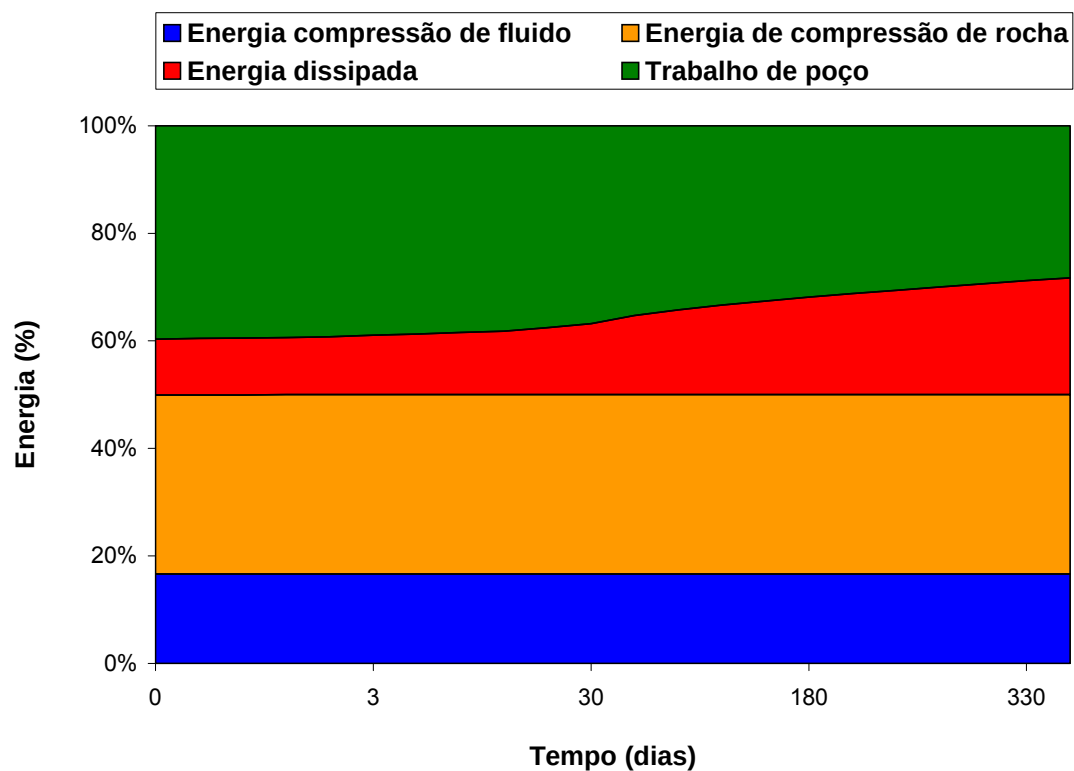


Figura 5.9 – Gráfico de energia para o caso monofásico, unidimensional, fluido e rocha compressíveis.

Porém, ainda, leva-se agora em conta a energia dissipada no escoamento do fluido.

5.1.4 Fluxo Bifásico, Unidimensional, Rocha e Fluidos Incompressíveis, Regime Transiente

O experimento numérico apresentado na seção 5.1.1 é aqui repetido, porém agora trata-se de um escoamento bifásico imiscível (água-óleo).

As dimensões e valores de propriedades utilizados neste modelo estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Propriedades e dimensões da formação para o caso bidimensional, monofásico, regime permanente.

Comprimento da formação	1000 m
Largura da formação	10 m
Espessura da formação	10 m
Permeabilidade da Formação	1000 mD
Viscosidade da água	0,504 cP
Viscosidade do óleo	1,3 cP
Vazão de injeção	10 m ³ /dia
Vazão de produção	10 m ³ /dia

As curvas de permeabilidade relativa água-óleo foram obtidas através do modelo de Corey com expoentes $m=1$ e $n=1$, saturação residual de óleo (S_{or}) e saturação irreduzível de água (S_{wi}) igual a 0,2 (Figura 5.10).

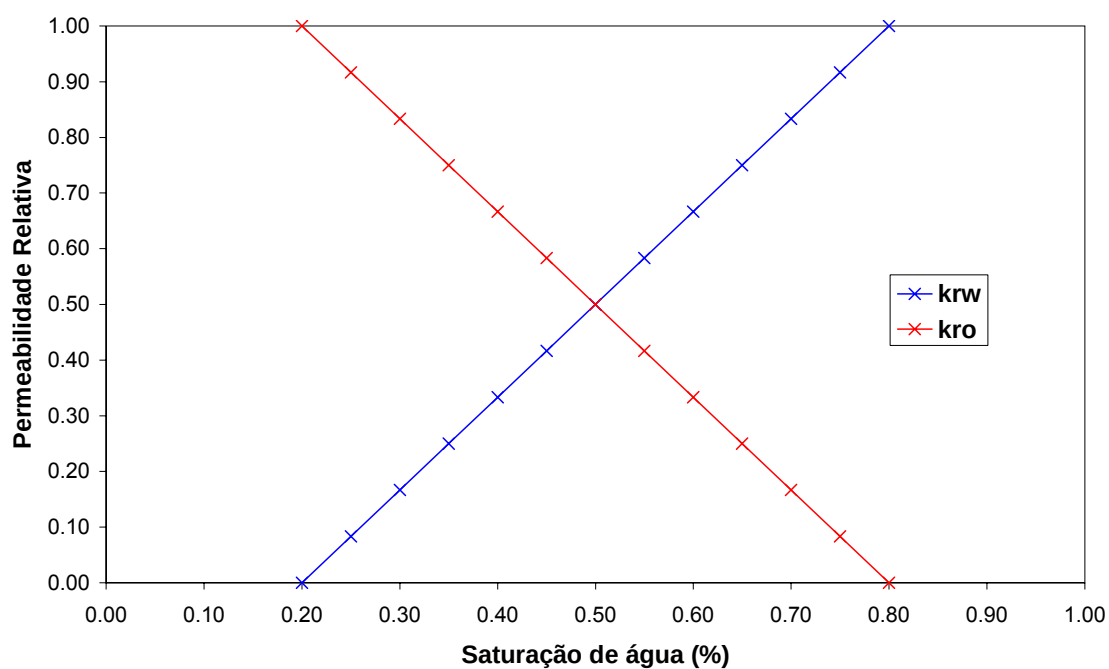


Figura 5.10 – Curvas de permeabilidade relativa água-óleo baseado em Corey com expoentes $m=1$ e $n=1$, $S_{or}=0.3$ e $S_{wi}=0.1$.

A Tabela 5.9 mostra de forma resumida as parcelas energéticas envolvidas no processo.

Tabela 5.9 – Parcelas energéticas para o caso linear, escoamento bifásico.

$\Delta E_{\mu,o}$ (MJ)	5.62×10^3
$\Delta E_{\mu,w}$ (MJ)	2.60×10^3
W_{well} (MJ)	8.22×10^3

A Figura 5.11 mostra a energia dissipada para o deslocamento de cada fase, comparativamente ao trabalho externo realizado para deslocar os fluidos.

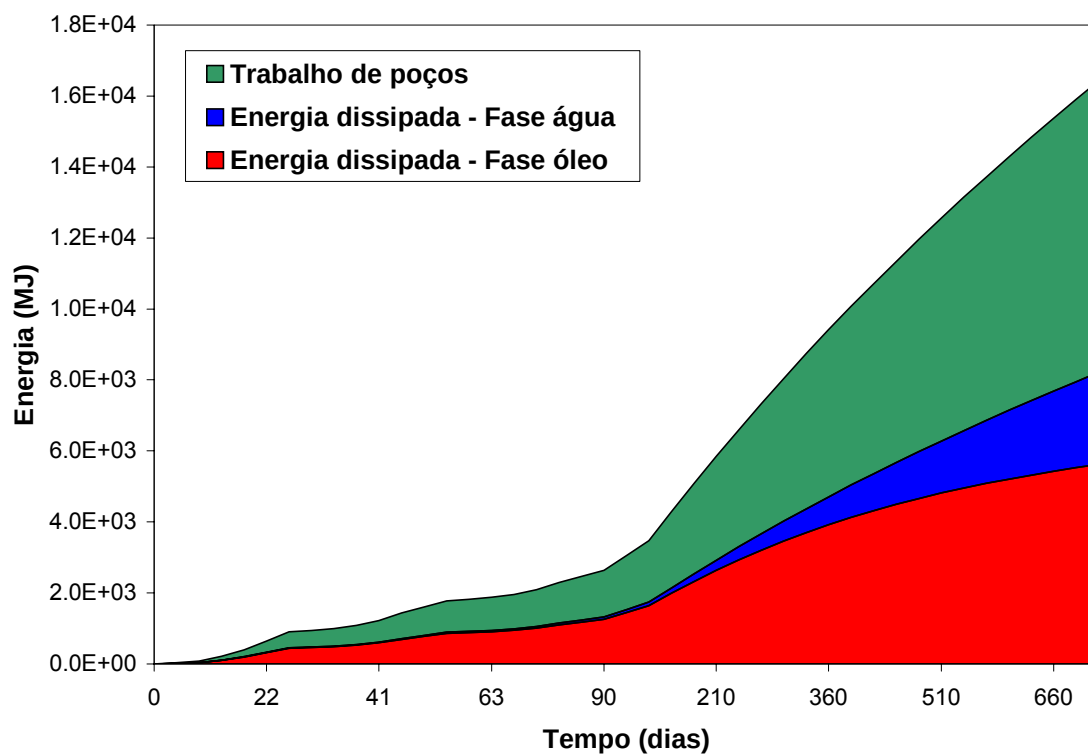


Figura 5.11 – Gráfico de área mostrando a tendência de contribuição de cada parcela energética.

No caso do fluido deslocado ser mais viscoso (no caso o óleo, com o dobro da viscosidade inicialmente utilizada, ou seja, 2,6 cP), não só mais energia deve ser dispendida para o deslocamento deste, como também para o deslocamento do fluido deslocante (no caso água), como mostrado na Figura 5.12, exigindo um maior trabalho externo proveniente dos poços.

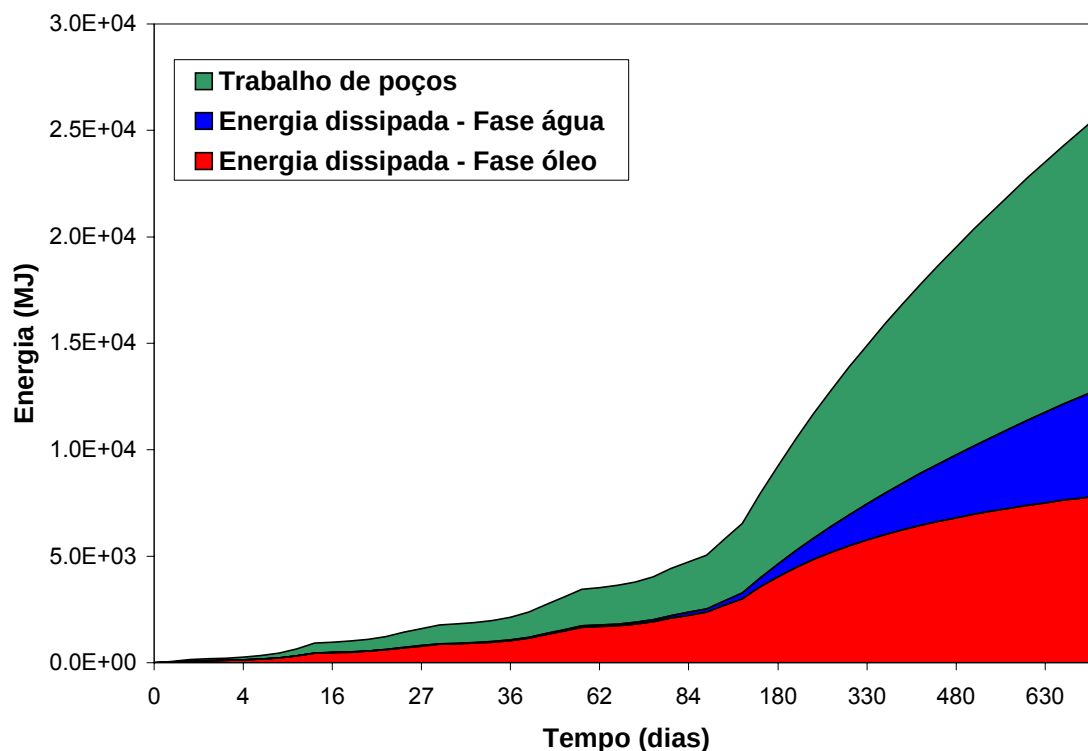


Figura 5.12 – Gráfico de contribuição energética para o caso mais viscoso.

5.1.5 Fluxo Bifásico, Bidimensional, Regime Permanente

Uma última verificação, principalmente para assegurar as aplicações que serão apresentadas no CAPÍTULO 6, é avaliar o cálculo das parcelas de energia dissipada para ambas as fases água e óleo em um meio bidimensional.

As dimensões e valores de propriedades utilizados neste modelo estão apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Dimensões e propriedades para o modelo 2D, bifásico.

Comprimento da formação	510 m
Largura da formação	510 m
Espessura da formação	4 m
Permeabilidade da Formação	5000 mD
Viscosidade da água	0,504 cP
Viscosidade do óleo	1,3 cP
Vazão de injeção	200 m ³ /dia
Vazão de produção	200 m ³ /dia

As vazões de produção e injeção são propositalmente iguais a fim de manter a pressão média do reservatório constante, de forma a não haver variação de volume poroso ou densidade dos fluidos, logo, não havendo variação da energia de expansão de rocha e fluido.

A malha de simulação consiste em 51 células na direção I e 51 células na direção J com os poços posicionados diagonalmente opostos, formando a conhecida configuração de um quarto de *five-spot*.

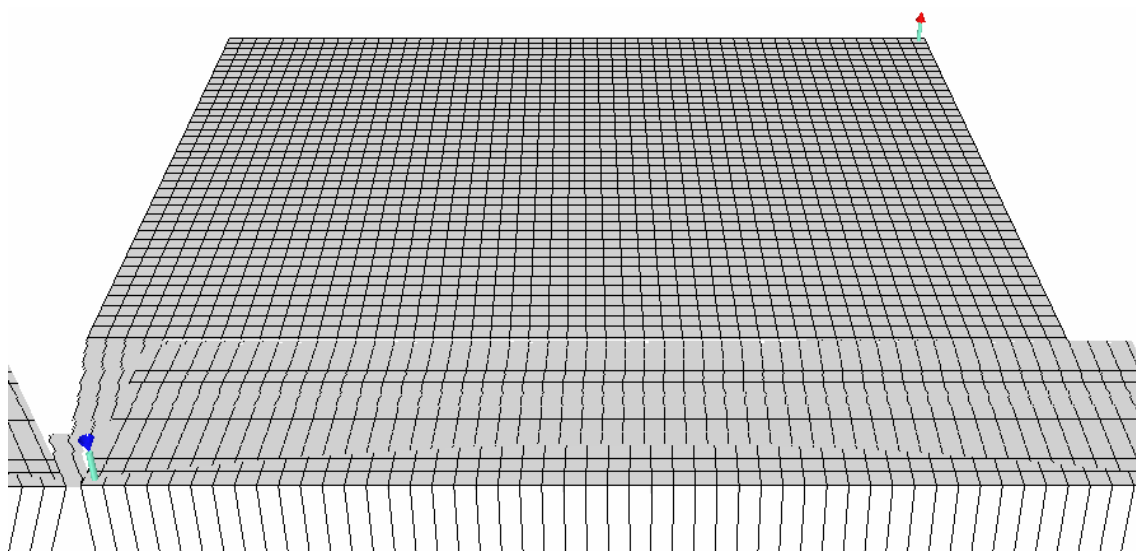


Figura 5.13 – Malha 2D para simulação do modelo bifásico.

A Tabela 5.11 mostra as parcelas energéticas envolvidas no processo.

Tabela 5.11 – Resumo das parcelas energéticas.

$\Delta E_{\mu,o}$	$5,98 \times 10^4$ MJ
$\Delta E_{\mu,w}$	$1,46 \times 10^4$ MJ
W_{well}	$7,44 \times 10^4$ MJ

Mais uma vez vale observar o correto fechamento do balanço energético, indicando a correta implementação computacional dos cálculos.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÕES

“The purpose of computing is insight, not numbers” – R. Hammin

6.1 OTIMIZAÇÃO DA EXPLOTAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

ROMEY *et al.* [56] apresentam um exemplo de aplicação da metodologia, escolhido para indicar, ainda que preliminarmente, a utilidade da interpretação energética em problemas de otimização da produção. O pressuposto é que, em muitas situações de interesse prático, o tipo de otimização desejada (máxima recuperação ou lucro) esteja associada a um uso mais eficiente da energia no reservatório. O exemplo, que será aqui reproduzido, aproveita um caso do trabalho de OLIVEIRA [43], com algumas modificações. No contexto original, trata-se de um exercício simples, mas significativo, de otimização dinâmica da estratégia de produção. Naquele contexto, o interesse era apenas mostrar alguns resultados do cálculo das energias do reservatório, com discussão sobre seu significado. Aqui, o caso servirá de exemplo para a aplicação da metodologia em um problema de otimização, descrito na seção 6.2.

Certas adaptações sobre o caso original foram feitas: simulador ECLIPSE (em vez do IMEX), pequenas diferenças no controle dos poços e nas propriedades dos fluidos, para melhor atender o objetivo da aplicação.

Trata-se de um reservatório horizontal, discretizado por uma malha 2D regular 51 x 51 células de 10 m x 10 m x 4 m. Todas as propriedades de rocha são uniformes, com exceção da permeabilidade (isotrópica), que varia segundo o padrão assimétrico mostrado na Figura 6.1. O escoamento é bifásico óleo e água.

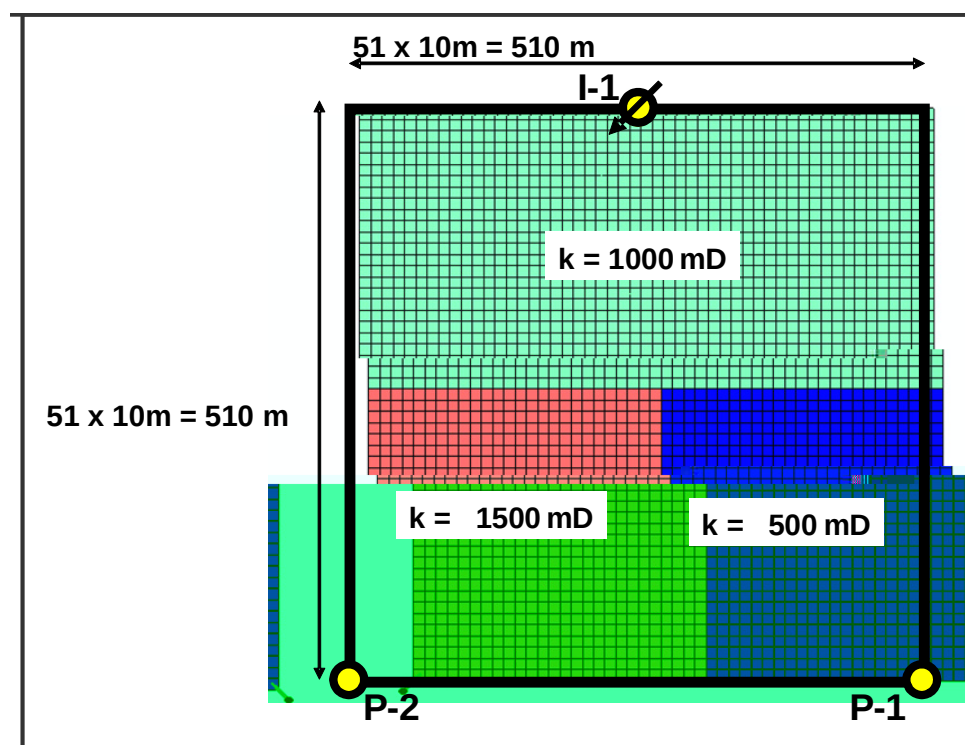


Figura 6.1 – Malha de simulação com posição dos três poços e distribuição das permeabilidades.

Outras propriedades de interesse são sumarizadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Propriedades do modelo utilizado para a aplicação em otimização da produção.

Porosidade	0,30
Viscosidade do óleo	2,5 cP
Viscosidade da água	0,5 cP
Fator volume de formação do óleo	1,25
Fator volume de formação da água	1,05
Compressibilidade do óleo	$15 \times 10^{-4} \text{ (MPa)}^{-1}$
Compressibilidade da água	$5 \times 10^{-4} \text{ (MPa)}^{-1}$
Compressibilidade da rocha	$10 \times 10^{-4} \text{ (MPa)}^{-1}$

As curvas de permeabilidade relativa são as mesmas do caso de OLIVEIRA [42], extraída de um dos casos do conjunto de modelos do SPE, o SPE 1.

Há três poços em operação: dois produtores (P-1 e P-2) de líquido nos vértices de uma das bordas; e um injetor (I-1) de água no centro da borda oposta. A vazão de produção total (soma dos dois poços) é constante no tempo, igual a $40 \text{ m}^3/\text{d}$ de líquido, em condições de reservatório. Isso é levemente diferente (menos realista, mais conveniente)

do que definir a vazão de líquido em condições de superfície, porque as vazões de cada fase variam no tempo, e B_o e B_w são diferentes. A injeção repõe continuamente o volume de líquido produzido, em condições de reservatório²¹. Assim, a pressão média do reservatório permanece constante, igual a 20 MPa. A exploração do reservatório pode ser otimizada — visando à maximização da recuperação ou do lucro — pelo controle de um único parâmetro, definido como a contribuição da vazão de P-1 na vazão total. No problema original de Oliveira, esse parâmetro pode variar entre 0,25 e 0,75, com valores possivelmente diferentes a cada 6 meses. Aqui se faz algo muito mais simples, comparando apenas duas estratégias de exploração²²:

- **“caso ruim”** (parâmetro=0,25 o tempo todo): o poço P-1 produz 10 m³/d; enquanto P-2, na região de permeabilidade maior, produz 30 m³/d;
- **“caso bom”** (parâmetro=0,75 o tempo todo): a situação inverte-se, agora P-1 produz 30 m³/d, e P-2 produz 10 m³/d.

Apesar dos nomes dados aos casos terem conotação diferente da intuição, o “caso bom” deveria ser aquele em que o poço produtor localizado na região de maior permeabilidade fosse atribuída uma maior vazão, será mostrado que, do ponto de vista do aproveitamento energético do reservatório, essa situação não é a melhor e por isso é dado o nome a esse caso de “caso ruim”.

A Figura 6.2 mostra os mapas de saturação de água para os dois casos, após seis anos de injeção: a água acaba de irromper no “caso ruim”, antes do que acontece no “caso bom”. A Figura 6.3 mostra a evolução do corte de água e da fração recuperada para os dois casos. No “caso bom”, a irrupção dos dois poços é mais próxima no tempo, de tal modo que o corte de água do campo chega a ultrapassar, no mesmo tempo, aquela do “caso ruim”. Isto é, no “caso bom”, a água chega mais tarde, mas em volume maior. A Figura 6.4 mostra a pressão de fundo dos três poços para os dois casos.

