

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

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE COM INTERFACE GRÁFICA
AMIGÁVEL PARA SIMULAÇÃO DA CONDUÇÃO DE CALOR EM
OBJETOS 3D COM GEOMETRIA COMPLEXA: APLICAÇÕES À
ENGENHARIA DE PETRÓLEO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
PROJETO DE ENGENHARIA

Nicholas de Almeida Pinto

Macaé - RJ

Junho - 2022

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE COM INTERFACE GRÁFICA
AMIGÁVEL PARA SIMULAÇÃO DA CONDUÇÃO DE CALOR EM
OBJETOS 3D COM GEOMETRIA COMPLEXA: APLICAÇÕES À
ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Nicholas de Almeida Pinto

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro de Exploração e Produção de Petróleo.

Orientador: André Duarte Bueno, D.Sc.

Co-Orientador: Guilherme Rodrigues Lima, D.Sc.

Macaé - RJ
Junho - 2022

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE COM INTERFACE GRÁFICA
AMIGÁVEL PARA SIMULAÇÃO DA CONDUÇÃO DE CALOR EM
OBJETOS 3D COM GEOMETRIA COMPLEXA: APLICAÇÕES À
ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Nicholas de Almeida Pinto

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro de Exploração e Produção de Petróleo.

Aprovada em 15 de Junho de 2022.

Comissão Examinadora:

Prof. Fernando Diogo de Siqueira (D.Sc) - LENEP/UENF

Prof. José Ricardo Siqueira (D.Sc) - LAMET/UENF

Prof. Nivaldo Silveira Ferreira (D.Sc) - LAMET/UENF

Prof. André Duarte Bueno (D.Sc) - LENEP/UENF

Prof. Guilherme Rodrigues Lima (D.Sc) - UFES

Dedico este trabalho aos meus pais, Heleno e Ana Lúcia, à minha irmã Gabriela, e aos meus amigos por todo o suporte e incentivo para construir este projeto.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Heleno de Almeida Pinto e Ana Lúcia Santa Rosa de Almeida Pinto por sempre incentivarem meu estudo, apoiando completamente meu ingresso numa universidade pública de alto nível e ir para longe de casa.

Agradeço à minha irmã Gabriela de Almeida Pinto pelas conversas e por ser minha amiga. Aos meus amigos de graduação, em especial ao Lucas Tavares, Kevin Alves Bar-telega, Letícia Sakai e Carol Bastos, por todos os bons momentos que passei com eles.

Agradeço a todos os professores da graduação, em especial aos professores que foram rigorosos, pois engenharia é um assunto complexo e importante. Em especial aos professores André Duarte Bueno, Carlos Pico, Adolfo Puime, Severiano, Yrma, José Ricardo e Nivaldo Silveira. Obrigado!

Agradeço ao meu líder no estágio Lorenzzo Rodrigues, pelos suportes e ensinamentos, tanto na parte prática do trabalho, quanto na parte humana. Dando dicas e direções para o trabalho tomar um rumo útil e profissional.

Ao meu orientador, professor André Duarte Bueno, por ensinar não só sobre a disciplina de C++, mas sobre como ser engenheiro. Também pelas dicas e sugestões para melhorar o trabalho desenvolvido, sempre disposto a ajudar e recomendar um novo desafio.

Ao meu co-orientador, professor Guilherme Rodrigues Lima, por aceitar o desafio do projeto, sugerindo pontos de melhoria, alterações, e correções.

Por fim, agradeço aos professores da banca pela avaliação deste projeto, e pelas sugestões de correção.

"But for us, it's different. Look again at that dot. That's here. That's home. That's us. On it everyone you love, everyone you know, everyone you ever heard of, every human being who ever was, lived out their lives. The aggregate of our joy and suffering, thousands of confident religions, ideologies, and economic doctrines, every hunter and forager, every hero and coward, every creator and destroyer of civilization, every king and peasant, every young couple in love, every mother and father, hopeful child, inventor and explorer, every teacher of morals, every corrupt politician, every "superstar", every "supreme leader", every saint and sinner in the history of our species lived there - on a mote of dust suspended in sunbeam."

Carl Sagan, Pale Blue Dot.

Resumo

O presente trabalho consiste em um projeto de engenharia completo, cujo objetivo é estudar e juntar diversas áreas da engenharia para construir um *software* de condução de calor tridimensional, modelado por diferenças finitas e programado em C++.

A equação da difusão de calor foi discretizada pelo método *Backward Time Centered Space* (BTCS) e o sistema de equações foi resolvido pelo método de Gauss-Jacobi. A modelagem foi realizada de tal forma, que é permitido um objeto ser constituído por vários materiais com propriedades termofísicas diferentes. A condutividade térmica, em função da temperatura, pode ser definida por modelos de correlação ou interpolação linear.

O programa foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C++, com o paradigma da Programação Orientada a Objeto - POO. Foram utilizados conceitos de paralelismo e *multithreading* para dividir os cálculos e tornar o simulador mais rápido. A interface gráfica foi implementada utilizando a biblioteca gráfica Qt e o ambiente de desenvolvimento QT-Creator, de forma que foi desenvolvida uma interface gráfica amigável para facilitar a utilização do software em atividades de ensino. Como complemento, foram programados algoritmos de renderização 3D, para facilitar a visualização dos objetos, e mecanismos para geração de resultados no formato de arquivos pdf.

O software tem um cunho educacional, com o objetivo de auxiliar o ensino de transferência de calor e desenvolver estudos sobre o comportamento da transferência de calor em diversas situações educativas aplicadas a engenharia de petróleo.

Este documento mostra a estrutura e sequência de um projeto de engenharia desenvolvido com metodologias ágeis e sistema de controle de versões (git/github), comuns no mercado de trabalho. O software pode ser obtido neste endereço:

<https://github.com/NicholasAlmeidaPinto/Projeto-TCC-SimuladorDifusaoTermica>.

Palavras-chaves: Transferência de calor. Modelagem numérica. Diferenças finitas. BTCS. Gauss-Jacobi. Linguagem C++. Programação orientada ao objeto. Qt Creator. Renderização 3D.

Listas de Figuras

1.1	Etapas para o desenvolvimento do software - <i>projeto de engenharia</i>	27
2.1	Diagrama de caso de uso geral	34
2.2	Diagrama de caso de uso específico: adição de novo material e interpolação	35
3.1	Tipos de malha, (a) bloco-centrado e (b) ponto-distribuído	39
3.2	Representação de condutividade térmica em série	42
3.3	Malha utilizada para calcular a temperatura de um ponto, onde cada ponto é o centro dos blocos	43
3.4	Análise da fronteira de Neumann	44
3.5	Processamento serial	48
3.6	Processamento paralelo	49
3.7	Ilustração dos três casos de paralelismo implementados para duas camadas com 9 células cada, e um processador com duas <i>thread</i>	50
3.8	(a) Observador alinhado com uma das faces do cubo. (b) observador não está alinhado e não foram removidas arestas ocultas. O cérebro consegue interpretar que é um objeto 3D, mas fica confuso entre os casos (c) e (d) .	51
3.9	(a) o cubo está com ângulos nulos. (b) os ângulos α e β estão com valor de 0.1 radianos	52
3.10	Mesmo desenho da Figura 3.9, mas agora renderizando a partir de triângulos	52
3.11	(a) mostra um caso onde a normal é na direção do leitor e (b) mostra um caso onde a normal é para dentro da folha	53
3.12	Diagrama de Pacotes	55
4.1	Diagrama de classes	59
4.2	Diagrama de sequência geral	60
4.3	Diagrama de sequência da importação de um novo material	61
4.4	Diagrama de sequência da análise de resultados	62
4.5	Diagrama de comunicação	63
4.6	Diagrama de máquina de estado para a classe CSimuladorTemperatura .	64
4.7	Diagrama de atividades para o algoritmo de renderização CRender3D Renderizacao()	65

5.1	Diagrama de componentes	68
5.2	Diagrama de implementação	69
6.1	Versão 0.1, simples e utilizando a biblioteca <i>SFML</i>	72
6.2	Versão 0.2, simples, mas contendo uma segunda janela dos materiais	73
6.3	Versão 0.3, completa e complexa, mas muito lenta	74
6.4	<i>Qt Creator</i>	75
6.5	Versão 0.4, inicial e incompleta, mas utilizando a biblioteca <i>Qt</i>	76
6.6	Versão 0.5, final. Na direita é apresentado a visualização 3D do objeto desenhado	77
8.1	Aplicação do problema unidimensional no simulador: (a) tempo inicial e (b) após 100 segundos	152
8.2	Comparação da solução da equação de calor com o resultado do simulador	155
8.3	Resultados da simulação com renderização 3D: (a) tempo inicial, (b) após 1 hora e (c) a renderização 3D	157
8.4	Gráficos da simulação para o tempo de 1 hora definidos pelo ponto de estudo: (a) é a temperatura ao longo do tempo, (b) é a temperatura ao longo da horizontal e (c) a temperatura ao longo da vertical	158
8.5	Resultados da simulação do primeiro modelo <i>five-spot</i> após 1 hora: (a) tempo inicial e (b) após 1 hora	159
8.6	Gráficos da simulação do primeiro modelo <i>five-spot</i> : (a) temperatura ao longo da horizontal de estudo, e (b) a temperatura ao longo da vertical . .	160
8.7	Resultados da simulação do segundo modelo <i>five-spot</i> após 128 horas: (a) tempo inicial, (b) após 128 horas e (c) renderização 3D	161
8.8	Gráficos da simulação do segundo modelo <i>five-spot</i> : (a) temperatura ao longo da horizontal, (b) ao longo da vertical e (c) ao longo do tempo . .	162
8.9	Modelo 1 de injeção térmica em reservatório: esquerda mostra a distribuição dos materiais, e a direita mostra a temperatura	163
8.10	Modelo 1 de injeção térmica em reservatório após 4.000 segundos	164
8.11	Graficos mostrando a variação de temperatura na região próxima ao poço. Esquerda é a temperatura ao longo da horizontal, e à direita é ao longo da vertical	164
8.12	Tempo inicial da simulação. Na esquerda, o cinza representa o poço, azul a água e o amarelo, arenito. Na direita, é mostrado as temperaturas	165
8.13	Evolução da simulação. Tempo de 1.200 segundos	166
8.14	Tempo final de 4.100 segundos	167
8.15	Gráficos do tempo final de 4.100 segundos	167
8.16	Interior de um <i>notebook</i> , apresentando o <i>heatpipe</i> , que é a barra de cobre que cruza a GPU e CPU, e resfria na ventoinha	168

8.17	Simulação do sistema de resfriamento do notebook após chegar ao período permanente	169
8.18	Interior de um <i>notebook</i> , apresentando o <i>heatpipe</i> , que é a barra de cobre que cruza a GPU e CPU, e resfria na ventoinha	169
9.1	Logo e documentação do <i>software</i>	172
9.2	Código fonte da classe CSimuladorTemperatura, no Doxygen	172
10.1	Imagen da Interface Gráfica	176
10.2	Adicionar um material no simulador: seleciona Arquivo, Import material, euUma janela será aberta para o usuário escolher o material	178
A.1	Principais disciplinas do curso relacionadas a Transferência de Calor	186

Lista de Tabelas

2.1	Características básicas do programa	30
2.2	Exemplo de caso de uso	33
8.1	Tabela com as propriedades termofísicas do modelo de validação	155
8.2	Tabela com propriedades termofísicas do arenito e da água	156
8.3	Tabela com propriedades termofísicas do arenito com água	156
8.4	Tabela com as propriedades termofísicas do modelo 1 - Ferro	162
8.5	Tabela com as propriedades termofísicas do modelo do <i>notebook</i> - Cobre . .	168

Sumário

1	Introdução	23
1.1	Escopo do problema	23
1.2	Objetivos	25
1.3	Metodologia utilizada	26
2	Concepção	29
2.1	Características gerais	29
2.2	Especificação	30
2.3	Requisitos	31
2.3.1	Requisitos funcionais	31
2.3.2	Requisitos não funcionais	32
2.4	Casos de uso	33
2.4.1	Diagrama de caso de uso geral	33
2.4.2	Diagrama de caso de uso específico	34
3	Elaboração	37
3.1	Análise de domínio	37
3.2	Formulação modelos teóricos	38
3.2.1	Termos e Unidades	38
3.2.2	Formulação teórica	39
3.2.3	Condutividade térmica	41
3.2.4	Condição de fronteira	44
3.2.5	Demonstrações matemáticas	45
3.2.6	Condutividade térmica variável	47
3.3	Formulação modelos computacionais	48
3.3.1	O que é processamento paralelo?	48
3.3.2	<i>Processamento paralelo com múltiplas-threads - multi-thread</i>	49
3.3.3	Renderização 3D	51
3.4	Identificação de pacotes	54
3.5	Diagrama de pacotes	54

4 Análise Orientada a Objeto	57
4.1 Dicionário das classes	57
4.2 Diagrama de sequência	59
4.2.1 Diagrama de sequência - cenário geral	59
4.2.2 Diagrama de sequência - adicionando novo material/correlação . . .	60
4.2.3 Diagrama de sequência - análise de resultados	61
4.3 Diagrama de comunicação	62
4.4 Diagrama de máquina de estado	63
4.5 Diagrama de atividades	64
5 Projeto	67
5.1 Projeto do sistema	67
5.2 Diagrama de componentes	68
5.3 Diagrama de implementação	68
6 Ciclos de Planejamento/Detalhamento	71
6.1 Versão 0.1 - Uso modo terminal e biblioteca SFML para saída gráfica . . .	71
6.2 Versão 0.2 - Adição de visualização para os tipos de materiais	72
6.3 Versão 0.3 - Adição de atalhos na tela	73
6.4 Versão 0.4 - Mudança para biblioteca Qt	74
6.5 Versão 0.5 - Melhorias na interface gráfica - usabilidade	76
7 Ciclos Construção - Implementação	79
7.1 Versão 0.3 - Código fonte - SFML	79
7.2 Versão 0.5 - Código fonte - Qt	91
8 Resultados	151
8.1 Validação do simulador	151
8.2 Injeção de calor em reservatório	155
8.3 Injeção de calor em reservatório - modelo five-spot	159
8.4 Injeção de calor em reservatório - modelo 1	162
8.5 Injeção de calor em reservatório - modelo 2	165
8.6 Resfriamento de processadores	168
9 Documentação	171
9.1 Documentação do usuário	171
9.2 Documentação do desenvolvedor	171
10 Manual do Usuário	175
10.1 Instalação	175
10.1.1 Dependências	175
10.2 Interface gráfica	175

10.3 Como adicionar materiais	177
10.3.1 Método da correlação ou constante	178
10.3.2 Método de interpolação	178
10.4 Como gerar relatório em PDF	179
Referências Bibliográficas	182
A Disciplinas Relacionadas a Transferência de Calor	185

Capítulo 1

Introdução

1.1 Escopo do problema

Transferência de calor é uma das principais áreas da Física¹ e da Engenharia. Seu comportamento foi especulado desde os primeiros filósofos. Aristóteles formula a teoria da matéria ser constituída por quatro elementos: o ar, a água, a terra e o fogo. Os estudos de transferência de calor tiveram grande ascensão no período de 1600 e 1800, sendo, posteriormente, dominados. Estes estudos contaram com a contribuição científica de diversos grandes nomes da física, como Newton e Fourier (FOURIER, 1822).

