

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO

PROJETO ENGENHARIA  
DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE  
SIMULADOR DE RESERVATÓRIO MONOFÁSICO 2D  
TRABALHO DA DISCIPLINA PROGRAMAÇÃO PRÁTICA

Versão 1:  
NICHOLAS DE ALMEIDA PINTO  
KEVIN ALVES BARTELEGA  
Prof. André Duarte Bueno

MACAÉ - RJ  
Novembro - 2021

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Escopo do problema . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Especificação</b>	<b>3</b>
2.1	Nome do sistema/produto . . . . .	3
2.2	Especificação . . . . .	3
2.2.1	Requisitos funcionais . . . . .	4
2.2.2	Requisitos não funcionais . . . . .	5
2.3	Casos de uso . . . . .	5
2.3.1	Diagrama de caso de uso geral . . . . .	5
2.3.2	Diagrama de caso de uso específico . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Elaboração</b>	<b>7</b>
3.1	Análise de domínio . . . . .	7
3.2	Formulação teórica . . . . .	8
3.2.1	Fluxo monofásico . . . . .	9
3.2.2	Propriedades dos gases . . . . .	11
3.2.3	Propriedades dos líquidos . . . . .	11
3.2.4	Equação geral . . . . .	11
3.2.5	Jacobiano . . . . .	12
3.3	Identificação de pacotes – assuntos . . . . .	14
3.4	Diagrama de pacotes – assuntos . . . . .	14

# Capítulo 1

## Introdução

No presente projeto de engenharia desenvolve-se o software SIMULADOR DE RESERVATÓRIO MONOFÁSICO 2D, um código em linguagem orientada a objeto que tem como principal objetivo implementar as equações vistas nas disciplinas de Avaliação de Formações e Engenharia de Reservatórios.

Dessa forma, a principal finalidade do programa é fornecer o cálculo do campo de pressões em um dado poço de um reservatório de óleo ou de gás. Para isso, utilizou-se uma simulação numérica computacional baseada no método dos volumes finitos. Este é uma ferramenta poderosa de resolução de equações diferenciais parciais a um determinado volume de meio contínuo baseado, por exemplo, na resolução de balanços de massa.

### 1.1 Escopo do problema

Em se tratando da Engenharia de Reservatórios, o foco do estudo é o próprio reservatório de óleo ou de gás. Os engenheiros lutam por mais entendimento do comportamento de um reservatório, para que se possa fazer previsões cada vez mais condizentes com as medidas de campo e aumentar a segurança em dizer se um campo é viável ou não à exploração e por quanto tempo esse campo será viável. Dada uma aplicação de injeção ou produção em poços no reservatório, se faz necessário um conhecimento sólido e completo de como ele se comportará e influenciará a dinâmica de pressões no poço.

Portanto, o problema que se propõe a resolver é simulação de poços com propriedades distintas, para otimizar a produção no reservatório. De posse dela - ou de pelo menos um valor próximo estimado pelo software, seria possível, por exemplo, dimensionar equipamentos de fundo do poço, prever tempo produtivo e quantificação o volume de fluido de completção, por exemplo.

### 1.2 Objetivos

Os objetivos deste projeto de engenharia são:

- Objetivo geral:
  - Desenvolver projeto de engenharia de software baseado em simulação numérica implícita computacional para determinar a evolução da pressão em um poço dentro de um reservatório estratigráfico de óleo ou gás.
- Objetivos específicos:
  - Modelar física e matematicamente o problema.
  - Modelagem estática por meio de diagramas com interface amigável.
  - Calcular Permeabilidade.
  - Calcular Transmissibilidade.
  - Calcular Matriz de Coeficientes.
  - Resolver sistema.
  - Calcular Pressões.
  - Simular para diferentes fluidos dentro do reservatório (óleo ou gás).
  - Simular para diferentes camadas estratigráficas rochosas.
  - Gerar gráficos externos a partir do software externo Gnuplot..

# Capítulo 2

## Especificação

Apresenta-se neste capítulo do projeto de engenharia a concepção, a especificação do sistema a ser modelado e desenvolvido.

### 2.1 Nome do sistema/produto

<b>Nome</b>	SIMULADOR DE RESERVATÓRIO MONOFÁSICO 2D
<b>Componentes principais</b>	Sistema para cálculos da distribuição de pressão em um poço/reservatório em função das coordenadas espaço-temporais, utilizando método numérico implícito
<b>Missão</b>	Calcular pressão no poço ao longo do tempo

### 2.2 Especificação

Deseja-se desenvolver um software com interface em modo texto que seja capaz de determinar o comportamento das pressões dentro de um poço. O processo é governado pela Equação da Equação da Difusividade Hidráulica. Será utilizada a modelagem numérica pela discretização em volumes finitos e método implícito de Newton para resolução.