²¹ Esse controle é obtido através da opção VREP (*voidage replacement*) do palavra-chave GCONINJE [61].

²² Experimento semelhante ao original será apresentado na seção 6.2.

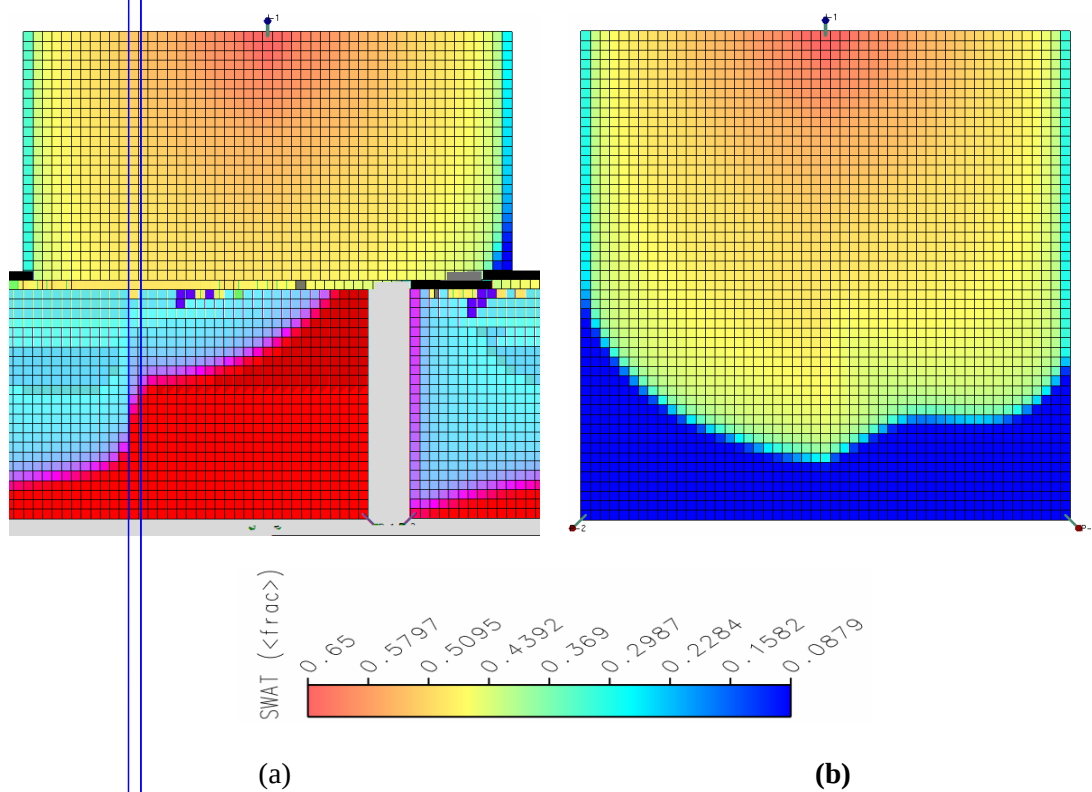
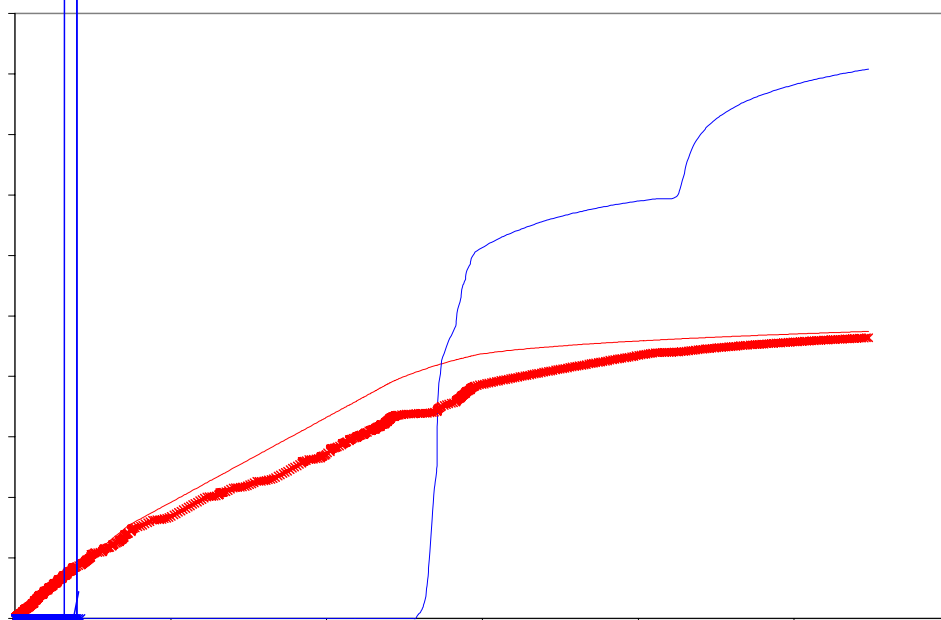


Figura 6.2 – Distribuição da saturação de água após 6 anos de produção para o caso ruim (a) e caso bom (b).



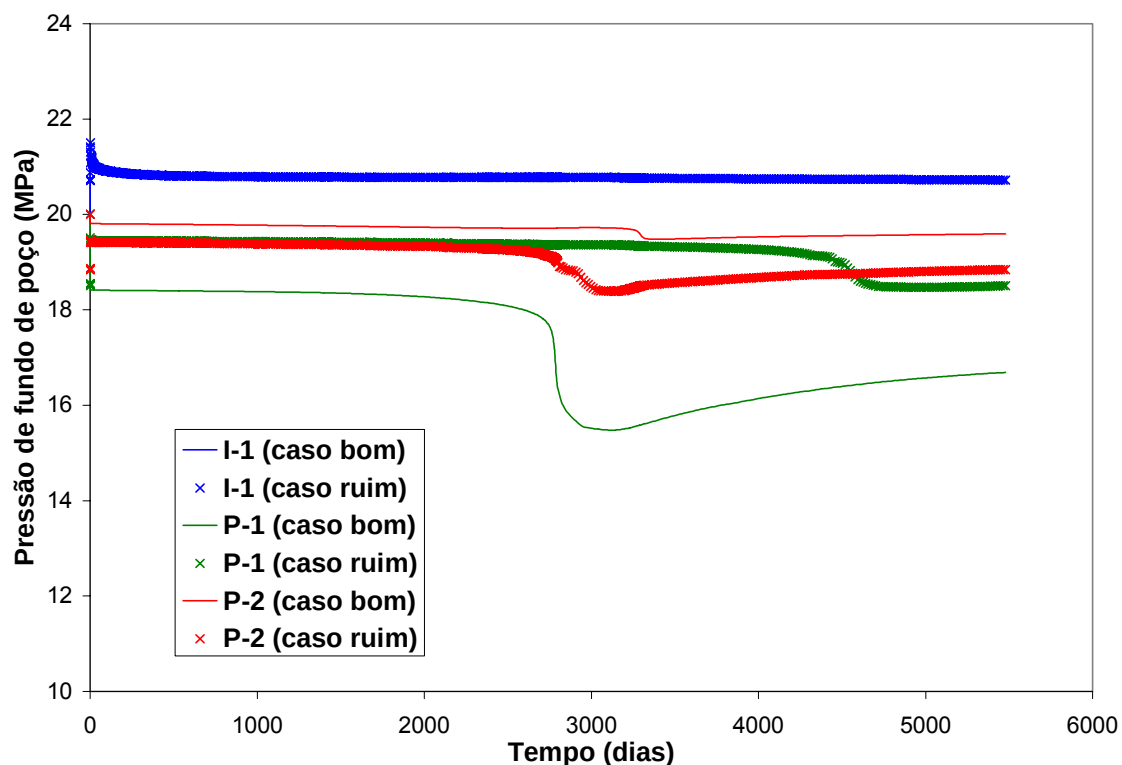
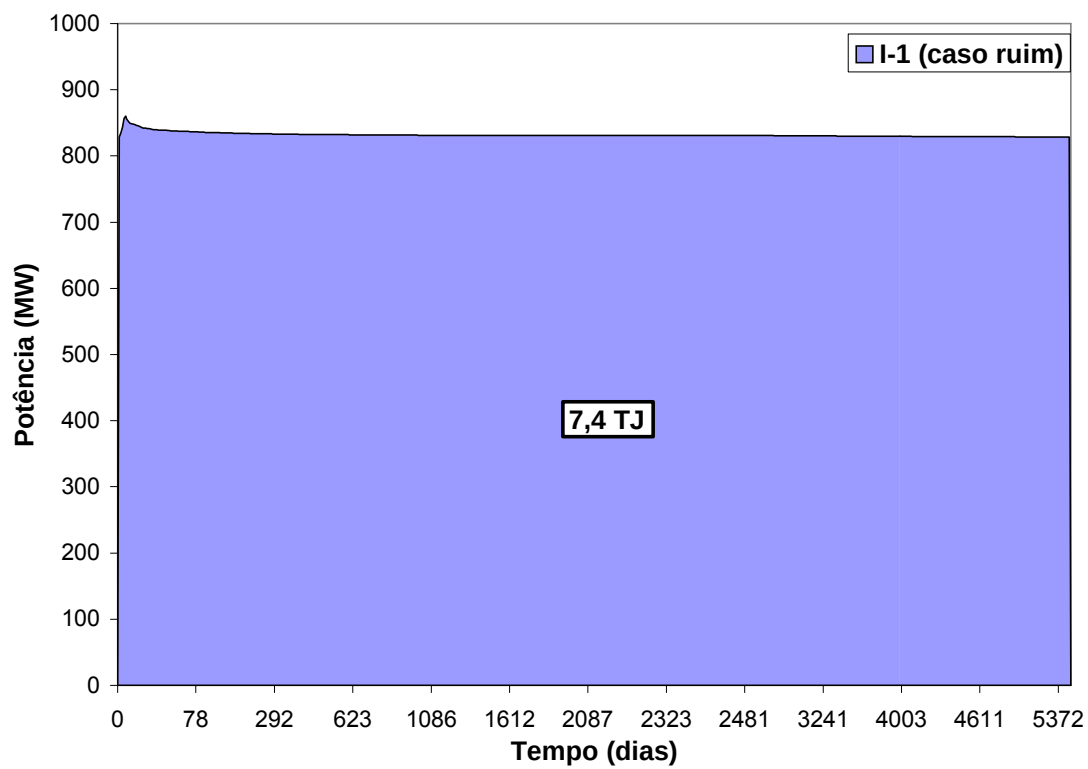
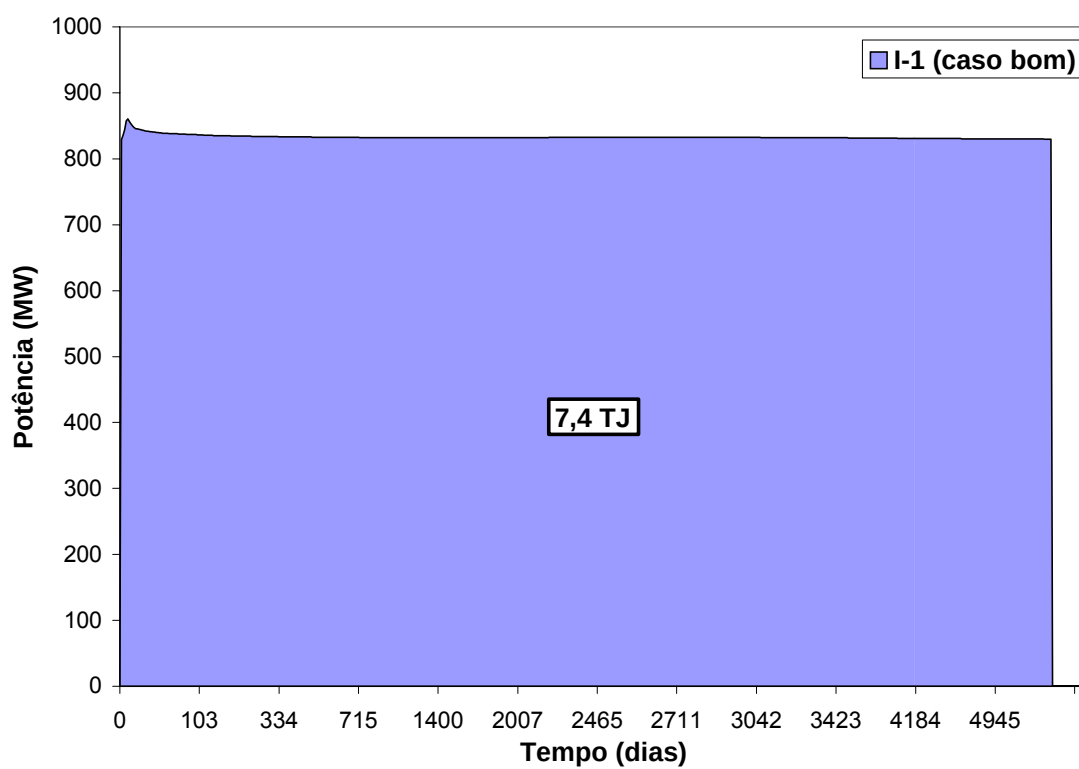


Figura 6.4 – Pressão de fundo para os poços I-1 (azul), P-1 (verde) e P-2 (vermelho), para os casos “ruim” (com símbolos em “X”) e “bom” (linhas contínuas), em 15 anos.

Nos dois casos simulados, o trabalho fornecido pelo poço injetor é igual: afinal, as vazões de injeção são iguais, e as pressões de injeção mostraram-se muito próximas (Figura 6.4). A potência fornecida por esse poço é praticamente constante o tempo todo, em torno de 9.500 Watts. Conseqüentemente, a energia total fornecida ao reservatório pelo poço injetor também é igual em ambos os casos, igual a 7,4 TJ (Figura 6.5).



(a)



(b)

Figura 6.5 – Potência no poço injetor (a) para o caso ruim e (b) para o caso bom.

Mas a situação para os poços produtores é muito diversa, como mostrado na Tabela 6.2. No “caso ruim”, o poço P-2 retira energia demais do reservatório, de maneira pouco útil. No “caso bom”, obriga-se o poço P-1, da região de baixa permeabilidade, a trabalhar com uma vazão maior (baixando sua pressão de operação). A energia de compressão de rocha e fluido é praticamente desprezível nesses casos, em que a pressão

fração recuperada de óleo, que é um valor disponível apenas nos poços e apenas é sensível após o momento de irrupção da água.

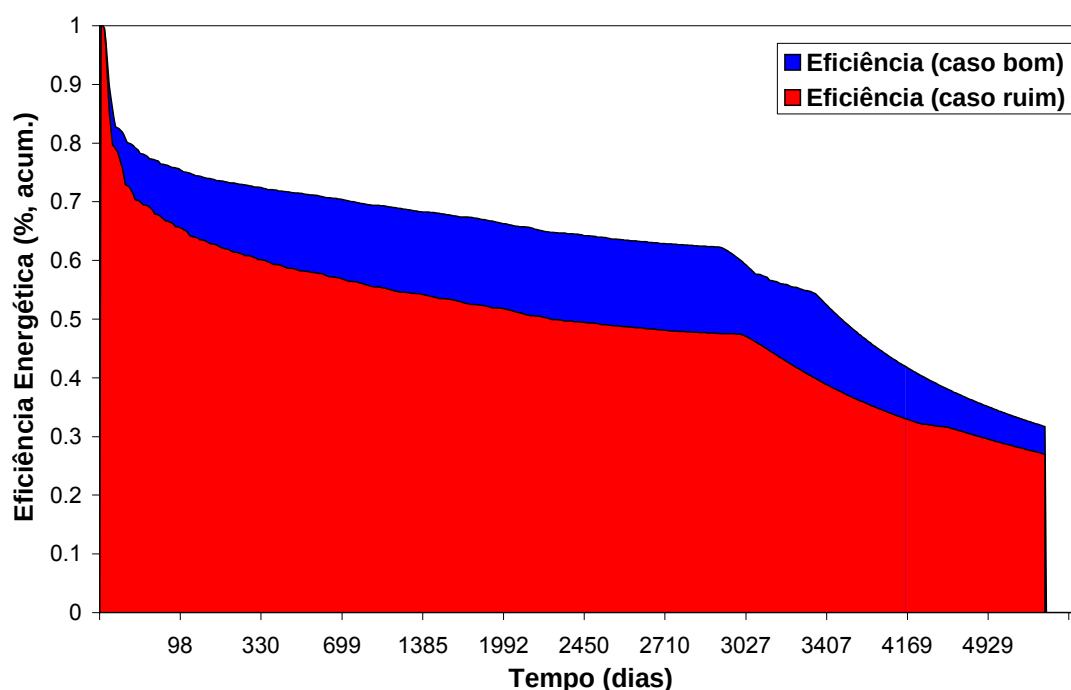
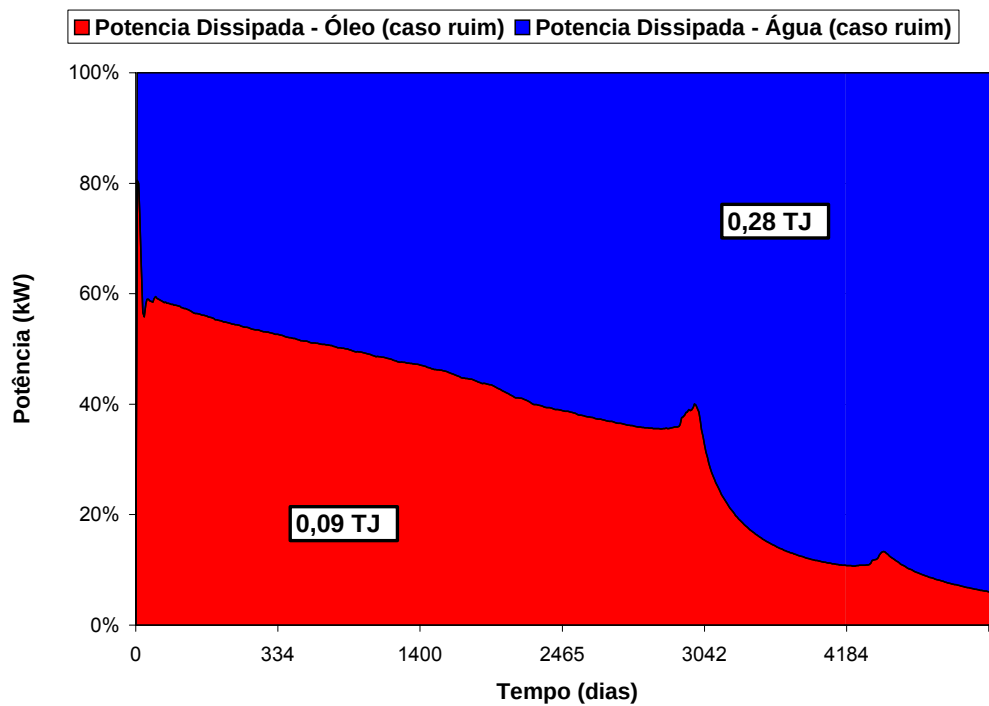


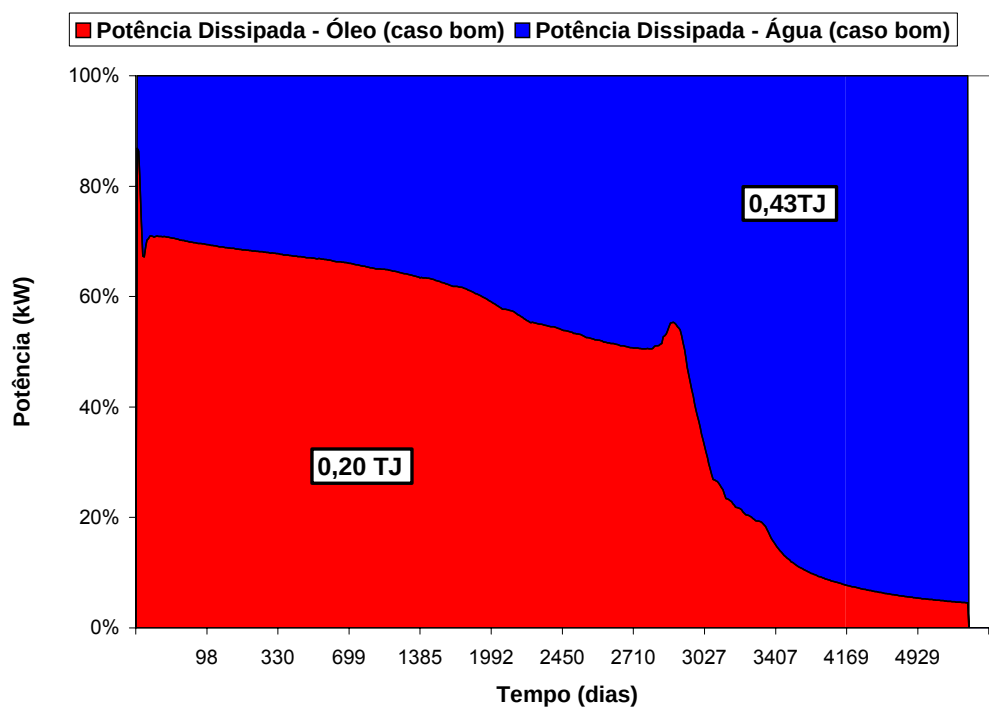
Figura 6.6 – Eficiência energética acumulada para o caso bom (azul) e ruim (vermelho).

Na Figura 6.7 é possível notar que para o “caso bom” se beneficiar de mais energia total e aproveitá-la melhor para o descolamento de óleo (como observado na Tabela 6.3) é necessário que mais energia seja gasta para deslocar a água, ainda que relativamente essa energia é melhor aproveitada, fato comprovado pela melhor eficiência em relação ao caso “ruim”.

Uma vantagem objetiva é o cálculo direto do trabalho realizado contra as forças viscosas — explicitamente associado ao deslocamento do fluido no meio poroso e sem contrapartida nos cálculos de balanço de massa — e, mais ainda, sua separação pelas fases (óleo, gás e água) — Figura 6.7 — e forças motoras (pressão, gravidade, capilaridade). De fato, na maioria das aplicações, o que interessa mesmo, dentro do reservatório, é deslocar o óleo (para os poços produtores). As parcelas de potência e de energia associadas a esse deslocamento são as parcelas realmente úteis do processo, distinguíveis de todas as demais, em geral, menos interessantes (relativas à água deslocando água, poros expandindo ou encolhendo, compressão e descompressão do gás dentro do reservatório, etc.).



