

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
Dezembro - 2021

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Escopo do problema	1
1.2	Objetivos	2
2	Especificação	3
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	6
3	Elaboração	8
3.1	Análise de domínio	8
3.2	Formulação teórica	9
3.2.1	Fluxo monofásico	10
3.2.2	Propriedades dos gases	13
3.2.3	Propriedades dos líquidos	13
3.2.4	Equação geral	14
3.2.5	Jacobiano	15
3.3	Identificação de pacotes – assuntos	16
3.4	Diagrama de pacotes – assuntos	17
4	AOO – Análise Orientada a Objeto	19
4.1	Diagramas de classes	19
4.1.1	Dicionário de classes	21
4.2	Diagrama de sequência – eventos e mensagens	22
4.2.1	Diagrama de sequência geral	22
4.2.2	Diagrama de sequência específico	22
4.3	Diagrama de comunicação – colaboração	23
4.4	Diagrama de máquina de estado	24

4.5	Diagrama de atividades	25
5	Projeto	26
5.1	Projeto do sistema	26
5.2	Projeto orientado a objeto – POO	27
5.3	Diagrama de componentes	29
5.4	Diagrama de implantação	30
	Referências Bibliográficas	32
6	Como modificar o arquivo inputdata	34
6.1	Modificando o tipo de fluido	34
6.2	Modificando as camadas do reservatório	37

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 ([Pico, 2018]).

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. Esta é uma ferramenta poderosa que pode ser aplicada para resolver equações diferenciais parciais a um determinado volume de meio contínuo baseado, por exemplo, nas equações 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 predições 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, se faz necessário um conhecimento sólido e completo de como ele se comportará e influenciará a dinâmica de pressões no reservatório ([ROSA, 2006]).

Portanto, o problema que se propõe a resolver é a 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 quantificar o volume de fluido de completação utilizado em uma operação, por exemplo.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste projeto de engenharia são:

- Objetivo geral:
 - Desenvolver um 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 Sistemas de equações.
 - 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

Nome	SIMULADOR DE RESERVATÓRIO MONOFÁSICO 2D
Componentes principais	Sistema para cálculos da distribuição de pressão em um poço/reservatório em função das coordenadas espaço-temporais, utilizando método numérico implícito
Missão	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 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 documento de 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 $[md]$;

ρ_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:**

ϕ 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.

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

RF-04	Deve mostrar os resultados na tela.
RF-05	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

RNF-01	Os cálculos devem ser feitos utilizando-se o método numérico implícito para cada passo de tempo.
RNF-02	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.

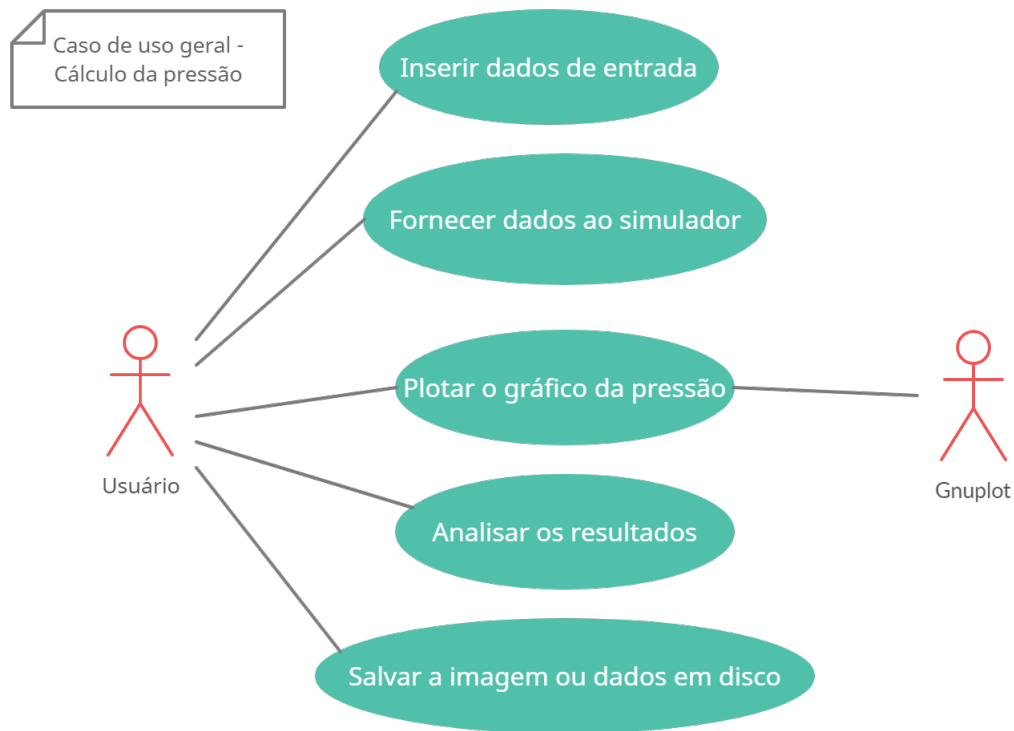


Figura 2.1: Diagrama de caso de uso – Caso de uso geral

2.3.2 Diagrama de caso de uso específico

Os diagramas de casos de uso específicos estão descritos nas Figuras 2.1 e 2.3 e na Tabela 2.1. Ele mostra a interação usuário-software para calcular a pressão no reservatório e no poço usando o método numérico implícito.

No primeiro caso de uso específico mostra-se as possibilidades de se simular o software com fluido ora líquido ora gás, e penetração do poço parcial ou total. Entende-se por penetração as áreas abertas ao fluxo adjacentes ao poço.

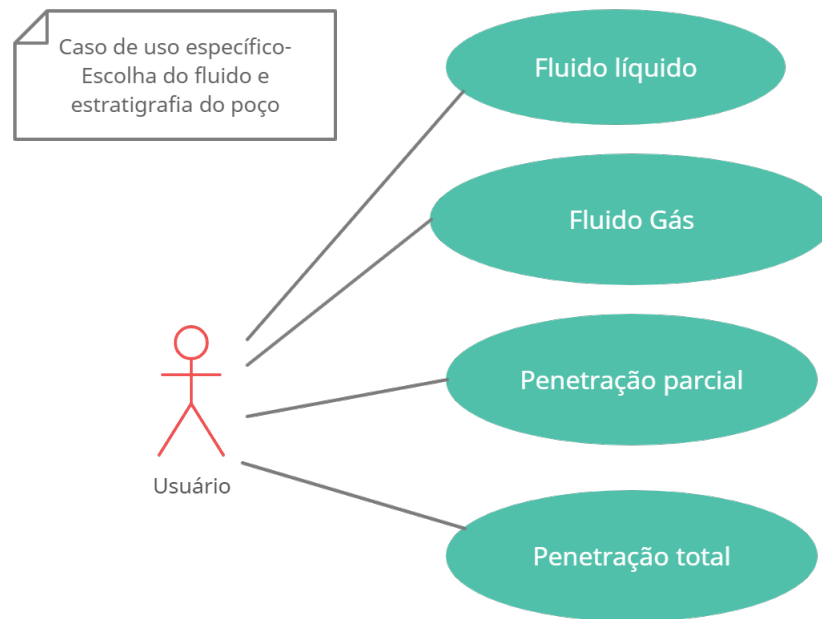


Figura 2.2: Diagrama de caso de uso específico – Escolha do fluido e estratigrafia do poço

Já no segundo caso de uso específico (4 etapas), o usuário optou por simular um líquido com penetração parcial. Assim, insere os dados de entrada, define zonas de fluxo no poço, executa a simulação. Depois disso, o software gera gráficos e o usuário analisa os resultados.

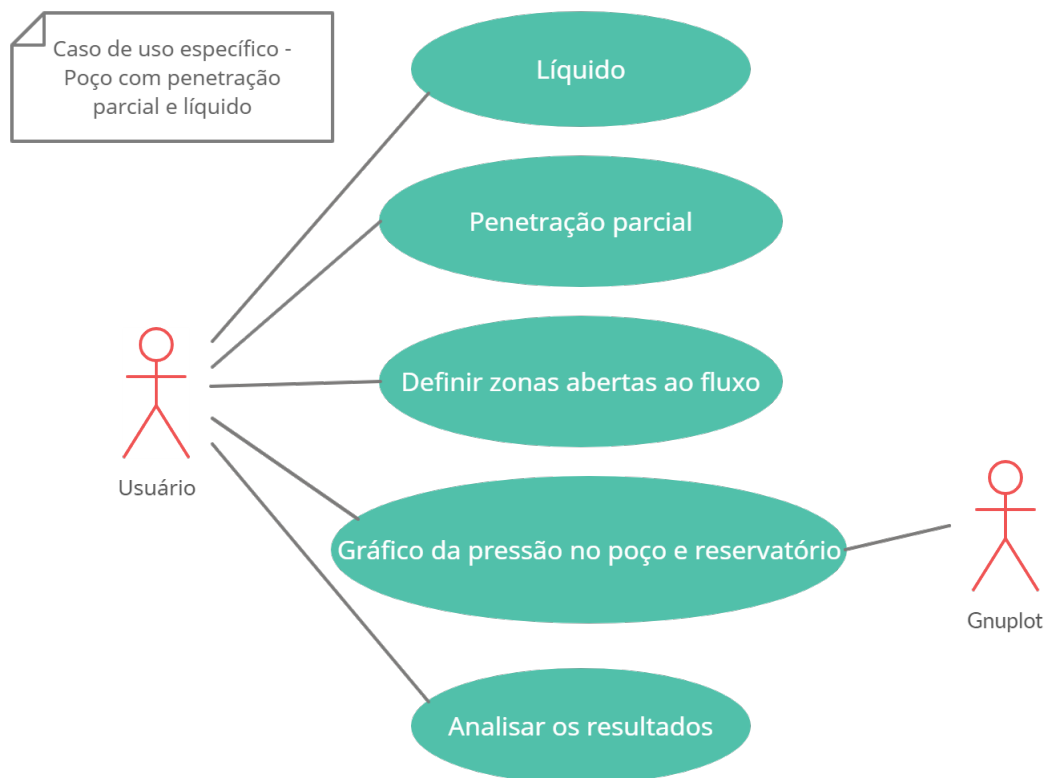


Figura 2.3: Diagrama de caso de uso específico – Poço com penetração parcial e líquido