Na dinâmica de execução do software, o usuário deverá entrar com os dados relativos ao fluido, à matriz da rocha, ao meio poroso, ao grid-2D, ao simulador, os valores das permeabilidade das camadas estratigráficas, inserir espessuras delas, dizer ao software quais camadas abertas à produção, bem como o tipo de fluido presente no reservatório, se óleo ou gás. Poderá optar-se também pela inserção dos dados em um documentode texto\*.txt. Dada a primeira ou segunda escolha, o software calcula suas propriedades termofísicas, e por fim, apresenta a pressão no poço e no reservatório.

Os dados com as suas respectivas unidades estão listados abaixo:

- **Dados relativos ao fluido:**

$k$  permeabilidade  $[md]$ ;

$\rho_f$  massa específica do fluido  $[kg/m^3]$ ;

$c_{pf}$  calor específico à pressão constante do fluido  $[J/KgK]$ .

• **Dados relativos à matriz da rocha:**

$\phi$  porosidade absoluta  $[m^3/m^3]$ ;

• **Dados relativos ao meio poroso:**

$T$  temperatura absoluta  $[K]$ ;

$P$  pressão  $[Pa]$ ;

• **Dados relativos ao grid bidimensional:**

$dx$  intervalo de discretização na direção x  $[m]$ ;

$dy$  intervalo de discretização na direção y  $[m]$ ;

• **Dados relativos ao simulador:**

$dt$  intervalo de tempo  $[s]$ ;

Após a entrada de dados pelo usuário, o programa irá calcular as propriedades do fluido escolhido e irá resolver a EDP discretizada com um método numérico, obtendo uma solução numérica implícita para cada passo de tempo, isto é, uma distribuição da pressões  $P(r, z, t)$ , como função das coordenadas espaciais e temporais.

O software então irá plotar gráficos que serão gerados com um programa externo (gnuplot).

Por fim, vale destacar que o software cuja interface será em modo texto, será escrito na linguagem C++ com o paradigma de orientação ao objeto, uma linguagem reconhecida por sua grande eficiência, abrangência e facilidade no reaproveitamento de códigos desenvolvidos previamente.

## 2.2.1 Requisitos funcionais

Apresenta-se a seguir os requisitos funcionais.

<b>RF-01</b>	O usuário tem a liberdade de escolher todos os dados de entrada, mencionados na seção 2.2.
<b>RF-02</b>	O usuário pode obter a distribuição de pressão (r,z) para qualquer tempo (t).
<b>RF-03</b>	O usuário pode modelar o processo de simulação escolhendo qual tipo de fluido, bem como as camadas estratigráficas nas quais haverá fluxo.

<b>RF-04</b>	Deve mostrar os resultados na tela.
<b>RF-05</b>	O usuário poderá plotar seus resultados de simulação em gráficos. O gráfico poderá ser salvo como imagem ou ter seus dados exportados como texto.

### 2.2.2 Requisitos não funcionais

<b>RNF-01</b>	Os cálculos devem ser feitos utilizando-se o método numérico implícito para cada passo de tempo.
<b>RNF-02</b>	O programa deverá ser multi-plataforma, podendo ser executado em <i>Windows</i> , <i>GNU/Linux</i> ou <i>Mac</i> .

## 2.3 Casos de uso

Tabela 2.1: Exemplo de caso de uso

Nome do caso de uso:	Cálculo da pressão
Resumo/descrição:	Cálculo da pressão em poço e reservatório em determinadas condições
Etapas:	1. Entrada de dados. 2. Executar o software 3. Gerar gráficos. 4. Analisar resultados.
Cenários alternativos:	Um cenário alternativo envolve um poço com penetração parcial e líquido no reservatório.

### 2.3.1 Diagrama de caso de uso geral

O diagrama de caso de uso geral da Figura 2.1 mostra o usuário acessando os sistemas de ajuda do software, calculando a pressão ou analisando resultados. Este diagrama de caso de uso ilustra as etapas a serem executadas pelo usuário ou sistema, ou seja, a interação do usuário com o sistema.

### 2.3.2 Diagrama de caso de uso específico

O diagrama de caso de uso específico descrito na Figura 2.1 e na Tabela 2.1 é detalhado na Figura 2.2. Ele mostra a interação usuário-software para calcular a pressão no reservatório e no poço usando o método numérico implícito. Nesse caso de uso específico (4 etapas), o usuário insere os dados de entrada, escolhe o tipo de fluido (líquido), monta o poço (camadas estratigráficas com fluxo), propriedades do meio poroso, executa o software, gera gráficos e por fim, analisará os resultados (eventualmente gerará gráficos com os resultados obtidos utilizando um sistema externo, como o software *gnuplot*).