(a)



(b)

Figura 6.7 – Potência dissipada para o deslocamento do óleo (vermelho) e da água (azul) para o (a) caso ruim e (b) caso bom.

Baseado nestes resultados, ROMEU *et al.* [55] acharam razoável propor, dependendo de mais estudos, que o cálculo dessa parcela de energia possa servir de base para um modo vantajoso de parametrizar problemas de otimização da produção. Um estudo a fim de avaliar a utilização da energia como função objetivo em um problema de otimização como avaliação dessa possível vantagem é apresentado na seção 6.2.

6.2 OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DA ESTRATÉGIA DE EXPLOTAÇÃO ATRAVÉS DA ALOCAÇÃO DAS VAZÕES DE PRODUÇÃO

A fim de avaliar a utilização da eficiência energética como *F.O.* foram conduzidas duas otimizações: uma, com o modelo descrito na seção 6.1 utilizando como *F.O.* a eficiência energética (equação (3.35)) e outra utilizando como *F.O.* o VPL (equação (2.81)), como realizado por OLIVEIRA *et al.* [43]. A partir dessas simulações foram realizadas comparações entre os processos de otimização.

Para tornar possíveis as comparações, as mesmas modificações feitas para realizar o experimento descrito na seção 6.1 foram feitas no modelo original de OLIVEIRA [43]. Atenção especial foi dispensada para que ambas as simulações fornecessem os mesmos resultados. Como os modelos se encontravam disponíveis em simuladores diferentes (o modelo aqui tratado está em ECLIPSE e o modelo original estava em IMEX), atenção especial foi requerida para a coerente configuração dos simuladores. Apesar de ambos simuladores serem *black oil*, eles são passíveis de fornecer resultados diferentes ou pela distinta configuração ou pela própria diferença de sua implementação. Uma breve discussão sobre como foi feita a comparação dos resultados dos dois simuladores é feita no APÊNDICE G.

O poço P-1 tem sua vazão controlada desde o início da produção até o momento de irrupção da água. Seus controles mudam a cada 6 meses, totalizando 12 variáveis de otimização. Os parâmetros utilizados na otimização (entre outros parâmetros numéricos requeridos pelo método de otimização, menos interessantes para a presente análise) estão apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Parâmetros da otimização.

Valor inicial das variáveis controladas	0,25 (10 m ³ /dia)
Restrições superiores	0,75 (30 m ³ /dia)
Restrições inferiores	0,25 (30 m ³ /dia)
Número máximo de iterações do otimizador	100
Ganho esperado da <i>F.O.</i>	0,035

A partir da comparação entre as vazões do poço P-1 para o caso otimizado utilizando VPL e para o caso utilizando a eficiência energética (Figura 6.8) é possível verificar

como o processo de otimização trabalha com os parâmetros de otimização a fim de otimizar a produção para ambas as situações.

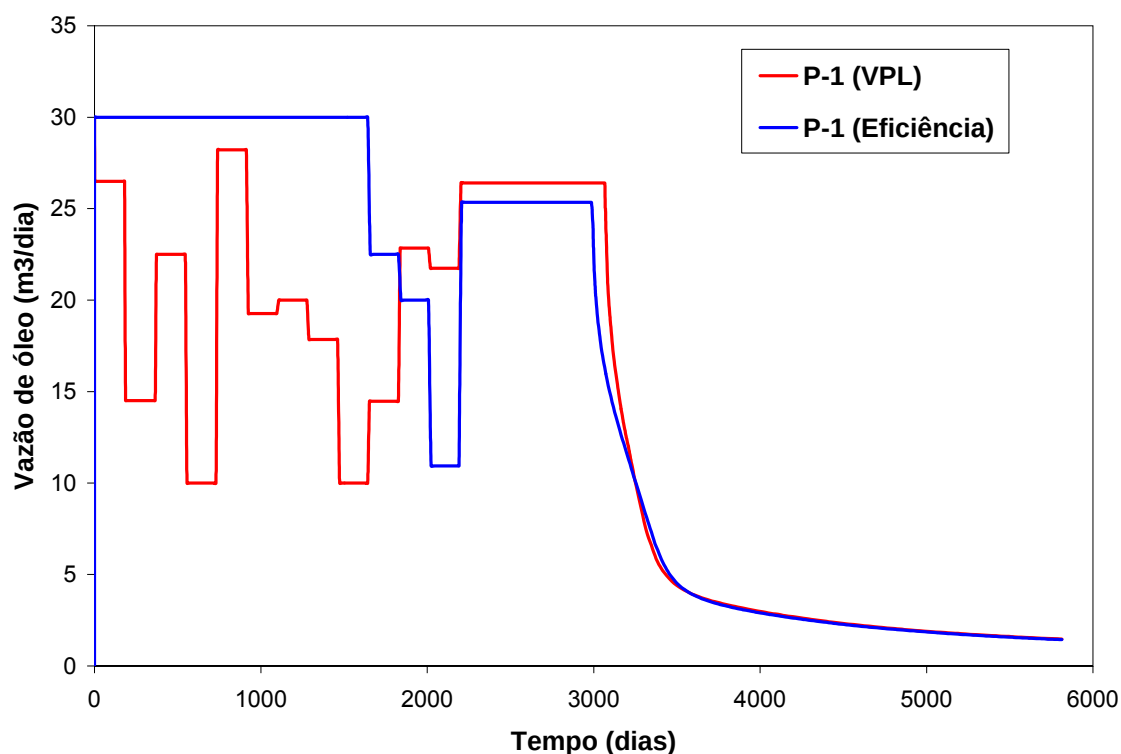


Figura 6.8 – Gráfico de vazão de óleo para o poço controlado P-1.

O resultado utilizando *F.O.* de eficiência parece mais coerente com a distribuição das heterogeneidades do meio. Uma vez que o meio é homogêneo até 01/06/2006, parece desnecessário alterar a vazão dos poços até que a frente de água alcance a região de contraste de permeabilidade. Apesar das mudanças de controle realizadas no caso otimizado com VPL, em ambos os casos a frente de avanço de água chega à região de heterogeneidades de forma homogênea, como pode ser observado na Figura 6.9.

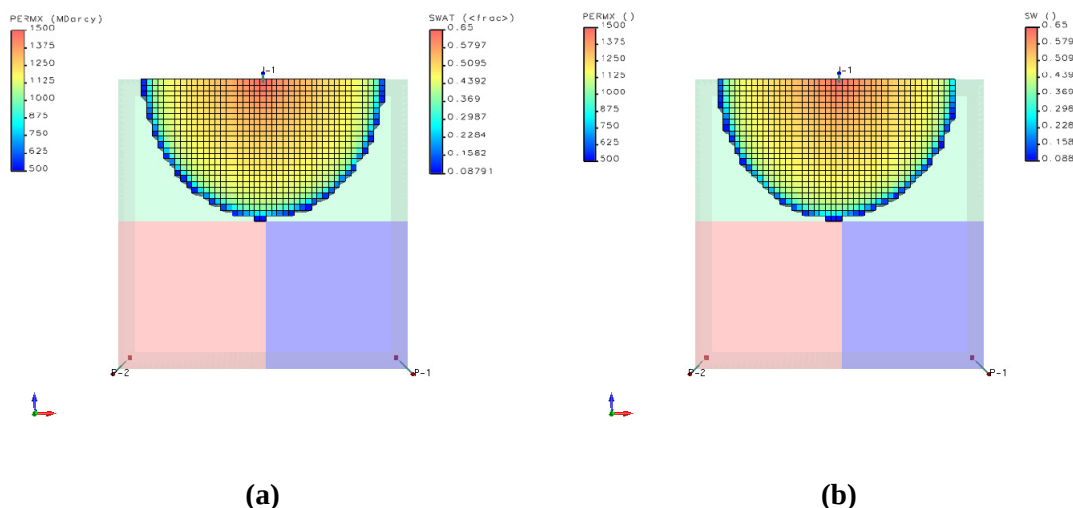


Figura 6.9 – Frente de avanço de água para o caso otimizado utilizando a eficiência energética (a) e utilizando o VPL (b).

Do ponto de vista operacional, este resultado se mostra bastante interessante, já que não há necessidade de alterar a vazão do poço durante anos, até que a frente alcance a região de contraste de permeabilidade. Após a irrupção da água, quando não há mais controle dos poços, as vazões se comportam de forma quase idêntica.

Na Figura 6.10 é possível observar a produção acumulada dos poços produtores. Para a otimização utilizando eficiência o poço P-1, localizado na região com menor permeabilidade, é forçado a produzir mais do que na otimização utilizando o VPL.

Na Figura 6.11 é apresentada a produção acumulada do campo. A curva de produção acumulada do campo para ambas as otimizações são coincidentes.

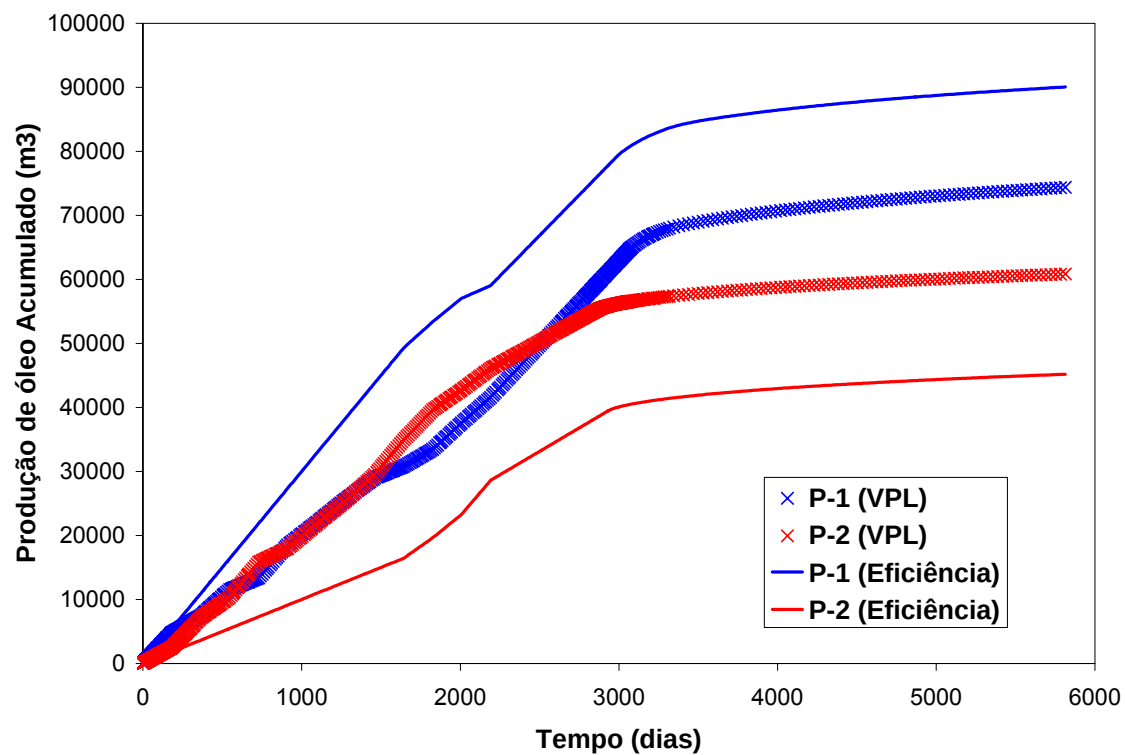


Figura 6.10 – Produção acumulada dos poços produtores para os casos otimizados.

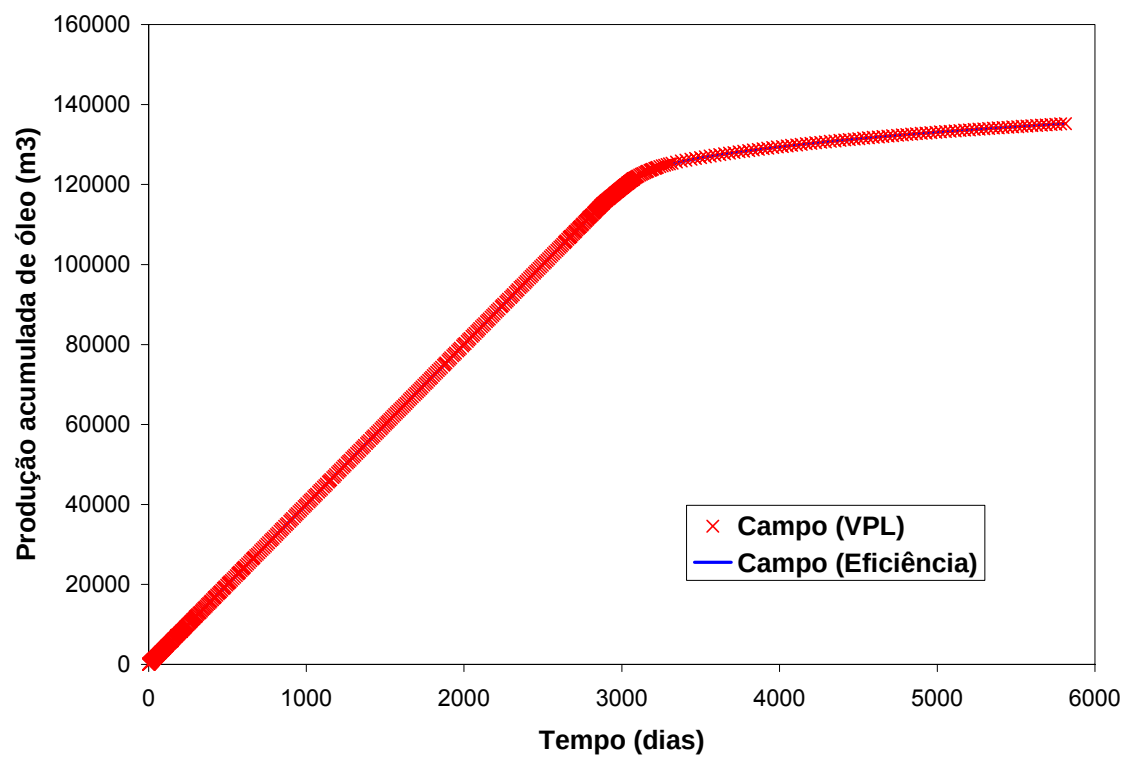


Figura 6.11 – Produção acumulada de óleo (N_p) para o campo – casos otimizados.

Na Figura 6.12 pode-se observar o corte de água dos poços produtores. No caso do poço P-1, a irrupção de água é adiantada em 79 dias no caso otimizado utilizando eficiência em relação ao caso utilizando VPL. Para o poço P-2 a situação se inverte: a irrupção de água é adiantada em 61 dias no caso utilizando VPL em relação à otimização utilizando a eficiência. Resultado coerente com o que foi observado para a vazão de poços: o poço P-1, localizado na região de menor permeabilidade, é mais exigido no caso otimizado utilizando eficiência.

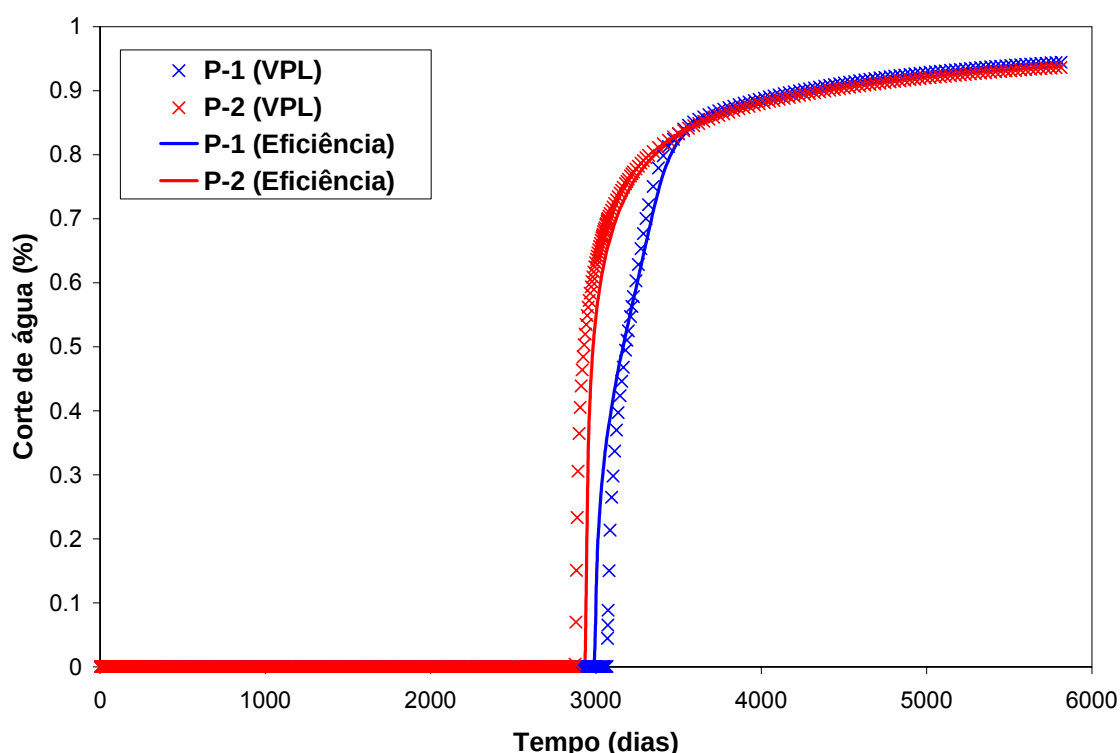


Figura 6.12 – Corte de água para os poços P-1 (curvas em azul) e P-2 (curvas em vermelho) para o caso otimizado utilizando eficiência (linha contínua) e utilizando VPL (símbolos em X).

Na Figura 6.13 pode-se observar o comportamento do algoritmo de otimização através do ganho na função objetivo *versus* número de iterações.

Do ponto de vista do processo de otimização, a parametrização do problema utilizando a função objetivo de eficiência mostrou-se mais interessante, uma vez que foi necessário um número de iterações menor (74), atendendo o critério imposto de ganho esperado da *F.O.*, quando comparado ao processo utilizando a *F.O.* de VPL (100, o limite máximo

de iterações imposto ao algoritmo). A *F.O.* de eficiência leva em consideração diretamente a distribuição de fluidos no reservatório, parecendo esse ser o motivo de levar a um processo de otimização mais rápido. Neste sentido, a eficiência energética pode ser uma vantagem em relação a outras medidas tomadas apenas nos poços, pois representa a distribuição dos fluidos, garantindo seu melhor arranjo.

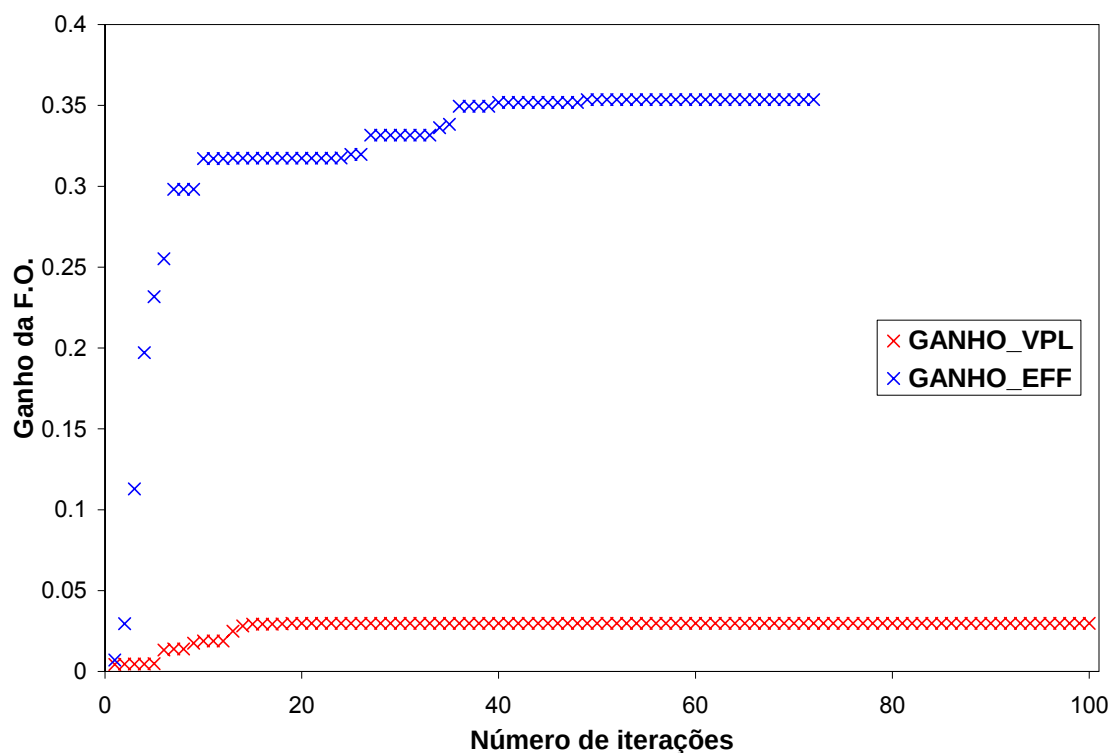


Figura 6.13 – Evolução do ganho na função objetivo.

Na Tabela 6.5 é apresentada uma comparação entre o valor presente líquido obtido após a otimização utilizando a *F.O.* de VPL e o valor presente líquido calculado, para os casos iniciais e otimizados.

Tabela 6.5 – Comparação entre os VPLs dos casos otimizados com *F.O.* de VPL e eficiência.

	VPL Inicial (u.m.)	VPL Otimizado (u.m.)
IMEX	1790045	1860956
ECLIPSE	1789892	1860162

De fato, como indicado na literatura, o bom gerenciamento energético do reservatório implica no melhor resultado do ponto de vista econômico, uma vez que VPLs semelhantes são encontrados otimizando VPL e otimizando a eficiência energética.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

“It is exceedingly important to establish the nature of the sources of reservoir energy operative in the given reservoir, the possibility of utilizing natural energy to achieve maximum oil recovery or the necessity of supplementing this energy artificially by injecting some kind of a driving agent into the reservoir to secure more effective drainage.” – Muravyov et al.

“The understanding of the main energy resources of a reservoir driving the different stages of a field life is essential to any simulation exercise. As a matter of fact, the input of each reservoir energy component should be qualified beforehand and explicitly input into the reservoir simulator.” – Luca Consentino

7.1 CONCLUSÕES

O termo energia é comumente utilizado na Engenharia de Petróleo quando se faz referência, por exemplo, aos mecanismos de recuperação de petróleo, porém praticamente sempre de forma qualitativa. As referências encontradas defendem a relevância da interpretação energética em um contexto clássico de análise do comportamento de reservatórios, porém muito dissociado das técnicas atuais de simulação numérica.