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 e 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 Reservatórios. Trata da utilização e do desenvolvimento de simuladores que buscam prever o comportamento de um reservatório de petróleo e de seus poços associados por meio de modelos matemáticos. Os simuladores podem ser do tipo *black oil* ou composicionais, no primeiro o óleo é considerado uma substância só, e no segundo uma mistura heterogênea.
- Modelagem Numérica Computacional que desenvolve modelos matemáticos para a solução de um determinado problema físico e então parte para um o modelo computacional 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 profissionalizante. Neste software foi utilizado 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 dele sofrem diversas alterações físico-químicas durante sua produção, sendo necessária uma boa modelagem termodinâmica para entender como eles reagem 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 utilizados métodos e funções já existentes para a resolução de sistemas de matrizes.

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[ROSA, 2006].

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[P., 2014].

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. No entanto, 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 [Pico, 2018].

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:

- α é a constante de conversão das unidades de acúmulo;
- ϕ é a porosidade;
- b é o inverso do fator volume formação (volume do óleo nas condições padrão / volume do óleo nas condições de reservatório);
- β é a constante de conversão das unidades de fluxo;
- k_r é a permeabilidade radial;
- k_z é a permeabilidade vertical;
- μ é a viscosidade do óleo;
- q_{sc} é a vazão do poço.

Considere o seguinte arranjo de um elemento de volume em coordenadas cilíndricas (Fig. 3.1) e a malha (Fig. 3.2) no sistema radial abaixo:

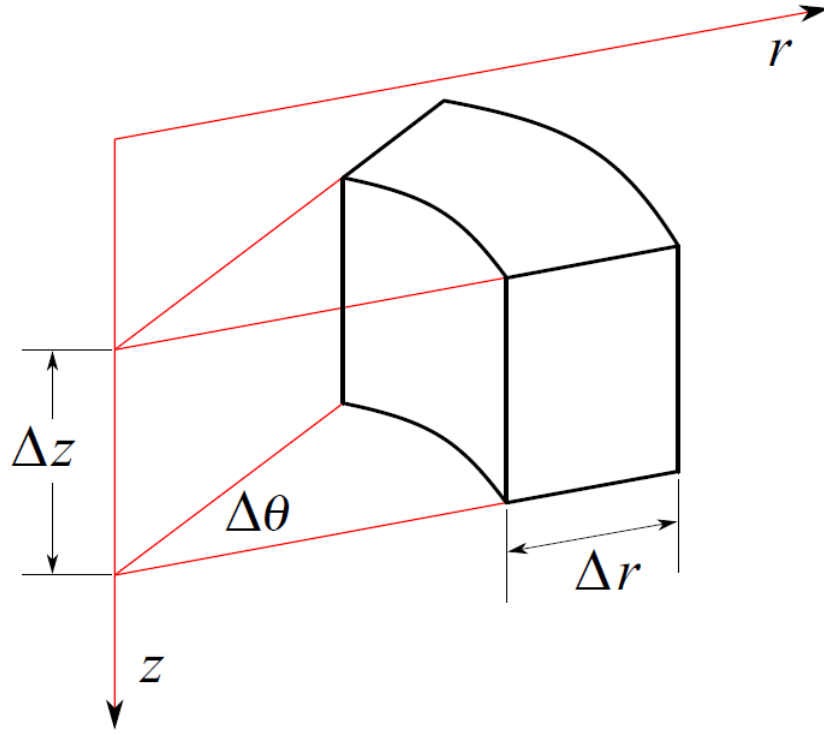


Figura 3.1: Elemento de volume em coordenadas cilíndricas

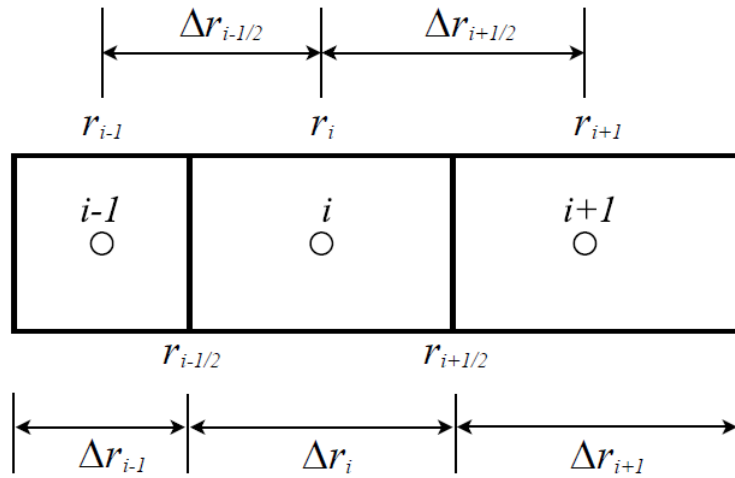


Figura 3.2: Malha radial não-homogênea

Aplicando-se a discretização por volumes finitos, podemos reescrever 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 um 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., 2015]. 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 and Eakin, 1966], como função da temperatura, massa molecular aparente M_a e massa específica:

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

Vale destacar que, para efeitos de simplificação, desconsiderou-se os efeitos não-darcianos que podem ocorrer nas proximidades do poço. A título de curiosidade, a equação de Forchheimer é o modelo empregado para representar tais efeitos de inércia, causados pela alta velocidade. Segundo [K. Aziz, 1979], em um sistema consistente de unidades, a Eq. é:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{k} u + \beta \rho u |u| \quad (3.17)$$

onde β é o coeficiente de Forchheimer, cuja dimensão é o inverso do comprimento, u é a vazão por unidade de área e x a direção paralela ao escoamento.

Em termos práticos, um fator de correção $\delta_{i \pm \frac{1}{2}}$ deve ser calculado em conjunto com a solução nas interfaces ([MacDonald and Coats, 1970]; [Pico, 2018]).

3.2.3 Propriedades dos líquidos

No caso de um líquido, as equações foram:

Para inverso do fator volume formação:

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

Para viscosidade:

$$\mu_l = \mu_l^0 (1 + c_l (p_l - p_l^0)) \quad (3.19)$$

3.2.4 Equação geral

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

$$R = TP + Q - H \quad (3.20)$$

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:

$$T = \begin{bmatrix} W & WR & & WR & & WR & & \\ RW & C & N & T & & & & \\ & S & C & N & T & & & \\ & & S & C & & T & & \\ RW & B & & C & N & T & & \\ & & B & S & C & N & T & \\ & & & B & S & C & & T \\ RW & & & B & & C & N & \\ & & & & B & S & C & N \\ & & & & & B & S & C \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

onde T é uma matriz não homogênea.

$$Q = [q_{sc}, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (3.22)$$

$$H = [0, H_{\{1,1\}}, H_{\{2,1\}}, \dots, H_{\{n_r, n_z\}}]^T \quad (3.23)$$

$$P = [P_w, P_{1,1}, P_{2,1}, \dots, P_{n_r, n_z}]^T \quad (3.24)$$

Sendo:

$$H_{i,j} = \frac{\alpha_c V_{i,j}}{\Delta t} [(\phi b)_{i,j}^{n+1} - (\phi b)_{i,j}^n] \quad (3.25)$$

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:

$$J^{(\nu)} P^{\nu+1} = -R^{\{\nu\}} \quad (3.26)$$

$$J = \left[\frac{\partial R_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right]_{nr*nr \times nr*nr} \quad (3.27)$$

onde J é a matriz Jacobiana, com as derivadas das equações de resíduo, com relação às incógnitas ([K. Aziz, 1979];[T. Ertekin, 2001]).