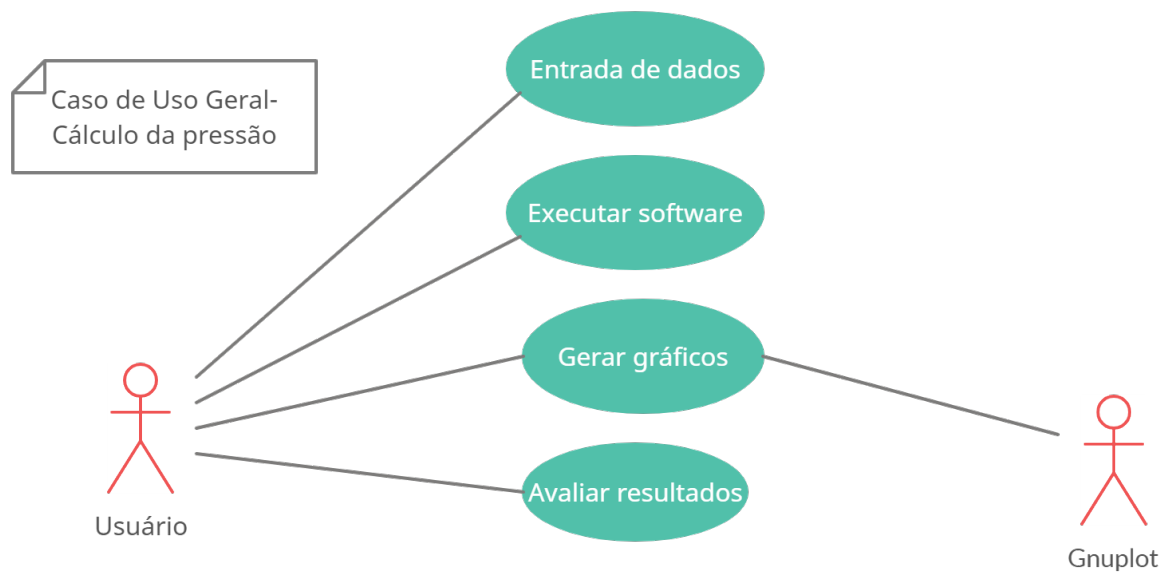


Figura 2.1: Diagrama de caso de uso – Caso de uso geral

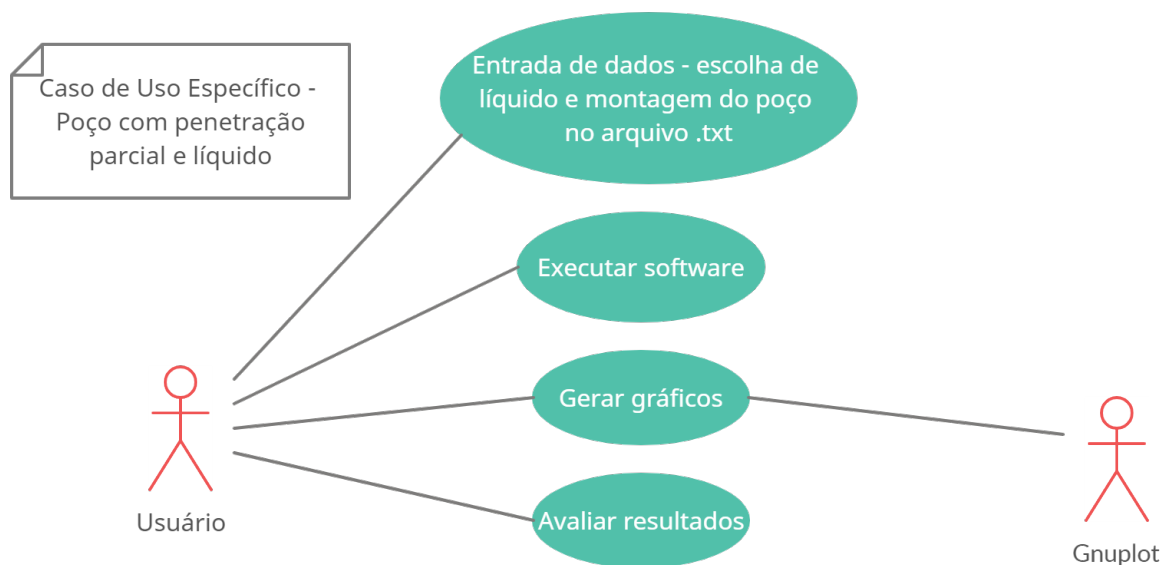


Figura 2.2: Diagrama de caso de uso específico – Título



# Capítulo 3

## Elaboração

Depois da definição dos objetivos, da especificação do software e da montagem dos primeiros diagramas, neste capítulo será apresentada a elaboração, que envolve o estudo de conceitos relacionados ao sistema a ser desenvolvido, a análise de domínio e a identificação de pacotes. Esse processo é feito através de pesquisas bibliográficas e entrevistas, que nos mostram o que é necessário para a formulação do programa.