"Aplicação da ciência e matemática através da qual as propriedades da matéria e as fontes de energia são tornadas úteis às pessoas (Dic. Merriam-Webster, 2001)."

É por isso que todos os cursos de engenharia incluem, no seu ciclo básico, um conjunto de disciplinas de matemática, física e química que possibilitam o entendimento dos problemas associados a temperatura, o efeito da temperatura nos materiais e nos fenômenos estudados. Entre as suas disciplinas obrigatórias, podemos citar as disciplinas de materiais, física, termodinâmica², transferência de calor, algoritmos/programação e cálculo numérico. São disciplinas necessárias para garantir os conhecimentos mínimos para lidar com o desenvolvimento de novos produtos.

Muitos destes conceitos são apresentados para casos simplificados, unidimensionais e para funções bem comportadas. Isto permite ao aluno encontrar as soluções, plotar gráficos e analisar o comportamento dos sistemas em estudo.

Na prática, soluções analíticas para a condução de calor em regime transiente são obtidas para casos unidimensionais, com condições de contorno e iniciais bem definidas, e com propriedades dos materiais constantes.

¹Disponível em <<http://lattes.cnpq.br/documents/11871/24930/TabeladeAreasdoConhecimento.pdf/d192ff6b-3e0a-4074-a74d-c280521bd5f7>>

²opcional em alguns cursos de engenharia

Para resolver problemas com objetos em duas ou três dimensões, com geometria complexa e em regime transiente é necessário, na maior parte dos casos, a utilização da modelagem numérica computacional. A mesma demanda conhecimentos associados ao cálculo numérico, algoritmos, modelagem computacional e desenvolvimento de software. Por isso os cursos de engenharia incluem também disciplinas vinculadas às ciências da computação.

Na indústria do petróleo os conhecimentos dos fenômenos da transferência de calor são fundamentais, seja na etapa de exploração ou na etapa de produção de petróleo.

Na exploração é buscado um óleo maturado sob temperaturas entre 65°C e 165°C, pois acima de 180°C, é propiciada a formação de gases leves, e acima de 210°C, a formação de grafite, (THOMAS, 2004). Essas temperaturas são obtidas devido ao soterramento da matéria orgânica e pela proximidade com o manto terrestre.

Na perfuração estão envolvidos conceitos de transferência de calor no contato broca substrato, na cura do concreto, no controle das propriedades do fluido de perfuração, e em diversos equipamentos da sonda.

Na produção são utilizados trocadores de calor nas plataformas para auxiliar nas separações e no resfriamento do óleo para armazenamento.

Na engenharia de reservatórios, é utilizado vapor de água para aquecer o petróleo no reservatório como método de recuperação avançada (ROSA *et al.*, 2006), com o objetivo de diminuir a viscosidade do óleo e facilitar seu escoamento.

Desta forma, torna-se clara a importância do estudo da condução ou difusão de calor em regime transiente, em objetos 3D com geometria complexa e constituído por diversos materiais com propriedades físicas variáveis.

Conforme a complexidade do problema for evoluindo, os cálculos exigem cada vez mais poder de processamento dos computadores, os quais, atualmente, possuem diversos núcleos lógicos capazes de resolverem cálculos independentemente, acelerando as simulações. Para permitir as divisões das tarefas para os processadores, é utilizada uma linguagem de programação de alto desempenho e com capacidade de programação paralela ou concorrente.

Neste projeto educacional, foi utilizado o método BTCS (*Backward Time, Centered Space*) para modelar a Equação do Calor. Para resolver o sistema implícito, foi utilizado o método iterativo de Gauss-Jacobi, e com condições de contorno de Neumann. A condição de contorno é aplicada em todo o sistema, sendo avaliada em cada iteração se a célula computacional está na fronteira do objeto ou não. Isto permite que o usuário possa simular objetos com qualquer formato.

Além disso, os cálculos da simulação são divididos em operações que podem ser resolvidas independentemente e separadamente, e cada operação é direcionada para um núcleo do processador, processo este chamado de *multithreading*, e que acelera em muitas vezes a velocidade das simulações.

Por fim, o ensino de engenharia pode ser aperfeiçoado com a utilização de *softwares*

livres, que abordem álgebra, modelagem numérica, programação orientada ao objeto, além do problema físico em si.

1.2 Objetivos

O objetivo deste projeto de engenharia foi desenvolver um programa educacional que simula o processo de condução tridimensional de calor, no regime transiente, utilizando métodos numéricos, programação orientada ao objeto com a linguagem C++, mecanismos de paralelismos e *multithreading*, além de renderização 3D.

O *software* deve resolver problemas de condução de calor em objetos 3D, constituídos por qualquer materiais com condutividade térmica dependente da temperatura. O software terá interface de usuário amigável e renderização 3D, permitindo a visualização do problema.

Os principais tópicos envolvidos neste projeto são o desenvolvimento de:

- Banco de dados de propriedades termofísicas: a partir da literatura, definir padrões para as curvas de propriedades térmicas em função da temperatura e então montar uma estrutura de diretórios com propriedades de materiais conhecidos, normalmente utilizados em engenharia de petróleo. As propriedades térmicas poderão ser obtidas em laboratório, adicionadas ao *software* e utilizados para simulação. As propriedades podem ser calculadas por métodos de correlação ou por interpolação linear.
- Transferência de calor: entender as equações físicas, como o calor é transferido em objetos com diversos formatos e composto por diferentes materiais, com propriedades termofísicas dependentes da temperatura.
- Modelagem numérica: solução da equação diferencial da condução ou difusão de calor por meio de diferenças finitas com o método implícito BTCS e com condições de contorno de Neumann, que podem ser aplicadas em todo o sistema, permitindo geometrias 3D complexas. Além disso, devido à complexidade de encontrar uma solução utilizando sistemas matriciais é utilizado um método iterativo para obter o resultado aproximado do problema. Por meio da utilização e combinação dessas ferramentas, é possível resolver diversos problemas de condução de calor, especialmente a solução simultânea de casos isolados, e objetos com grandes regiões vazias (como porcas ou tubos).
- Programação em C++: por meio da orientação ao objeto em C++, o problema pode ser dividido em classes, paradigma este que melhorou o controle e organização das etapas de desenvolvimento do software, além de facilitar futuras adaptações e incrementos no simulador. Além disto, esta linguagem possui bibliotecas que auxiliam a

utilização de paralelismos e *multithreading* e o desenvolvimento de interface gráfica amigável.

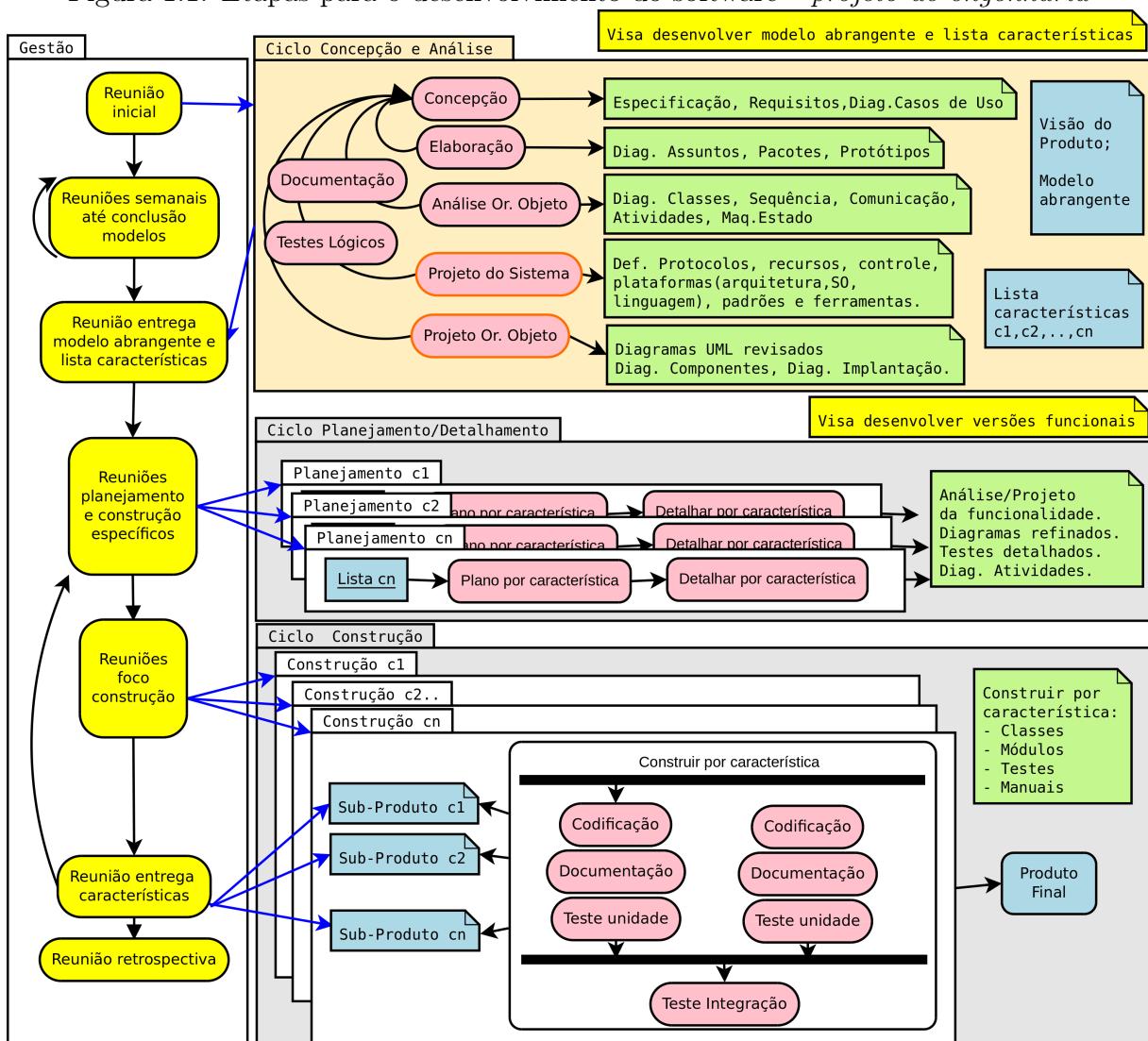
- Interface do usuário: com integração total ao simulador a interface gráfica permite que o usuário tenha liberdade para modificar as propriedades da simulação. Com a implementação de renderização 3D, é possível visualizar o objeto por diferentes ângulos.

1.3 Metodologia utilizada

O software a ser desenvolvido utiliza a metodologia de engenharia de software apresentada pelo Prof. André Bueno na disciplina "Programação Orientada a Objeto em C++" e ilustrado na Figura 1.1. Note que o "Ciclo de Concepção e Análise" é composto por diversas partes representadas neste trabalho em diferentes capítulos. Os "Ciclos de Planejamento/Detalhamento" e "Ciclo Construção", envolvem a construção das diferentes versões do software e serão brevemente descritos no capítulo de Projeto.

Esta metodologia é utilizada nas disciplinas:

- LEP01447 : Programação Orientada a Objeto em C++
 - <https://sites.google.com/view/professorandreduartebueno/ensino/prog-orientada-objeto-c>
- LEP01446 : Programação Prática
 - <https://sites.google.com/view/professorandreduartebueno/ensino/projeto-engenharia>

Figura 1.1: Etapas para o desenvolvimento do software - *projeto de engenharia*

Fonte: Apostila da disciplina "Programação Orientada a Objeto em C++" do professor André Duarte Bueno

Capítulo 2

Concepção

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

2.1 Características gerais

O software denominado *Simulador de Condução de Calor em Objetos 3D com Geometria Complexa e Interface Gráfica Amigável*, foi desenvolvido utilizando o paradigma da orientação a objeto usando a linguagem de alto desempenho C++, o mesmo é capaz de simular a condução de calor em objetos tridimensionais, com formas e superfícies complexas definidas pelo usuário. O usuário pode definir quais materiais constituem o objeto, e qual o método utilizado para calcular as propriedades termofísicas para cada material. Também é permitido a renderização 3D do objeto, o uso de processamento paralelo, e os resultados podem ser salvos em arquivo no formato pdf.

A equação diferencial de condução de calor é modelada por diferenças finitas, especificamente pelo método BTCS (*Backward Time Centered Space*), um método implícito e incondicionalmente estável. As condições iniciais são inseridas pelo usuário, e as condições de contorno externas são definidas por regiões que não trocam calor com o meio externo, isto é, fronteiras adiabáticas.

A Tabela 2.1 apresenta as características básicas do software desenvolvido.

Tabela 2.1: Características básicas do programa

Nome	Simulador de Condução de Calor em Objetos 3D com Geometria Complexa e Interface Gráfica Amigável
Componentes principais	Banco de dados com métodos de correlação e interpolação para propriedades termofísicas. Método numérico implícito BTCS. Interface gráfica para desenho da simulação. Renderização 3D, processamento paralelo e saída gráfica e pdf.
Missão	Simulador de transferência de calor em objetos 3D com superfícies complexas, formado por materiais com propriedades dependentes da temperatura. Visando auxiliar no ensino das diversas disciplinas abrangidas por este trabalho, como cálculo numérico, modelagem computacional, programação orientada a objeto em C++, física e matemática.

2.2 Especificação

Deseja-se desenvolver um *software* com interface gráfica amigável ao usuário, onde seja possível desenhar objetos tridimensionais, por meio de perfis 2D. Para cada objeto a ser incluído na simulação o usuário escolhe, a partir de um banco de dados, as propriedades do material.

A simulação é governada pela equação da difusão térmica, a qual é modelada por diferenças finitas, pelo método BTCS, com fronteiras adiabáticas.