Neste sentido, a fim de associar técnicas de simulação numérica à enfoques clássico, procurou-se neste trabalho associar conhecimentos pertinentes aos mecanismos de produção e à ciência da Termodinâmica ao processo de simulação numérica do escoamento para tentar melhor compreender a exploração dos reservatório de petróleo. O cálculo energético fornece outras grandezas quantitativas ao engenheiro, e novas perspectivas para a análise do problema estudado

O modelo energético aqui apresentado foi desenvolvido partindo das equações do escoamento multifásico e através de um formalismo comum em Elementos Finitos, chega à equações identificadas como formas de energia. Esse formalismo é, em certo sentido, do modo aplicado aqui, mais matemático do que físico. De fato, não se assumem *a priori* quais seriam as parcelas e formas de energia (interna, cinética, potencial, etc.) no reservatório. Não se parte de nenhuma expressão dada do balanço de energia, do tipo proposto na seção 2.2.4. Em vez disso, aplica-se uma manipulação matemática sobre a forma diferencial da conservação de massa (esta sim, um ponto de partida físico). O que se faz, nessa passagem do desenvolvimento, é a escolha de uma função de ponderação matematicamente arbitrária e fisicamente conveniente. O resultado é identificado *a posteriori* como um balanço de energia (mecânica) através da comparação com outros resultados provenientes da Termodinâmica. De um lado, essa estratégia garante a correção matemática formal das igualdades das equações. De outro lado, a física é usada para controle e interpretação dos resultados.

O modelo desenvolvido foi implementado através do pós-processamento de simulações numéricas de fluxo. O pós-processamento é uma estratégia vantajosa para o

acoplamento de novos cálculos a um simulador de fluxo, visto que o novo modelo pode ser utilizado com uma série de simuladores diferentes, bastando que a saída desses simuladores contenha todas as variáveis necessárias. Isto é, não é necessária a recodificação do núcleo do simulador. Por outro lado, essa estratégia sofre com o problema de desempenho, uma vez que as informações necessárias devem ser lidas em disco para serem utilizadas, uma forma lenta de acesso aos dados em um computador. Outras estratégias (mencionadas na seção 4.3) poderiam ser adotadas, como a implementação do modelo proposto em um novo simulador, concomitantemente ao seu desenvolvimento. Uma outra possibilidade é a implementação do simulador com arquitetura aberta contendo estruturas similares às descritas aqui para a sua fácil extensão, ou no próprio simulador ou em sua plataforma.

O arcabouço de algoritmos e estruturas de dados oferece um conjunto de ferramentas capaz de oferecer uma solução expedita para o desenvolvimento e testes de novos modelos, tornando a implementação desses modelos mais simples. Nenhum algoritmo foi implementado de forma dependente do caráter estruturado ou não, do em consideração à malha ser estruturada ou não, do tipo do simulador de fluxo, número de fases ou dimensão do modelo. Procurou-se dissociar totalmente, ou quase, os algoritmos de seus dados, tornando a implementação flexível, extensível e manutenível. Ainda que apenas testes em casos sintéticos tenham sido conduzidos aqui a implementação foi ocnduzida de forma a contemplar o pós-processamento de modelos reais, aproveitando o já maduro estado de desenvolvimento da biblioteca de base (ROMEUE [53]), no que diz respeito ao tratamento de particularidades da modelagem de reservatórios.

Testes de validação foram conduzidos em ordem crescente de complexidade a fim de garantir a correta implemetação do modelo. À medida que foram realizados os testes, diferentes parcelas de energia foram analisadas, tanto em relação à sua correta implementação quanto à sua coerência com os fenômenos físicos representados pelo modelo. Tal metodologia tanto facilitou o desenvolvimento do modelo computacional como também facilitou a interpretação e compreensão dos efeitos da variação das propriedades do reservatório nas parcelas energéticas.

Como uma indicação da potencialidade da utilização do modelo, a eficiência foi utilizada como parametrização do problema de alocação dinâmica de vazões de poços,

com resultados satisfatórios e motivadores. O pressuposto que, em muitas situações de interesse prático, o tipo de otimização desejada (máxima recuperação ou lucro) esteja associado a um uso mais eficiente da energia no reservatório. Outros indicadores desse tipo podem ser úteis, por exemplo, para avaliar o aproveitamento da energia gravitacional no deslocamento do óleo, etc.

Em relação ao programa Ciclope e à biblioteca PetroLib, adicionam-se uma série de funcionalidades em função da implementação aqui desenvolvida:

- Um conjunto de algoritmos para pré-processamento de esquemas de pós-processamento está disponível para a utilização da integração de outros modelos;
- Um módulo específico para pós-processamento de simulações de fluxo foi desenvolvido de forma a tratar de forma consistente e genérica este tipo de problema;
- Recursos computacionais de interface e de visualização foram implementados para auxiliar a interpretação de resultados da metodologia aqui desenvolvida, mas que estão disponíveis para outras aplicações, como gráficos de área (para analisar a tendência de diferentes parcelas de séries de dados), tabelas resumidoras, etc.;
- Criou-se um arquivo de resultados contendo os dados de solução do pós-processamento de energia, semelhante a um arquivo de resultados da simulação, de forma que, uma vez realizado o pós-processamento, fique disponível para futuras análises.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção, defende-se a utilidade de uma interpretação energética na engenharia e simulação de reservatórios. Essa defesa é ainda especulativa e busca justamente justificar possíveis esforços adicionais, já que os desenvolvimentos propostos são recentes. Este trabalho abre possibilidades para uma grande variedade de desenvolvimentos e estudos futuros.

Um desenvolvimento imediatamente importante seria a implementação e testes para escoamentos trifásicos (água, óleo e gás, modelos *black oil* completo) e tridimensional. Fica-se devendo também, para algum desenvolvimento futuro, uma modelagem térmica mais completa, considerando apropriadamente transientes de temperatura e sua influência sobre as propriedades de rocha e fluido, com extensão ainda para aplicações de métodos térmicos de recuperação. Tal inclusão de efeitos térmicos pode aproveitar o campo de temperaturas calculado pelo ECLIPSE, que trata a equação da energia como um traçador. Ou até mesmo utilizar uma implementação de traçador presente na biblioteca de base para a solução do problema de acidulação biogênica (LUCIANETTI [36]) para obter o campo de temperaturas.

Na verdade, mesmo na produção a frio do reservatório, a análise energética indica que modelagem térmica pode ser mais importante do que se supõe. As hipóteses usuais de reservatório isotérmico e processo adiabático de produção não são consistentes, a rigor, com escoamento viscoso no meio poroso: afinal, a potência consumida no vencimento das forças viscosas (uma espécie de atrito, fundamentalmente) converte-se necessariamente em energia interna (dentro do sistema) ou transfere-se como calor (para fora do sistema). Mais do que isso, essas considerações podem ser, conforme se conjectura, quantitativamente relevantes no caso de escoamento de gás dentro do reservatório.

Outra consideração a ser mais bem investigada é a relação do balanço de massa e do balanço de energia. De fato, o balanço energético está mais diretamente implicado na análise dos mecanismos de produção do que o balanço de massa. Afinal, se é para se tratar das energias associadas à expansão da capa, influxo do aquífero, compressibilidade da rocha, injeção de água, etc., então, que se calculem propriamente

essas energias e não apenas as variações de volume associadas — porque é diferente. Grosso modo, como indica a análise dimensional, transformar essas variações volumétricas em energia requer multiplicá-las pelas pressões contra as quais elas se exercem, pressões que variam no espaço e no tempo. Por exemplo, a quantidade de energia que um aquífero ou que um poço injetor fornece ao reservatório depende não só da vazão (em condições de reservatório), mas também da pressão de injeção momentânea, e quem duvida disso que se imagine a fazer o trabalho da bomba.

Muito provavelmente, como idéia a investigar, a fração recuperada de um reservatório deve evoluir, ao longo do tempo, segundo interessantes correlações com o trabalho fornecido ao reservatório ou, melhor ainda, com parcelas específicas do trabalho total, conforme se especula logo adiante. Além disso, formas de expressão comuns adquirem valor matemático: por exemplo, um reservatório de óleo pesado demanda mais trabalho para ser produzido, em um sentido físico bem definido, mensurável em Joules; e o modo mais ou menos agressivo como se explora um reservatório pode ser avaliado por uma potência de exploração, mensurável em Watts, envolvendo vazão e pressão.

Balanço de massa e balanço de energia são diferentes, complementares certamente, e, para a análise da mecânica de produção do reservatório, o balanço de energia está mais diretamente implicado. Ele combina muito explicitamente vazão, pressão e tempo, as três variáveis mais importantes do processo.

Além de mais diretamente implicado na análise da mecânica de produção do reservatório, o balanço energético é mais rico para essa análise devido à variedade de suas parcelas. O balanço de massa envolve, resumidamente, três parcelas básicas:

- volume da massa injetada no reservatório (de poços e vizinhanças);
- volume da massa produzida pelo reservatório (para poços e vizinhanças);
- volume expandido de rocha e fluidos no reservatório.

O balanço de energia envolve, resumidamente, quatro parcelas básicas:

- energia de deslocamento injetada no reservatório (de poços e vizinhanças);
- energia de deslocamento produzida pelo reservatório (para poços e vizinhanças);
- energia de expansão de rocha e fluido no reservatório;

- energia mecânica consumida pelas forças viscosas no deslocamento através do meio poroso.

As três primeiras parcelas dos dois balanços se correspondem. Mas só o balanço de energia apresenta a quarta parcela, justamente a mais significativa para o entendimento do aproveitamento energético no processo de exploração de reservatórios de petróleo.

Uma possibilidade a explorar a metodologia proposta é otimizar a estratégia de drenagem do reservatório a partir de um indicador associado à distribuição espacial das energias. Seja, como exemplo simples, um reservatório homogêneo, quadrado e fechado, em que se tem direito a posicionar apenas dois poços, um injetor e um produtor.

Outro problema de otimização que poderia ser tratado, análogo ao abordado aqui (seção 6.2), é a alocação dinâmica de vazões de injeção, uma vez que parece ser mais intuitivo, por exemplo, fornecer mais energia ao reservatório através de injeção de fluidos, tornando o problema mais próximo da realidade, mais interessante do ponto de vista operacional.

Ainda no aspecto de otimização da produção, um sistema de controle da simulação (*steering*) poderia ser utilizado de forma a otimizar a eficiência energética do processo de exploração.

Outra vantagem da abordagem energética do escoamento no reservatório é a facilidade com que se integra a uma abordagem do mesmo tipo aplicada ao escoamento no poço e nas linhas de produção e mesmo ao projeto de instalações de superfície, enfim, ao sistema global de produção do campo. Uma análise integrada nessas bases pode ajudar em decisões que envolvam diferentes escolhas quanto à potência de operação do sistema todo, com maiores ou menores pressões de injeção e de produção nos poços, considerando também métodos alternativos de elevação artificial. BUCHMAN [8], por exemplo, serve-se explicitamente de um argumento desse tipo para defender uma modificação no sistema de bombeio mecânico que reduziria o nível dinâmico dos poços e o que ele considera um desperdício energético no sistema poço-reservatório. Mais longe ainda do reservatório, o dimensionamento do sistema de geração elétrica de uma

plataforma depende da potência das instalações de bombeio para injeção de água nos poços, que, por sua vez, tem relação direta com a potência adotada para exploração do reservatório, tudo em Watts. Isto é, desde o cálculo da energia inicial do reservatório e do trabalho suplementar (por injeção de água, por exemplo) para deslocar o óleo recuperável no reservatório e elevá-lo até a superfície, passando, depois, pela especificação da potência de operação do reservatório até o dimensionamento das bombas e, por consequência, do sistema de geração da plataforma, todas essas avaliações podem ser diretamente expressas e operadas homogeneamente em unidades de energia ou potência.

Além das aplicações diretamente relacionadas com a avaliação e a otimização da estratégia de exploração, a abordagem energética parece útil para análises mais específicas na solução dos problemas de escoamento no reservatório. A seguir, especula-se brevemente algumas análises desse tipo, entre outras mais que se possa considerar.

Na simulação de reservatórios, as soluções nem sempre tão exatas ou precisas quanto se gostaria, por diversas questões de cálculo numérico, e um dos indicadores comuns para controle da qualidade do cálculo é o erro no balanço de materiais. A abordagem energética pode fornecer outro indicador significativo, o erro no balanço de energia. Um critério desse tipo foi usado por ROMEU e NOETINGER, *apud* ROMEU [52] na avaliação de diferentes esquemas de cálculo de transmissibilidades no método CVFD, a partir de um viés numérico no cálculo da permeabilidade equivalente definida em bases energéticas. Aplicações muito mais diretas e menos específicas dessa idéia parecem interessantes de se explorar. Um critério de erro de balanço de energia é provavelmente mais exigente do que um de erro de balanço de massa.

A abordagem energética pode ser útil para outros tipos de avaliação, agora não relacionadas aos aspectos numéricos, mas às simplificações da modelagem física.

Uma avaliação desse tipo considera especificamente a questão do acoplamento entre simulação de escoamento e geomecânica. Como regra, reduz-se o papel das deformações geomecânicas no escoamento nos reservatórios a uma variação simples do volume poroso, função unicamente da pressão de poros, segundo uma

compressibilidade pequena e perfeitamente elástica. Tal simplificação, adotada por quase todos os simuladores (e também por este texto) pode ser insatisfatória para uma variedade maior de casos do que normalmente se julga, sendo vários os autores que defendem a importância de uma simulação de escoamento acoplada ao cálculo completo das tensões e deformações mecânicas, esse último realizado normalmente por métodos de elementos finitos. Uma maneira natural de examinar essa questão é comparar as soluções obtidas pelas duas abordagens: de um lado, a simulação simplificada habitual; de outro lado, a simulação acoplada à geomecânica. Mas, a maneira exata de conduzir essa comparação e, mais ainda, de interpretar seus resultados de modo a extrair conclusões gerais e consistentes não parece muito evidente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALEXANDRESCU, A., *Modern C++ Design: Generic Programming and Design Patterns Applied*. 1 ed. Boston, Addison-Wesley Professional, 2001.
- [2] AMSDEN, J., “Levels of Integration – Five ways you can integrate with the Eclipse Platform”. Object Technology International, Inc, March 2001, disponível em: <http://www.eclipse.org/articles/Article-Levels-Of-Integration/levels-of-integration.html>. Acesso em: 15 jan. 2008.
- [3] AZEVEDO NETTO, J.M. E ALVAREZ, G.A., *Manual de Hidráulica*. 6 ed. São Paulo, Blücher, 1977.
- [4] AZIZ, K. e SETTARI, A., *Petroleum Reservoir Simulation*, 1 ed. London, Elsevier, Applied Science Publishers, 1979.
- [5] BEAR, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*. 1 ed. New York, Elsevier, 1972.
- [6] BERTI, G., “Generic Components for Grid Data Structures and Algorithms with C++”. 2001.
- [7] BOOST C++ Libraries, Disponível em: <http://www.boost.org/>. Acessado em: 21 fev. 2008.
- [8] BUCHMAN, S.S., “Producing the well in artificial lift by a subsurface compensated pump: a new production method”. *SPE Production Operations Symposium*, SPE-80920, Oklahoma, USA, 22-25 March 2003.
- [9] BURRUS N., DURET-LUTZ A., GÉRAUD T. et al., 2003, “A Static C++ Object-Oriented Programming (SCOOP) Paradigm Mixing Benefits of Traditional OOP and Generic Programming”. In: *Proceedings of the Workshop on Multiple Paradigm with OO Languages (MPOOL'03)*, Anaheim, CA, USA October.

- [10] COIN - Computational Infrastructure for Operations Research Home Page; Derivative-Free Optimization; <https://projectcs.coin-or.org/Dfo>.
- [11] CONN, A.R.; SCHEINBERG, K.; TOINT, Ph.L.; “Recent Progress in Unconstrained Nonlinear Optimization without Derivatives”; *Mathematical Programming*, 79: 397-414; 1997.
- [12] ÇENGEL, Y. A. e BOLES, M. A., *Thermodynamics – An Engineering Approach*, 4 ed, New York, McGraw-Hill, 2002.
- [13] CHEN, Z., HUAN, G., MA, Y., *Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media*, 1 ed. Philadelphia, SIAM – Computational Science and Engineering, 2006.
- [14] COMPUTER MODELLING GROUP, *Builder User’s Guide*, Calgary, Canada, 2007.
- [15] COMPUTER MODELLING GROUP, *Result’s Users’s Guide*, Calgary, Canada, 2007.
- [16] COMPUTER MODELLING GROUP, *IMEX’s User’s Guide*, Calgary, Canada, 2007.
- [17] COSENTINO, L. *Integrated reservoir studies*. 1 ed. Paris, Technip, 1993.
- [18] DAMIANI, M. C., *Determinação de Padrões de Fluxo em Simulações de Reservatório de Petróleo Utilizando Traçadores*, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [19] DAGAN, G., *Flow and Transport In Porous Formations*. 1 ed. Berlin, Springer-Verlag, 1989.
- [20] DARCY, H., “Les fontaines publiques de la Ville de Dijon”, Dalmount, Paris (reprinted in Hubbert, 1969).

- [21] ECLIPSE FOUNDATION, Eclipse – an open development platform, disponível em <http://www.eclipse.org>. Acesso em: 14 fev. 2008.
- [22] EDWARDS Jr., C. H., PENNEY, D. E., *Equações Diferenciais Elementares com Problemas de Contorno*, 3 ed. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil, 1995.
- [23] EMERICK, A. A., MORAES, R. J., RODRIGUES, J. R. P., “Calculating Seismic Attributes Within a Reservoir Simulator Flow”, *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. SPE 107001, Buenos Aires, Argentina, 14-18 April 2007.
- [24] ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE, *Ciclope 2.0 User's Manual*, 2005.
- [25] FANCHI, J. R., “Integrating Forward Modeling into Reservoir Simulation”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 32, n. 1, pp. 11-21(11), Dec. 1996.
- [26] FELIPPA, C. A., PARK K. C., FARHAT, C., *Partitioned Analysis of Coupled Mechanical Systems*. In: Report CU-CAS-99-06, Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures – University of Colorado at Boulder, Boulder, Colorado, 2001.
- [27] FOX, R. W., McDONALD, A. T., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 5 ed. Rio de Janeiro LTC, 2001.
- [28] GAMMA, E., HELM, R., JOHNSON, R., VLISSIDES, J., *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 36 ed. Boston, Addison-Wesley, 2007.
- [29] HELMIG, R., *Multiphase Flow and Transport Process in the Subsurface: a Contribution to the Modeling of Hydrosystems*. 1 ed. New York, Springer-Verlag, 1997.

- [30] HUBBERT, M. K., "Darcy's Law and the Field Equations of the Flow of Underground Fluids". *American Institute of Mining Engineers Transactions*, v. 207, pp. 222-239, 1956.
- [31] HUGUES, T. J. R., *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Mineola, Dover, 2000.
- [32] INDELMAN, P., DAGAN, G., "Upscaling of permeability of anisotropic heterogeneous formations". *Water Resources Research*. v. 29, n. 4, pp. 935-943, 1993.
- [33] JOSUTTIS, N. M., *The C++ Standard Library*. 1 ed. Boston, Addison-Wesley Professional, 1999.
- [34] LAKE, L. W., *Enhanced Oil Recovery*. 1 ed. New Jersey, Prentice-Hall, 1989.
- [35] LE LOC'H, G. *Étude de la composition des perméabilités par des méthodes variationnelles*. Thèse de doctorat. École nationale Supérieure des Mines de Paris, Fontainebleau, Paris, France, 1987.
- [36] LUCIANETTI, R. M., *Reservoir Souring Solution*, In: *Souring User's Guide*, 2008.
- [37] MALVERN, L., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Facsimile ed. New Jersey, Prentice-Hall, 1977.
- [38] MASSARANI, G., *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. Rio de Janeiro, Ed. UFRJ, 1997.
- [39] MATHERON, G., *Genèse et Signification Énergétique de Loi de Darcy*. *Révue de l'Institut Français du Pétrole*, v. XXI, n.11, pp. 1967-1706, Nov. 1966.
- [40] MATHERON, G., *Éléments pour une Théorie des Milieux Poreux*. Paris, Masson, 1967.

- [41] MENDONÇA, A. L., *Simulação Numérica de Escoamentos Incompressíveis Bifásicos de Fluidos Não-Newtonianos e Imiscíveis em Meios Porosos Via Método dos Elementos Finitos*, Dissertação de M. Sc., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [42] OLIVEIRA, D. F. B., *Técnicas de Otimização de Produção em Reservatórios de Petróleo, Abordagem Sem Uso de Derivadas para Alocação Dinâmica das Vazões de Produção e Injeção*, Dissertação de M.Sc., UFPE, Recife, PE, Brasil, 2006.
- [43] OLIVEIRA, D. F. B., RODRIGUES, J. R. P., ARAÚJO, E. R., MORAES, R. J., SIQUEIRA, D. A., “Técnicas de otimização para alocação dinâmica das vazões de produção e injeção”. *Seminário de Reservas e Reservatórios 2007*, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brasil, 11-14 set., 2007.
- [44] PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O., *Perry's Chemical Engineers's Handbook*. 7 ed. New York, McGraw-Hill, 1997.
- [45] PETROLEUM EXPERTS, *GAP User's Guide*, 2007.
- [46] PETROLEUM EXPERTS, *RESOLVE User's Guide*, 2007.
- [47] Python Programming Language, <http://www.python.org>. Acesso em: 14 fev. 2008.
- [48] ROGERS, W. L., INGALLS, L. J., PRASAD S. J., “Pre-and Postprocessing for Reservoir Simulation”, In: *SPE Computer Applications*, v. 3, n. 3, SPE 20360, 1991.
- [49] REGTIEN, J.M.M., POR, G.J.A, van STIPHOUT, M.T., van der VLUGT F.F., “Interactive Reservoir Simulation”. *SPE Reservoir Simulation Symposium*, SPE 29146, San Antonio, Texas, USA, 1995.

- [50] REIS G., JÄRVI J., 2005, “What is Generic Programming?”, In: *Object-Oriented Programming, Systems, Languages and Applications (OOPSLA'05)*, San Diego, California, 2005.
- [51] RIBEIRO, F.L.B. *Introdução ao método dos elementos finitos – notas de aula*. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, março 2004.
- [52] ROMEU, R. K., *Écoulement em Milieux Hétérogènes: Prise de Moyenne de Permeabilité em Regime Permanente et Transitoire*. Thèse de doctorat, Univ. Paris VI, Paris, France, 1994.
- [53] ROMEU, R. K. (relator), *Malhas Volumétricas para Representação de Reservatórios*. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello – Tecnologia de Reservatórios, Publicação Interna, Rio de Janeiro, 2001.
- [54] ROMEU, R. K., PARAIZO, P. L. B., MORAES, M. A. S., LIMA, C. C., LOPES, M. R. F., SILVA, A. T., RODRIGUES, J. R. P., SILVA, F. P. T., CARDOSO, M. A., DAMIANI, M. C., “Reservoir Representation for Flow Simulation”. *9th SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [55] ROMEU, R. K., DUARTE, F. P. T., MORAES, R. J., *Energia do Reservatório*. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello – Geoengenharia de Reservatórios, Publicação Interna, Rio de Janeiro, 2007.
- [56] ROMEU, R. K., DUARTE, F. P. T., MORAES, R. J., “Energias do Reservatório Calculadas por Pós-Processamento das Simulações”. *Seminário de Reservas e Reservatórios 2007*, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brasil, 11-14 set., 2007.
- [57] ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., *Previsão de Comportamento de Reservatórios de Petróleo – Métodos Analíticos*. 1 ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2002.