Uma análise dos requisitos para o funcionamento do programa será feita para se avaliar as condições necessárias para o desenvolvimento de um sistema útil, que satisfaça as necessidades requeridas e que permita extensão futura.

### 3.1 Análise de domínio

Após estudo dos requisitos/especificações do sistema, leitura de artigos recomendados e disciplinas do curso foi possível identificar nosso domínio de trabalho no desenvolvimento do simulador.

- Engenharia de Reservatórios: parte fundamental na qual esse projeto se sustenta. O software desenvolvido, utiliza conceitos tais como de propriedades dos fluídos, propriedades de rochas, a Equação de Balanço de Materiais (EBM). Ele então aplicará todos esses conceitos na caracterização adicional do reservatório e do poço o que permite a predição do comportamento de ambos ao longo da produção.
- A Simulação de Reservatórios é um ramo da engenharia de reservatório. Trata da utilização do desenvolvimento de simuladores, que por meio de modelos matemáticos buscam prever o comportamento de um reservatório de petróleo e de seus poços associados. Os simuladores podem ser do tipo black oil ou composicionais, no primeiro o óleo é considerado uma substância só, e no segundo uma mistura de diversas substâncias.
- Modelagem Numérica Computacional que desenvolve modelos matemáticos para a solução de um determinado problema físico e então parte para um o modelo compu-

tacional por meio de algoritmos a fim de encontrar a solução do problema. Utilizou-se conceitos matemáticos de Cálculo Numérico, vistos na primeira parte do curso e aprimorados no ciclo profissionalizantes. Neste software foi utilizados, por exemplo, o método numérico de Newton-Raphson.

- A Termodinâmica é uma área da física que estuda os efeitos de mudanças na temperatura, pressão, volume e outras propriedades termodinâmicas de um sistema. Ela é extremamente importante no desenvolvimento de um simulador de reservatório pois os fluidos de um reservatório sofrem diversas alterações físicas durante sua produção, sendo necessária uma boa modelagem termodinâmica para entender como eles reagirão a estas alterações.
- Álgebra linear e Cálculo Integral e Diferencial na resolução de sistemas de matrizes e em cálculos de derivadas parciais, Jacobianos, por exemplo.
- Pacote Gráfico: usar-se-á um pacote gráfico para plotar o comportamento da pressão, por exemplo, ao longo do poço e do reservatório para que haja uma melhor compreensão e visualização.
- Software: Serão utilizadas métodos e funções já existentes para a resolução de sistemas de matrizes.
- Elaboração 3.1. Análise de domínio 3.2. Formulação teórica 3.3. Identificação de pacotes - assuntos 3.4. Diagrama de Pacotes - assuntos

## 3.2 Formulação teórica

O petróleo é uma das matérias-primas mais importantes utilizadas pelo homem. Infelizmente, os reservatórios rasos estão quase todos esgotados ou possuem óleos de baixa qualidade, sendo necessária a extração em altas profundidades e em reservatórios de geometria e propriedades complexas.

Nesse contexto, os métodos de recuperação secundária e avançada são as ferramentas mais empregadas para otimizar a produção. As jazidas de petróleo possuem uma quantidade de energia, denominada energia primária, na época de sua descoberta, determinada pelas condições de pressão e temperatura e pela natureza dos fluidos existentes. Porém, à medida que os fluidos são produzidos, parte dessa energia primária é dissipada e o efeito reflete-se principalmente no decréscimo da pressão do reservatório e consequente redução da produtividade dos poços.

Para minorar os efeitos do decréscimo da pressão e obter ótimas porcentagens de recuperação, são utilizados métodos de recuperação avançados, como injeção de água, gases, solventes, etc. Mas somente injetar fluidos em poços próximos ao produtor não é suficiente para maximizar a extração, é necessário também saber onde, quando, quanto e

quais devem ser as propriedades do fluido a ser injetado. Para isto, são realizados, entre outros, testes de pressão, que permitem identificar ou caracterizar o sistema fluido/rocha de cada reservatório. Para a interpretação destes testes é necessário o desenvolvimento de um modelo teórico que descreva o escoamento dos fluidos no reservatório.