Na dinâmica de desenho dos objetos a serem simulados, o usuário deverá escolher:

- o tipo de material e suas propriedades termofísicas a partir de um banco de dados.
- a temperatura inicial do objeto.
- para cada plano 2D a posição do objeto e suas dimensões
- cada camada do objeto poderá ser construída a partir de um banco de objetos geométricos simples: círculo ou quadrado.

O usuário tem a liberdade para utilizar um dentre três métodos para obter a condutividade térmica do material a partir da temperatura: constantes, correlação ou interpolação.

Após os desenhos pelo usuário do sistema a ser simulado é necessário definir:

- um ponto de monitoramento da temperatura.

- valor de erro aceitável

Finalmente é disparada a simulação em si. A cada etapa da simulação o simulador irá calcular a temperatura em cada ponto, e só irá passar para o próximo passo de tempo se o erro entre iterações for menor que o valor aceitável definido pelo usuário. Finalizado um passo de tempo, a janela gráfica que tem a solução, distribuição de temperaturas, será atualizada. O simulador também irá plotar gráficos com os novos valores calculados (eixo x e y para o ponto de monitoramento selecionado pelo usuário).

Outras características desejadas incluem:

- possibilidade de alterar, a qualquer momento, o desenho do problema, inserindo novos objetos.
- possibilidade de alterar, a qualquer momento, o ponto de monitoramento.

2.3 Requisitos

Apresenta-se a seguir os requisitos funcionais e não funcionais.

2.3.1 Requisitos funcionais

Apresenta-se a seguir os requisitos funcionais.

RF-01	O programa deve ter uma interface gráfica amigável.
RF-02	O usuário tem a liberdade de desenhar qualquer objeto 3D.
RF-03	O usuário tem a liberdade de escolher a temperatura em cada ponto.
RF-04	O usuário tem a liberdade de escolher o material em cada ponto do objeto, juntamente com o método para obter a condutividade térmica.
RF-05	Novos materiais podem ser adicionados no banco de dados pelo usuário
RF-06	A condutividade térmica pode ser calculados por correlação ou interpolação linear.
RF-07	O usuário poderá escolher um ponto de estudo, cuja temperatura será monitorada ao longo do tempo, juntamente com todas as linhas cardinais partindo desse ponto.

RF-08	O ponto de estudo poderá ser alterado durante a execução da simulação
RF-09	O usuário poderá escolher uma região de fonte ou sumidouro.
RF-10	O usuário poderá salvar e/ou carregar dados da simulação.
RF-11	O usuário poderá salvar os resultados da simulação em um arquivo pdf.
RF-12	O usuário poderá comparar as propriedades termofísicas dos materiais.
RF-13	O usuário poderá acompanhar a evolução da temperatura em uma superfície 2D em todo intervalo de tempo.
RF-14	O usuário poderá visualizar o objeto 3D desenhado em uma janela específica.
RF-15	O usuário pode definir as propriedades físicas da simulação, como intervalo de tempo e espaço.
RF-16	O desenho dos objetos será feito em camadas 2D a partir de geometrias bidimensionais usuais como circulo, quadrado, retângulo, elipse.

2.3.2 Requisitos não funcionais

RNF-01	Os cálculos devem ser feitos utilizando-se o método numérico de diferenças finitas BTCS.
RNF-02	O programa deverá ser multi-plataforma, podendo ser executado em <i>Windows</i> , <i>GNU/Linux</i> ou <i>Mac</i> .
RNF-03	A performance do programa pode ser alterada com a mudança do modelo de paralelismo.
RNF-04	A linguagem a ser utilizada é C++ ¹ .
RNF-05	A interface gráfica deve ser desenvolvida pela biblioteca multiplataforma Qt (link para site).
RNF-07	Os gráficos devem ser gerados usando a biblioteca QCustom Plot ² .

RNF-08	O usuário poderá comparar os valores das propriedades termodfísicas em função da temperatura de qualquer material por meio de um gráfico na interface de usuário.
---------------	---

2.4 Casos de uso

Nesta seção iremos mostrar alguns casos de uso do software a ser desenvolvido.

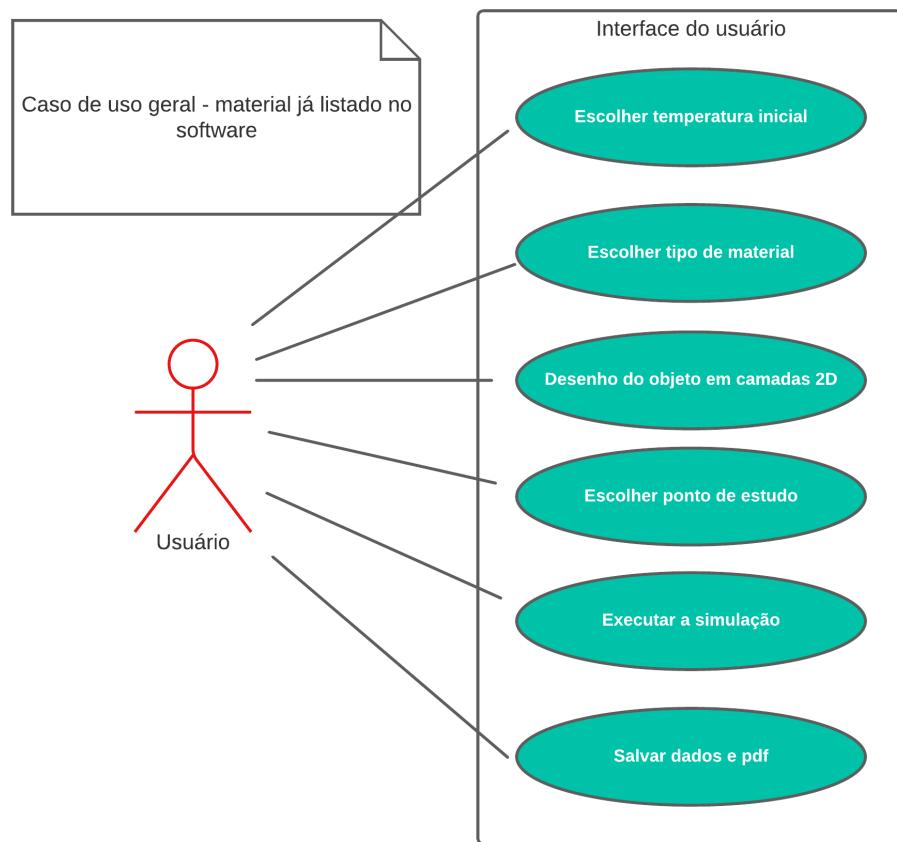
2.4.1 Diagrama de caso de uso geral

O diagrama de caso de uso geral da Figura 2.1 mostra o usuário desenhando um objeto com material padrão do simulador, escolhendo um ponto de estudo, executando a simulação, analisando os resultados e salvando o objeto e os resultados em pdf. As condições do caso de uso são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Exemplo de caso de uso

Nome do caso de uso:	Simulação da distribuição da temperatura
Resumo/descrição:	Cálculo da distribuição de temperatura em determinadas condições.
Etapas:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Escolher o material e sua temperatura inicial 2. Desenhar o objeto; 3. Escolher um ponto de estudo; 4. Executar a simulação; 5. Analisar resultados; 6. Salvar resultados em pdf.
Cenários alternativos:	Um cenário alternativo envolve uma entrada de propriedades de um metal obtidas em laboratório, escolher se essas propriedades vão ser calculadas por correlação ou interpolação.

Figura 2.1: Diagrama de caso de uso geral



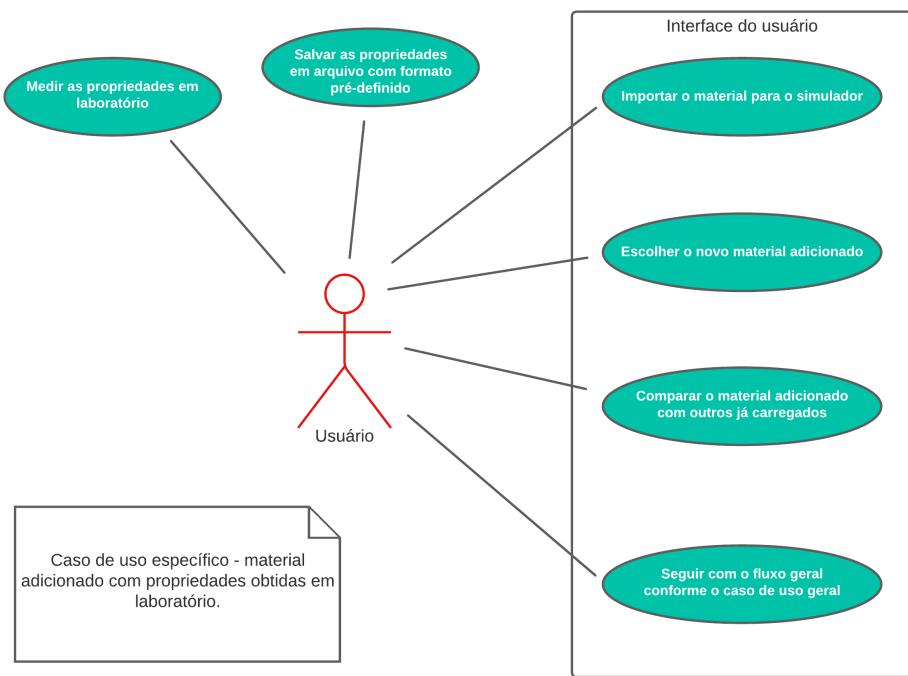
Fonte: Produzido pelo autor.

2.4.2 Diagrama de caso de uso específico

O caso de uso específico da Figura 2.2 mostra um cenário onde o usuário quer utilizar os valores da condutividade térmica obtidos em laboratório. Ele deve montar um arquivo .txt com esses valores (a forma de criar esse arquivo é descrito no Apêndice B), e carregar no simulador (RF-05).

O usuário terá a liberdade de comparar seu material com outros padrões do simulador, e escolhê-lo para o desenho do objeto.

Figura 2.2: Diagrama de caso de uso específico: adição de novo material e interpolação



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 3

Elaboração

Neste capítulo é apresentada a elaboração do programa, constituído pelo desenvolvimento teórico, modelagem numérica, identificação de pacotes e algoritmos adicionais relacionados ao *software* desenvolvido.

3.1 Análise de domínio

A análise de domínio, como parte da elaboração, tem o objetivo de entender e delimitar conceitos fundamentais, sob os quais o *software* é construído (BUENO, 2003).

O presente trabalho envolve quatro conceitos fundamentais:

1. Transferência de calor:

Transferência de calor é uma das áreas clássicas de fenomenologia da física. É responsável por tratar das três formas possíveis de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Este projeto trata especificamente da condução de calor.

A condução só pode ocorrer em meio material (fluidos ou sólidos), e sem que haja movimento do próprio meio, característica da convecção (NUSSENZVEIG, 2014).

2. Modelagem numérica:

Métodos numéricos são algoritmos desenvolvidos com ajuda da matemática para resolver problemas complexos da natureza. São utilizados quando uma solução analítica é difícil de ser obtida, ou com condições de contorno complexas.

3. Programação:

O paradigma orientado ao objeto é um dos principais paradigmas da programação, utilizado especialmente na construção de grandes *softwares* devido à portabilidade, organização e delimitação de assuntos. C++ é uma das linguagens mais utilizadas atualmente, por ser mais rápida com muito suporte, por permitir a orientação ao objeto e disponibilizar muitas bibliotecas prontas (como Qt, QCustomPlot). Os

computadores atuais disponibilizam diversos núcleos de processamento, possibilitando o uso de recursos de programação paralela e ou concorrente. C++ fornece a abstração de *threads* que possibilitam, de forma simplificada, o uso de processamento paralelo.

4. Renderização 3D:

Renderização 3D é uma área com grande ascensão na indústria de jogos e *softwares* de engenharia profissional, torna prático que usuários consigam visualizar o objeto sob qualquer ótica. É necessário a utilização de vários conceitos da álgebra linear.

3.2 Formulação modelos teóricos

Apresenta-se a seguir os termos e unidades utilizados, a formulação teórica, condições de contorno, demonstrações e considerações sobre condutividade térmica variável.

3.2.1 Termos e Unidades

Os principais termos e suas unidades utilizadas neste projeto estão listadas abaixo:

- Dados relativos ao material:

- c_p - calor específico a pressão constante [$J/kg \cdot K$];
- k - condutividade térmica [$W/m \cdot K$];
- ρ - massa específica [kg/m^3].

- Dados relativos ao objeto

- $\Delta x, \Delta y$ - distância entre os centros dos blocos, valor inicial: $1px=0.0026\text{ m}$ [m];
- Δz - distância entre perfis, valor inicial: 0.05 m [m];
- T - temperatura no nodo [K];

- Variáveis usadas na simulação:

- i - posição do nodo em relação ao eixo x;
- k - posição do nodo em relação ao eixo y;
- g - qual *grid*/perfil está sendo analisado;
- t - tempo atual;
- n - índice do passo de tempo;
- ν - número da iteração.

3.2.2 Formulação teórica

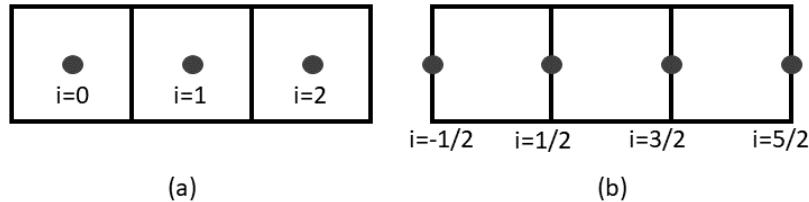
A taxa de transferência de calor foi modelado empiricamente por Jean B. J. Fourier em 1822 (FOURIER, 1822). Posteriormente a teoria foi aprimorada até chegar na equação geral da difusão de calor Equação (3.1). O desenvolvimento teórico para chegar nesta equação, pode ser acompanhado detalhadamente no (INCROPERA, 2008).

Portanto, a seguir é apresentada a equação geral da difusão de calor em meios tridimensionais em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Para resolver a equação geral da difusão térmica, será utilizado o método implícito de diferenças finitas BTCS, com malha em formato bloco centrado.

Figura 3.1: Tipos de malha, (a) bloco-centrado e (b) ponto-distribuído



Fonte: Produzido pelo autor.

Conforme a Figura 3.1, existem dois tipos principais de malha: bloco-centrado, onde os pontos analisados estão nos centros de cada bloco, e ponto-distribuído, onde os pontos analisados estão nas fronteiras de cada bloco.