- [58] ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., XAVIER, J. A. D., *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*. 1 ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2006.
- [59] SANDOVAL, R. K., “SimPlot: An Analytical Tool for Simulation Post-Processing”. *Petroleum Computer Conference*, SPE 36024, Dalla, Texas, USA, 2-6 June 1996.
- [60] SCHILTIUS, R. J., “Active oil and reservoir energy”. *Petroleum Transactions, AIME* 1936. v. 118, pp 33-52, 1936.
- [61] SCHLUMBERGER, *ECLIPSE Reference Manual 2005A*, 2005.
- [62] SCHLUMBERGER, *ECLIPSE Technical Description 2005A*, 2005.
- [63] SCHLUMBERGER, *ECLIPSE File Formats Reference Manual 2005A*, 2005.
- [64] SMITH, J. M., VAN ESS, H. C. e ABBOT, M. M., *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. 6 ed. New York, McGraw-Hill, 2000.
- [65] SOUSA M. C., MIRANDA Filho, D. N., “3D Scientific Visualization of Reservoir Simulation Post-Processing”. *Petroleum Computer Conference*, SPE 28247, Dallas, Texas, USA, 31 July-3 August, 1994.
- [66] STROUSTRUP, B., *The C++ Programming Language*. 3 ed. Addison-Wesley Professional, Boston, 1997.
- [67] TAREK, T., MCKINNEY, P. D., *Advanced Reservoir Engineering*, 1 ed. Elsevier – Gulf Professional Publishing, Oxford, 2005.
- [68] THOMAS, E. D. (Organizador),. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 1 ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2001.
- [69] TRAN, D., SETTARI A. e NGHIEM L., “New Iterative Coupling Between a Reservoir Simulator and a Geomechanis Module”. *SPE/ISRM Rock*

Mechanics Conference, SPE 78192, Irving, Texas, USA, 20-23 October 2002.

- [70] VELDHUIZEN, T. L., “Scientific Computing: C++ versus Fortran”, disponível em <http://ubiety.uwaterloo.ca/~tveldhui/papers/DrDobbs2/drdobbs2.html>. Acesso em: 23 fevereiro 2008.

- [71] VELDHUIZEN, T. L., “Will C++ be faster than Fortran?”, disponível em <http://ubiety.uwaterloo.ca/~tveldhui/papers/iscope97/index.html>. Acesso em: 23 fevereiro 2008.

APÊNDICE A

CONFIGURAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS DOS SIMULADORES DE FLUXO ECLIPSE E IMEX

Para que os simuladores gravem (nos arquivos binários de saída) as propriedades necessárias para o cálculo de energia, certas palavras-chave devem ser inseridas no arquivo de entrada do simulador de reservatórios. Essas palavras-chave comandam quais propriedades, tanto de malha quanto de poços, devem ser escritas (e, quando necessário, calculadas) nos arquivos de resultado. Serão descritas aqui as palavras-chave para a utilização do ECLIPSE e do IMEX, os simuladores que foram contemplados para a utilização do modelo aqui apresentado.

Configuração do Simulador ECLIPSE

O ECLIPSE pode conter normalmente, em seus arquivos de saída, todas as propriedades necessárias para a solução das equações, a menos da porosidade efetiva e da saturação de óleo. É necessário apenas comandar o simulador para que essas propriedades devam ser calculadas e gravadas (e calculadas quando não se trata de propriedade necessária para a solução das variáveis primárias), com as seguintes palavras-chave.

Propriedades de malha

Fluxo das Fases	
Seção	SCHEDULE e SOLUTION ²⁴
Palavra-chave	RPTRST
Mnemônico	FLWS
Exemplo	RPTRST 'FLWS' /

²⁴ A palavra-chave RPTRST na seção SOLUTION indica quais propriedades devem ser escritas no passo de tempo 0 (inicialização da simulação).

Potencial das Fases	
Seção	SCHEDULE e SOLUTION
Palavra-chave	RPTRST
Mnemônico	POT
Exemplo	RPTRST 'POT' /

Fator Volume de Formação das Fases	
Seção	SCHEDULE e SOLUTION
Palavra-chave	RPTRST
Mnemônico	ALLPROPS*
Exemplo	RPTRST 'ALLPROPS' /

*Além dos fatores de formação de volume de fases, esse mnemônico requisita também a impressão de outras propriedades (densidades, viscosidades e permeabilidades relativas dos fluidos)

Pressão de bolha	
Seção	SCHEDULE e SOLUTION
Palavra-chave	RPTRST
Mnemônico	PBPD
Exemplo	RPTRST 'ALLPROPS' /

Propriedades de Poço

Fluxo Volumétrico da Fase Óleo nas Completações	
Seção	SUMMARY
Palavra-chave	COFR
Mnemônico	-
Exemplo	COFR '[POÇO_1]' / '[POÇO_2]' / ... '[POÇO_N]' / /

Fluxo Volumétrico da Fase Água nas Completações	
Seção	SUMMARY
Palavra-chave	CWFR
Mnemônico	-
Exemplo	CWFR ‘[POÇO_1]’ / ‘[POÇO_2]’ / ... ‘[POÇO_N]’ / /

Fluxo Volumétrico da Fase Gás nas Completações	
Seção	SUMMARY
Palavra-chave	CGFR
Mnemônico	-
Exemplo	CGFR ‘[POÇO_1]’ / ‘[POÇO_2]’ / ... ‘[POÇO_N]’ / /

Pressão nas Completações	
Seção	SUMMARY
Palavra-chave	CPR
Mnemônico	-
Exemplo	CPR ‘[POÇO_1]’ / ‘[POÇO_2]’ / ... ‘[POÇO_N]’ / /

Tabelas de PVT de Cada Fase do Modelo

Regiões de PVT	
Seção	REGIONS
Palavra-chave	RPTREGS
Mnemônico	PVTNUM
Exemplo	RPTREGS ‘PVTNUM’ /

Tabela de PVT de óleo “morto”	
Seção	PROPS
Palavra-chave	RPTPROPS
Mnemônico	PVDO
Exemplo	RPTPROPS ‘PVDO’ /

Tabela de PVT de óleo “vivo”	
Seção	PROPS
Palavra-chave	RPTPROPS
Mnemônico	PVTO
Exemplo	RPTPROPS ‘PVTO’ /

Tabela de PVT da água	
Seção	PROPS
Palavra-chave	RPTPROPS
Mnemônico	PVTW
Exemplo	RPTPROPS ‘PVTW’ /

Tabela de PVT de gás “seco”	
Seção	PROPS
Palavra-chave	RPTPROPS
Mnemônico	PVDG
Exemplo	RPTPROPS ‘PVDG’ /

Tabela de PVT de gás “úmido”	
Seção	PROPS
Palavra-chave	RPTPROPS
Mnemônico	PVTG
Exemplo	RPTPROPS ‘PVTG’ /

Controle da Frequência de Escrita dos Arquivos

Frequência de Escrita dos Passos de Tempo – Propriedades de Malha	
Seção	SCHEDULE
Palavra-chave	RPTRST
Mnemônico	BASIC
Valor	6
Exemplo	RPTRST ‘BASIC=6’

*Esta instrução deve estar logo no início da seção SCHEDULE e não deve ser alterada ao longo da linha de tempo da simulação.

Frequência de Escrita dos Passos de Tempo – Propriedades de Poços	
Seção	SCHEDULE
Palavra-chave	RPTSCHED
Mnemônico	RESTART
Valor	6
Exemplo	RPTRST ‘RESTART=6’

*Esta instrução deve estar logo no início da seção SCHEDULE e não deve ser alterada ao longo da linha de tempo da simulação.

Frequência de Escrita nos Arquivos de Resultados		
Seção	SCHEDULE	
Palavra-chave	RPTRST	
Mnemônico	SAVE	SFREQ
Valor	3	1
Exemplo	RPTSCHED ‘SAVE=3’ ‘SFREQ=1’	

*Esta instrução deve estar logo no início da seção SCHEDULE e não deve ser alterada ao longo da linha de tempo da simulação.

Controle das propriedades escritas nos arquivos de <i>restart</i>	
Seção	SOLUTION
Palavra-chave	RPTSOL
Mnemônico	RESTART
Valor	> 3
Exemplo	RPTSOL ‘RESTART=4’

Simulador IMEX

Como discutido, no caso do simulador IMEX é necessário um pré-processamento antes de ser calculada a energia, a fim de se calcularem as propriedades requisitos.

Propriedades de Malha

Pressão	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	PRES
Exemplo	*OUTSRF *GRID PRES

Porosidade Efetiva	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	POROS
Exemplo	*OUTSRF *GRID POROS

Potencial do Óleo	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	OILPOT
Exemplo	*OUTSRF *GRID OILPOT

Pressão de Bolha	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	BPP
Exemplo	*OUTSRF *GRID BPP

Pressão capilar água-óleo	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	PCOW
Exemplo	*OUTSRF *GRID PCOW

Pressão capilar óleo-gás	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	PCOG
Exemplo	*OUTSRF *GRID PCOG

Fator volume de formação do óleo	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	BO
Exemplo	*OUTSRF *GRID BO

Razão gás-óleo	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	RS
Exemplo	*OUTSRF *GRID RS

Razão de óleo condensado	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	GRID
Mnemônico	RV
Exemplo	*OUTSRF *GRID RV

Razão Net-to-Gross	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	RES
Mnemônico	ALL
Exemplo	*OUTSRF *RES ALL

Multiplicador de transmissibilidade	
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL
Palavra-chave	OUTSRF
Sub-palavra-chave	RES
Mnemônico	ALL*
Exemplo	*OUTSRF *RES ALL

*Este mnemônico requisita a impressão de todas as propriedades iniciais estáticas do

Propriedades de Poço

Escrita de todas as propriedades nas completções dos poços		
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL	
Palavra-chave	OUTSRF	
Sub-palavras-chave	WELL	LAYER
Mnemônicos	ALL	
Exemplo	*OUTSRF *WELL *LAYER ALL	

*No IMEX não há a possibilidade de controlar a escrita de entidades nem de propriedades individuais no arquivo de saída.

Tabelas de PVT de Cada Fase do Modelo

Escrita das tabelas de PVT de todas as fases		
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL	
Palavra-chave	OUTPRN	
Sub-palavras-chave	TABLES	
Mnemônicos	ALL	
Exemplo	*OUPRN *TABLES ALL	

Controle da Frequência de Escrita dos Arquivos

Controle dos passos de tempo escritos no arquivo de saída		
Seção	INPUT / OUTPUT CONTROL	
Palavra-chave	WRST	
Sub-palavra-chave	FREQ	
Valor	1	
Exemplo	*WRST *FREQ 1	

*Esta instrução não deve ser alterada ao longo da linha de tempo da simulação.

APÊNDICE B

DICIONÁRIO DE PROPRIEDADES CALCULADAS PELA SIMULAÇÃO DE ENERGIA

O módulo de pós-processamento energético implementado no Ciclope escreve um arquivo de saída contendo propriedades de conteúdo de malha e curvas de sumário, bem como é feito pelos simuladores de reservatório. Aqui são descritas as propriedades que são calculadas e gravadas neste arquivo, disponíveis para posterior visualização através do Ciclope. Na Tabela A.1 são descritas as propriedades de malha, na Tabela A.2 as propriedades de sumário e na Tabela A.3, a localização (campo, poço, completação) que as propriedades de sumário são calculadas e disponibilizadas.

Tabela A.1 - Propriedades de malha

Mnemônico	Descrição da Propriedade
ENGDISOIL	Energia dissipada pelas forças viscosas da fase óleo
ENGDISWAT	Energia dissipada pelas forças viscosas da fase água
ENGDISGAS	Energia dissipada pelas forças viscosas da fase gás
POWDISOIL	Potência dissipada pelas forças viscosas da fase óleo
POWDISWAT	Potência dissipada pelas forças viscosas da fase água
POWDISGAS	Potência dissipada pelas forças viscosas da fase gás
ROCKCOMP	Energia de expansão/contração de rocha total
ROCKCOMPOIL	Energia de expansão/contração de rocha referente à fase óleo
ROCKCOMPWATER	Energia de expansão/contração de rocha referente à fase água
ROCKCOMPGAS	Energia de expansão/contração de rocha referente à fase gás
FLUIDCOMP	Energia de expansão/contração de fluido total
FLUIDCOMPOIL	Energia de expansão/contração de fluido referente à fase óleo
FLUIDCOMPWATER	Energia de expansão/contração de fluido referente à fase água
FLUIDCOMPGAS	Energia de expansão/contração de fluido referente à fase gás

Tabela A.2 - Propriedades de sumário

Mnemônico	Propriedade
Energy Dissip Visc O	Energia dissipada pelas forças viscosas para deslocamento da fase óleo
Energy Dissip Visc W	Energia dissipada pelas forças viscosas para deslocamento da fase água
Energy Dissip Visc	Energia total dissipada para deslocamento dos fluidos
Power Comp Rock	Potência de compressão/expansão de rocha
Power Comp Fluid	Potência de compressão/expansão de fluidos
Energy Comp Rock	Energia de compressão/expansão de rocha
Energy Comp Fluid	Energia de compressão/expansão de fluidos
Expansion Energy Total	Energia de expansão/compressão total
Efficiency	Eficiência
Work Well W	Trabalho de poço referente à fase água
Work Well O	Trabalho de poço referente à fase óleo
Work Well	Trabalho de poço total
Power Well W	Potência de poço referente à fase água
Power Well O	Potência de poço referente à fase óleo
Power Well	Potência de poço total
Aquifer Energy	Energia de aquífero
Aquifer Power	Potência de aquífero
Energy Balance	Balanço de Energia

Tabela A.3 – Localização das propriedades de sumário

Mnemônico	Localização		
	Completação	Poço	Campo
Energy Dissip Visc O			
Energy Dissip Visc W			
Energy Dissip Visc			
Power Comp Rock			
Power Comp Fluid			
Energy Comp Rock			
Energy Comp Fluid			
Expansion Energy Total			
Efficiency			
Work Well W			
Work Well O			
Work Well			
Power Well W			

APÊNDICE C

ALGORITMOS PARA CÁLCULO DE PROPRIEDADES PARA PÓS- PROCESSAMENTO

Cálculo dos Potenciais das fases

Os potenciais das fases são as pressões das fases óleo, água e gás corrigidas a uma profundidade de referência, levando em consideração os efeitos gravitacionais. O potencial da fase em uma célula é calculado a uma apropriada pressão da fase utilizando a densidade média da fase (em condições de reservatório) na região de PVT que a célula pertence,

$$\Phi_{oil} = P_{oil} - \rho_{oil} (D - DATUM) \quad (C.1)$$

$$\Phi_{water} = P_{water} - \rho_{water} (D - DATUM) \quad (C.2)$$

$$\Phi_{gas} = P_{gas} - \rho_{gas} (D - DATUM) \quad (C.3)$$

onde as pressões das fases água e gás são definidas pelas equações (2.72) e (2.73), respectivamente.

A profundidade de referência deve ser informada explicitamente no arquivo de entrada do simulador (ver APÊNDICE A). Caso não seja informado, ou o usuário fornece o valor através da aplicação que utilizou na inicialização do modelo, ou será assumido zero.

Cálculo das Transmissibilidades

Quando for necessário o cálculo dos fluxos entre as células da malha e o simulador não dispuser da saída dos mapas de transmissibilidades (caso do simulador IMEX), é necessário calculá-las – ver próxima seção deste apêndice.

Para malhas bloco centradas, podemos calcular a transmissibilidade de uma célula i para uma célula vizinha n utilizando a expressão [62]

$$Tx_i = \frac{CDARCY \cdot Tm_{x_i} \cdot A \cdot DIPC}{B} \quad (C.4)$$

onde,

$$A = \frac{Dx_j \cdot Dy_i \cdot Dz_i \cdot RNTG_i + Dx_i \cdot Dy_j \cdot Dz_j \cdot RNTG_j}{Dx_i + Dx_j} \quad (C.5)$$

$$B = \frac{\left(\frac{Dx_i}{kx_i} + \frac{Dx_j}{kx_j} \right)}{2} \quad (C.6)$$

$$DIPC = \frac{DHS}{DHS + DVS} \quad (C.7)$$

$$DHS = \left(\frac{Dx_i + Dx_j}{2} \right)^2 \quad (C.8)$$

$$DVS = \left(DEPTH_i - DEPTH_j \right)^2 \quad (C.9)$$

Esta modelagem para cálculo de transmissibilidade é restrita apenas a malhas cartesianas, bloco centradas. Para malhas de vértices é necessária a implementação de outra modelagem, apesar de ser possível utilizar esta como uma aproximação, calculando as dimensões da célula em cada direção a partir das médias dos vértices das faces.

Para uma malha de vértices, a seguinte equação deve ser utilizada [62],

$$TRANX = \frac{CDARCY \cdot TMLTX_i}{\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_j}} \quad (C.10)$$

Onde,

$$T_i = PERMX \cdot RNTG_i \cdot \frac{A \cdot D_i}{D_i \cdot D_i}$$

Com,

$$(A \cdot D_i) = A_X \cdot D_{iX} + A_Y \cdot D_{iY} + A_Z \cdot D_{iZ}$$

e

$$(D_i \cdot D_i) = D_{iX}^2 + D_{iY}^2 + D_{iZ}^2.$$

A_X, A_Y e A_Z são as projeções da área da interface mútua das células i e j (que não precisam ser vizinhas na indexação cartesiana) e D_{iX}, D_{iY} e D_{iZ} são as componentes da distância entre o centro da célula i e o centro da face relevante da célula i , sendo os centros obtidos com a média apropriada.

As transmissibilidades nas direções Y e Z são similares, mas a razão *net-to-gross* não está presente para a expressão em Z. Para maiores detalhes sobre cálculo de transmissibilidades nos simuladores de reservatórios consultar, por exemplo, ROMEU *et al.* [53].

Cálculo dos Fluxos

Para os simuladores que não dispõem da saída dos fluxos das fases, é necessário calculá-los.

Os fluxos de cada fase são função das mobilidades das fases, λ , e da transmissibilidade, T , e da diferença de pontencial, dP , entre as célula i e sua vizinha n . A equação para o cálculo do fluxo em um esquema CVFD é SCHLUMBERGER [62]

$$F_{ni} = T_{ni} \cdot \lambda \times dP \quad (C.11)$$

$$F_{ni} = T_{ni} \cdot \begin{bmatrix} \frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} & 0 & \frac{R_v k_{rg}}{B_g \mu_g} \\ 0 & \frac{k_{rw}}{B_w \mu_w} & 0 \\ \frac{R_s k_{ro}}{B_o \mu_o} & 0 & \frac{k_{rg}}{B_g \mu_g} \end{bmatrix}_u \times \begin{bmatrix} dP_{oni} \\ dP_{wni} \\ dP_{gni} \end{bmatrix} \quad (C.12)$$

onde,

$$dP_{oni} = P_{on} - P_{oi} - \rho_{oni} G(D_n - D_i) \quad (C.13)$$

$$\begin{aligned} dP_{wni} &= P_{wn} - P_{wi} - \rho_{wni} G(D_n - D_i) \\ &= P_{on} - P_{oi} - \rho_{wni} G(D_n - D_i) - P_{cown} + P_{cowi} \end{aligned} \quad (C.14)$$

$$\begin{aligned} dP_{gni} &= P_{gn} - P_{gi} - \rho_{gni} G(D_n - D_i) \\ &= P_{on} - P_{oi} - \rho_{gni} G(D_n - D_i) + P_{cogn} - P_{cogi} \end{aligned} \quad (C.15)$$

O sub-índice u indica que as mobilidades devem ser calculadas na célula à montante (*upstream*) (célula n se dP_{ni} for positivo, célula i se dP_{ni} for negativo). O cálculo à montante se aplica separadamente a cada equação (óleo, água, gás). Desta forma, as permeabilidades relativas, fatores de volume de formação e viscosidades devem ser avaliadas à montante.

Cálculo do Fator Volume de Formação da Água

O fator volume de formação da fase água, B_w , é calculado de acordo com a fórmula [4]

$$B_w = B_{wi} \cdot (1.0 - C_w \cdot (P - P_{ref_w})) \quad (C.16)$$

Cálculo da Porosidade Efetiva

O efeito da pressão sobre a porosidade é calculado utilizando a equação (2.80)

$$\varphi \approx \varphi_{ref} \left[1 + c_\varphi (p - p_{ref}) \right]$$

onde φ_{ref} é a porosidade medida à pressão de referência p_{ref} e c_φ é a compressibilidade de rocha, para cada região de PVT definida no modelo de simulação.

Influxo de água proveniente de aquíferos

Nos simuladores de fluxo, um dos critérios de avaliação da convergência da solução do sistema durante as iterações não-lineares é baseado no resíduo do balanço de materiais (ou conservação de massa).

Simplificando a notação da equação (3.4) para torná-la mais compacta, temos

$$\frac{\partial M}{\partial t} + F + Q = R \quad (C.17)$$

onde dM é a massa acumulada durante o passo de tempo dt , F é o fluxo líquido para as células vizinhas e Q o fluxo líquido nos poços no passo de tempo. A solução do sistema formado pelas equações do escoamento multifásico escritas para cada fase do modelo é tal que $R \rightarrow 0$ ao longo das iterações não-lineares. Na verdade, o método de solução do sistema não-linear tem como objetivo reduzir o resíduo a uma tolerância especificada.

No cálculo deste balanço de massa nas células de fronteira que estão em contato com aquíferos analíticos, identificadas pelo mapa de índices²⁵ diferente de zero, o resíduo não é reduzido à tolerância especificada. Podemos escrever esse “erro de balanço” como

$$\frac{\partial M}{\partial t} + F + Q = (F_{aq} \pm R)$$

$$F_{aq} = \frac{\partial M}{\partial t} + F + Q \pm R. \quad (C.18)$$

²⁵ Os mapas de índices que identificam as células em contato com aquíferos são mencionados no APÊNDICE A.

Ou seja, como o fluxo na fronteira do reservatório proveniente de um aquífero quando este é tratado por um modelo analítico é calculado separadamente das variáveis primárias do problema, é possível calculá-lo através do “desbalanço” de massa da fase água, ainda que este fluxo sofra do mesmo erro que o erro do balanço de materiais para esta fase na célula e no passo de tempo em questão.

Cálculo da pressão atuante na fronteira

É possível obter a pressão na fronteira, ou interface da célula, do mesmo modo que são calculadas as transmissibilidades discretas na interface.