Em determinadas situações é factível resolver analiticamente as equações do modelo, porém, estes casos se limitam com frequência ao escoamento monofásico, regido por equações diferenciais lineares. Em casos mais complexos, como a injeção de fluidos alheios ao reservatório, possivelmente com diferentes temperaturas, a complexidade matemática do modelo não permite a sua solução analítica. Nestas situações, as equações diferenciais do modelo são resolvidas utilizando métodos numéricos.

### 3.2.1 Fluxo monofásico

A equação do escoamento monofásico em meios porosos e em coordenadas cilíndricas  $(r, z)$  é:

$$\alpha_c \frac{\partial}{\partial t} (\phi b) = \beta_c \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k_r b}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \beta_c \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k_z b}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + q_{sc} \quad (3.1)$$

onde:

- $\alpha$  é a constante de conversão das unidades de acúmulo;
- $\phi$  é a porosidade;
- $b$  é o inverso do fator volume formação (Volume do óleo nas condições padrão / volume do óleo nas condições de reservatório);
- $\beta$  é a constante de conversão das unidades de fluxo;
- $k_r$  é a permeabilidade radial;
- $k_z$  é a permeabilidade vertical;
- $\mu$  é a viscosidade do óleo;
- $q_{sc}$  é a vazão do poço.

Aplicando-se a discretização por volumes finitos, podemos reecrevar a Eq. 3.1 como:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_c V_{i,j}}{\Delta t} \left[ (\phi b)_{i,j}^{n+1} - (\phi b)_{i,j}^n \right] = & T_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} (p_{i+1,j}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1}) - T_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} (p_{i,j}^{n+1} - p_{i-1,j}^{n+1}) + \\ & T_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} (p_{i,j+1}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1}) - T_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} (p_{i,j}^{n+1} - p_{i,j-1}^{n+1}) + q_{gsc,i,j} \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde a transmissibilidade  $T$  é definida por:

$$T_{i\pm\frac{1}{2},j} = G_{i\pm\frac{1}{2},j} \left( \frac{b}{\mu} \right)_{i\pm\frac{1}{2},j} \quad (3.3)$$

$$T_{i,j\pm\frac{1}{2}} = G_{i,j\pm\frac{1}{2}} \left( \frac{b}{\mu} \right)_{i,j\pm\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

As propriedades dos fluidos nas interfaces são:

$$\psi_{i+\frac{1}{2},j} = (1 - \Omega) \psi_{i,j} + \Omega \psi_{i+1,j} \quad , \psi = \mu, b, \phi \quad (3.5)$$

$$\psi_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{\psi_{i,j} + \psi_{i,j+1}}{2} \quad , \psi = \mu, b, \phi \quad (3.6)$$

As permeabilidades nas interfaces são dadas pelo conjunto de 4 equações abaixo:

$$k_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{k_i k_{i+1} \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)}{k_i \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_{i+\frac{1}{2}}} \right) + k_{i+1} \ln \left( \frac{r_{i+\frac{1}{2}}}{r_i} \right)} \quad (3.7)$$

$$k_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{k_{i-1} k_i \ln \left( \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)}{k_{i-1} \ln \left( \frac{r_i}{r_{i-\frac{1}{2}}} \right) + k_i \ln \left( \frac{r_{i-\frac{1}{2}}}{r_{i-1}} \right)} \quad (3.8)$$

$$k_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{\frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{z_{i,j+1} - z_{i,j+\frac{1}{2}}} + \frac{z_{i,j+\frac{1}{2}} - z_{i,j}}{k_{i,j}}}{k_{i,j+1}} \quad (3.9)$$

$$k_{i,j-\frac{1}{2}} = \frac{\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{z_{i,j} - z_{i,j-\frac{1}{2}}} + \frac{z_{i,j-\frac{1}{2}} - z_{i,j-1}}{k_{i,j-1}}}{k_{i,j}} \quad (3.10)$$

Seguem abaixo outras fórmulas utilizadas no desenvolvimento anterior colocadas aqui para não quebrar a linha de raciocínio:

$$G_{i\pm\frac{1}{2},j} = \beta_c \frac{r_{i\pm\frac{1}{2}} k_{i\pm\frac{1}{2}}}{\Delta r_{i\pm\frac{1}{2}}} \Delta \theta \Delta z \quad (3.11)$$

$$r_{i+\frac{1}{2}} = \frac{r_{i+1} - r_i}{\ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)}, \quad r_{i-\frac{1}{2}} = \frac{r_i - r_{i-1}}{\ln \left( \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)} \quad (3.12)$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2} \left( r_{i+\frac{1}{2}}^2 - r_{i-\frac{1}{2}}^2 \right) \Delta \theta \Delta z \quad (3.13)$$

As duas próximas subseções trazem propriedades dos gases e dos líquidos, caso opte-se pela escolha de um dos dois em questão.