Com esses conceitos em mente, a equação geral é modelada por diferenças finitas (HOFFMAN, 2001), mantendo a condutividade térmica dentro da derivada espacial. Inicialmente, será modelado somente a derivada externa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j,k} - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Modelando as derivadas internas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k} \left(\frac{T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}}{\Delta x} \right) - k_{i+\frac{1}{2},j,k} \left(\frac{T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k}}{\Delta x} \right)}{\Delta x} \quad (3.3)$$

Com um pouco de álgebra:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) - k_{i+\frac{1}{2},j,k} (T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k})}{\Delta x^2} \quad (3.4)$$

Chegando na modelagem final para a derivada espacial ao longo do x:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k} T_{i-1,j,k} - \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k} + k_{i+\frac{1}{2},j,k} \right) T_{i,j,k} + k_{i+\frac{1}{2},j,k} T_{i+1,j,k}}{\Delta x^2} \quad (3.5)$$

Como as outras dimensões são simétricas:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k_{i,j-\frac{1}{2},k} T_{i,j-1,k} - \left(k_{i,j-\frac{1}{2},k} + k_{i,j+\frac{1}{2},k} \right) T_{i,j,k} + k_{i,j+\frac{1}{2},k} T_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}} T_{i,j,k-1} - \left(k_{i,j,k-\frac{1}{2}} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}} \right) T_{i,j,k} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}} T_{i,j,k+1}}{\Delta z^2} \quad (3.7)$$

A derivada temporal é atrasada no tempo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Substituindo as diferenças finitas na equação geral:

$$\begin{aligned} & \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i-1,j,k}^{n+1} - \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i+1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \\ & \frac{k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j-1,k}^{n+1} - \left(k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j+1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \\ & \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k-1}^{n+1} - \left(k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k+1}^{n+1}}{\Delta z^2} = \\ & c_p \rho \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Onde a malha é homogênea na superfície, mas não entre os perfis, ou seja, $\Delta x = \Delta y \neq \Delta z$. Substituindo:

$$\begin{aligned} & \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i-1,j,k}^{n+1} - \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i+1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \\ & \frac{k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j-1,k}^{n+1} - \left(k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j+1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \\ & \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k-1}^{n+1} - \left(k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k+1}^{n+1}}{\Delta z^2} = \\ & c_p \rho \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Multiplicando pelo múltiplo comum:

$$\begin{aligned} & \Delta z^2 \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i-1,j,k}^{n+1} - \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i+1,j,k}^{n+1} \right) + \\ & \Delta z^2 \left(k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j-1,k}^{n+1} - \left(k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j+1,k}^{n+1} \right) + \\ & \Delta x^2 \left(k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k-1}^{n+1} - \left(k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} \right) T_{i,j,k}^{n+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k+1}^{n+1} \right) = \\ & \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i,j,k}^{n+1} - \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i,j,k}^n \end{aligned} \quad (3.11)$$

Como a equação acima é complexa para ser resolvida por equações matriciais, será utilizado o método iterativo de Gauss-Jacobi (RUGGIERO & LOPES, 1996). As condições das iterações podem ser alteradas pelo usuário, e ele terá a liberdade para definir o erro aceitável (maior diferença de temperatura entre duas iterações), o mínimo de iterações, e o máximo de iterações.]

Então, para resolver a iterativamente a Equação (3.11), é isolado uma das temperaturas para calcular a iteração $\nu + 1$:

$$\begin{aligned} & T_{i,j,k}^{n+1} = \\ & A \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i,j,k}^n + \\ & A \Delta z^2 \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{\nu+1} T_{i-1,j,k}^{\nu+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\nu+1} T_{i+1,j,k}^{\nu+1} \right) + \\ & A \Delta z^2 \left(k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{\nu+1} T_{i,j-1,k}^{\nu+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\nu+1} T_{i,j+1,k}^{\nu+1} \right) + \\ & A \Delta x^2 \left(k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{\nu+1} T_{i,j,k-1}^{\nu+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\nu+1} T_{i,j,k+1}^{\nu+1} \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Onde $1/A$ é definido por:

$$\frac{1}{A} = \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} + \Delta z^2 \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{\nu+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{\nu+1} \right) + \Delta z^2 \left(k_{i,j-\frac{1}{2},k}^{\nu+1} + k_{i,j+\frac{1}{2},k}^{\nu+1} \right) + \Delta x^2 \left(k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{\nu+1} + k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{\nu+1} \right) \quad (3.13)$$

3.2.3 Condutividade térmica

Agora, é necessário definir o cálculo das condutividades térmicas nas fronteiras. Para solucionar esse problema, pode-se resolver pela taxa de condução (HALLIDAY & RESNICK, 2009), esse modelo de solução é similar ao cálculo da permeabilidade de rochas em série (ROSA *et al.*, 2006). Também pode-se utilizar da analogia com a resistência elétrica (NUSSENZVEIG, 2014), (INCROPERA, 2008). Para o presente trabalho, será demonstrado a condutividade térmica equivalente pela taxa de condução térmica:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = -\frac{kA}{L} \Delta T \quad (3.14)$$

Onde q_x é a taxa de condução térmica.

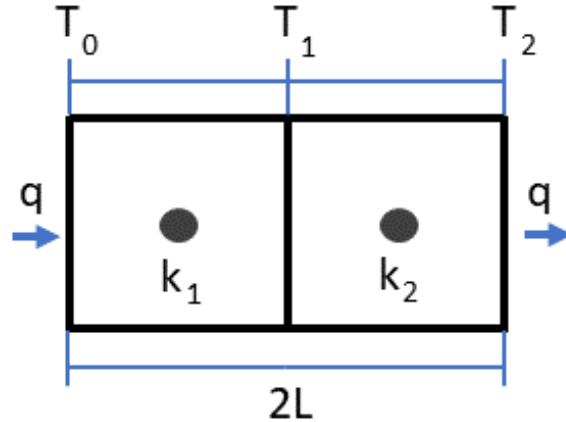
Isolando a diferença de temperatura:

$$\Delta T = -\frac{Lq_x}{kA} \quad (3.15)$$

A Figura 3.2 mostra o caso de condutividades térmicas em série. A diferença de temperatura entre a esquerda (0) e a direita (2), é a soma das diferenças nesse meio, ou seja:

$$T_0 - T_2 = (T_0 - T_1) + (T_1 - T_2) \quad (3.16)$$

Figura 3.2: Representação de condutividade térmica em série



Fonte: Produzido pelo autor.

Logo,

$$\Delta T_t = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (3.17)$$

Como não há fontes de calor, a taxa de calor (q) que entra no sistema, é igual ao que sai. O comprimento total do sistema é $2L$, então:

$$-\frac{2Lq}{k_r A} = -\frac{Lq}{k_1 A} - \frac{Lq}{k_2 A} \quad (3.18)$$

Com alguns ajustes algébricos:

$$\frac{2}{k_r} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (3.19)$$

Ou, simplesmente:

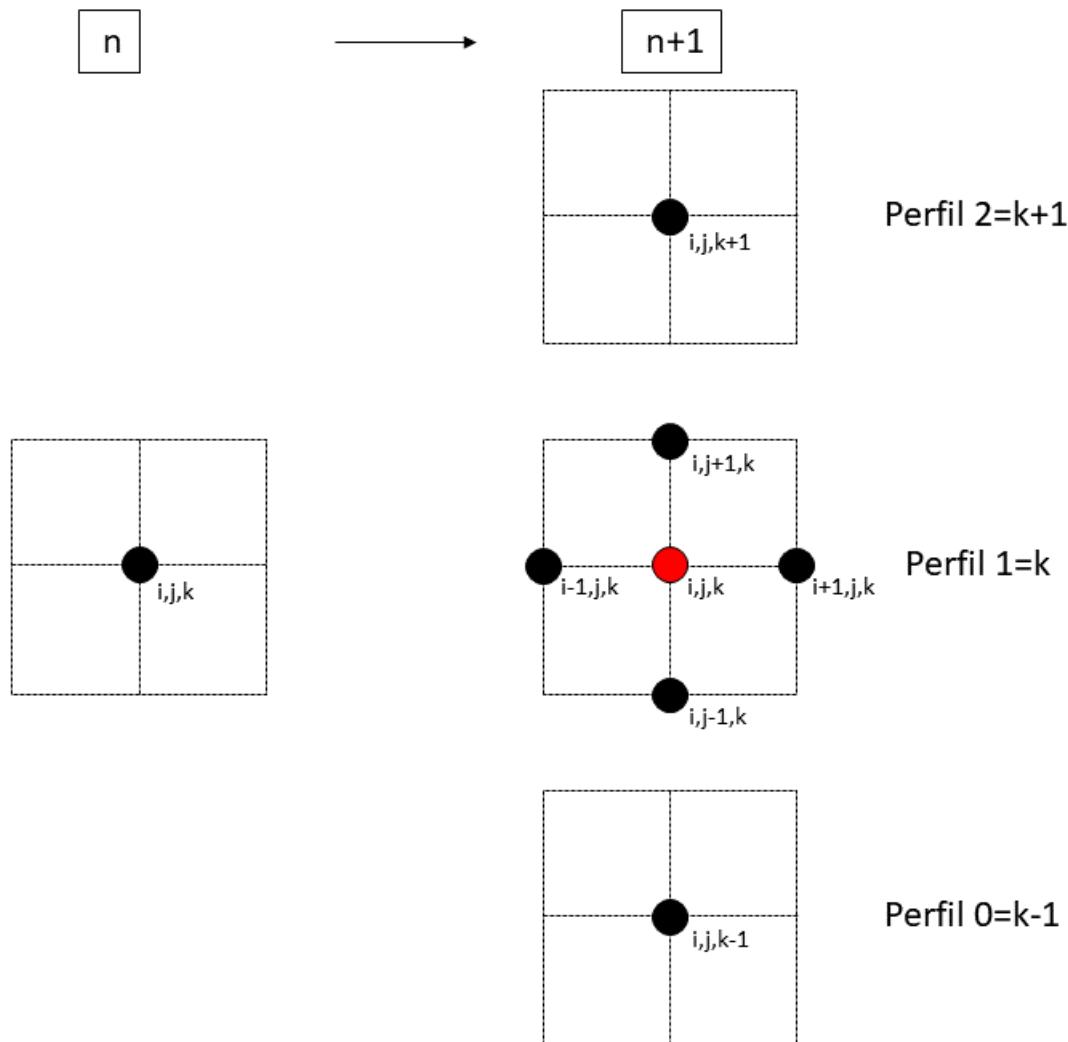
$$k_r = \frac{2k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (3.20)$$

A Equação 3.20 mostra a condutividade térmica equivalente em série, para materiais com mesmo comprimento. Essa solução, com a condição de comprimento igual, é a mesma

apresentada nas referências anteriores.

É importante analisar a célula computacional, ou a região que é observada quando a temperatura é calculada em um ponto específico. Para isso, é apresentada a Figura 3.3, onde a esquerda é o tempo anterior $t=n-1$, e o ponto calculado está no tempo presente $t=n$. Para calcular a temperatura no ponto vermelho, é utilizado o mesmo ponto, mas no tempo anterior, e uma célula em cada sentido.

Figura 3.3: Malha utilizada para calcular a temperatura de um ponto, onde cada ponto é o centro dos blocos



Fonte: Produzido pelo autor.

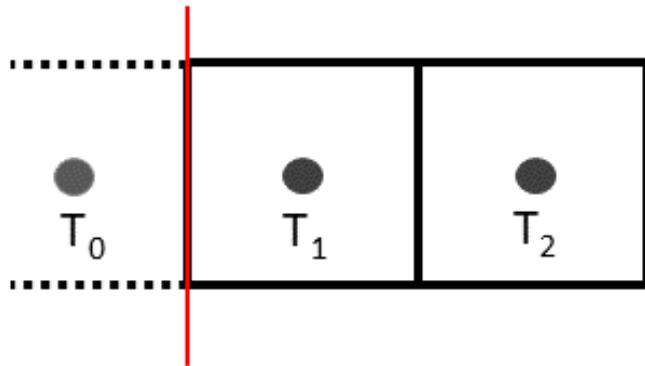
A seguir, é resolvida a última etapa da modelagem do problema, a modelagem da condição de fronteira de Neumann.

3.2.4 Condição de fronteira

Condição de fronteira, como o próprio nome diz, é a condição onde estão os limites materiais do objeto. Nessa região, a condução térmica é diferente do interior do objeto, pois não poderá conduzir calor em todos os sentidos, mas só onde existir material adjacente.

A condição de contorno de Neumann define a taxa de troca de calor com o meio externo, no trabalho desenvolvido essa taxa será sempre nula, ou seja, a região estudada não troca calor com o meio externo. Na Figura 3.4, a fronteira está na reta vermelha e, como o método modelado utilizaria o ponto à esquerda, é necessário encontrar um substituto real para esse termo.

Figura 3.4: Análise da fronteira de Neumann



Fonte: Produzido pelo autor.

Por isso, é importante modelar a condição de contorno, que pode ser modelada com diferenças finitas centradas como:

$$k \frac{\partial T}{\partial x}_{i-\frac{1}{2},j,k} = k_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = 0 \quad (3.21)$$

A equação acima possui duas soluções:

$$\begin{cases} k_{i-\frac{1}{2},j,k} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x}_{i-\frac{1}{2},j,k} = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Resolvendo a linha de baixo:

$$\frac{\partial T}{\partial x}_{i-\frac{1}{2},j,k} = \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = 0 \quad (3.23)$$

$$T_{i-1,j,k}^{n+1} = T_{i,j,k}^{n+1} \quad (3.24)$$

Todas as seis fronteiras são simétricas, então:

$$\begin{aligned}
T_{i-1,j,k}^{n+1} &= T_{i,j,k}^{n+1} \\
T_{i+1,j,k}^{n+1} &= T_{i,j,k}^{n+1} \\
T_{i,j-1,k}^{n+1} &= T_{i,j,k}^{n+1} \\
T_{i,j+1,k}^{n+1} &= T_{i,j,k}^{n+1} \\
T_{i,j,k-1}^{n+1} &= T_{i,j,k}^{n+1} \\
T_{i,j,k+1}^{n+1} &= T_{i,j,k}^{n+1}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

As equações encontradas na Eq. 3.25 dizem que, se existir uma fronteira, a temperatura inexistente deve ser substituída pela temperatura do próprio ponto. De forma alternativa, como mostrado na Eq. 3.22, a condutividade térmica na fronteira deve ser zero. Quaisquer dentre as duas opções resolvem o problema da condição de contorno de Neumann.