Não há uma forma única de se calcular a transmissibilidade na face das células. De uma forma geral, ela pode ser escolhida de tal forma que a taxa de fluxo (acúmulo e influxo na célula) seja a mais acurada possível, levando em consideração os diferentes arranjos das heterogeneidades do modelo. O caso que será aqui tratado é o de descontinuidade vertical, como ilustrado na Figura A.1.

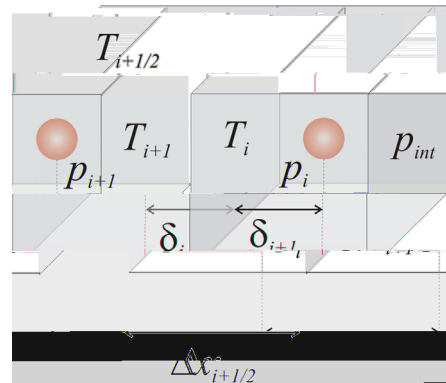


Figura A.1 – Interpolação da transmissibilidade – descontinuidade vertical.

Supondo que a transmissibilidade é constante por partes com a interface entre a célula i e $i+1$ (não necessariamente na fronteira da célula), o fluxo entre essas células é dado por

$$-q = A \frac{(p_{\text{int}} - p_i)}{\delta_i} T_i = A \frac{(p_{i+1} - p_{\text{int}})}{\delta_{i+1}} T_{i+1} \quad (\text{C.19})$$

onde p_{int} é a pressão na fronteira da célula. Uma transmissibilidade média $T_{i+1/2}$ deve ser tal que o fluxo entre as células em questão seja o mesmo

$$-q = A \frac{(p_{i+1} - p_i)}{\Delta x_{i+1/2}} T_{i+1/2} \quad (\text{C.20})$$

Igualando as equações (C.19) e (C.20) e resolvendo para p_{int} , temos

$$A \frac{(p_{i+1} - p_{\text{int}})}{\delta_{i+1}} T_{i+1} = A \frac{(p_{i+1} - p_i)}{\Delta x_{i+1/2}} T_{i+1/2}$$

$$p_{\text{int}} = p_{i+1} - \frac{(p_{i+1} - p_i) \delta_{i+1} T_{i+1/2}}{\Delta x_{i+1/2} T_{i+1}} \quad (\text{C.21})$$

onde a transmissibilidade da célula $i+1$ (T_{i+1}) é dada pela componente na direção de interesse do tensor transmissibilidade, representado pela equação (2.71).

A forma como foi deduzida a expressão para o cálculo da pressão na interface leva em consideração um escoamento entre blocos com descontinuidade vertical, o que resulta em uma transmissibilidade na interface calculada por uma média harmônica. Ainda que seja a opção mais utilizada (inclusive é uma das opções de cálculo de transmissibilidades em simuladores de fluxo comerciais), trata-se de uma aproximação, que representa a solução exata para o padrão de escoamento tratado. Outras opções de cálculo, no futuro, devem ser consideradas.

APÊNDICE D

CLASSES-BASE DO MÓDULO DE

PÓS-PROCESSAMENTO

Classe pré-processor

```

class ISimuladorPreProcessor
{
// Definições de tipos
public:
    typedef boost::shared_ptr<IAgoritmo> TAlgoritmo;
    typedef std::vector<TAlgoritmo> TPreProcessandoAlgoritmos;
// Construtor a
public:
    ISimuladorPreProcessor(
        // Sistema de unidades da simulação
        const TSimuladorUnidadeSistema &p_SimuladorUnidadeSistema
        // Dicionário de propriedades
        const TMapDicionario &p_MapsAssoc,
        // Fases presentes na simulação
        const TPhases &p_Phases ) :
        m_SimuladorUnidadeSistema( p_SimuladorUnidadeSistema ),
        m_MapsAssoc( p_MapsAssoc ),
        m_Phases( p_Phases ) {}
    ~ISimuladorPreProcessor( ) {}
// Métodos
public:
    void DoPreProcessando(
        TGridPTR p_GridPtr,
        TGridAssemblyPTR p_GridAssembly );
    void AttachAlgoritmo( TAlgoritmo p_Algoritmo );
// Atributos
private:
    const TSimuladorUnidadeSistema &m_SimuladorUnidadeSistema
    const TMapDicionario &m_MapsAssoc;
    const TPhases &m_Phases;
    TPreProcessandoAlgoritmos m_Algoritmos;
};

```

Classe base para funtores

```

class TFuncor
{
// Construtor a
public:
    TFuncor( // Geometria da malha
              const shared_ptr<TGeometry> &_geo,
              // Sistema de unidades
              const TSimulationUnitSystem &p_UnitSystem
              // Lista de GridFunctions necessárias ao cálculo
              (...)
              ) :
              geo( _geo )
    {
        UnitConversion( p_UnitSystem );
    }

// Metodos
protected:
    void UnitConversion( const TSimulationUnitSystem &p_UnitSystem );

public:
    // Cálculo de propriedades nodais
    template<class Cell>
    double Calculate( const Cell &cell ) const;
    // Cálculo de propriedades inter nodais
    virtual double Calculate( const TCellIndex &idxn,
                              const TCellIndex &idxi ) const;

// Operadores
public:
    // Conectividades naturais
    template<class Cell>
    double operator()( const Cell &cell ) const;
    // NNCs internas
    void operator()(
        const IAdditionalConnectivities::TInternalConnection &NNC )
        const;
    // Conectividades externas
    void operator()(
        const IAdditionalConnectivities::TExternalConnection &NNC )
        const;
    void operator()(
        const IAdditionalConnectivities::TDualConnection &NNC )
        const;

// Atributos
private:
    // Geometria da malha
    const shared_ptr<TGeometry> &geo;
    // NNC
    mutable reservoir::TGrid::TNNCFunction::iterator NNCIter;
    // Gridfunctions armazenadas para cálculo
    (...)
};

```

Classe-base para modelos de pós-processamento

```

class I Si mul at i onPosPr ocessor
{
public:
// Construtor & destrutor
I Si mul at i onPosPr ocessor (
    const T Si mul at i onUni t Syst em &p_ Si mul at i onUni t Syst em,
    const T MapDi ct i onary &p_ MapsAssoc,
    const T BFact or Li st &p_ PVTBs,
    const T RockLi st &p_ RockTabl e,
    const T Si mul at i onPhases &p_ Phases,
    const T Si mul at or Tags &p_ Si mul at or Tag );

~I Si mul at i onPosPr ocessor () {}
// Metodos
public:
virtual void PosPr ocessi ng(
    TGri dDat aPTR p_ Gri dDat a,
    TWel l Dat aPTR p_ Wel l Dat a,
    const TFI oat Type &p_ Dt );

virtual void Initiali ze( TGri dAssembl ePTR p_ Assembl ePTR0 );

protected:
virtual void DoPosPr ocessi ng( TGri dAssembl ePTR p_ Cur Assembl ePTR,
    TGri dPTR p_ Cur Gri dPTR,
    TGri dPTR p_ PrevGri dPTR,
    TWel l Dat aPTR p_ Wel l Dat a,
    const TFI oat Type &p_ Dt ) = 0;

virtual void Creat ePr ePr ocessor (
    const T Si mul at or Tags &p_ Si mul at or Tag ) = 0;

virtual void DoIni ti ali ze( TGri dPTR p_ Gri dPTR0 ) = 0;

protected:
T Si mul at i onUni t Syst em m_ Si mul at i onUni t Syst em;
T MapDi ct i onary m_ MapsAssoc;
T Phases *m_ Phases;
T BFact or Li st m_ PVTBs;
T RockLi st m_ RockTabl e;
T Si mul at or Tags m_ Si mul at or Tag;
I Si mul at or Pr ePr ocessor *m_ Pr ePr ocessor ;
};

```


Classe-base para algoritmos

```

class IAlgorithm
{
// Construtora & Destrutora
public:
    IAlgorithm( const TMapDictionary &p_MapsAssoc ):
        m_MapsAssoc( p_MapsAssoc ) {}
    ~IAlgorithm() {}

// Metodos
public:
    virtual void Calculate( TGridPTR p_GridPTR,
                           TGridAssemblyPTR p_GridAssembly ) = 0;

// Atributos
protected:
    const TMapDictionary &m_MapsAssoc;
};

```

APÊNDICE E

ACOPLAMENTO DE MODELOS A SIMULADORES DE FLUXO

Há diferentes abordagens para se acoplar um modelo acessório ao modelo de fluxo.²⁶ É possível classificá-los segundo o nível de interferência que esse modelo exerce nos resultados do simulador e qual o nível de acoplamento entre o modelo e o simulador. O fluxograma do funcionamento básico de um simulador de reservatório foi ilustrado na Seção 2.4.2, Figura 2.4. Diferentes alterações no fluxograma básico devem ser executadas de acordo com o nível de acoplamento que determinado modelo exige.

Acoplamentos Internos

Abordagem Totalmente Acoplada (Fully Coupled Approach)

Esta é a forma de acoplamento mais estreita, já que as variáveis primárias do simulador de fluxo e as variáveis do modelo são resolvidas simultaneamente. O fluxograma do simulador de fluxo com um modelo acoplado implicitamente é ilustrado na Figura A.2.

Este tipo de modelo, idealmente, deve ser implementado concomitantemente à própria construção do simulador, visando a um desenvolvimento ótimo do sistema. Caso já exista o simulador, a decisão posterior de acoplar algum modelo a este, requer a elaboração de mudanças íntimas no código que normalmente requer um grande esforço. Algumas vezes nem mesmo é possível realizar tais modificações, devido, por exemplo, à inacessibilidade ao código fonte do simulador, quando se trata, por exemplo, de simuladores comerciais ou por causa da enorme dificuldade de extensão e manutenção do código fonte.

Esse tipo de abordagem só faz sentido quando o modelo acoplado altera os resultados do modelo de fluxo. Podemos citar como exemplo o acoplamento geomecânico na forma implícita. Se implementado desta forma, as deformações são calculadas em

²⁶ Não serão tratadas neste trabalho questões acerca da acurácia ou convergência de cada abordagem, uma vez que o objetivo é apenas apresentar as abordagens e discuti-las no âmbito de suas aplicações em função do modelo a ser utilizado.

conjunto às pressões e saturações, que são função, dentre outros parâmetros, da porosidade e permeabilidade, que por sua vez são influenciados pelas deformações. No modelo totalmente implícito todas essas iterações são resolvidas simultaneamente [69].

Uma desvantagem dessa abordagem é o aumento do custo computacional referente à simulação, já que aumenta o número de variáveis primárias a serem solucionadas.

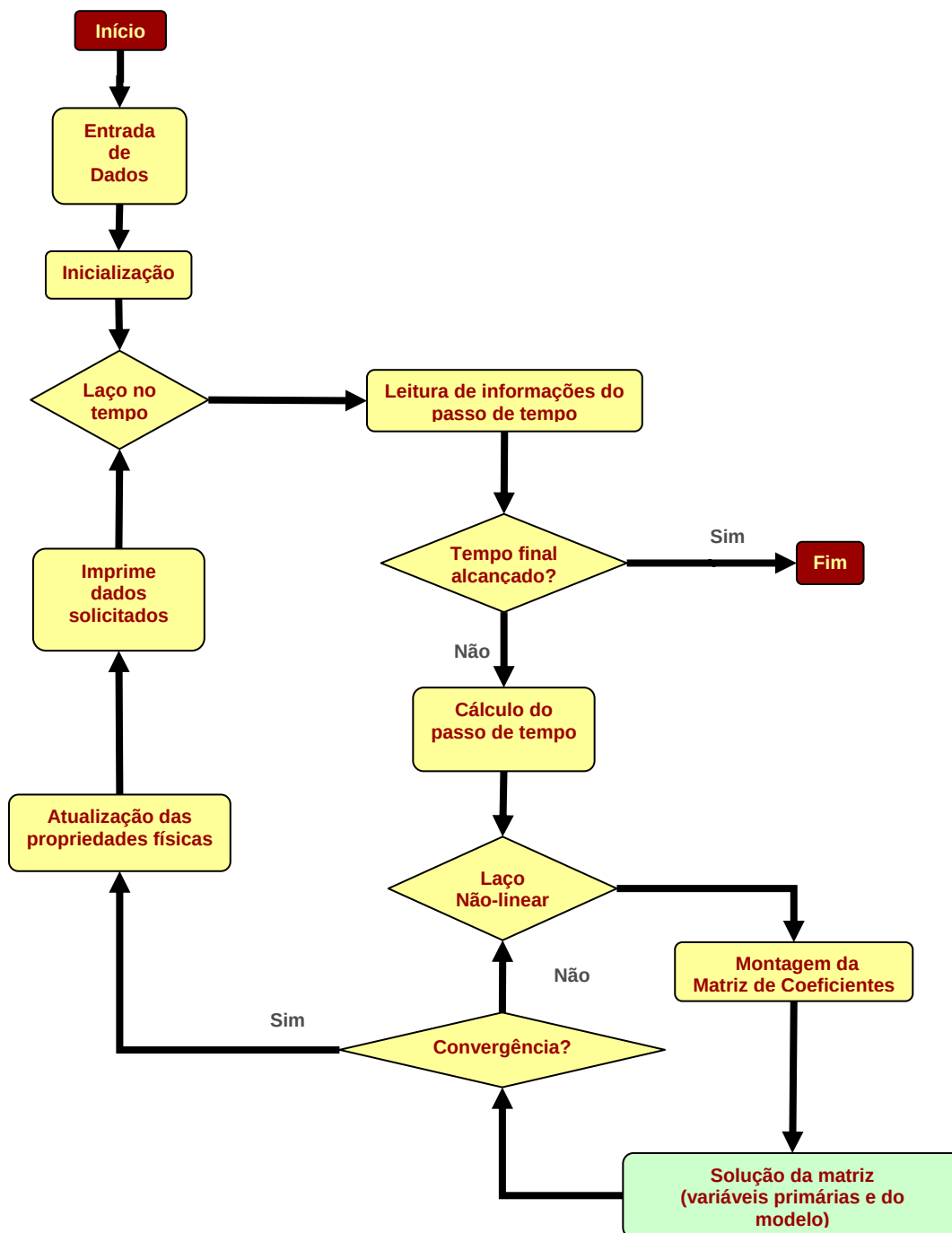


Figura A.2 – Fluxograma do simulador de fluxo com modelo totalmente acoplado.

Abordagem Iterativamente Acoplada (Iterative Coupled Approach)

Neste método, o acoplamento é menos estreito do que o método anterior, já que os cálculos do modelo acessório não são realizados ao mesmo tempo em que os cálculos do escoamento no reservatório são resolvidos, mas sim de forma sequencial. Deste modo, o escoamento no reservatório é afetado pelas respostas do modelo acessório.

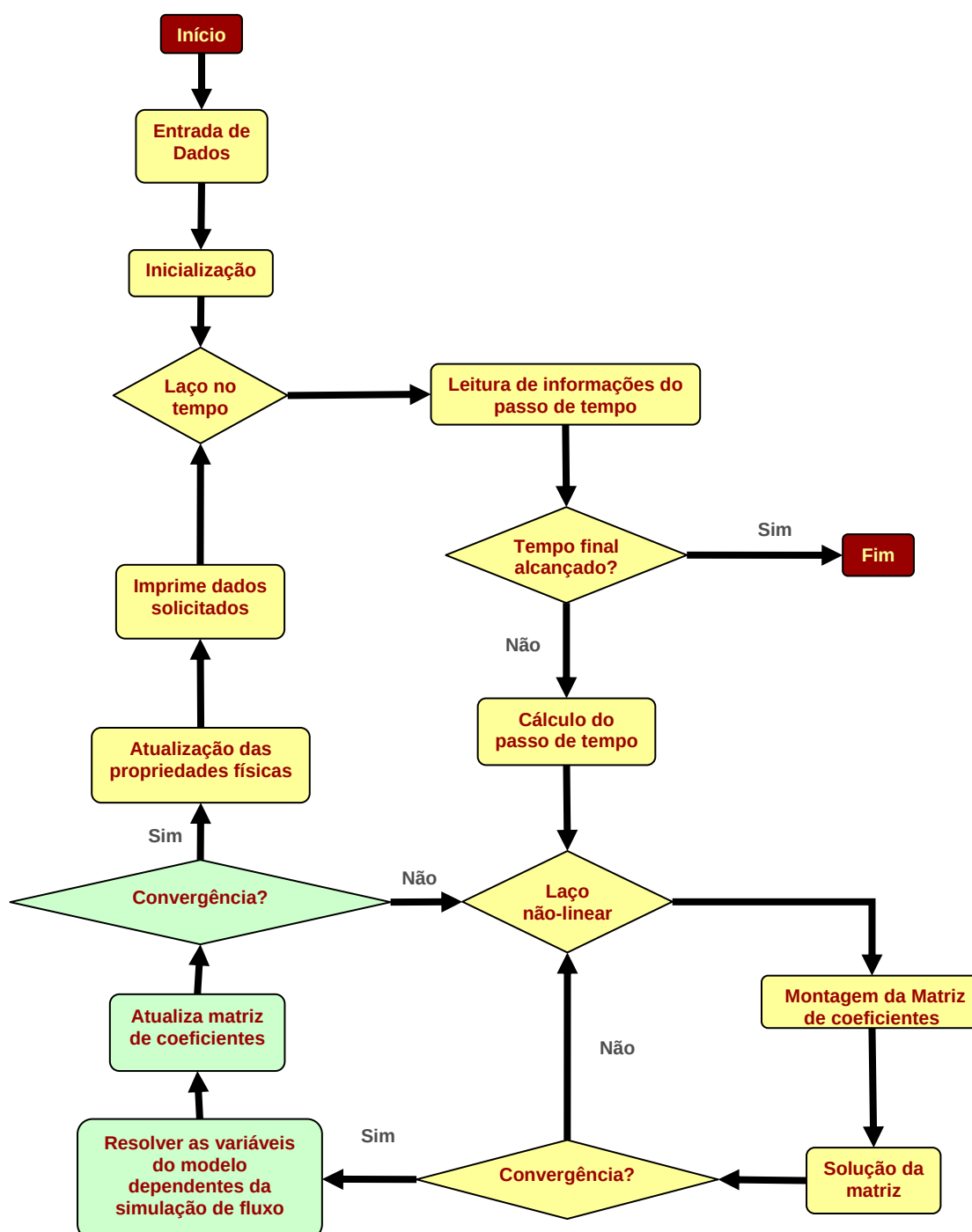


Figura A.3 - Fluxograma do simulador de fluxo com um modelo acoplado iterativamente.

Neste tipo de acoplamento, as variáveis de fluxo e as variáveis do modelo acessório são resolvidas separadamente e sequencialmente por um simulador de reservatórios a um módulo geomecânico, respectivamente, e o acoplamento dos termos são iterados a cada passo de tempo. A iteração de acoplamento é controlada por um algum critério de convergência.

TRAN e SETTARI [69] apresentam a utilização dessa abordagem aplicada a um modelo geomecânico e destacam a flexibilidade como uma de suas vantagens. Pouca modificação no código do simulador de reservatórios deve ser feita para o acoplamento do modelo.

Abordagem Explicitamente Acoplada (Explicitly Coupled Approach)

Esta abordagem pode ser considerada como um caso especial da abordagem iterativamente acoplada. A informação do simulador de fluxo é enviada para o módulo do modelo, mas os cálculos realizados no módulo não alimentam de volta o simulador de reservatórios. Neste caso o escoamento no reservatório não é afetado pelas respostas calculadas pelo modelo. Porém, as mudanças nas variáveis do escoamento do reservatório afetarão as variáveis do modelo.

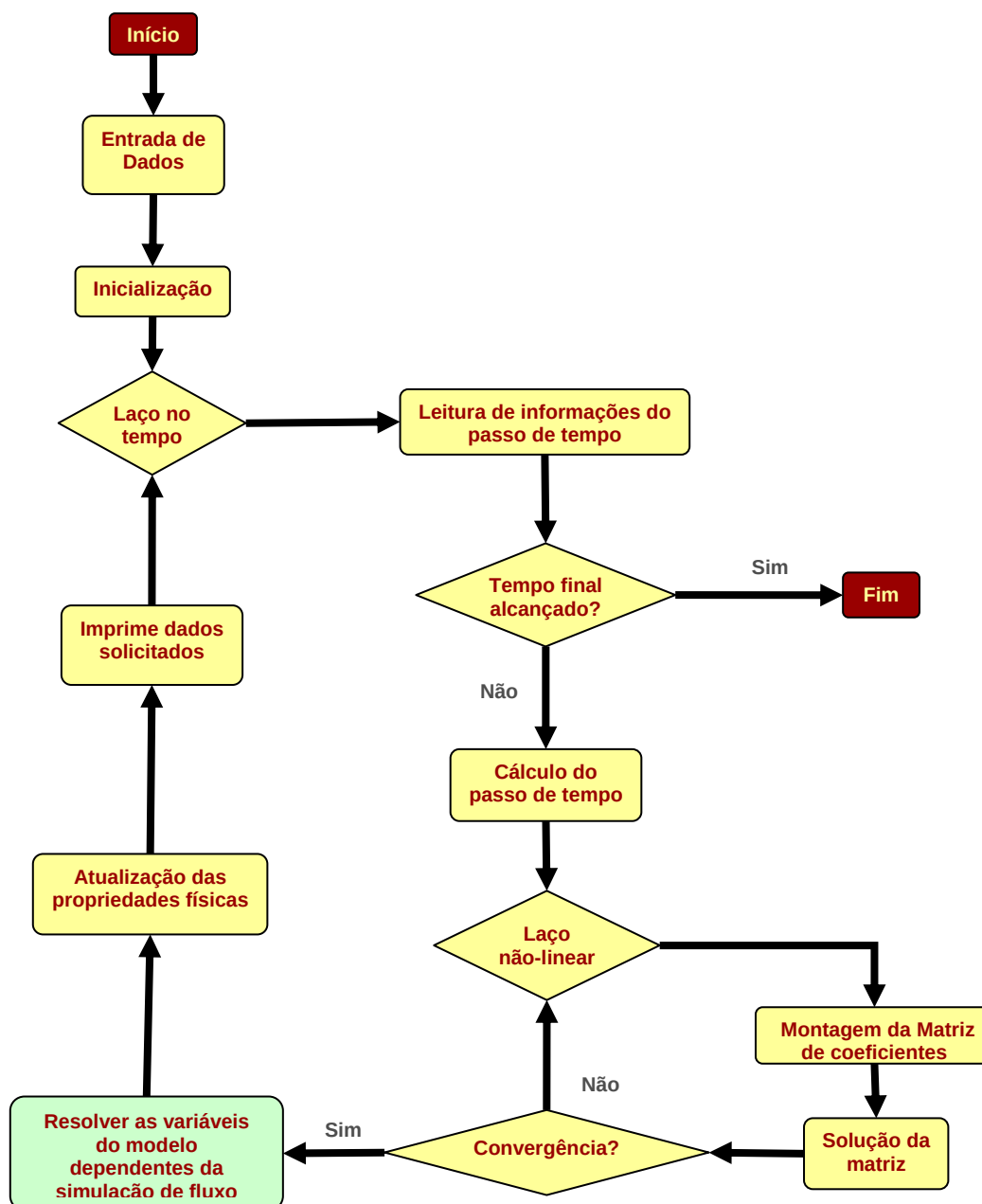


Figura A.4 – Fluxograma do simulador de fluxo com modelo acoplado explicitamente.