O J também pode ser calculado como:

$$J = T + \tau - \eta \quad (3.28)$$

sendo T a matriz de transmissibilidades, τ a derivada dos termos de fluxo e η as derivadas do termo de acúmulo. Abaixo a equação para η :

$$\eta_{i,j} = \frac{\alpha_c V_{b_{i,j}}}{\Delta t} \left(\phi_{i,j} \frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} + b_i \frac{\partial \phi_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right) \quad (3.29)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} 0 & & & & & & & & \\ & \eta_1 & & & & & & & \\ & & \eta_2 & & & & & & \\ & & & \eta_3 & & & & & \\ & & & & \eta_4 & & & & \\ & & & & & \eta_5 & & & \\ & & & & & & \eta_6 & & \\ & & & & & & & \eta_7 & \\ & & & & & & & & \eta_8 \\ & & & & & & & & & \eta_9 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

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

$$\tau_{i,j \pm \frac{1}{2}} = \frac{\partial T_{i,j \pm \frac{1}{2}}}{\partial p_{i,j \pm 1}} (p_{i,j \pm 1} - p_{i,j}) \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned}
\tau_{i,j} = & G_{i-1,j} \frac{(1-\Omega)}{\mu_{i-\frac{1}{2},j}} \left[\frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} - \left(\frac{b}{\mu} \right)_{i-\frac{1}{2},j} \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right] (p_{i-1,j} - p_{i,j}) + \\
& + G_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Omega}{\mu_{i+\frac{1}{2},j}} \left[\frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} - \left(\frac{b}{\mu} \right)_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}} \right] (p_{i+1,j} - p_{i,j}) + \\
& + G_{i,j-\frac{1}{2}} \left[\frac{(\mu_{i,j-1} + \mu_{i,j}) \frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} + (b_{i,j-1} + b_{i,j}) \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}}}{(\mu_{i,j-1} + \mu_{i,j})^2} \right] (p_{i,j-1} - p_{i,j}) + \\
& + G_{i,j+\frac{1}{2}} \left[\frac{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j}) \frac{\partial b_{i,j}}{\partial p_{i,j}} + (b_{i,j+1} + b_{i,j}) \frac{\partial \mu_{i,j}}{\partial p_{i,j}}}{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j})^2} \right] (p_{i,j+1} - p_{i,j})
\end{aligned} \tag{3.33}$$

As derivadas das transmissibilidades são:

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

$$\frac{\partial T_{i+\frac{1}{2},j}}{\partial p_{i+1,j}} = G_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Omega}{\mu_{i+\frac{1}{2},j}} \left[\frac{\partial b_{i+1,j}}{\partial p_{i+1,j}} - \left(\frac{b}{\mu} \right)_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\partial \mu_{i+1,j}}{\partial p_{i+1,j}} \right] \tag{3.35}$$

$$\frac{\partial T_{i,j\pm\frac{1}{2}}}{\partial p_{i,j\pm 1}} = G_{i,j\pm\frac{1}{2}} \left[\frac{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j}) \frac{\partial b_{i,j\pm 1}}{\partial p_{i,j\pm 1}} + (b_{i,j+1} + b_{i,j}) \frac{\partial \mu_{i,j\pm 1}}{\partial p_{i,j\pm 1}}}{(\mu_{i,j+1} + \mu_{i,j})^2} \right] \tag{3.36}$$

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 juntos, 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 testes 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. Base de todo o processo.
- **Pacote Gráfico:** 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 3.3 mostra as relações existentes entre os pacotes deste software.

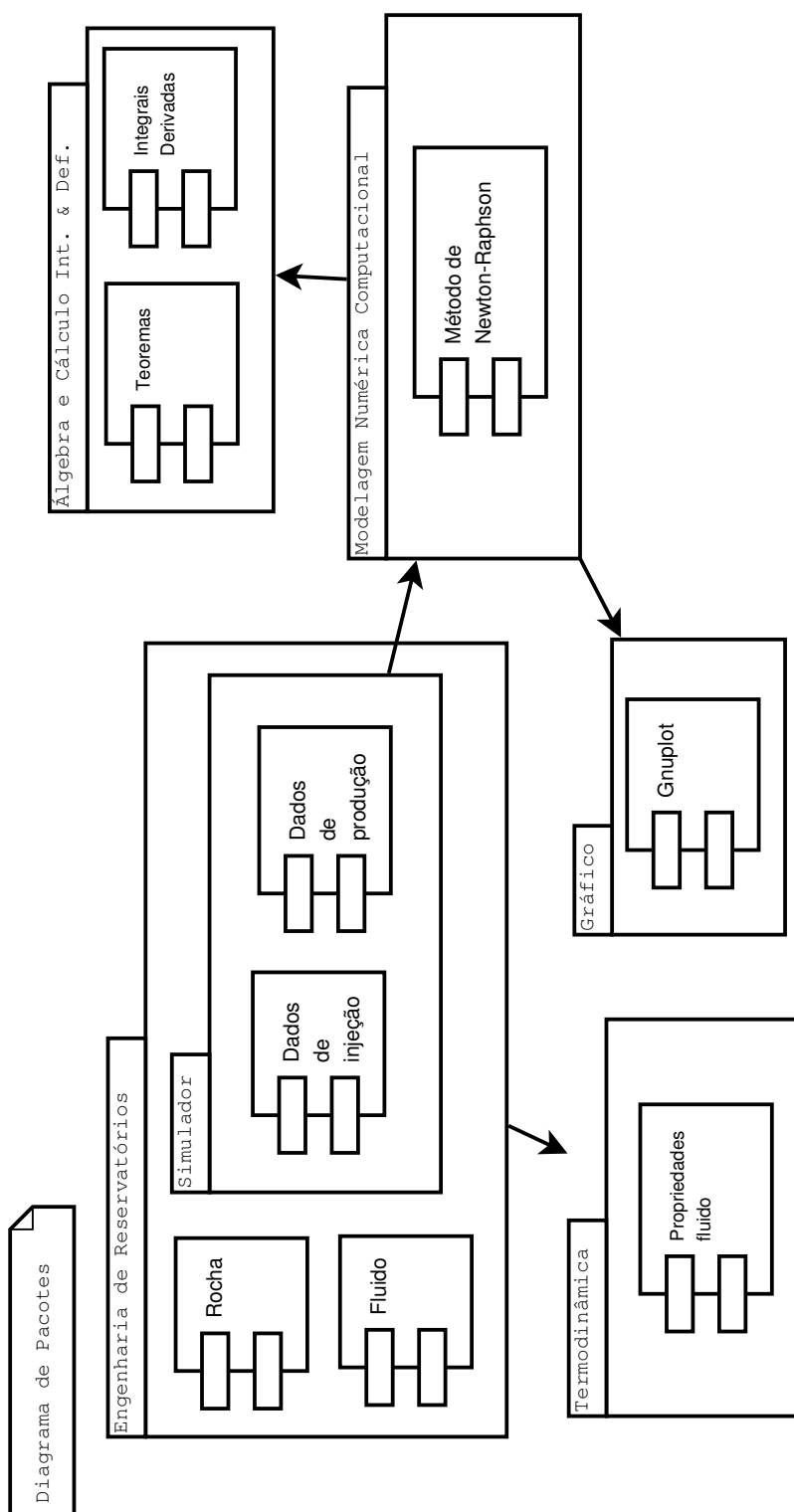


Figura 3.3: Diagrama de Pacotes

Capítulo 4

AOO – Análise Orientada a Objeto

A AOO – Análise Orientada a Objeto é a terceira etapa do desenvolvimento de um projeto de engenharia, neste caso um software aplicado a engenharia de petróleo. Ela utiliza algumas regras para identificar os objetos de interesse, as relações entre os pacotes, as classes, os atributos, os métodos, as heranças, as associações, as agregações, as composições e as dependências. O modelo de análise enfatiza o que deve ser feito e não como foi realizado.

Nas próximas seções, serão apresentados um conjunto de cinco diagramas (de classes, de sequência, de comunicação, de máquina de estado e de atividades) com o objetivo de identificar os objetos e seus relacionamentos e assim visualizar o software de várias formas.

4.1 Diagramas de classes

O diagrama de classes é essencial para a montagem da versão inicial do código do software. Ele é constituído pelas classes, seus métodos e atributos, além das diversas relações entre elas (herança, dependência, nível de acesso). Então, o diagrama aqui desenvolvido é composto por 10 classes e é apresentado na Figura 4.1 que se segue.