3.2.5 Demonstrações matemáticas

Nesta parte, serão analisados dois casos para validar as modelagens. Primeiro, será utilizado um objeto formado por uma única célula isolada no espaço. Posteriormente, será analisado o caso do objeto constituído por um único material, mas bidimensional.

Começando pelo objeto de única célula, em todas as suas seis fronteiras devem ser aplicadas as condições de contorno de Neumann. Fisicamente, é esperado que o objeto, por estar isolado, não varie sua temperatura interna ao longo do tempo. Então, partindo da equação geral:

Partindo da Eq. (3.12) e, como demonstrado na Eq. 3.22, quando houver fronteira a condutividade térmica na fronteira é zero:

$$\begin{aligned}
T_{i,j,k}^{n+1} &= \\
A \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i,j,k}^n + \\
A \Delta z^2 \left(k_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i-1,j,k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{i+1,j,k}^{n+1} \right) + \\
A \Delta z^2 \left(k_{j-\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j-1,k}^{n+1} + k_{j+\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{i,j+1,k}^{n+1} \right) + \\
A \Delta x^2 \left(k_{j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k-1}^{n+1} + k_{j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} T_{i,j,k+1}^{n+1} \right)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\frac{1}{A} = \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} + \Delta z^2 \left(k_{i-\frac{1}{2}, j, k}^{n+1} + k_{i+\frac{1}{2}, j, k}^{n+1} \right) + \Delta z^2 \left(k_{i, j-\frac{1}{2}, k}^{n+1} + k_{i, j+\frac{1}{2}, k}^{n+1} \right) + \Delta x^2 \left(k_{i, j, k-\frac{1}{2}}^{n+1} + k_{i, j, k+\frac{1}{2}}^{n+1} \right) \quad (3.27)$$

Resultando em:

$$T_{i, j, k}^{n+1} = A \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i, j, k}^n \quad (3.28)$$

$$\frac{1}{A} = \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} \quad (3.29)$$

Logo:

$$T_{i, j, k}^{n+1} = \frac{\Delta t}{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho} \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i, j, k}^n \quad (3.30)$$

$$T_{i, j, k}^{n+1} = T_{i, j, k}^n \quad (3.31)$$

Mostrando que a temperatura não varia com o tempo.

Para a segunda demonstração, onde o objeto é constituído pelo mesmo material e mesma condutividade térmica, mas somente bidimensional.

O índice k referente à terceira dimensão continuará aparecendo nas equações abaixo para manter a ideia do algoritmo. Como só existe um valor para essa dimensão, pode-se considerar o valor fixo de 0.

Partindo da Equação (3.12) e substituindo todas as condutividades térmicas nas interfaces por k, e simplificando para bidimensional:

$$\begin{aligned} T_{i, j, k}^{n+1} &= \\ A \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i, j, k}^n &+ \\ A \Delta z^2 \left(k T_{i-1, j, k}^{n+1} + k T_{i+1, j, k}^{n+1} \right) &+ \\ A \Delta z^2 \left(k T_{i, j-1, k}^{n+1} + k T_{i, j+1, k}^{n+1} \right) & \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{A} = \frac{\Delta z^2 \Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} + \Delta z^2 (k + k) + \Delta z^2 (k + k) \quad (3.33)$$

Com alguns ajustes:

$$\begin{aligned} \frac{1}{A} T_{i, j, k}^{n+1} &= \\ \frac{\Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} T_{i, j, k}^n &+ \\ k \left(T_{i-1, j, k}^{n+1} + T_{i+1, j, k}^{n+1} \right) &+ \\ k \left(T_{i, j-1, k}^{n+1} + T_{i, j+1, k}^{n+1} \right) & \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\frac{1}{A} = \frac{\Delta x^2 c_p \rho}{\Delta t} + 2k + 2k \quad (3.35)$$

Logo:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta x^2 c_p \rho}{k \Delta t} + 2 + 2 \right) T_{i,j,k}^{n+1} = \\ \frac{\Delta x^2 c_p \rho}{k \Delta t} T_{i,j,k}^n + \\ \left(T_{i-1,j,k}^{n+1} + T_{i+1,j,k}^{n+1} \right) + \\ \left(T_{i,j-1,k}^{n+1} + T_{i,j+1,k}^{n+1} \right) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Chegando na equação:

$$\begin{aligned} \frac{c_p \rho}{k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \\ \frac{T_{i-1,j,k}^{n+1} - 2T_{i,j,k}^{n+1} + T_{i+1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \\ \frac{T_{i,j-1,k}^{n+1} - 2T_{i,j,k}^{n+1} + T_{i,j+1,k}^{n+1}}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (3.37)$$

A Equação (3.37) representa o método implícito BTCS para um sistema homogêneo bidimensional, conforme (INCROPERA, 2008).

3.2.6 Condutividade térmica variável

A condutividade térmica no programas desenvolvido pode variar com o espaço, devido à possibilidade do objeto ser constituído por mais de um material - solução mostrada na Equação 3.20). Contudo, a condutividade térmica pode também variar com a temperatura, deixando a simulação mais real e complexa.

Serão fornecidas aos usuários, três opções para calcular essas condutividades térmicas:

- Valores constantes;
- Correlação;
- Interpolação.

Para o primeiro caso, como o nome diz, a condutividade térmica será constante ao longo de todo o tempo, variando somente com a posição.

No segundo caso, será utilizado os modelos de correlação do *handbook Thermophysical Properties* (VALENCIA & QUESTED, 2008). O modelo proposto, é calculado, em geral, como:

$$k = C_0 + C_1 T - C_2 T^2 \quad (3.38)$$

onde C_0 , C_1 e C_2 são constantes da correlação, específicas para cada material.

O terceiro caso, é o cálculo pela interpolação e, como o nome diz, calcula a condutividade térmica pela interpolação linear entre valores obtidos em laboratório.

3.3 Formulação modelos computacionais

Apresenta-se a seguir considerações sobre o que é processamento paralelo, paralelismos usando múltiplas *threads* e informações sobre renderização 3D.

3.3.1 O que é processamento paralelo?

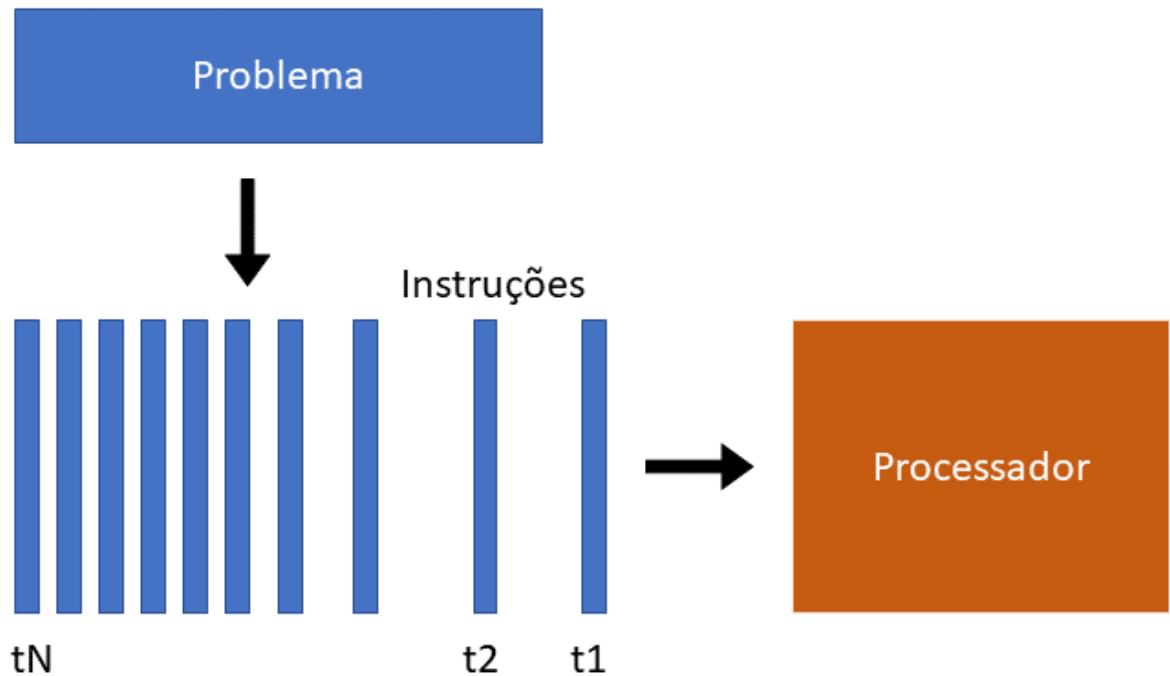
O processamento paralelo consiste em dividir uma tarefa em suas partes independentes e na execução de cada uma dessas partes em diferentes processadores ou núcleos.

A Figura 3.5 mostra um processamento serial e a Figura 3.6 sua versão paralelizada.

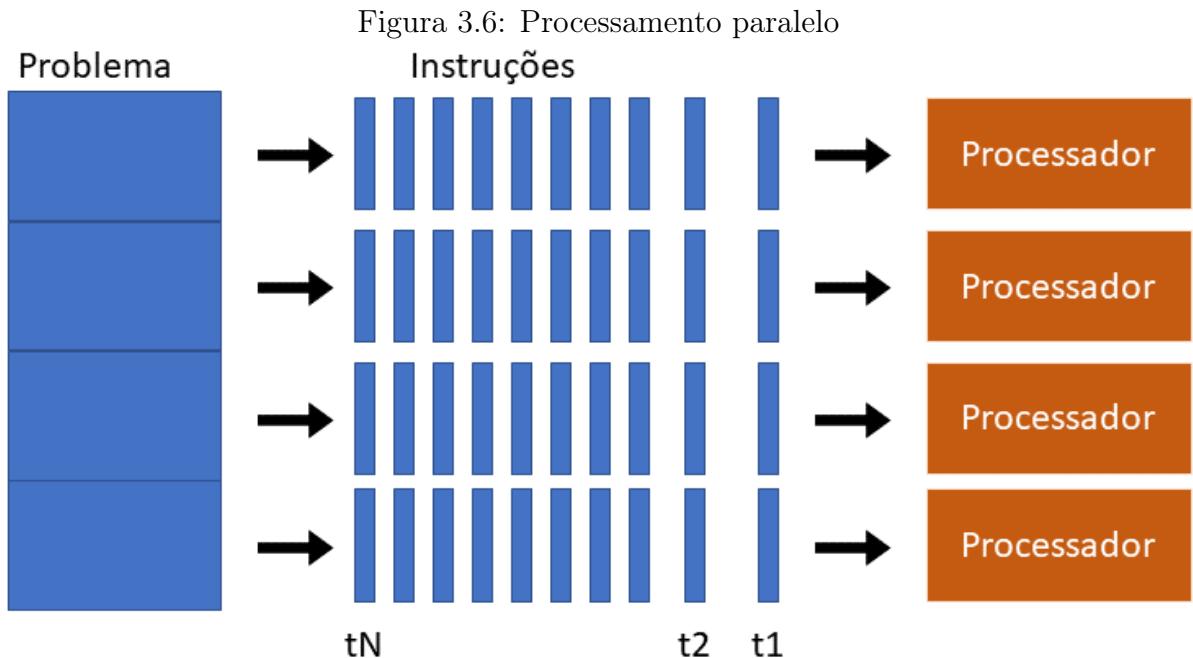
Note que os processadores podem estar numa mesma máquina, em um *cluster* ou em máquinas distribuídas.

Para poder aproveitar o poder de processamento dos novos processadores é preciso que os programas sejam desenvolvidos utilizando processamento paralelo.

Figura 3.5: Processamento serial



Fonte: Adaptada da apostila de aulas do professor André Duarte Bueno.



Fonte: Adaptada da apostila de aulas do professor André Duarte Bueno.

Note que no processamento paralelo o acoplamento é mais forte, exigindo sistemas de comunicação mais velozes (como barramentos e/ou *switches* de alta velocidade). O controle dos recursos do sistema é mais refinado.

- **Vantagens:**

- Melhor uso dos recursos disponibilizados; Maior velocidade na realização das tarefas.

- **Desvantagens:**

- O distribuição dos cálculos é de responsabilidade do programador.

3.3.2 *Processamento paralelo com múltiplas-threads - multi-thread*

Os chips dos processadores atuais são constituídos por vários processadores menores, o que permite que um mesmo processador consiga realizar tarefas (distintas ou iguais) nos processadores menores. A ideia é separar tarefas distintas, para que um processador não fique envolvido em uma única tarefa.

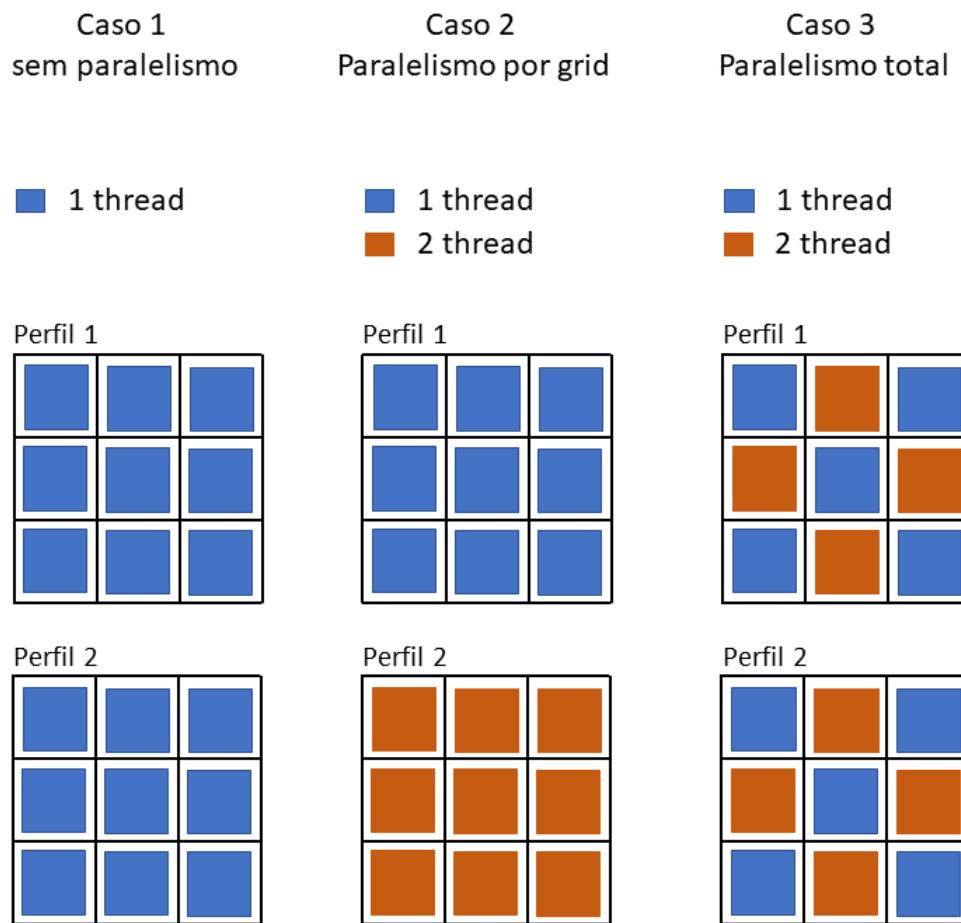
Uma analogia para melhorar a explicação sobre processamento paralelo é a da aplicação de um filtro sobre uma imagem bidimensional. O filtro a ser aplicado é exatamente o mesmo em toda imagem (mesmo algoritmo), sendo possível dividir a imagem em partes e entregar cada parte para um processador (*thread*) diferente executar.