Acoplamentos Externos

A menos da abordagem totalmente acoplada, todas as outras abordagens discutidas anteriormente podem ser implementadas externamente ao simulador de fluxo. O acoplamento externo tem como principal vantagem implicar pouca ou nenhuma alteração no simulador de fluxo, desde que o simulador forneça a saída das propriedades necessárias para os cálculos realizados pelo modelo, ou que ele forneça uma interface (*API*) para o acesso a esses dados internamente.

A versão externa do acoplamento explícito pode ser realizada como ilustrado na Figura A.5. Após a convergência da simulação de fluxo, as variáveis solucionadas, bem como outras propriedades intermediárias (a depender da necessidade do modelo acessório) são passadas ao módulo que irá calcular o modelo acoplado. Este por sua vez, retorna as propriedades calculadas para que o simulador de fluxo atualize a propriedades pertinentes.

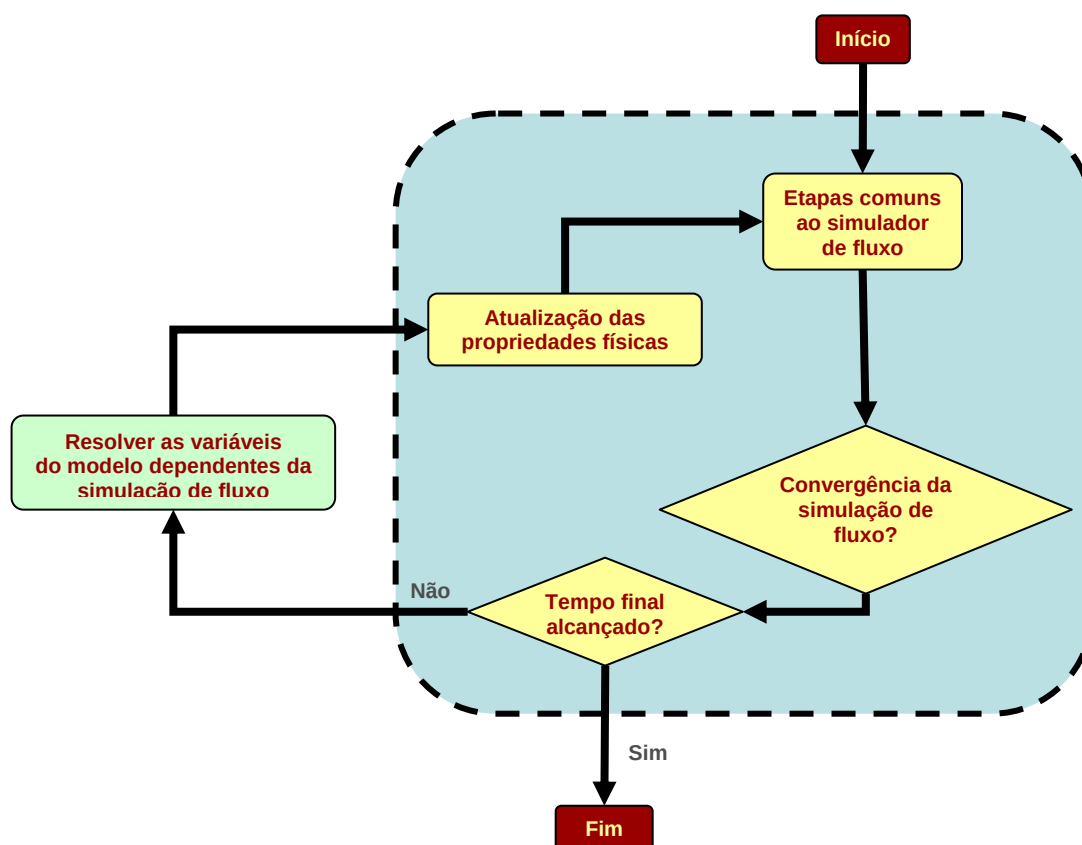


Figura A.5 – Fluxograma do acoplamento de modelo externamente ao simulador de fluxo.

O único conhecimento exigido sobre o simulador é o modo como ele grava os resultados nos arquivos de saída, no caso do nível de integração ser por compartilhamento de dados através de arquivos. Porém, qualquer outro nível de integração descrito na seção 4.2 pode ser aplicado.

A versão externa do acoplamento iterativo pode ser realizada de duas formas distintas. A primeira, ilustrada pela Figura A.6, também trata o simulador como uma caixa preta. O *software* externo que realiza o acoplamento deve apenas saber como ler o arquivo de

resultados do simulador e como escrever os resultados dos cálculos no formato de entrada do simulador, a fim de atualizar o modelo.

Após o término da simulação de fluxo, o *software* que realiza o acoplamento lê os arquivos de saída, extrai as informações necessárias ao cálculo, processa o modelo de pós-processamento e escreve os arquivos de entrada com as devidas modificações das propriedades calculadas, reiniciando o simulador no passo de tempo em questão. É de responsabilidade do *software* de terceiro realizar a verificação de convergência.

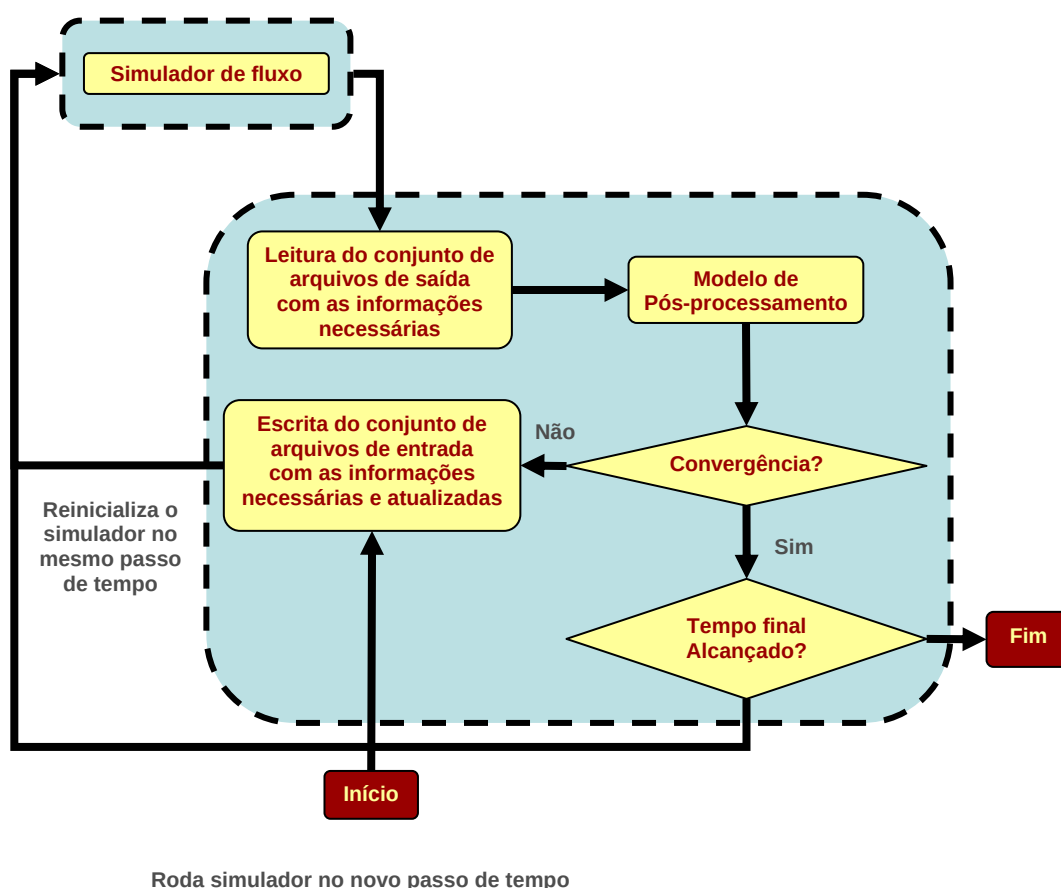


Figura A.6 – Acoplamento iterativo externo através da atualização do modelo e da reinicialização da simulação.

Uma simplificação do fluxograma dessa abordagem pode ser feita se o modelo não necessitar de iterar para atualizar a simulação de fluxo. Uma vez processado, as informações seriam utilizadas diretamente na reinicialização da simulação em um novo passo de tempo.

Uma segunda maneira de realizar o acoplamento iterativo é através da utilização de uma API de comunicação fornecida pelo simulador de fluxo. Esta API deve conter funções que disponibilizem o acesso e modificação de dados internos do simulador.

Figura A.7 - Fluxograma para acoplamento (abordagem iterativa) externamente ao simulador de fluxo através da API.

Esse fluxograma é análogo ao representado pela Figura A.3, a não ser por duas diferenças:

- o modelo acessório é calculado por um *software* a parte
- a interface entre o simulador de fluxo e o software externo é realizado por uma chamada externa quando a simulação do passo de tempo converge e o software externo atualiza as propriedades através do protocolo de comunicação.

O simulador IMEX fornece um protocolo de comunicação através de arquivos texto que permite o acoplamento com outras ferramentas. Esse desenvolvimento foi realizado para o acoplamento com o GAP [45], um software de otimização que modela as facilidades de superfície de sistemas de produção. Esse protocolo de comunicação permite que, em tempo de execução do simulador, variáveis de operação de poços sejam alteradas, como vazões e pressões. Seu fluxograma de funcionamento é equivalente ao ilustrador na Figura A.7, a não ser pelo fato que o processo de acoplamento realiza primeiro o passo de tempo do GAP e depois, para o mesmo passo de tempo, calcula o fluxo com o IMEX. Este é um exemplo de *steering*, abordagem apresentada na seção 2.4.4 no sentido restrito de visualização.

APÊNDICE F

SISTEMAS DE DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO, MALHAS COMPUTACIONAIS E A BIBLIOTECA PETROLIB

O sistema de malha tem uma relação direta com o método de discretização selecionado para a solução das equações do problema. Há dois tipos de sistemas de malhas comumente empregadas na simulação de reservatórios: malhas bloco centradas e distribuídas em pontos (ou corner-point ou malha de vértices).

Em geral, um ponto em um sistema de malhas pode ser definido como:

$$p_{ijk} = p(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,k}) \quad (\text{F.1})$$

onde $x_{1,i}$, $x_{2,j}$ e $x_{3,k}$ são as i – ésima, j – ésima e k – ésima coordenadas do ponto nas direções 1, 2 e 3, respectivamente. Em malhas bloco centradas, o ponto p_{ijk} se localiza no centro do hexaedro (i, j, k) . Em malhas de vértices, o ponto p_{ijk} se localiza nos vértices do hexaedro.

Esses dois sistemas de malhas fornecem diferentes níveis de flexibilidade para a discretização de um domínio. Em função destas diferenças, uma classificação das malhas foi definida [54], baseada em sua regularidade, além da classificação formal, estruturada e não-estruturada. Neste sentido, são identificados 7 tipos de malhas estruturadas:

- Tipo 1: bloco centrada, Cartesiana, espaçamento uniforme (Figura A.8 (a));
- Tipo 2: bloco centrada, Cartesiana, espaçamento não uniforme (Figura A.8 (b));
- Tipo 3: bloco centrada, conformada na direção k (profundidades de espessuras variáveis (Figura A.8 (c)));

- Tipo 4: vértices, coordelinhas²⁷ verticais, ortogonal no plano IJ (Figura A.8 (d));
- Tipo 5: vértices, coordelinhas verticais, não ortogonal no plano IJ (Figura A.8 (e));
- Tipo 6: vértices, coordelinhas inclinadas (Figura A.8 (f));
- Tipo 7: vértices, coordelinhas curvadas (Figura A.8 (g)).

²⁷ Coordenadas que defines as arestas das células.

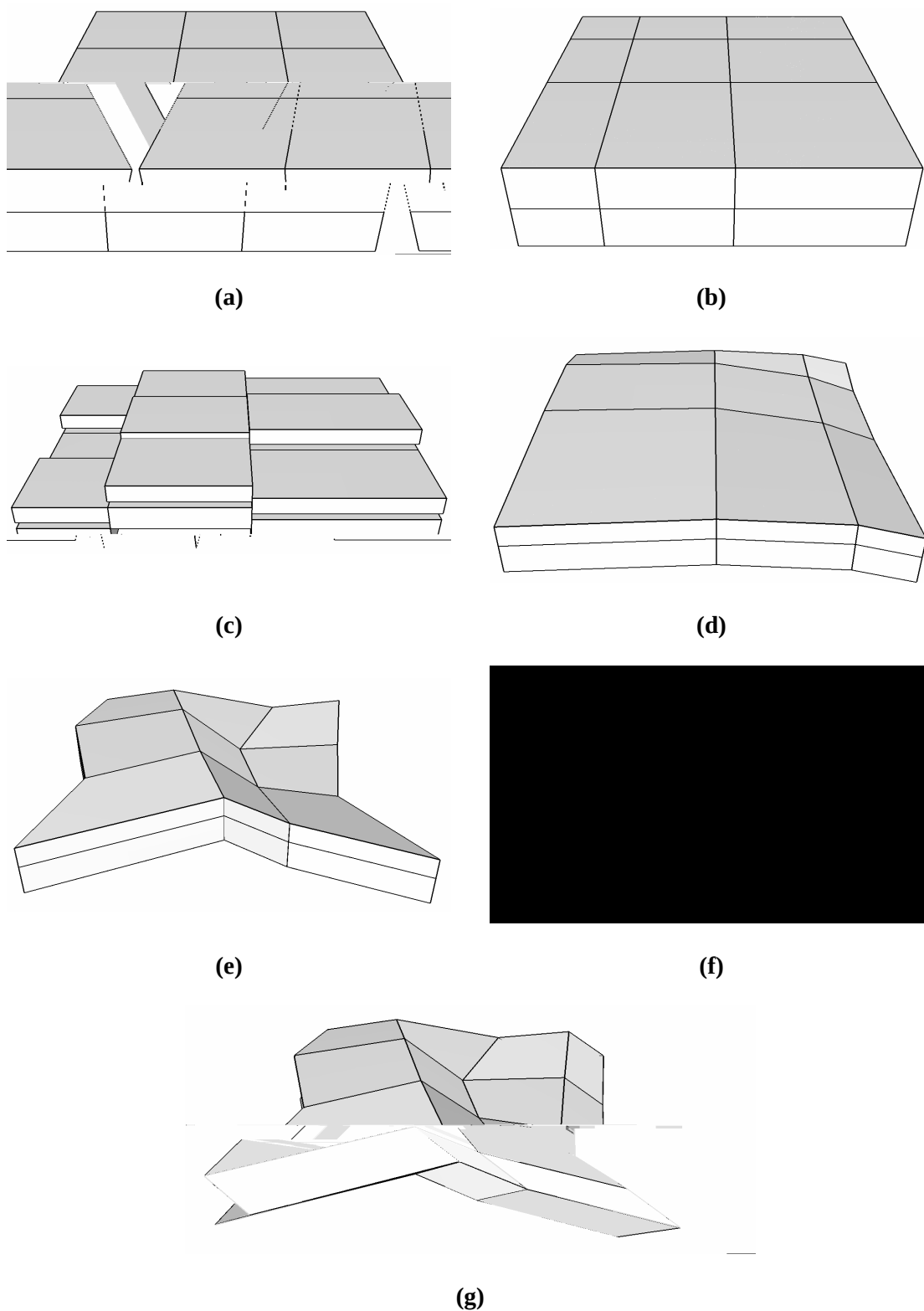


Figura A.8 – Os sete tipos de malha utilizadas na discretização espacial na simulação de fluxo de reservatórios.

Apesar de serem utilizadas ambas as representações para definição da geometria da malha, as propriedades são não são representadas nos vértices nas malhas, a convenção adotada segue a regra da Tabela 2.1 (seção 2.4.2).

Tratamento de células não-vizinhas topologicamente e células inativas

Repetidas vezes são encontradas nas malhas de simulação conectividades entre células que não são vizinhas topologicamente, ou seja, células que não respeitam a regra de vizinhança topológica implícita característica de malhas estruturadas (seção 2.4.2). Essas conexões adicionais são chamadas de *non-neighbour connections* (ou simplesmente NNC).

Esse recurso é usado, principalmente, para representar certas discontinuidades geológicas, como a presença de *pinch-outs* e falhas (Figura A.9).

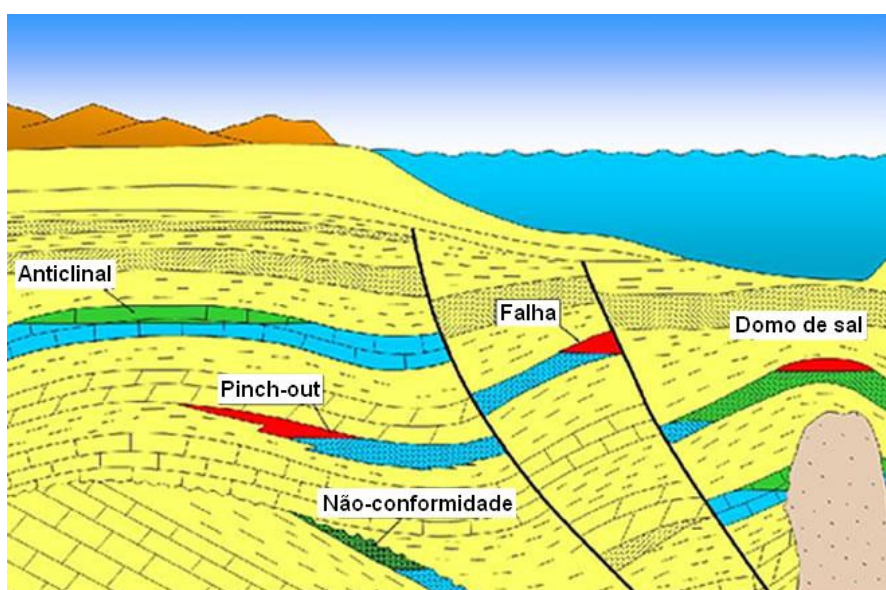


Figura A.9 – Estruturas típicas de reservatórios de petróleo (© ExxonMobil).

Um *pinch-out* pode ser uma armadilha estratigráfica, uma delimitação por afinamento do reservatório contra uma rocha selante não porosa, ou simplesmente um desaparecimento de determinada zona geológica em função do afinamento desta, interligando as outras zonas imediatamente adjacentes a ela. A representação computacional deste tipo de estrutura geológica é mostrada na Figura A.10.

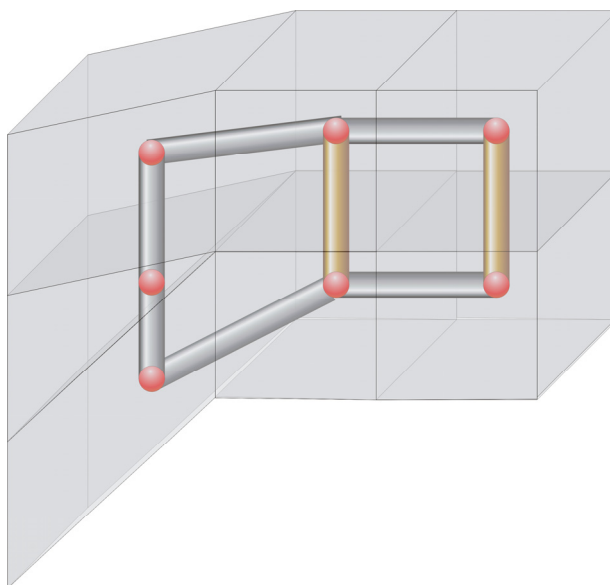


Figura A.10 – Conectividades adicionais criadas em função de *pinch-outs*.

Falhas geológicas, ou simplesmente falhas, são superfícies num volume de rocha onde se observa deslocamento relativo dos blocos paralelos à fratura. Este acidente geológico também pode comunicar zonas geológicas distintas. Uma representação, em um esquema simplificado, das conectividades adicionais geradas em função de uma falha é ilustrada na Figura A.12.

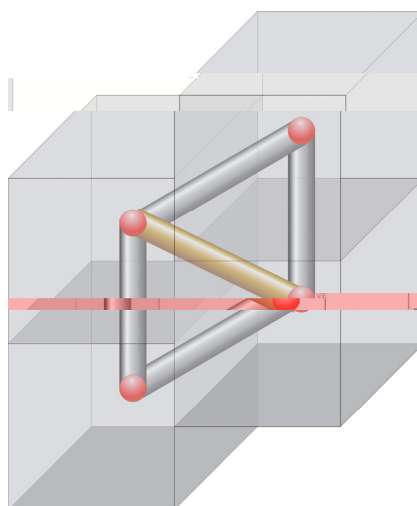


Figura A.11 – Conectividade adicional gerada em função de uma falha geológica.

A presença de NNCs também pode ser devida à utilização de refinamentos locais (*local grid refinements*, ou simplesmente LGR, Figura A.12), recurso utilizado principalmente nas células que comportam completações de poço, a fim de obter mais acurácia da solução nestas regiões.