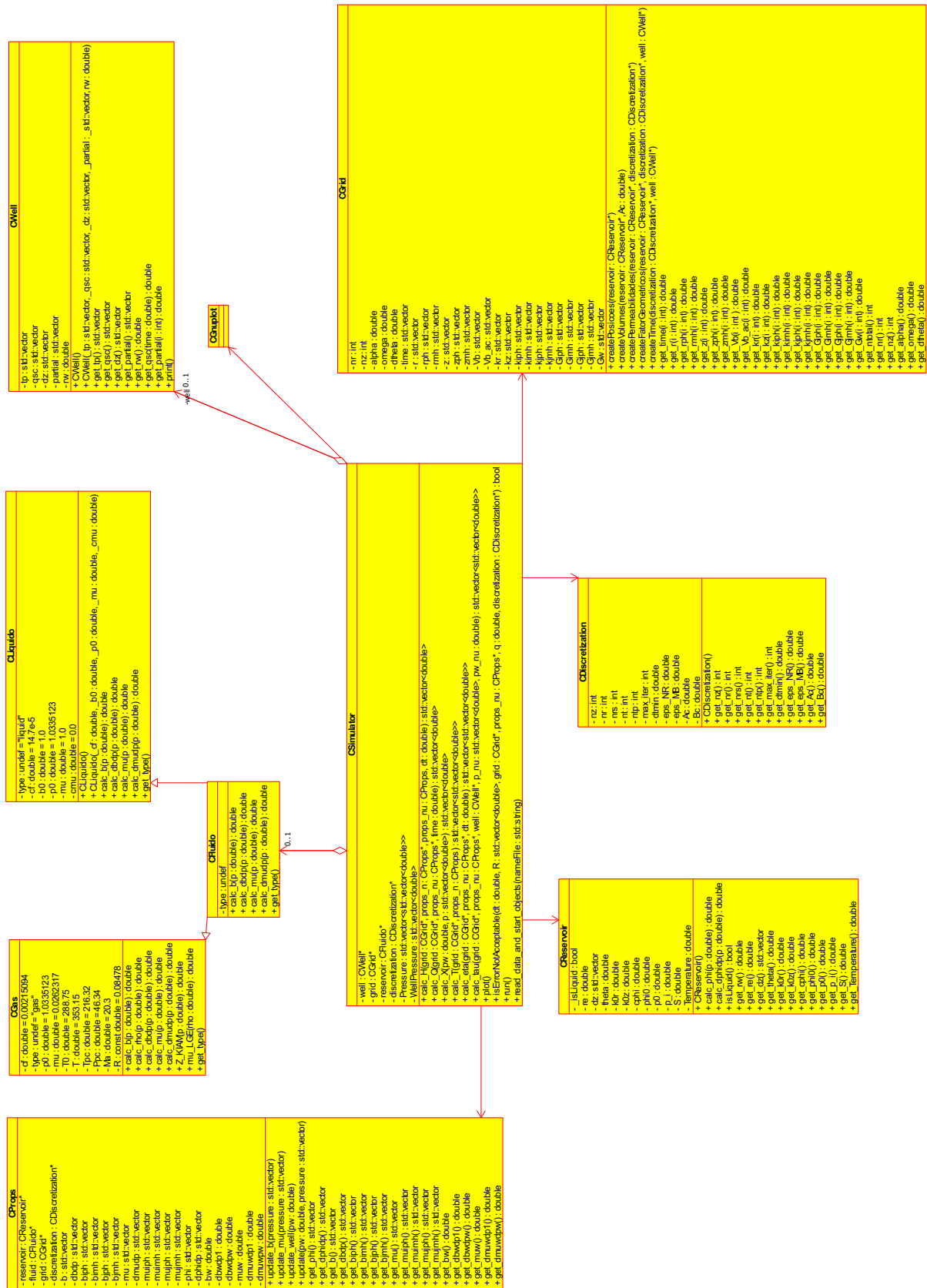


Figura 4.1: Diagrama de classes

4.1.1 Dicionário de classes

- Classe **CGas**: gás que satura o meio poroso, contendo propriedades físicas características. Sua função é fornecer informações para compor um meio poroso saturado. Classe filha de CFluido, ou seja, herda propriedades e métodos da classe mãe, e contém métodos e propriedades próprias. Cabe destacar, fator de compressibilidade e constante universal dos gases.
- Classe **CLiquido**: líquido que satura o meio poroso, contendo propriedades físicas características. Sua função é fornecer informações para compor um meio poroso saturado. Classe filha de CFluido, ou seja, herda propriedades e métodos da classe mãe, e contém métodos e propriedades próprias.
- Classe **CFluido**: classe virtual que representa o fluido que satura o meio poroso. Basicamente, por meio de uma classe virtual, ao se criar uma subclasse é possível torná-la mais específica não sendo necessário reimplementar toda a classe, pois é possível alterar o comportamento pontualmente.
- Classe **CReservoir**: representa uma rocha reservatório com atributos específicos do reservatório, como pressão inicial, raio externo, compressibilidade, porosidade, temperatura, permeabilidade.
- Classe **CProps**: classe que recebe características do fluido e do reservatório e calcula propriedades de interesse. Tudo que foi armazenado é acessado dinamicamente. É a base de cálculo do método numérico por implementar as derivadas e possuir métodos de atualização do conteúdo das células discretizadas.
- Classe **CGrid**: classe que representa o meio poroso como um domínio discretizado, ou seja, fornece o dimensionamento do poço e reservatório no espaço, uma grade propriamente dita. Sua função é identificar os pontos no espaço em que a solução em volumes finitos será calculada.
- Classe **CDiscretization**: armazena propriedades puras da simulação. Dito de outra forma, propriedades da malha que não dependem da tempo e que são estáticas.
- Classe **CWell**: classe que representa o poço com propriedades características.
- Classe **CGnuplot**: classe que fornece os métodos necessários para a geração de gráficos. Sucintamente, o programa externo Gnuplot é uma ferramenta utilizada para criação dos gráficos da distribuição de pressão, em função do tempo obtida pelo simulador para o poço e reservatório.
- Classe **CSimulator**: uma classe que representa o simulador, “cérebro do software”. Ela quem dita as regras e comanda quais ações serão tomadas e em qual ordem. Em destaque, possui o método Run, que dá o pontapé inicial na resolução pelo

método numérico. Como já foi dito, é um método cuja discretização da EBM pode ser resolvida implicitamente, obtendo a distribuição de pressões. Constantemente acessa a Classe CProps com valores em atualização a cada passo de tempo.

4.2 Diagrama de sequência – eventos e mensagens

O diagrama de sequência enfatiza a troca de eventos e mensagens e sua ordem temporal. Contém informações sobre o fluxo de controle do software. Costuma ser montado a partir de um diagrama de caso de uso e estabelece o relacionamento dos atores (usuários e sistemas externos) com alguns objetos do sistema. O diagrama de sequência pode ser geral, englobando todas as operações do sistema ou específico, que enfatiza uma determinada operação.

4.2.1 Diagrama de sequência geral

O diagrama de sequência geral do software é mostrado na Figura 4.2 que se segue:

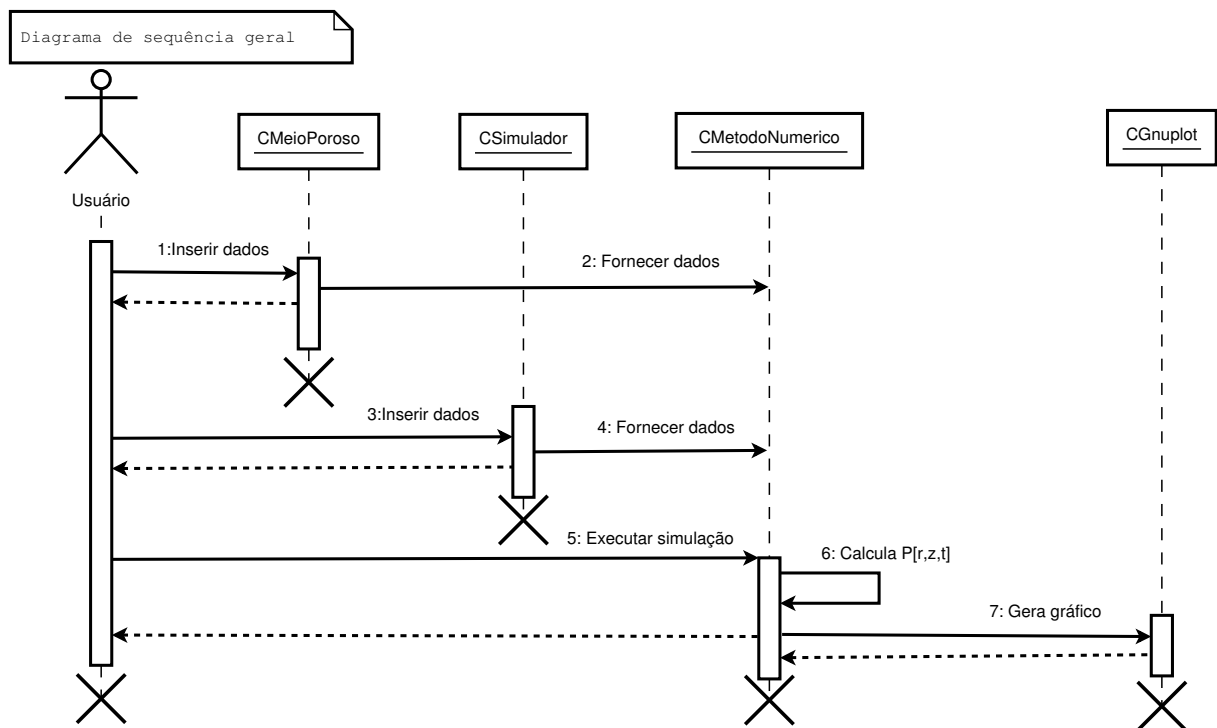


Figura 4.2: Diagrama de sequência geral

4.2.2 Diagrama de sequência específico

O diagrama de sequência específico é mostrado na Figura 4.3 abaixo.