Similarmente ao cenário acima, foram implementados três casos de paralelismo, por questão de didática.

1. Sem paralelismo: uma única *thread* do processador resolve todos os cálculos.
2. Paralelismo por *grid*: cada *thread* resolve uma camada do objeto. Possui certa otimização em relação ao anterior, mas, se só existir objeto em uma camada, outras *threads* ficam ociosas.
3. Paralelismo total: todas as *threads* do processador resolvem os cálculos de todo o objeto 3D, intercalando a posição com base no número da *thread*.

A Figura 3.7 ilustra melhor esses três casos.

Figura 3.7: Ilustração dos três casos de paralelismo implementados para duas camadas com 9 células cada, e um processador com duas *thread*



Fonte: Produzido pelo autor.

O algoritmo utilizado para o caso 3 é:

```
for(int i = NUM_THREAD; i < size; i+=MAX_THREADS)
```

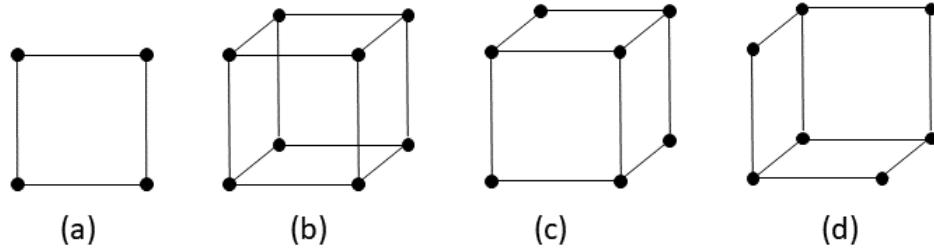
Esse algoritmo diz que a *thread* “i”, deverá começar a resolver as equações na posição “i”. Quando finalizar, deve pular para a posição “i + números de *thread*”.

3.3.3 Renderização 3D

Após o usuário desenhar um objeto no *software*, pode ser de interesse observar como seria em renderização 3D. Portanto, foram implementados algoritmos para essa renderização.

Inicialmente, é interessante observar a complexidade da renderização: um objeto 3D deve ser apresentado em uma tela 2D, com a ilusão de ótica que é um objeto com profundidade. Por exemplo, um cubo com arestas de tamanho 1 cm é mostrado nos quatro casos da figura abaixo:

Figura 3.8: (a) Observador alinhado com uma das faces do cubo. (b) observador não está alinhado e não foram removidas arestas ocultas. O cérebro consegue interpretar que é um objeto 3D, mas fica confuso entre os casos (c) e (d)



Fonte: Produzido pelo autor.

Todos cantos do cubo da Figura 3.8 estão na mesma posição, o que mudou foi o ângulo do observador com o objeto.

Portanto, tendo definidos os pontos das arestas, seus respectivos vetores são multiplicados pela matriz de rotação (HERTER & LOTT, n.d.) mostrada na Equação (3.39), a qual permite rotacionar qualquer ponto a partir dos três ângulos do observador.

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma)\cos(\beta) & \cos(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) - \sin(\gamma)\cos(\alpha) & \cos(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) + \sin(\gamma)\cos(\alpha) \\ \sin(\gamma)\cos(\beta) & \sin(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) + \cos(\gamma)\cos(\alpha) & \sin(\gamma)\sin(\beta)\cos(\alpha) - \cos(\gamma)\sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta) * \sin(\alpha) & \cos(\beta) * \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

onde α , β e γ são os Ângulos de Euler.

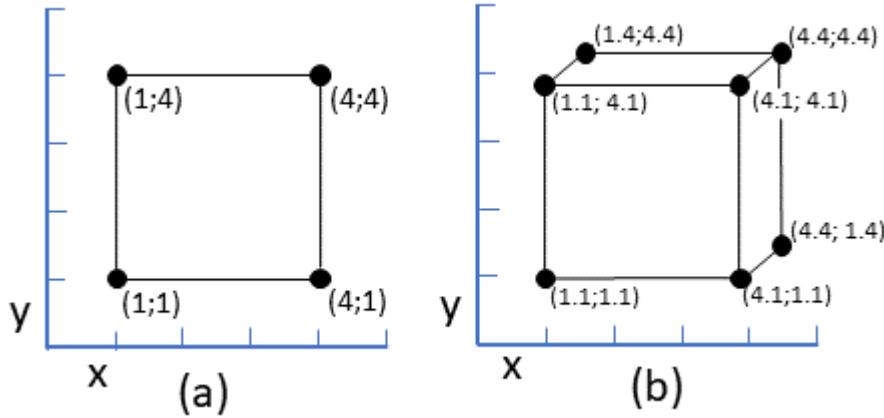
Ou seja, inicialmente, um cubo de aresta 3 cm, com uma distância da origem de 1 cm, pode ser mostrado na tela (monitor) com os pontos do caso (a) da Figura 3.9, onde o observador está alinhado com o objeto.

Conforme desejado, o objeto pode mudar seu ângulo com o observador, como no caso (b), onde os ângulos α e β passaram a ter o valor de 0.1 radianos. Não foi só os pontos de trás do cubo que aparecem (e mudaram seus valores), mas todos os pontos foram modificados.

Além disso, a aresta possui valor ligeiramente menor que 3, pois não é mais “de frente”

que o observador está olhando, mas ligeiramente de lado. Mesmo que o objeto cubo tenha aresta de 3 centímetros.

Figura 3.9: (a) o cubo está com ângulos nulos. (b) os ângulos α e β estão com valor de 0.1 radianos



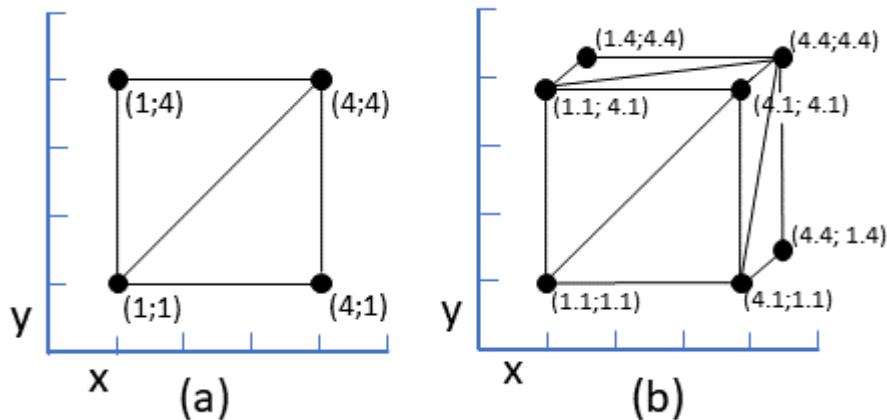
Fonte: Produzido pelo autor.

Nos desenhos do simulador, cada pixel da figura, é uma célula com propriedades que serão calculadas, possuindo material, temperatura e volume. Como o usuário pode desenhar por pixel, a renderização 3D deve partir do princípio que cada pixel é um potencial objeto que deve ser renderizado.

Inicialmente, essa conclusão pode ficar vaga, pois todas as células do simulador devem ser renderizadas, mas, quando a simulação fica grande, é numerosa a quantidade de objetos renderizando ao mesmo tempo, tornando muito lenta a apresentação. Então algumas considerações são feitas no algoritmo para otimizar a renderização.

Primeiro, é desejável desenhar triângulos, e não pontos ou retas, por 2 motivos: geometria simples, possui normal e a biblioteca do Qt consegue desenhar e preencher a área com qualquer cor escolhida.

Figura 3.10: Mesmo desenho da Figura 3.9, mas agora renderizando a partir de triângulos



Fonte: Produzido pelo autor.

O segundo motivo apresentado, é o mais importante dos três. Um triângulo possui três pontos, podendo ser reduzido para dois vetores (subtraindo o ponto de origem dos outros dois pontos) e permite-se calcular a normal dessa superfície. Com isso, são obtidos os vetores $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, a_3\}$ e $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, b_3\}$ permitindo a realização do produto vetorial:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

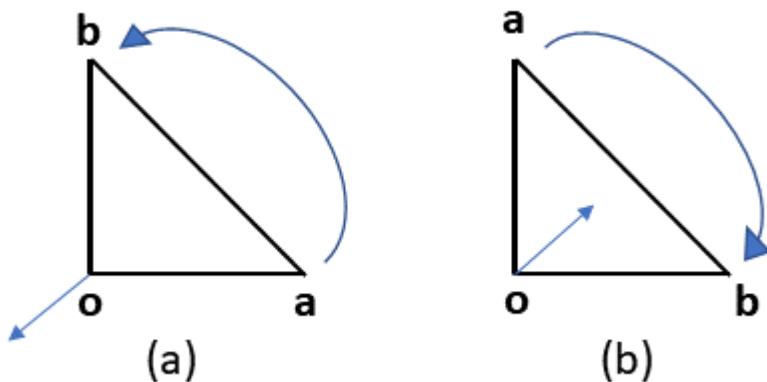
Ou simplesmente:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = (a_2 b_3 - a_3 b_2) \mathbf{i} - (a_1 b_3 - a_3 b_1) \mathbf{j} + (a_1 b_2 - a_2 b_1) \mathbf{k} \quad (3.41)$$

Utilizando a Regra da Mão Direita¹, é possível entender a utilidade da Equação 3.41: o caso (a) da Figura 3.11, mostra uma normal saindo do papel, em direção ao olho do leitor, logo, é um triângulo que deve ser renderizado. O caso (b) possui uma normal no sentido contrário, e não faz sentido desenhar esse triângulo, pois está na parte de trás do objeto.

¹

Figura 3.11: (a) mostra um caso onde a normal é na direção do leitor e (b) mostra um caso onde a normal é para dentro da folha



Fonte: Produzido pelo autor.

Essa simples operação condicional do valor positivo (apontando para o olho do observador) e negativo (apontando para dentro da tela) de \mathbf{j} da normal, reduz a quantidade de objetos que devem ser renderizados, e otimiza o software em duas vezes.

Uma outra condição implementada é a de avaliar se o objeto está em contato com outro objeto. Na superfície de contato, existem 4 triângulos (2 de cada objeto), e eles

¹Para utilizar a Regra da Mão Direita, posicione o dedo polegar sobre o ponto \mathbf{o} , e estique o indicador para o ponto \mathbf{a} , agora, feche o indicador no sentido do ponto \mathbf{b} (seta curvada mostra o sentido que a ponta do indicador deve realizar). No caso (a) da figura, o dedo polegar fica no sentido para fora do papel, e o caso (b), para dentro.

não devem ser renderizados, pois estão no interior do objeto maior. Para esse cenário, pode-se pensar em blocos de montar: enquanto eles não estão juntos, é possível observar todas as superfícies do bloco mas, quando eles são encaixados, essa superfície de contato entre eles fica oculta.

Por fim, antes de renderizar os numerosos triângulos, eles são colocadas em ordem crescente com o valor de \mathbf{j} da normal. Isso serve para ser desenhado primeiro o que está atrás, e depois desenhar o que está na frente, sobrescrevendo áreas que deveriam estar ocultas, evitando a criação de figuras confusas como no caso (b) da Figura 3.8. É uma técnica lenta, mas de fácil implementação.

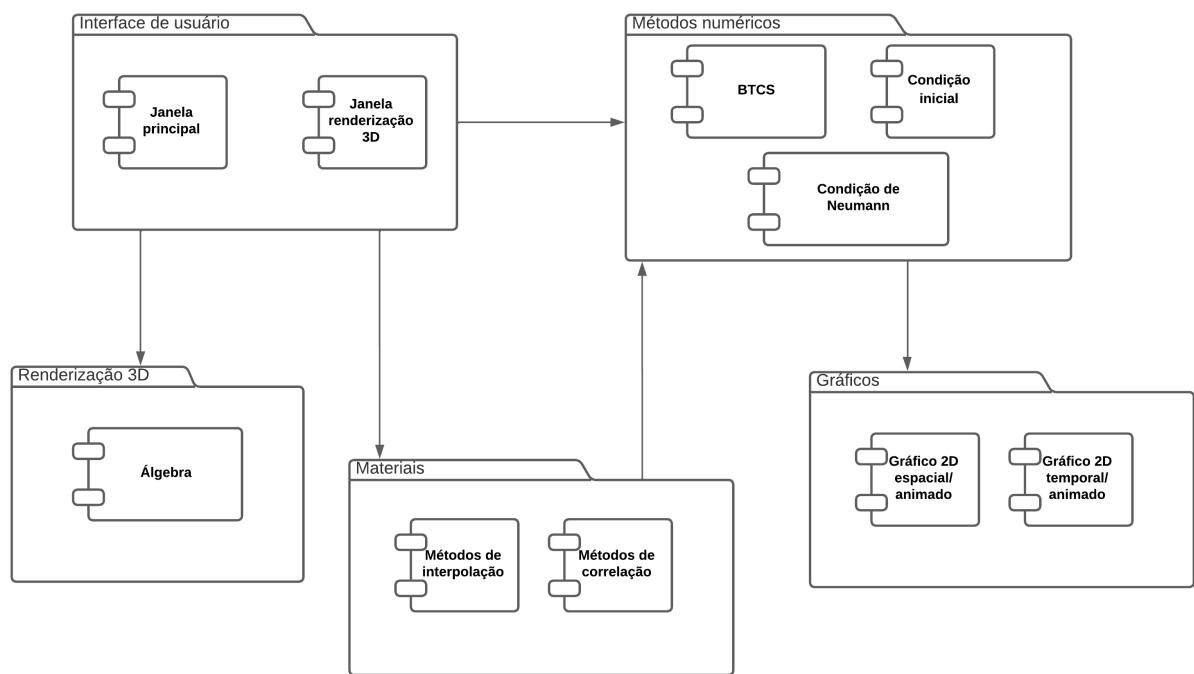
3.4 Identificação de pacotes

- Pacote de renderização 3D: organiza os cálculos e algoritmos para renderizar o objeto.
- Pacote de métodos numéricos: nele está presente o coração do simulador: o método BTCS, a condição inicial e a condição de Neumann. Estes três permitem a solução dos problemas de temperatura.
- Pacote de materiais: organiza as propriedades termofísicas dos materiais, e é dividido em método de correlação - onde a condutividade térmica depende da temperatura por meio de uma equação de correlação - e método de interpolação - por meio de uma tabela de valores da condutividade térmica e temperatura, esta propriedade é calculada pela interpolação linear dos pontos da tabela.
- Pacote de interface ao usuário: utilização da biblioteca Qt, para criar interface gráfica amigável. Fornece um ambiente onde o usuário pode enviar comandos para o simulador de maneira fácil, e apresenta os resultados. É dividida em janela principal, e janela de renderização 3D.
- Pacote de gráficos: utilização da biblioteca *qcUSTOMplot*, para montar os melhores gráficos para o problema. É solicitado ao pacote de malhas os resultados da temperatura. Está presente junto com o pacote de interface.