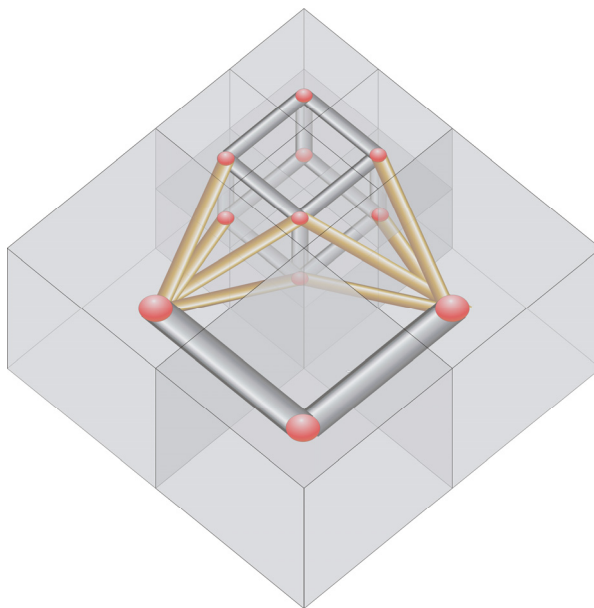
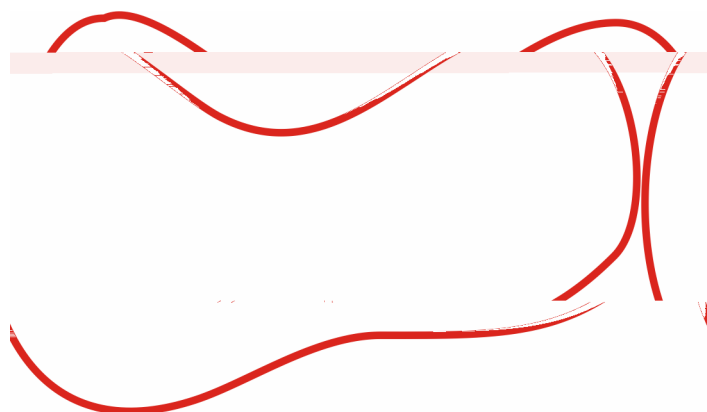
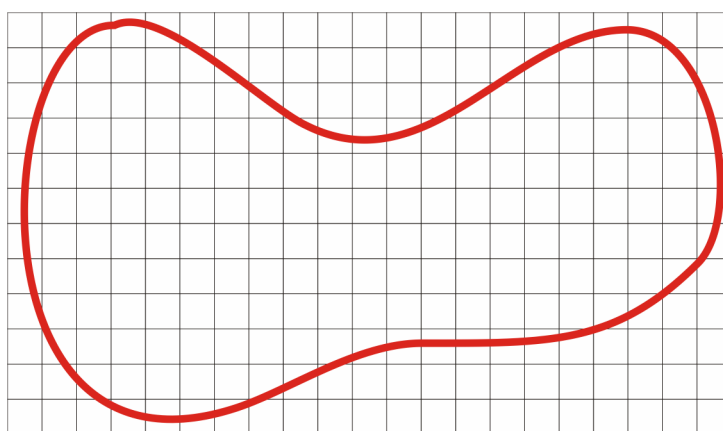


Figura A.12 – Conectividades adicionais associadas à utilização de refinamento local de malha.

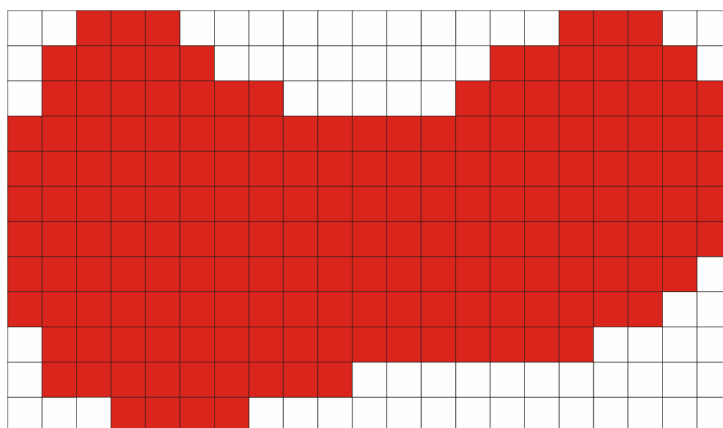
Outra característica de malhas de reservatório atribuída à sua natureza estruturada é a utilização de células inativas. Para que seja possível criar uma malha que acompanhe a fronteira real do reservatório respeitando o caráter cartesiano da malha, esta é criada com número de células nas três direções suficiente para compreender toda a fronteira do campo. Um mapa de 0's e 1's é atribuído à malha, de forma que apenas as suas células que coincidem com o domínio do reservatório são atribuídas o valor 1 e as outras células o valor 0. A Figura A.13 ilustra esse conceito. As células inativadas não participam do processo da solução numérica do fluxo.



(a)



(b)



(c)

Figura A.13 – Ilustração do conceito de célula inativa.

Modelo de representação de malhas computacionais

Berti [6], propõe uma estratégia para desacoplar algoritmos que trabalham sobre malhas dos detalhes de representações da malha, utilizando uma abordagem de programação genérica em C++.

Funcionalidades da estrutura de dados da malha são capturados por um pequeno conjunto de primitivas, divididos em combinatórias e geométricas. A malha é representada por uma estrutura combinatória, as relações de incidência entre seus elementos (vértices, arestas e células). Esta relação é refletida em uma treliça que é, a grosso modo, o grafo de incidências (Figura A.14).

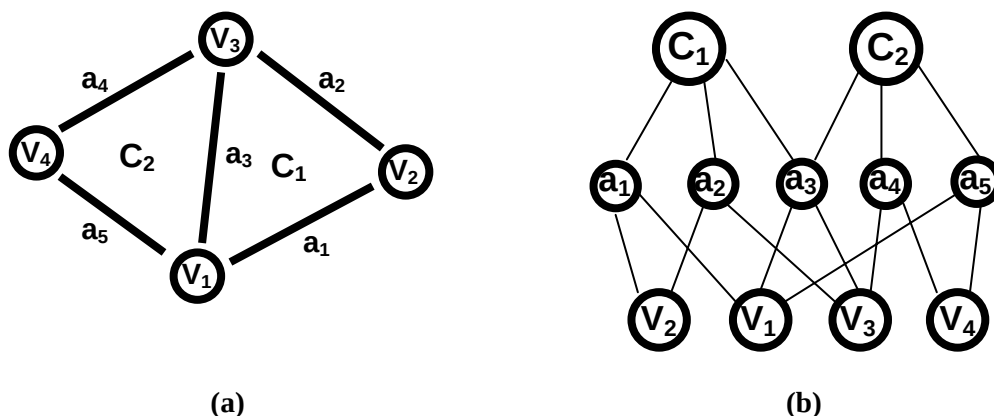


Figura A.14 – Estrutura combinatória de representação de malha. Células (“C”), arestas (“a”) e vértices (“V”) de uma malha (a) e o correspondente grafo de incidências (b) (Gurtin [6]).

Uma malha G de dimensão d consiste de elementos de dimensão 0 (vértices – G_0), dimensão 1 (arestas – G_1), até dimensão d (células – G_d). As informações geométricas de onde a malha está disposta no espaço são representadas simplesmente atribuindo coordenadas espaciais aos vértices.

A representação de dados da malha é dada por uma função no conjunto discreto de elementos de malha que fornece armazenamento e acesso à um tipo arbitrário T associado aos elementos da malha. O correspondente à essa noção matemática são as funções da malha (tratadas nesse trabalho como *gridfunction*), extremamente importantes para quase todos algoritmos nas malhas. Esses algoritmos requerem

funcionalidades modestas da estrutura de dados da malha, que podem ser capturado por um conjunto pequeno de conceitos. Essas funcionalidades são resumidas na Figura A.15.

- **Funcionalidade combinatória**

↳

Figura A.15 – Requisitos de algoritmos de malha.

APÊNDICE G

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS SIMULADORES PARA APLICAÇÃO NO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE VAZÕES

A representação de um mesmo modelo em simuladores de fluxo distintos requer atenção. Ainda que se baseiem no mesmo modelo matemático – aqui ambos simuladores ECLIPSE e IMEX são *black oil* – suas implementações computacionais não são as mesmas. Principalmente, os comportamentos padrão quando determinadas propriedades não são configuradas explicitamente são diferentes. Aspectos como a correta inicialização do modelo (verificação das propriedades de rocha e fluido e sua distribuição espacial, tabelas de correlações termodinâmicas), verificação da correta configuração das restrições dos poços e seu atendimento durante toda a simulação e a distribuição de pressão e fluidos no reservatório para as diferentes simulações devem ser verificados.

Uma vez garantida a correta inicialização dos modelos, foram verificadas as restrições dos poços. Na Figura A.16 são verificadas as vazões de óleo, na Figura A.17 são verificadas as pressões de fundo e na Figura A.18 são verificados os cortes de água para os poços produtores.

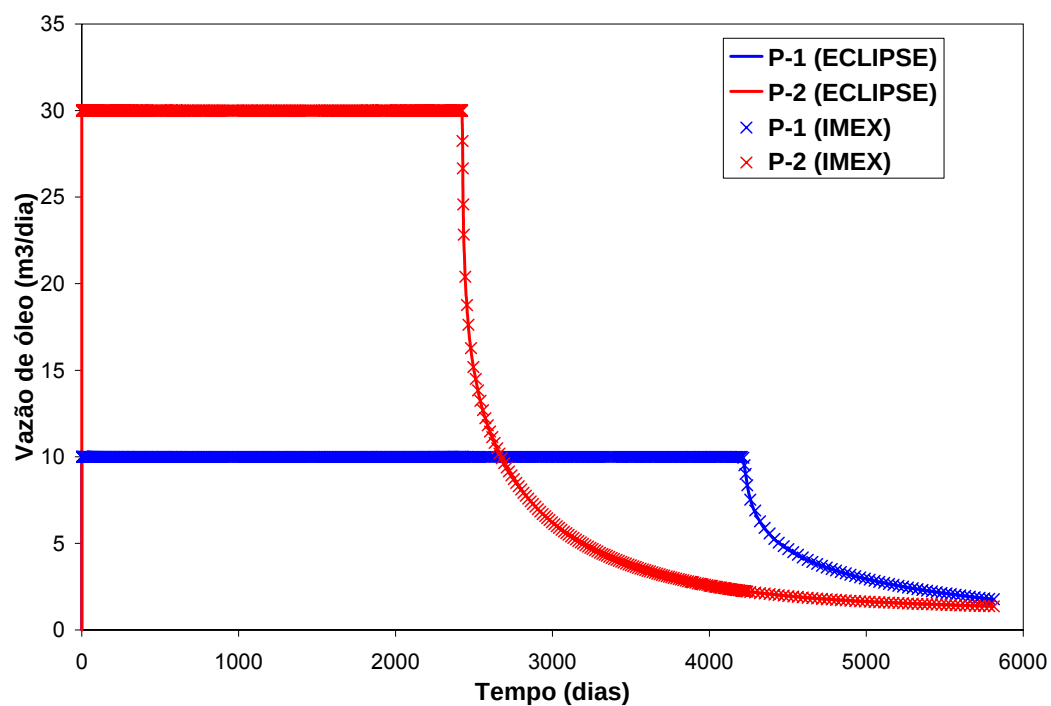


Figura A.16 – Comparação entre a vazão de óleo dos poços produtores P-1 (azul) e P-2 (vermelho) para a simulação em ECLIPSE (linha contínua) e IMEX (símbolos em X).

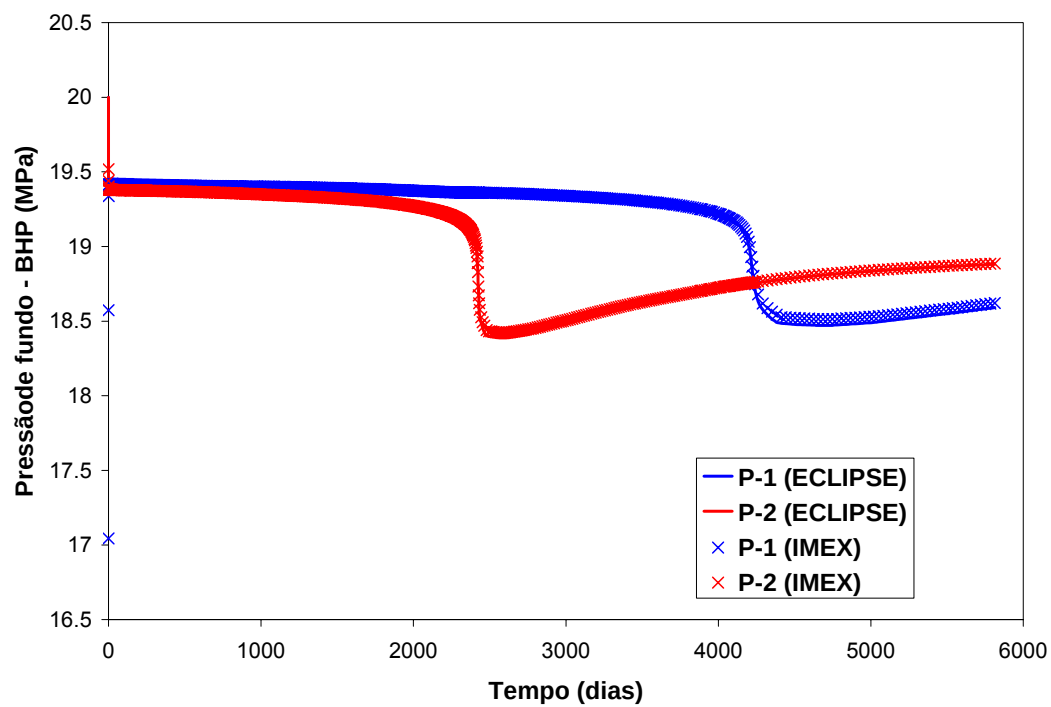
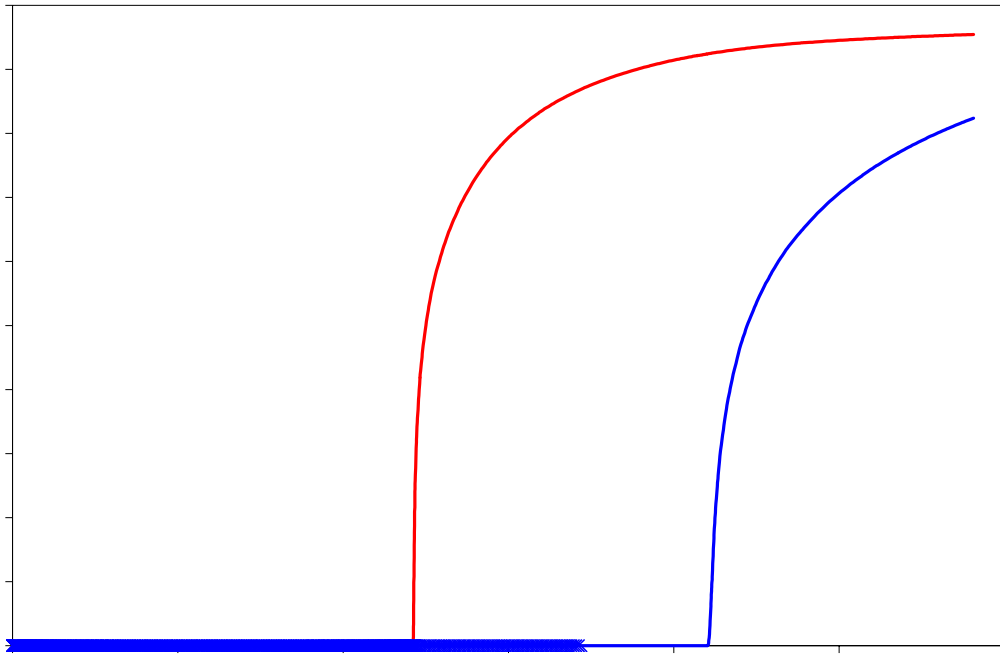
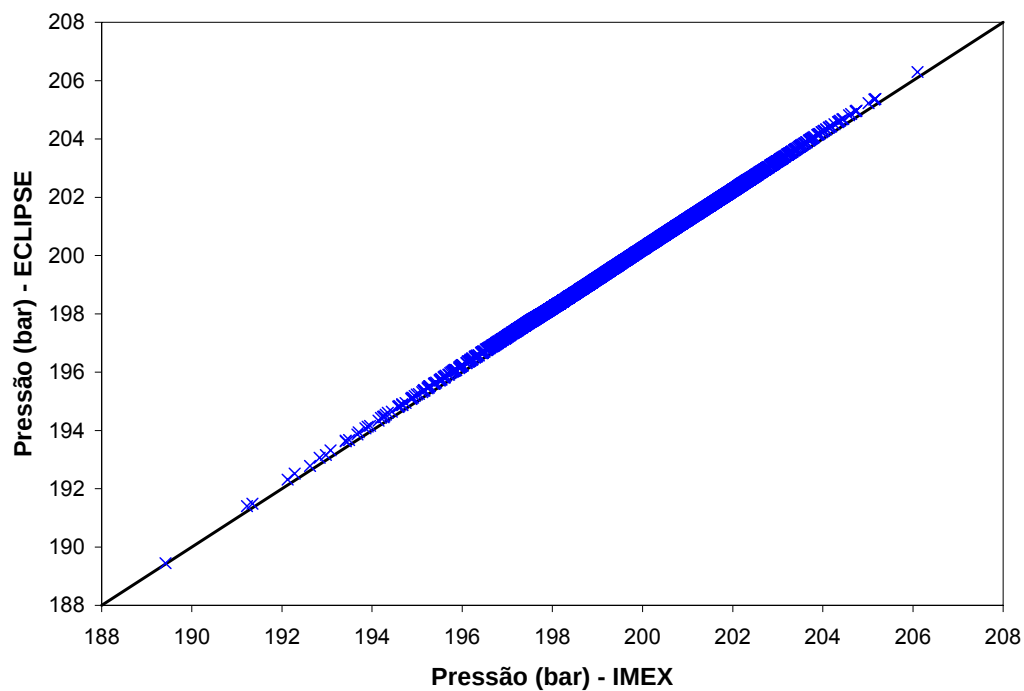
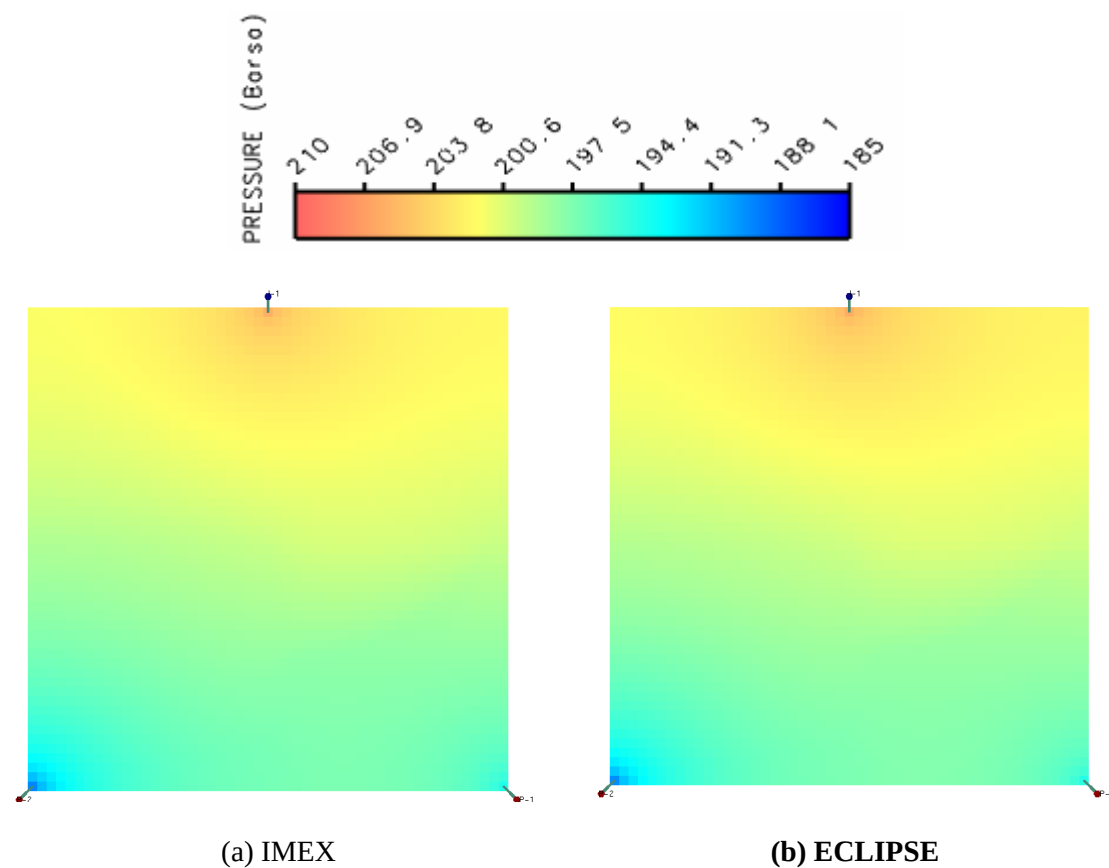
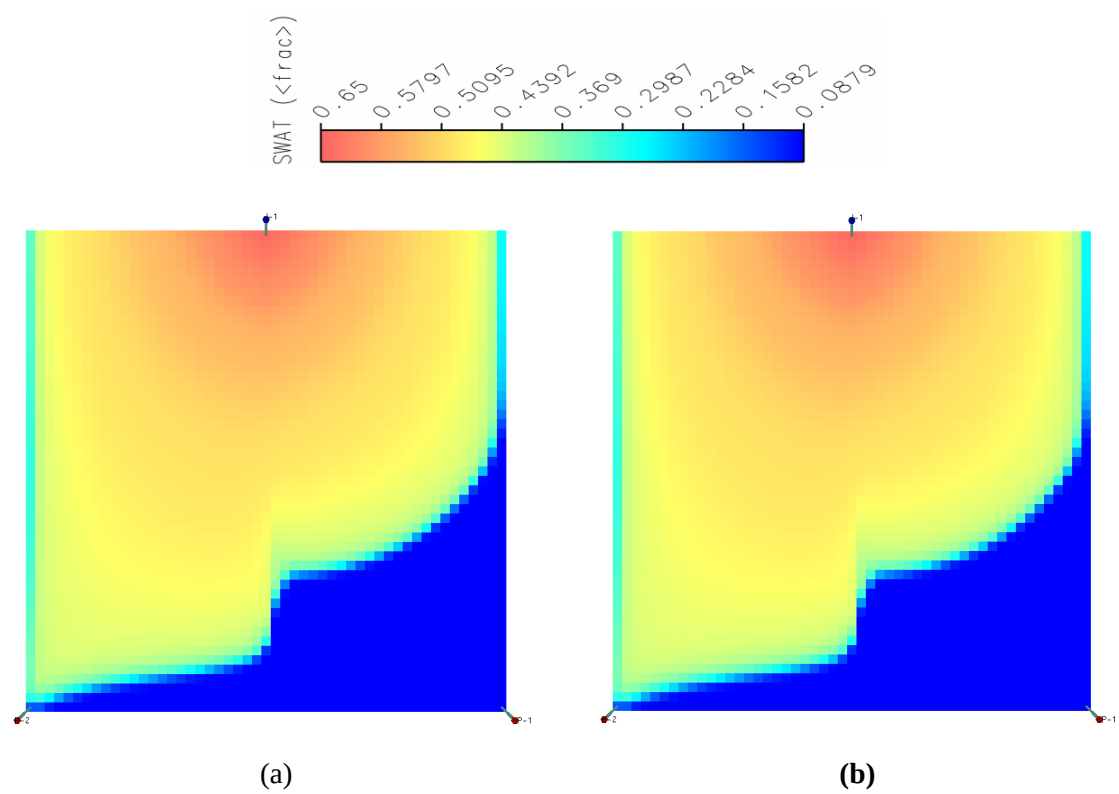


Figura A.17 - Comparação entre a pressão 74008





FiguraA.19 – Distribuição de pressão no reservatório no instante de irrupção da água na simulação IMEX (a), na simulação ECLIPSE (b) e o gráfico cruzado (c).



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)