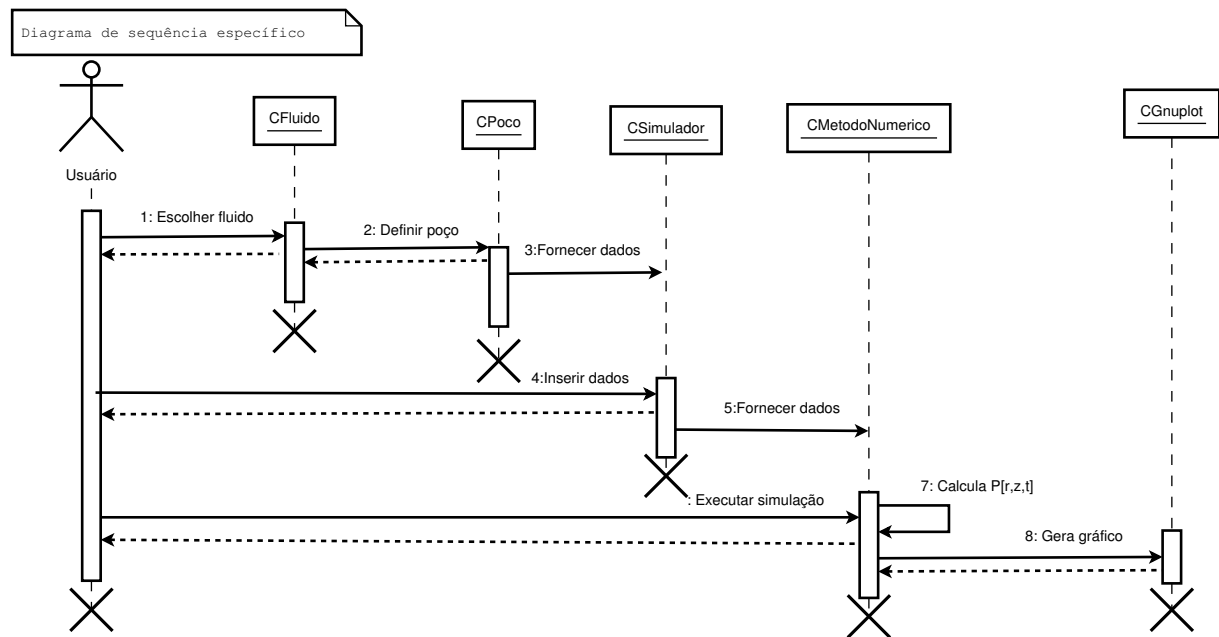


Figura 4.3: Diagrama de sequência específico

4.3 Diagrama de comunicação – colaboração

No diagrama de comunicação o foco é a interação e a troca de mensagens e dados entre os objetos. O usuário está sempre informando ao computador dados que são necessários para o processamento da simulação. Aqui a ênfase é o entendimento das mensagens que chegam e saem de cada objeto.

Veja na Figura 4.3 abaixo o diagrama de comunicação com foco no simulador propriamente dito. As linhas indicam ora criação de objetos ora acesso a funções das classes.

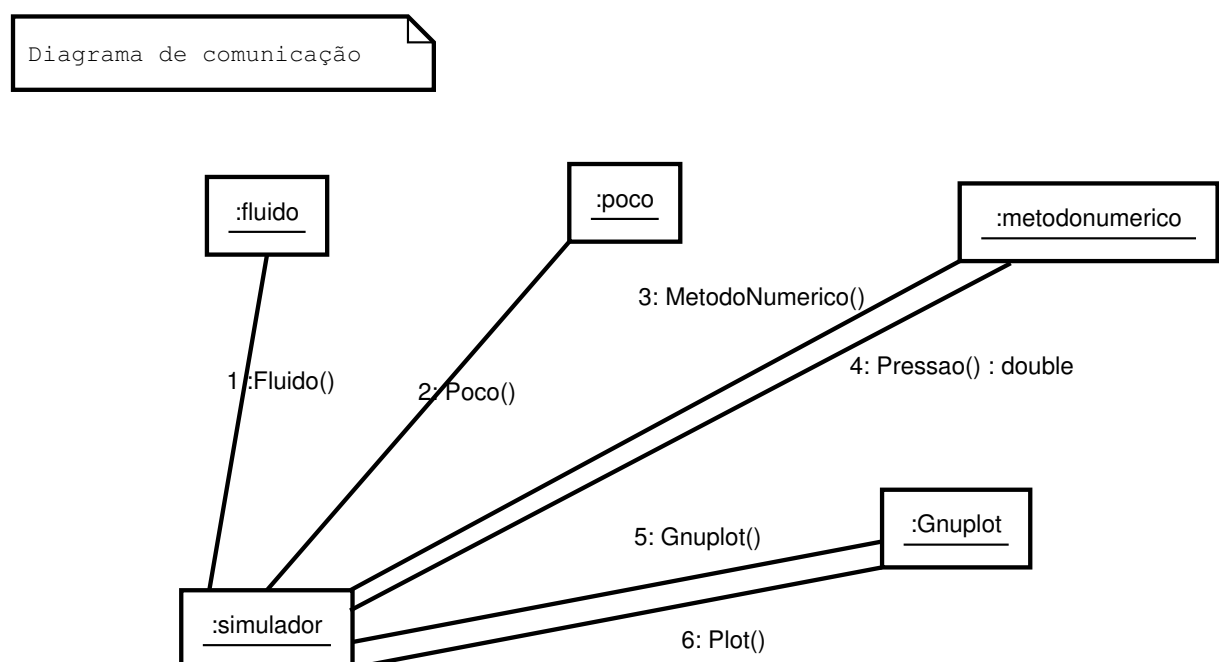


Figura 4.4: Diagrama de comunicação

Por sua vez, nesse segundo diagrama apresentado na Figura 4.3, tem-se a completa comunicação entre os sistemas envolvidos. Observa-se que o primeiro passo é escolher o tipo de fluido, depois construir o poço com zonas abertas ao fluxo ou não. A seguir, fornecer dados ao simulador. Com todos os parâmetros definidos e alocados na memória, o computador processa-os a partir do objeto CMetodoNumerico. A comunicação continua com a exibição dos resultados para o usuário e com o fornecimento deles para o Gnuplot gerar os respectivos gráficos e fornecê-los ao usuário.

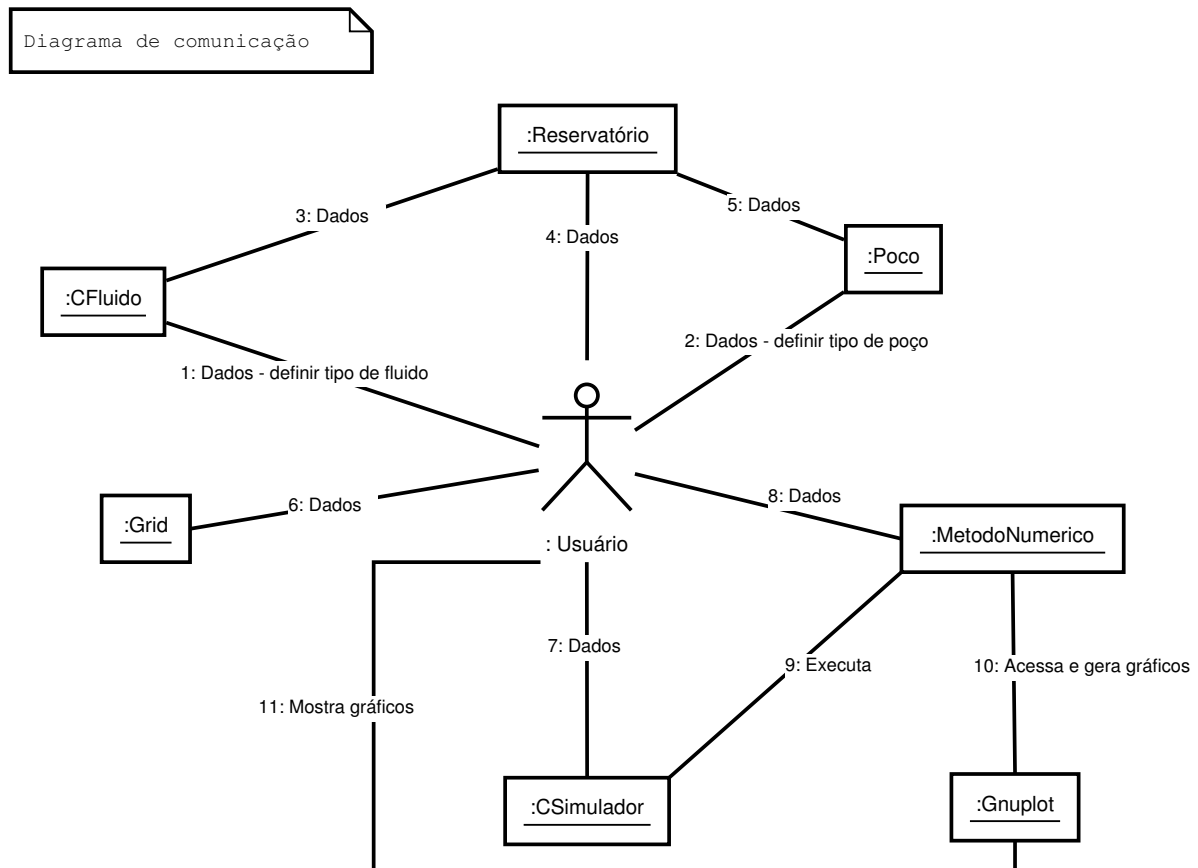


Figura 4.5: Diagrama de comunicação

4.4 Diagrama de máquina de estado

Um diagrama de máquina de estado representa os diversos estados que o objeto assume e os eventos que ocorrem ao longo de sua vida ou mesmo ao longo de um processo (histórico do objeto). É usado para modelar aspectos dinâmicos do objeto. Veja na Figura 4.6 o diagrama de máquina de estado para o objeto CSimulador.