3.5 Diagrama de pacotes

O diagrama de pacotes é apresentado na Figura 3.12.

Figura 3.12: Diagrama de Pacotes



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 4

Análise Orientada a Objeto

Neste capítulo são apresentados as classes desenvolvidas no projeto, suas relações, atributos e métodos. Depois, veremos uma breve explicação sobre cada classe, e são apresentados os diagramas UML (Linguagem de Modelagem Unificada) para auxiliar no entendimento do *software* e suas relações. Serão apresentados ainda os diagramas de classes, de sequência, de comunicação, de máquina de estado e de atividades.

4.1 Dicionário das classes

O *software* é constituído por 10 classes, onde duas classes de interpolação foram implementadas pelo professor André Duarte Bueno no curso de C++. Utilizar esse código pronto, mostra que o simulador está apto a adições de métodos para o cálculo das propriedades termofísicas.

1. **MainWindow:** Classe responsável pela janela principal. Consegue obter os valores adicionados pelo usuário e enviar para a classe do simulador. Permite ao usuário desenhar o objeto a ser simulado, definir suas propriedades termofísicas e numéricas, e disparar a simulação. Apresenta os resultados na medida em que os mesmos são realizados, possibilitando parar a simulação para ver resultados parciais.
2. **CRender3D:** Classe responsável por apresentar o objeto em renderização 3D. É criada a partir da classe mainwindow e recebe valores do simulador. Possui toda a álgebra necessária para a renderização.
3. **CSimuladorTemperatura:** Classe responsável por organizar as células do objeto a ser simulado e por resolver o sistema numérico do problema da difusão térmica.
4. **CGrid:** Classe responsável por organizar as células do objeto em *grids*, importante para organizar as células e facilitar a utilização pela classe CSimuladorTemperatura.
5. **CCell:** Classe responsável por armazenar informações da célula, se ela está ativa ou não, se é fonte de calor ou não, qual o tipo de material e qual sua temperatura.

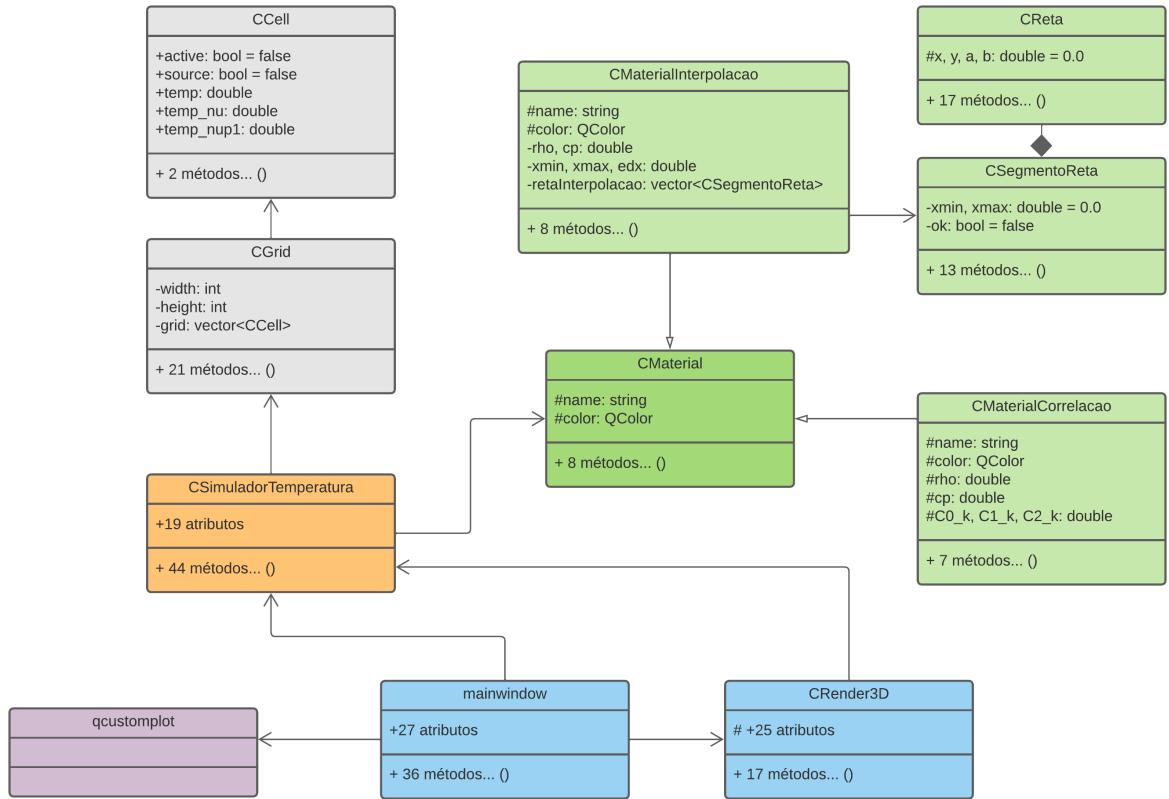
6. **CMaterial:** Classe virtual responsável por prover os valores das propriedades termodfísicas dos materiais. É chamada pelo CSimuladorTemperatura e é sobreescrita por CMaterialCorrelacao ou CMaterialInterpolacao.
7. **CMaterialCorrelacao:** Classe responsável por calcular os valores da condutividade térmica em função da temperatura. A propriedade é determinada a partir de correlações lidas do disco.
8. **CMaterialInterpolacao:** Classe responsável por calcular os valores da condutividade térmica em função da temperatura. A propriedade é determinada utilizando método de interpolação linear a partir de dados experimentais armazenados em disco.
9. **CReta:** Representa uma reta, dado um valor de x calcula y. Usada no cálculo da interpolação linear.
10. **CSegmentoReta:** Representa um segmento de reta com intervalos definidos.

Uma classe externa foi utilizada no simulador:

1. **QCustomPlot:** Classe responsável por gerar gráficos apresentados pelo mainwindow, obtido em (<https://www.qcustomplot.com/>).
2. Também foram utilizadas diversas classes da biblioteca Qt (<https://www.qt.io/>).

O diagrama de classes é apresentado na Figura 4.1. Ele tem como objetivo apresentar todas as classes, seus atributos, métodos, heranças e relações entre as classes.

Figura 4.1: Diagrama de classes



Fonte: Produzido pelo autor.

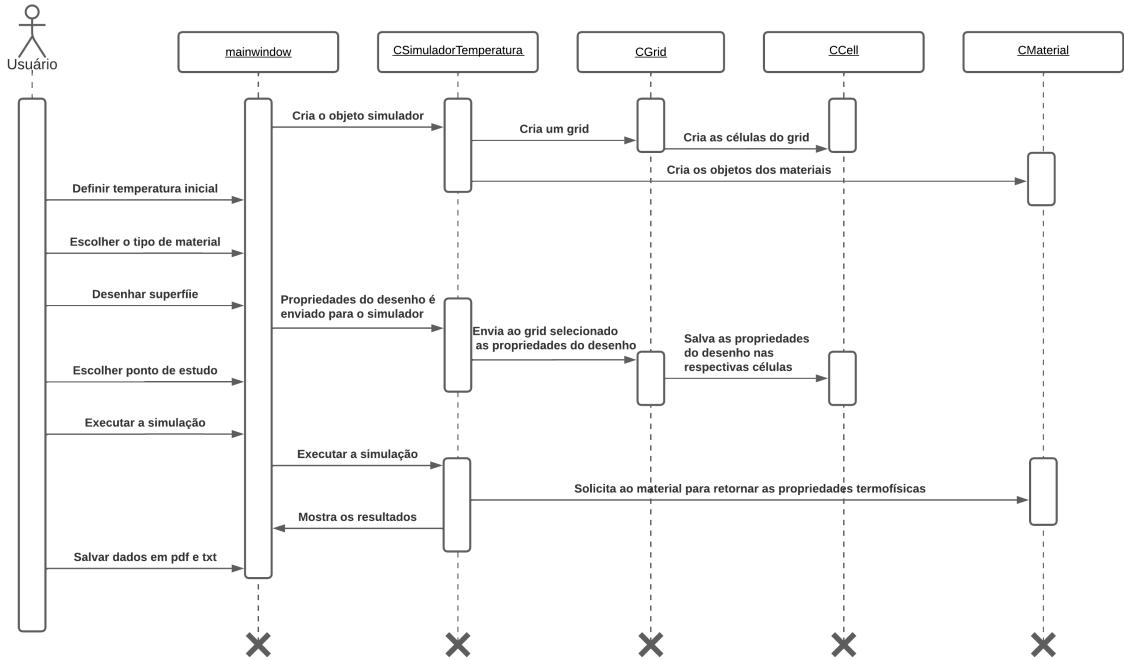
4.2 Diagrama de sequência

O diagrama de sequência enfatiza a troca de eventos e mensagens e sua ordem temporal, representando um cenário de uso do software. 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.

4.2.1 Diagrama de sequência - cenário geral

A seguir, é apresentado o diagrama de sequência geral na Figura 4.2, conforme o exemplo do caso de uso da Figura 2.1.

Figura 4.2: Diagrama de sequência geral

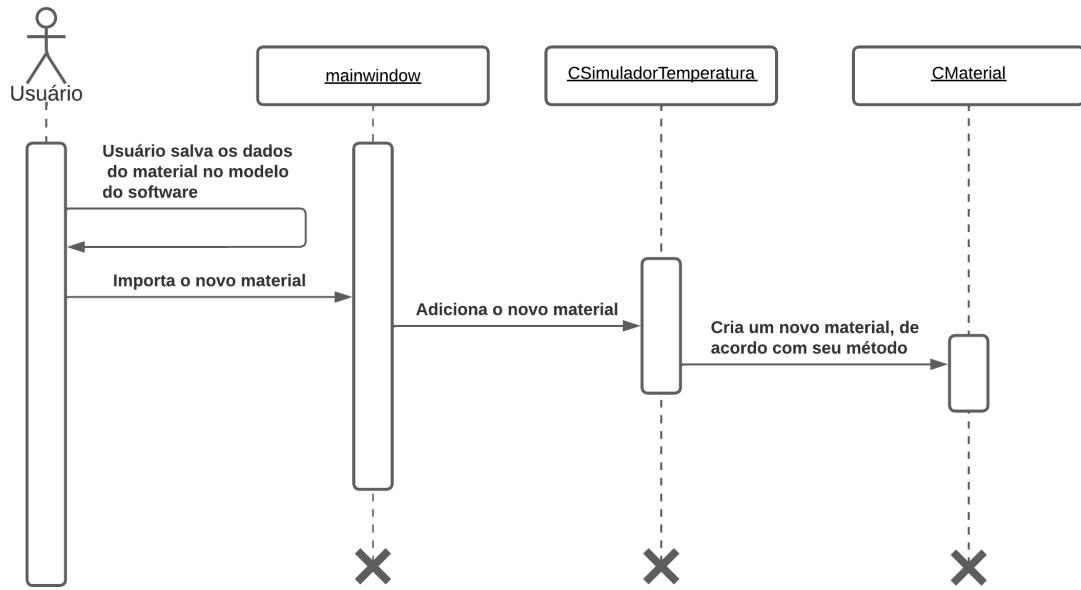


Fonte: Produzido pelo autor.

4.2.2 Diagrama de sequência - adicionando novo material/correlação

Uma atividade corriqueira é adicionar ao simulador um novo material. Neste caso os dados do material são salvos em um arquivo de disco, em formato pré-definido e então lidos pelo simulador. . O diagrama de sequência da Figura 4.3 mostra este cenário.

Figura 4.3: Diagrama de sequência da importação de um novo material

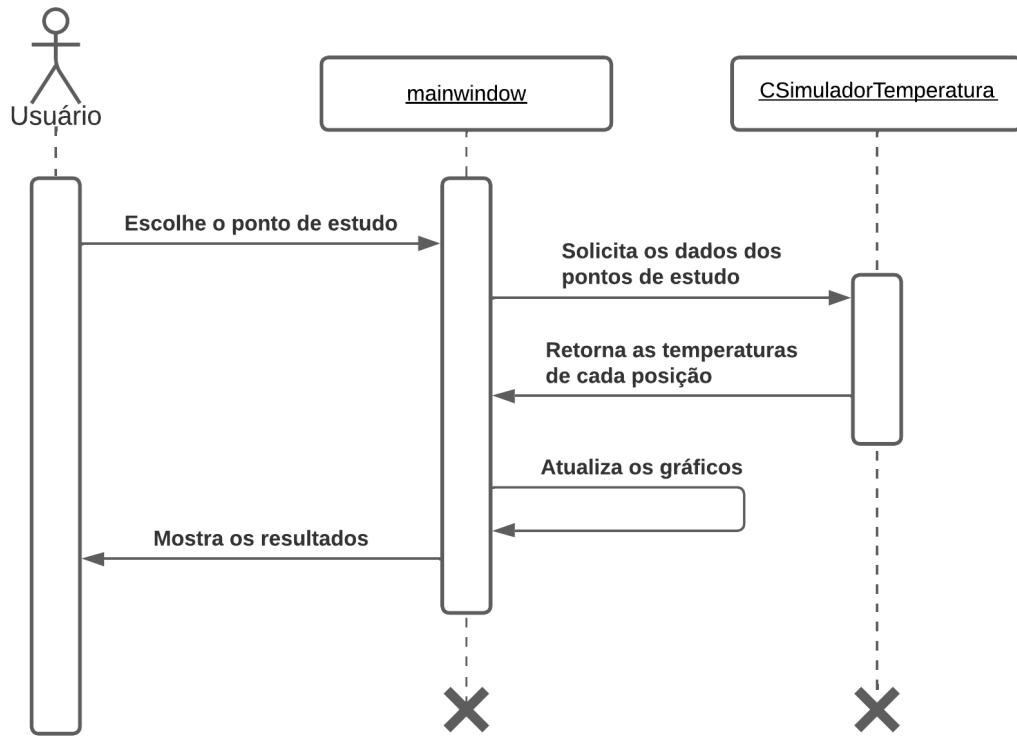


Fonte: Produzido pelo autor.