### 3.2.2 Propriedades dos gases

O comportamento de gás está definido pela equação de estado de gás real abaixo:

$$pV = ZnRT \quad (3.14)$$

O fator de compressibilidade  $Z$  está dado pela correlação apresentada por Kareem et al. (2016). Esta correlação permite calcular explicitamente fator de compressibilidade nas faixas  $0.2 \leq p_{pr} \leq 15$  e  $1.15 \leq T_{pr} \leq 3$  de forma simples.

O inverso do fator volume formação do gás é calculado usando a equação de estado:

$$b = \frac{T_o p}{T_{p_o} Z} \quad (3.15)$$

A viscosidade do gás é calculada pela correlação de Lee et al. (1966), como função da temperatura, a massa molecular aparente  $M_a$  e a massa específica:

$$\rho = \frac{p M_a}{Z R T} \quad (3.16)$$

### 3.2.3 Propriedades dos líquidos

No caso de um líquido, as equações foram:

Para inverso do fator volume formação:

$$b_l = b_l^0 (1 + c_l (p_l - p_l^0)) \quad (3.17)$$

Para viscosidade:

$$\mu_l = \mu_l^0 (1 + c_l (p_l - p_l^0)) \quad (3.18)$$

### 3.2.4 Equação geral

De posse das equações anteriores, é possível reescrever a equação da discretização por volumes finitos (Eq. 3.1) como:

$$R = TP + Q - H \quad (3.19)$$

onde:

- $R$  é o vetor de resíduos;
- $T$  é a matriz de transmissibilidade;
- $Q$  é o vetor de vazões;
- $H$  é o vetor de acúmulo;

- $P$  é o vetor de pressões.

O formato das matrizes com termo do poço fica:

$$T = \begin{bmatrix} W & WR & & WR & & WR \\ RW & C & N & T & & \\ & S & C & N & T & \\ & & S & C & & T \\ RW & B & & C & N & T \\ & & B & S & C & N & T \\ & & & B & S & C & T \\ RW & & & B & & C & N \\ & & & & B & S & C & N \\ & & & & & B & S & C \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

onde  $T$  é uma matriz não homogênea.

$$Q = [q_{sc}, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (3.21)$$

$$H = [0, H_{\{1,1\}}, H_{\{2,1\}}, \dots, H_{\{n_r, n_z\}}]^T \quad (3.22)$$

$$P = [P_w, P_{1,1}, P_{2,1}, \dots, P_{n_r, n_z}]^T \quad (3.23)$$

Sendo:

$$H_{i,j} = \frac{\alpha_c V_{i,j}}{\Delta t} [(\phi b)_{i,j}^{n+1} - (\phi b)_{i,j}^n] \quad (3.24)$$

### 3.2.5 Jacobiano

Para resolver esse sistema linear, foi utilizado o método de Newton-Raphson. Esse método requer uma solução iterativa, por meio da equação abaixo:

$$J^{(\nu)} P^{\nu+1} = -R^{\{(\nu)\}} \quad (3.25)$$

$$J = \left[ \frac{\partial R_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right]_{nr \times nz \times nr \times nz} \quad (3.26)$$

O  $J$  também pode ser calculado como:

$$J = T + \tau - \eta \quad (3.27)$$

sendo  $T$  a matriz de transmissibilidades,  $\tau$  a derivada dos termos de fluxo e  $\eta$  as derivadas do termo de acúmulo. Abaixo a equação para  $\eta$ :

$$\eta_{i,j} = \frac{\alpha_c V_{b_{i,j}}}{\Delta t} \left( \phi_{i,j} \frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} + b_i \frac{\partial \phi_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right) \quad (3.28)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} 0 & & & & & & & & \\ & \eta_1 & & & & & & & \\ & & \eta_2 & & & & & & \\ & & & \eta_3 & & & & & \\ & & & & \eta_4 & & & & \\ & & & & & \eta_5 & & & \\ & & & & & & \eta_6 & & \\ & & & & & & & \eta_7 & \\ & & & & & & & & \eta_8 \\ & & & & & & & & & \eta_9 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\tau_{i \pm \frac{1}{2},j} = \frac{\partial T_{i \pm \frac{1}{2},j}}{\partial p_{i \pm 1,j}} (p_{i \pm 1,j} - p_{i,j}) \quad (3.30)$$