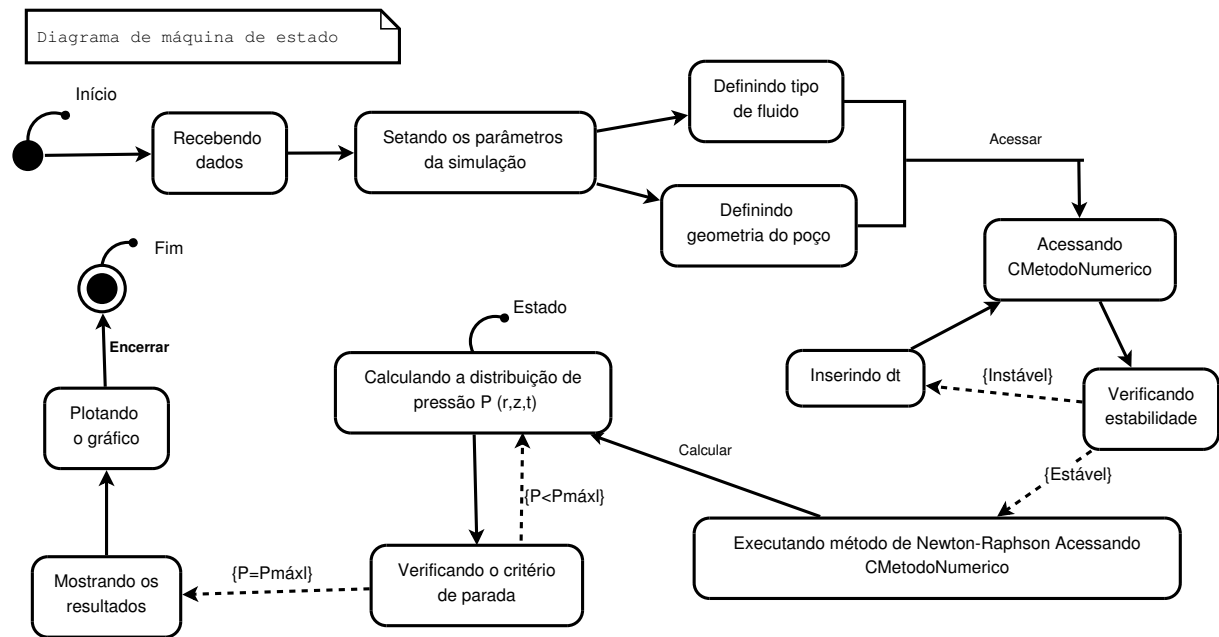


Figura 4.6: Diagrama de máquina de estado

4.5 Diagrama de atividades

Veja na Figura 4.7 que o diagrama de atividades correspondente a uma atividade específica do diagrama de máquina de estado. Nesse caso, “calculando a distribuição de pressão $P(r, z, t)$ ”.

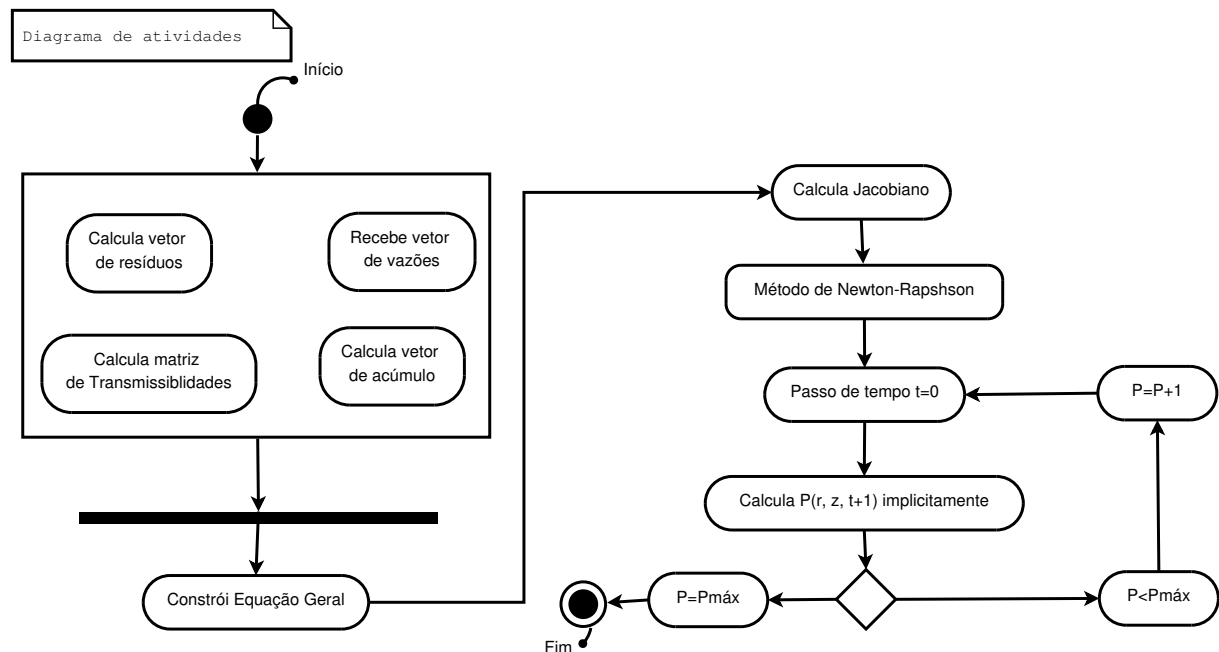


Figura 4.7: Diagrama de atividades

Capítulo 5

Projeto

Neste capítulo do projeto de engenharia veremos questões associadas ao projeto do sistema, incluindo protocolos, recursos, plataformas suportadas, implicações nos diagramas feitos anteriormente, diagramas de componentes e implantação. Na segunda parte revisamos os diagramas levando em conta as decisões do projeto do sistema.

5.1 Projeto do sistema

Depois da análise orientada a objeto desenvolve-se o projeto do sistema, o qual envolve etapas como definição dos protocolos, interface API, uso de recursos, subdivisão do sistema em subsistemas, alocação dos subsistemas ao hardware, seleção das estruturas de controle, seleção das plataformas do sistema, das bibliotecas externas, dos padrões de projeto, além da tomada de decisões conceituais e políticas que formam a infraestrutura do projeto.

A importância de se definir padrões específicos de documentação, nome das classes, padrões de retorno, interface do usuário e características de desempenho constitui-se como uma ferramenta estratégica para resolver o problema, elaborar uma solução e garantir repetibilidade e expansão para problemas similares.

Nessa etapa serão avaliadas algumas características do *software* tais como:

1. Protocolos:

- O programa permite salvar dados em disco no formato aberto, como .txt.
- Será efetuada a entrada de dados via arquivo de texto .txt.
- Neste projeto o software irá se comunicar com o componente externo Gnuplot que gera gráficos.

2. Recursos:

- O programa utilizará uma máquina computacional com HD, CPU, RAM, periféricos, processador, teclado para a entrada de dados e o monitor para a saída de dados.

- O simulador utiliza o programa externo Gnuplot que plota figuras e gráficos.
3. Controle:
- Este software requer um controle sequencial.
4. Plataformas:
- O programa é multiplataforma, o que permite executá-lo em Windows e Mac OS X , mas será desenvolvido na plataforma Windows. A linguagem de software utilizada é a C++ orientada a objeto.
 - Ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual C ++ (MSVC). Um editor de códigos e compilador de diversas linguagens de programação como python, C, C++, C#, desenvolvido pela Microsoft . MSVC é um software proprietário. Originalmente um produto autônomo que mais tarde tornou-se parte do Visual Studio e foi disponibilizado em versões de teste e *freeware*. Ele apresenta ferramentas para desenvolver e depurar código C ++, especialmente código escrito para a API do Windows , DirectX e .NET.
 - O software utilizara a biblioteca externa CGnuplot que permite acesso ao programa Gnuplot. É um utilitário portátil de gráfico baseado em linha de comando para Linux, OS / 2, MS Windows, OSX, VMS e muitas outras plataformas. O código-fonte é protegido por direitos autorais, mas é distribuído gratuitamente.
5. Padrões de projeto:
- Não se aplica para esse caso já que o software foi feito para cunho acadêmico e não empresarial.

5.2 Projeto orientado a objeto – POO

O projeto orientado a objeto é a etapa posterior ao projeto do sistema. Baseia-se na análise, mas considera as decisões do projeto do sistema. Acrescenta a análise desenvolvida e as características da plataforma escolhida (hardware, sistema operacional e linguagem de software). Passa pelo maior detalhamento do funcionamento do software, acrescentando atributos e métodos que envolvem a solução de problemas específicos não identificados durante a análise. Além disso, envolve a otimização da estrutura de dados e dos algoritmos, a minimização do tempo de execução, de memória e de custos.

Exemplo: na análise você define que existe um método para salvar um arquivo em disco, define um atributo nomeDoArquivo, mas não se preocupa com detalhes específicos da linguagem. Já no projeto, você inclui as bibliotecas necessárias para acesso ao disco,

cria um objeto específico para acessar o disco, podendo, portanto, acrescentar novas classes às aquelas desenvolvidas na análise.

Efeitos do projeto no modelo estrutural

- O programa utiliza o HD, o processador e o teclado do computador.
- O Software pode ser executado nas plataformas GNU/Linux ou Windows.
- Existe a necessidade de instalação do software Gnuplot para o funcionamento do programa.
- O código possui comentários com explicações dos algoritmos a serem executados.
- Neste projeto foi feita uma associação entre a biblioteca CGnuplot com as classes CSimulator, que por sua vez associa-se com as classes CReservoir, CDiscretization, CGrid, CWell, CProps, CFluido, que se associam com CGas e CLiquido

Efeitos do projeto no modelo dinâmico

- Não foi realizada nessa etapa do projeto uma vez que os diagramas de sequência, de comunicação, máquina de estado e de atividades serão modificados durante o desenvolvimento do código caso seja necessário.

Efeitos do projeto nos atributos

- Como alguns atributos necessitavam de constante atualização, foi implementado uma função chamada update, que a cada passa de tempo, recalculava as propriedades do sistema reservatório e poço.
- As relações entre classes foram melhoradas e adaptadas em relação à herança entre CFluido com CGas e CLiquido. Basicamente, foi necessário melhor especificar com base nos atributos inerentes de cada uma delas.

Efeitos do projeto nos métodos

- Em virtude de usar leitura de disco, um método de inserção de dados através do teclado foi adicionado.
- A razão da existência do método Run() presente em CSimulador se explica pela intenção em deixar o código mais enxuto e pela intenção de agrupar algoritmos de mesma natureza em um só método. Ele é chamado e governa toda a execução do código.

Efeitos do projeto nas heranças

- Sempre que um ou mais atributos e métodos se repetiam, foi necessário reavaliar o código. Desse modo, o item de ação voltou-se para o diagrama de classes que foi reformulado algumas vezes em subdivisões de classes e criação de novas classes.
- Algumas heranças puderam ser excluídas do diagrama, uma vez que alguns atributos necessários inicialmente puderam ser passados através da chamada das funções/métodos de classes com relações de herança.

Efeitos do projeto nas associações

- Algumas heranças foram trocadas por associações e novas associações foram criadas para relacionamento com novas classes.

Efeitos do projeto nas otimizações

- Logo no início optou-se por pedir todas as informações ao usuário juntas.
- O software tem opção de parada para mudança de valores e depois retomada.
- Pode ser otimizado pela implementação de processamento paralelo a fim de utilizar melhor a capacidade de processamento da máquina.
- Possibilidade de inclusão de bibliotecas otimizadas para resolução do Método de Newton-Raphson e sistema linear.
- A Classe CProps foi criada para reunir alguns atributos que estavam presentes na maioria dos cálculos e que necessitavam de atualizações constantes. Por conta disso eles foram retirados das respectivas classes e implementados em outra.

As dependências dos arquivos e bibliotecas podem ser descritos pelo diagrama de componentes, e as relações e dependências entre o sistema e o hardware podem ser ilustradas com o diagrama de implantação.

5.3 Diagrama de componentes

O diagrama de componentes mostra a forma como os componentes do software se relacionam, suas dependências. Inclui itens como: componentes, subsistemas, executáveis, nós, associações, dependências, generalizações, restrições e notas. Exemplos de componentes são bibliotecas estáticas, bibliotecas dinâmicas, dlls, componentes Java, executáveis, arquivos de disco, código-fonte.

Veja na Figura 5.1 um exemplo de diagrama de componentes. De posse do diagrama de componentes, temos a lista de todos os arquivos necessários para compilar e rodar o software. Por ele, podemos perceber as dependências de cada componente. Por exemplo, o componente CSimulator depende de todos outros para funcionar. E por sua vez, o CFluido para funcionar, depende do CGas ou CLiquido.

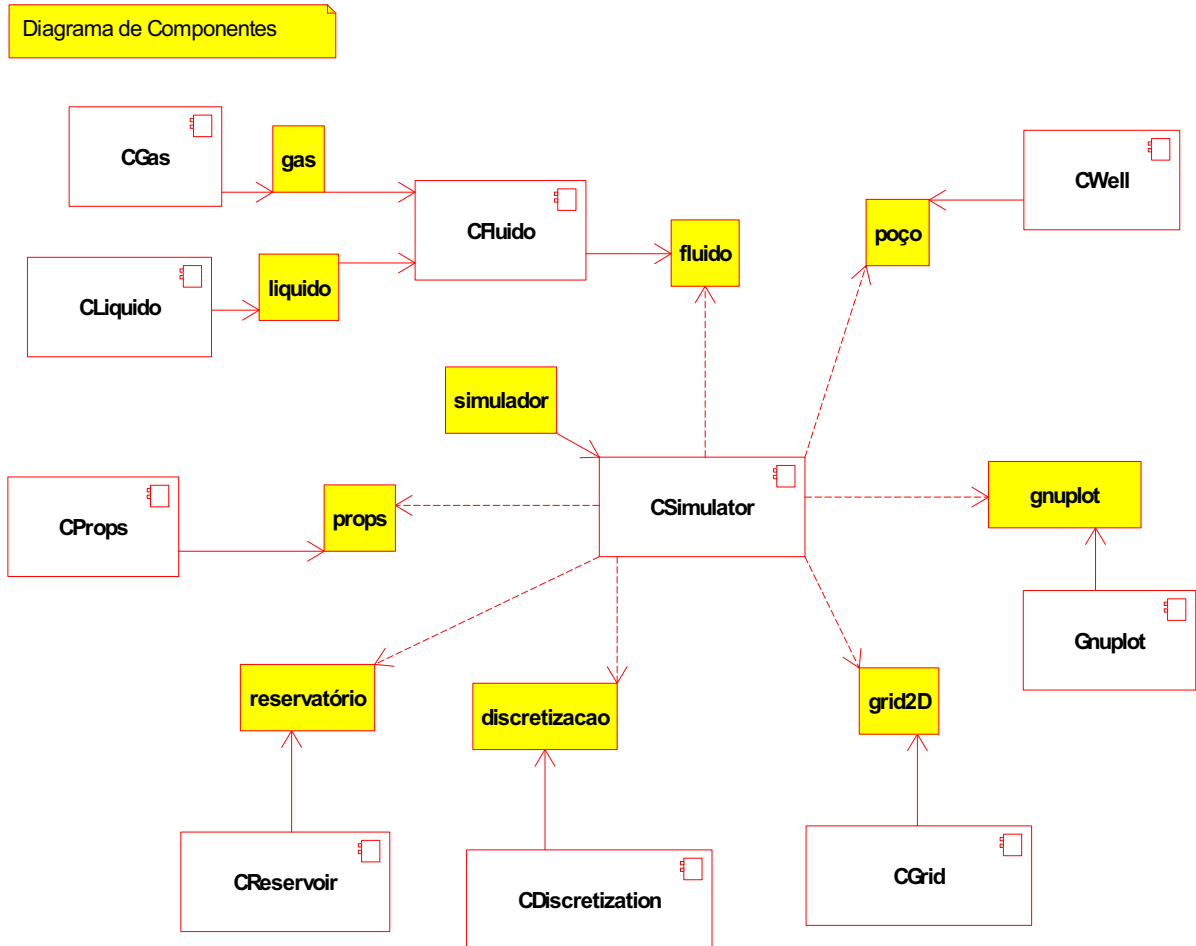


Figura 5.1: Diagrama de componentes

5.4 Diagrama de implantação

O diagrama de implantação é um diagrama de alto nível que inclui relações entre o sistema e o hardware e que se preocupa com os aspectos da arquitetura computacional escolhida. Seu enfoque é o hardware, a configuração dos nós em tempo de execução. Este deve incluir os elementos necessários para que o sistema seja colocado em funcionamento: computador, periféricos, processadores, dispositivos, nós, relacionamentos de dependência, associação, componentes, subsistemas, restrições e notas.

Veja na Figura 5.2 um exemplo de diagrama de implantação utilizado. Para que haja um correto e realístico desempenho da simulação pelo software, é necessário que haja o computador com todos os hardwares requeridos (CPU, RAM, HD) e uma fonte de dados

como dados do poço e dados de reservatório.