$$\tau_{i,j \pm \frac{1}{2}} = \frac{\partial T_{i,j \pm \frac{1}{2}}}{\partial p_{i,j \pm 1}} (p_{i,j \pm 1} - p_{i,j}) \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} \tau_{i,j} &= G_{i-1,j} \frac{(1-\Omega)}{\mu_{i-\frac{1}{2},j}} \left[ \frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} - \left( \frac{b}{\mu} \right)_{i-\frac{1}{2},j} \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right] (p_{i-1,j} - p_{i,j}) + \\ &+ G_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Omega}{\mu_{i+\frac{1}{2},j}} \left[ \frac{\partial b_i}{\partial p_i} - \left( \frac{b}{\mu} \right)_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right] (p_{i+1,j} - p_{i,j}) + \\ &+ G_{i,j-\frac{1}{2}} \left[ \frac{(\mu_{i,j-1} + \mu_{i,j}) \frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} + (b_{i,j-1} + b_{i,j}) \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}}}{(\mu_{i,j-1} + \mu_{i,j})^2} \right] (p_{i,j-1} - p_{i,j}) + \\ &+ G_{i,j+\frac{1}{2}} \left[ \frac{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j}) \frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} + (b_{i,j+1} + b_{i,j}) \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}}}{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j})^2} \right] (p_{i,j+1} - p_{i,j}) \end{aligned} \quad (3.32)$$

As derivadas das transmissibilidades são:

$$\frac{\partial T_{i-\frac{1}{2},j}}{\partial p_{i-1,j}} = G_{i-1,j} \frac{(1-\Omega)}{\mu_{i-\frac{1}{2},j}} \left[ \frac{\partial b_{i-1,j}}{\partial p_{i-1,j}} - \left( \frac{b}{\mu} \right)_{i-\frac{1}{2},j} \frac{\partial \mu_{i-1,j}}{\partial p_{i-1,j}} \right] \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial T_{i+\frac{1}{2},j}}{\partial p_{i+1,j}} = G_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Omega}{\mu_{i+\frac{1}{2},j}} \left[ \frac{\partial b_{i+1,j}}{\partial p_{i+1,j}} - \left( \frac{b}{\mu} \right)_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\partial \mu_{i+1,j}}{\partial p_{i+1,j}} \right] \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial T_{i,j \pm \frac{1}{2}}}{\partial p_{i,j \pm 1}} = G_{i,j \pm \frac{1}{2}} \left[ \frac{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j}) \frac{\partial b_{i,j \pm 1}}{\partial p_{i,j \pm 1}} + (b_{i,j+1} + b_{i,j}) \frac{\partial \mu_{i,j \pm 1}}{\partial p_{i,j \pm 1}}}{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j})^2} \right] \quad (3.35)$$

Resultando em uma matriz com aparência igual ao da Transmissibilidade.

### 3.3 Identificação de pacotes – assuntos

A partir da análise dos modelos apresentados, pode-se identificar os seguintes assuntos/pacotes:

- Engenharia de Reservatórios: este pacote recebe arquivos digitados pelo usuário ou os lê de um arquivo de extensão .txt. Nele, os dados se separam, de acordo com suas característica: rocha, fluido, aquífero, dados de produção, dados de injeção. Quando juntas fornecem uma caracterização do reservatório como um todo e servem de base para os cálculos da simulação.
- Simulador: Relaciona os pacotes, sendo responsável pela criação e destruição de objetos, assim como interagir com o usuário através de um interface via texto para definir todas ações a serem tomadas.
- Modelagem Numérica Computacional: contém os algoritmos matemáticos necessários para a solução do modelo do simulador, como por exemplo, o Método de Newton-Raphson. Este pacote está separado do simulador, pois um dos objetivos da AOO é ter uma maior reusabilidade do código, assim, estando separados, é possível aplicar este mesmo pacote para outros problemas de engenharia, como por exemplo o de análise de teste de pressão.
- Termodinâmica: pacote que envolve todos os conceitos físicos (efeitos de mudanças na temperatura, pressão, volume e outras propriedades termodinâmicas de um sistema) sendo necessário no desenvolvimento de um simulador de reservatório devido ao dinamismo do comportamento dos fluidos.
- Álgebra linear e Cálculo Integral e Diferencial: pacote com deduções matemáticas, teoremas, e e deduções que são a base de todo o processo.
- Pacote Gráco: é um pacote que utiliza o gnuplot para plotar as soluções numéricas obtidas, isto é, as distribuições de pressão. Em outras palavras, é o software gnuplot que implementa a saída gráfica dos dados calculados.
- Biblioteca: Serão utilizadas métodos e funções já existentes para a resolução de sistemas de matrizes, bibliotecas padrão de C++ tais como (STL) e bibliotecas como a iostream, iomanip, etc.