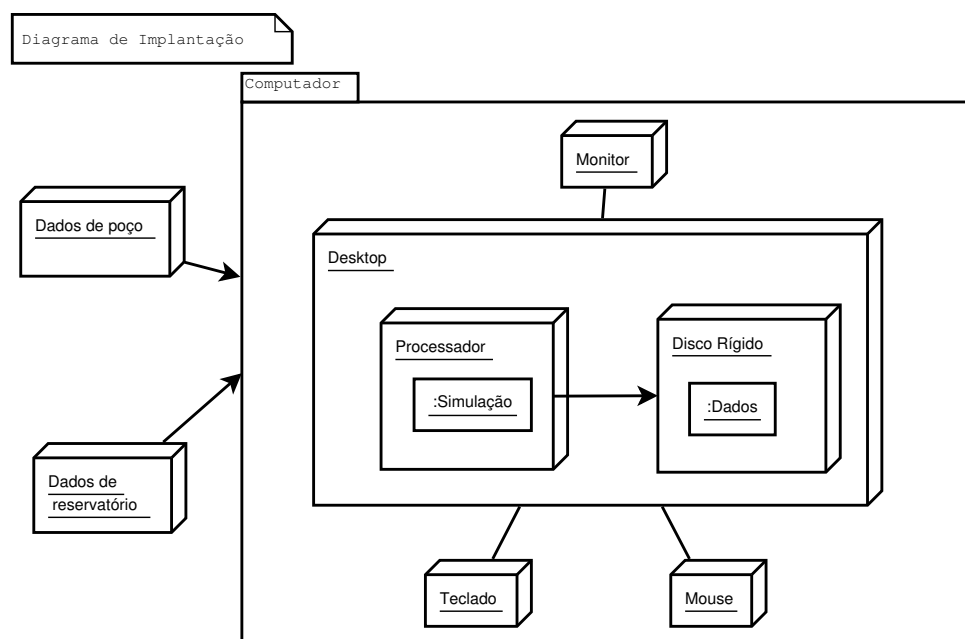


Figura 5.2: Diagrama de implantação

Referências Bibliográficas

- [K. Aziz, 1979] K. Aziz, A. S. (1979). *Petroleum Reservoir Simulation*. Applied Science Publishers, 1 edition. 13, 15
- [Kareem et al., 2015] Kareem, L. A., Iwalewa, T. M., and Al-Marhoun, M. (2015). New explicit correlation for the compressibility factor of natural gas: linearized z-factor isotherms. 6(3):481–492. 13
- [Lee and Eakin, 1966] Lee, A. L., G. M. H. and Eakin, B. E. (1966). The viscosity of natural gases. *Journal of Petroleum Technology*, 18(8):997–1000. 13
- [MacDonald and Coats, 1970] MacDonald, R. and Coats, K. (1970). Methods for numerical simulation of water and gas coning. *Society of Petroleum Engineers Journal - SPE-2796-PA*, 10(4):425–436. 13
- [P., 2014] P., D. L. (2014). *Engenharia de reservatórios : fundamentos*. Elsevier, RiodeJaneiro.9
- [Pico, 2018] Pico, C. E. (2018). *Simulacao numerica de reservatorios* lep18410. Notas de aula LENEP/CCT/UENF, 1. 1, 10, 13
- [ROSA, 2006] ROSA, Adalberto Jose; CARVALHO, R. d. S. X. J. A. D. (2006). Engenharia de Reservatorios de Petroleo. *Interciência, Rio de Janeiro*. 1, 9
- [T. Ertekin, 2001] T. Ertekin, J. H. Abou-Kassem, G. R. K. (2001). Basic Applied Reservoir Simulation. *SPE Textbook Series. Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers*. 15

Capítulo 6

Como modificar o arquivo inputdata

Neste anexo, é apresentado como o usuário deve modificar o arquivo com as propriedades iniciais da simulação.

6.1 Modificando o tipo de fluido

Abaixo é mostrado o arquivo com inputs para o caso do líquido, com 5 camadas de 1 metro cada, e somente a primeira aberta à produção. Para escolher a opção de líquido, é importante modificar a variável do Reservatório “isLiquid” para 1. O líquido recebe 5 propriedades, conforme mostrado abaixo.

```
----- Simulador Monofásico 2D -----  
----- Nicholas e Kevin -----  
-----  
# Poço periodos: 2  
tp: 0 1000    /// tempos de mudança na vazão na superfície [h]  
qsc: 0 -500   /// vazões nos tempos de mudança[m3std/dia]  
nz: 5         /// número de camadas do reservatório  
dz | aberto/fechado /// indicação da camada / aberto = 1; fechado = 0  
1 | 1  
1 | 0  
1 | 0  
1 | 0  
1 | 0  
rw: 0.09486   /// raio do poço  
  
# Reservatório  
isLiquid: 1    /// 1 = líquido; 0 = gás  
re: 3000.0     /// raio externo do reservatório
```

```

theta: 0.52359866666    /// ângulo estudado do reservatorio
k0r: 500    /// permeabilidade horizontal
k0z: 100    /// permeabilidade vertical
cphi: 1.0e-4    /// compressibilidade da formação
phi0: 0.2    /// porosidade inicial
p0: 1.033512    /// pressão de referência
p_i: 350.0    /// pressão inicial
S: 0    /// fator de película
Temperature: 353.15    /// temperatura do reservatorio

# Discretização
nr: 20    /// quantidade de volumes na largura
nrs: 1    /// quantidade de volumes na região danificada
nt: 100    /// quantidade de tempos
ntp: 100    /// quantidade de tempos
max_iter: 24    /// número máximo de iterações
dtmin: 1.0e-4    /// passo de tempo mínimo[h]
eps_NR: 1.0e-6    /// tolerância de convergência dos resíduos
eps_MB: 1.0e-8    /// tolerância de convergência do balanço de materiais
Ac: 24    /// constante de conversão de unidades acúmulo (ANP)
Bc: 0.0083621472    /// constante de conversão de unidades fluxo (ANP)

# Liquido
cf: 14.7e-5    /// compressibilidade do fluido[cm2/kgf]
b0: 1.0    /// inverso do fator volume formação na pressão p0 [m3std/m3]
p0: 1.0335123    /// pressão de referência [kgf/cm2]
mu: 1.0    /// viscosidade [cp]
cmu: 0.0

```

Abaixo é mostrado o caso de gás, que recebe 7 propriedades.

```

----- Simulador Monofásico 2D -----
----- Nicholas e Kevin -----
-----

# Poço periodos: 2
tp: 0 1000    /// tempos de mudança na vazão na superfície [h]
qsc: 0 -500    /// vazões nos tempos de mudança[m3std/dia]
nz: 5    /// número de camadas do reservatório
dz | aberto/fechado    /// indicação da camada / aberto = 1; fechado = 0

```

```

1 | 1
1 | 0
1 | 0
1 | 0
1 | 0
rw: 0.09486    /// raio do poço

# Reservatório
isLiquid: 1    /// 1 = líquido; 0 = gás
re: 3000.0     /// raio externo do reservatório
theta: 0.52359866666    /// ângulo estudado do reservatorio
k0r: 500       /// permeabilidade horizontal
k0z: 100       /// permeabilidade vertical
cphi: 1.0e-4    /// compressibilidade da formação
phi0: 0.2      /// porosidade inicial
p0: 1.033512   /// pressão de referência
p_i: 350.0     /// pressão inicial
S: 0           /// fator de película
Temperature: 353.15    /// temperatura do reservatorio

# Discretização
nr: 20         /// quantidade de volumes na largura
nrs: 1         /// quantidade de volumes na região danificada
nt: 100        /// quantidade de tempos
ntp: 100       /// quantidade de tempos
max_iter: 24   /// número máximo de iterações
dtmin: 1.0e-4  /// passo de tempo mínimo[h]
eps_NR: 1.0e-6 /// tolerância de convergência dos resíduos
eps_MB: 1.0e-8 /// tolerância de convergência do balanço de materiais
Ac: 24         /// constante de conversão de unidades acúmulo (ANP)
Bc: 0.0083621472    /// constante de conversão de unidades fluxo (ANP)

# Gas
cf: 0.00215094    /// compressibilidade do fluido[ $cm^2/kgf$ ]
p0: 1.08335123    /// pressão padrão [ $kgf/cm^2$ ]
mu: 0.0262317     /// viscosidade na condição inicial [cp]
T0: 288.75        /// temperatura absoluta padrão [K]
Tpc: 216.32       /// temperatura pseudocrítica [K]
Ppc: 46.34        /// pressão pseudocrítica [ $kgf/cm^2$ ]

```

```
Ma: 20.3      /// massa molecular aparente [kg/kg-mol]
```

6.2 Modificando as camadas do reservatório

Para modificar as camadas do reservatório, é necessário alterar os valores de “nz” e “dz | aberto/fechado”, onde “nz” é o número de camadas, e “dz | aberto/fechado” são valores adicionados nas linhas posteriores, com a espessura e se está aberto ou fechado.

Por exemplo, um reservatório com 2 camadas, a primeira fechada com 1 metro, e a segunda aberta com 3 metros, fica:

```
nz: 2          /// número de camadas do reservatório
dz | aberto/fechado  /// indicação da camada / aberto = 1; fechado = 0
1 | 0
3 | 1
```

O simulador recebe o valor de “aberto/fechado” e aceita valores entre 0 e 1, onde 0 é totalmente fechado, e 1 totalmente aberto à produção.

Índice Remissivo

A

Análise orientada a objeto, 19

AOO, 19

Associações, 29

atributos, 28

C

Casos de uso, 5

colaboração, 23

comunicação, 23

Controle, 27

D

Diagrama de colaboração, 23

Diagrama de componentes, 29

Diagrama de execução, 30

Diagrama de máquina de estado, 24

Diagrama de sequência, 22

E

Efeitos do projeto nas associações, 29

Efeitos do projeto nas heranças, 29

Efeitos do projeto nos métodos, 28

Elaboração, 8

estado, 24

Eventos, 22

H

Heranças, 29

heranças, 29

M

Mensagens, 22

métodos, 28

modelo, 28

O

otimizações, 29

P

Plataformas, 27

POO, 27

Projeto do sistema, 26

Projeto orientado a objeto, 27

Protocolos, 26

R

Recursos, 26