### 3.4 Diagrama de pacotes – assuntos

O diagrama de pacotes da Figura 3.1 mostra as relações existentes entre os pacotes deste software.



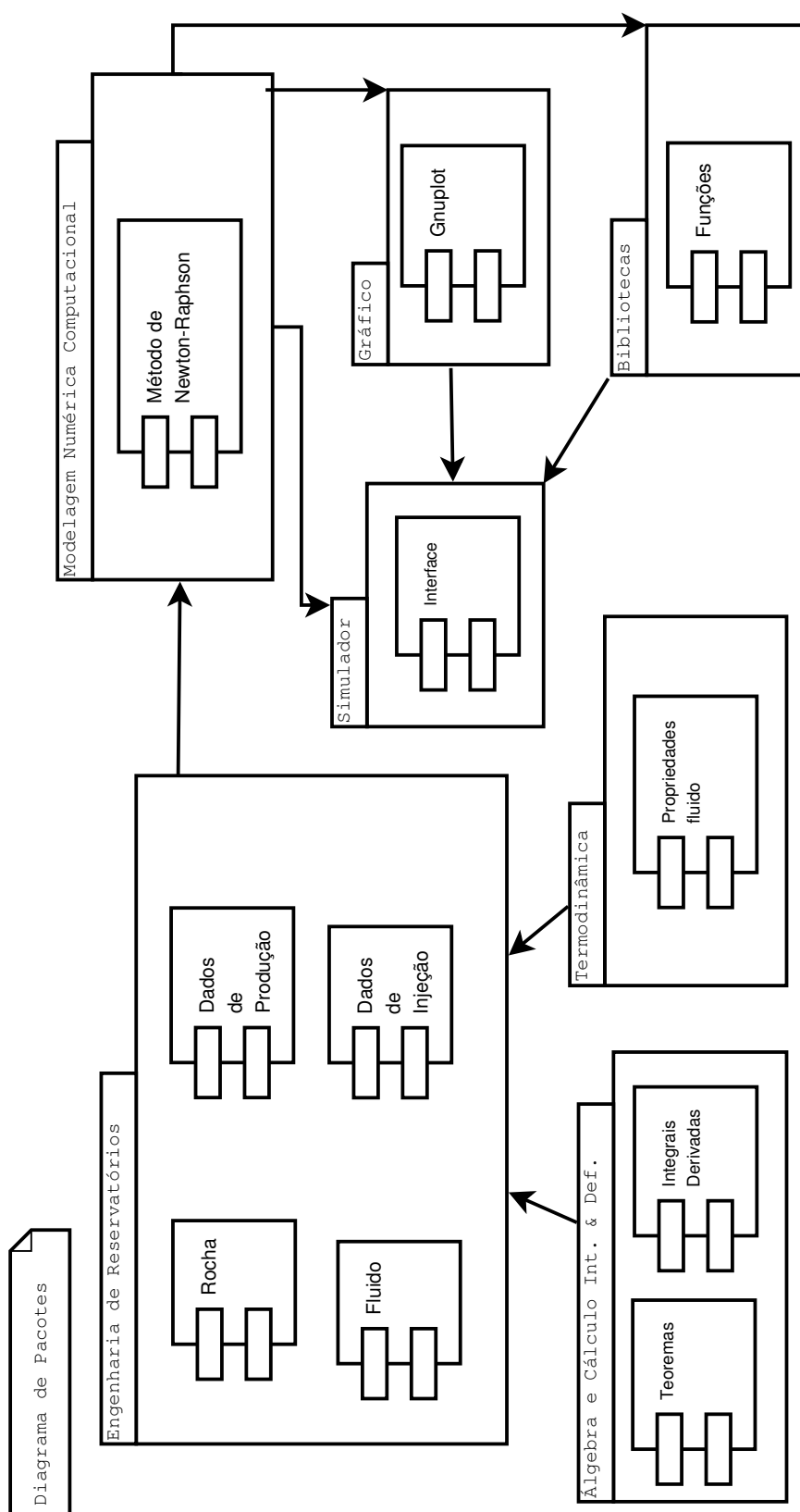


Figura 3.1: Diagrama de Pacotes.



## Referências Bibliográficas

# Índice Remissivo

## **C**

Casos de uso, 5

## **E**

Elaboração, 7