4.2.3 Diagrama de sequência - análise de resultados

A análise de resultados é a etapa final da simulação, e é realizada por meio dos gráficos. A sequência de atualização é mostrada na Figura 4.4.

Figura 4.4: Diagrama de sequência da análise de resultados



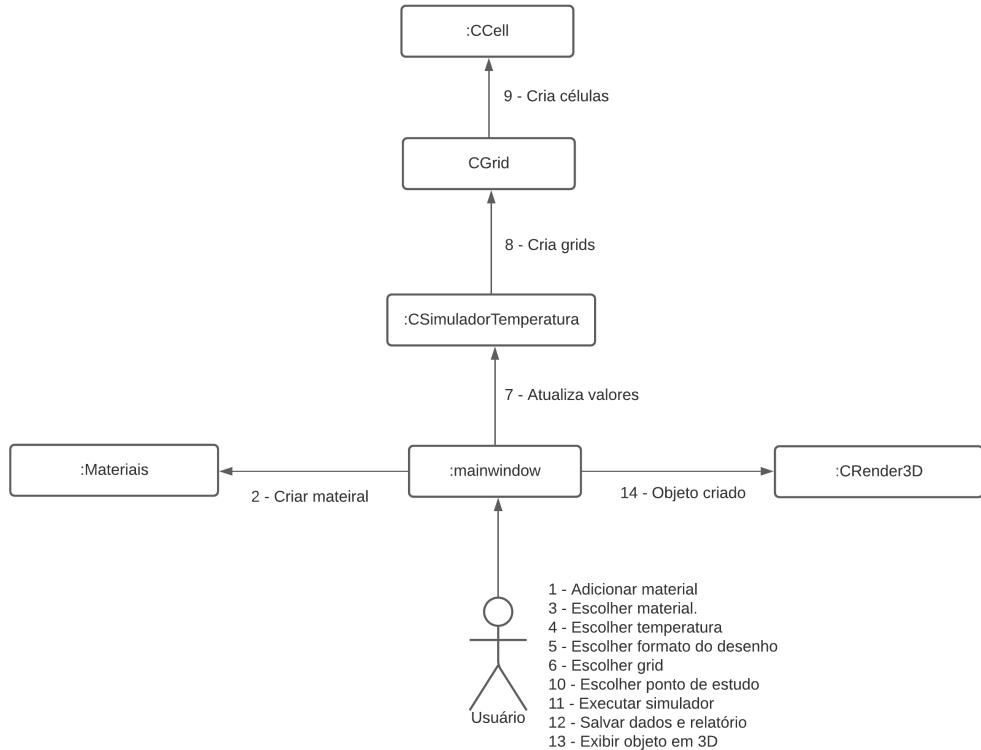
Fonte: Produzido pelo autor.

4.3 Diagrama de comunicação

O diagrama de comunicação tem como objetivo apresentar as interações dos objetos, juntamente com sua sequência de processos.

O diagrama de comunicação do caso de uso geral é apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5: Diagrama de comunicação



Fonte: Produzido pelo autor.

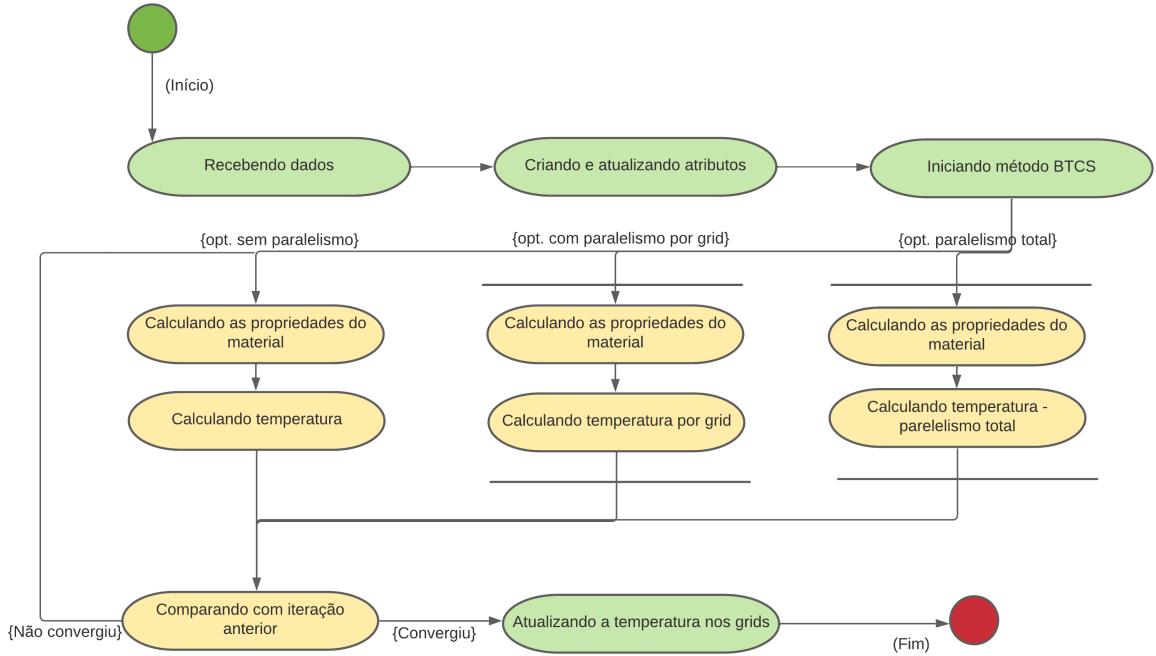
4.4 Diagrama de máquina de estado

O diagrama de máquina de estado descreve os estados de uma classe desde o momento de sua criação, até sua destruição. A Figura 4.6 mostra a máquina de estado para a classe CSimuladorTemperatura.

Inicialmente, os dados são recebidos pela classe CSimuladorTemperatura, seus atributos são atualizados, e é iniciado o método BTCS. Conforme a opção de paralelismo, ele pode seguir para uma dentre as três sequências, chegando na comparação com a iteração anterior.

Como o método resolve os sistemas de equações de maneira iterativa, é necessário a comparação entre os valores calculados, com a iteração anterior, para avaliar se os valores convergiram. Se não convergiu, ele retorna para os cálculos, se convergiu, ele atualiza as temperaturas nos grids, e finaliza suas ações.

Figura 4.6: Diagrama de máquina de estado para a classe CSimuladorTemperatura



Fonte: Produzido pelo autor.

4.5 Diagrama de atividades

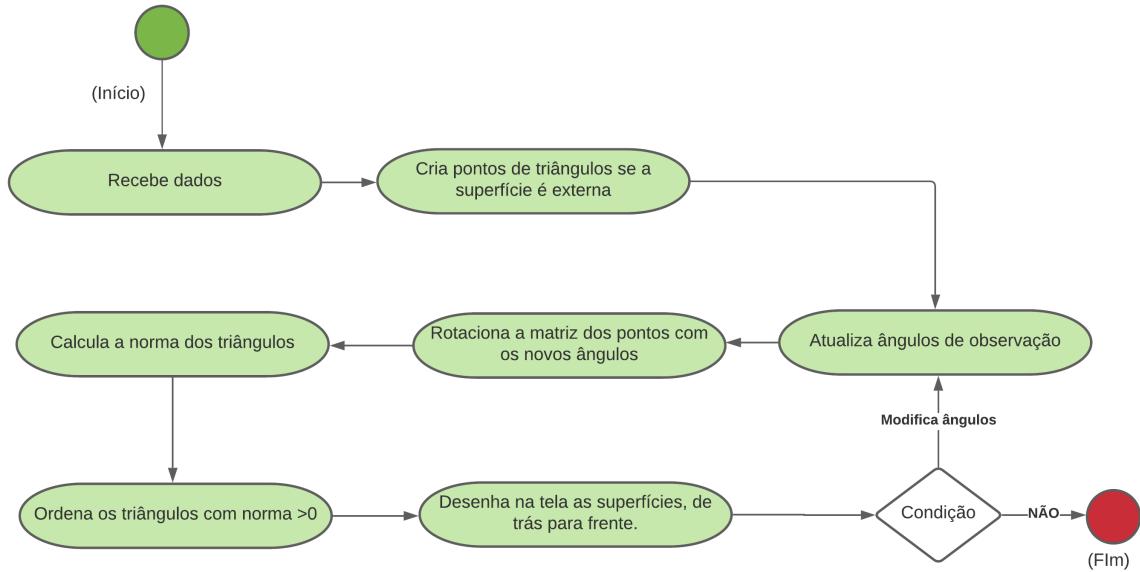
No diagrama de atividades apresentado na Figura 4.7, é mostrado em detalhes uma atividade específica. Para o presente caso, será apresentado o diagrama de atividades do algoritmo de renderização da classe CRender3D, devido à complexidade de renderização 3D.

Inicialmente, essa classe recebe os dados do simulador, as posições e os atributos das células. Com isso, são criadas matrizes com os pontos de triângulos para cada respectivo ponto, se a superfície desse objeto for possível de se observar. Ou seja, se existir uma superfície em contato com essa outra superfície, nenhuma das duas serão criadas, pois estarão dentro do objeto.

A partir desse ponto, são obtidos os valores dos ângulos e calculado a matriz rotacionada dos pontos dos triângulos e, em seguida, obtidas suas normas. Se positivo, esse valor é guardado em uma matriz, a qual é ordenada em ordem crescente.

Com todos os valores calculados e ordenados, a classe renderiza na tela o objeto 3D. Conforme condições do usuário, o objeto pode concluir suas atividades, ou calcular novos valores para outra renderização.

Figura 4.7: Diagrama de atividades para o algoritmo de renderização CRender3D Renderizacao()



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 5

Projeto

Neste capítulo são apresentadas questões relacionadas ao desenvolvimento do projeto, como ambiente de desenvolvimento e bibliotecas gráficas, comentados juntamente com a evolução de versões. Também são apresentados os diagramas de componentes e de implantação.

5.1 Projeto do sistema

O paradigma de programação selecionado foi o orientado o objeto.

A linguagem de programação selecionada foi C++ pelos seguintes motivos:

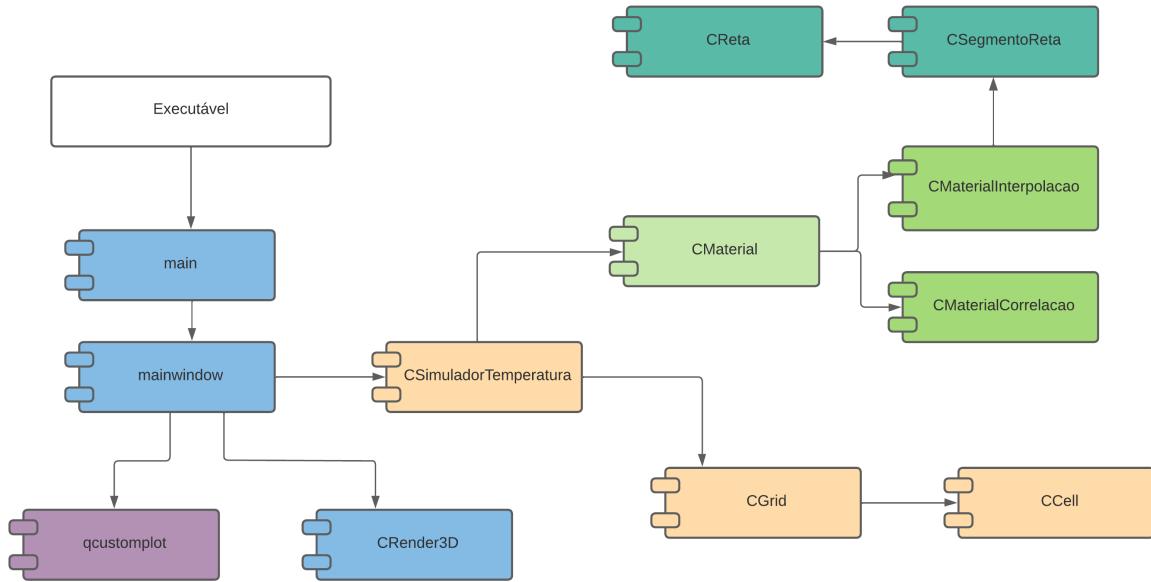
- Linguagem de programação de alto desempenho, adequada para cálculos numéricos intensivos.
- Amplo suporte a orientação a objeto e diversos vínculos com UML.
- Dezenas de bibliotecas de suporte prontas, incluindo interface gráfica amigável (biblioteca Qt), gráficos (biblioteca QCustomPlot) e bibliotecas para gerar saídas em pdf.
- Programação de alto nível com vários graus de abstração.
- Diversos ambientes de desenvolvimento - IDEs, compiladores, debugers, profilers.
- Compiladores e ferramentas gratuítas disponíveis, facilitando o uso por alunos.
- Segundo o índice tiobe, esta entre as três linguagens de programação mais usadas nos últimos 20 anos, sendo base conceitual para diversas outras linguagens.

Iremos apresentar a seguir os diagramas de componentes e de implementação.

5.2 Diagrama de componentes

O diagrama de componentes mostra as relações entre todos os componentes do *software* e é apresentado na Figura 5.1

Figura 5.1: Diagrama de componentes



Fonte: Produzido pelo autor.

Começando pela esquerda na Figura 5.1, temos o executável e o main. Os outros dois componentes em azul criam janelas para o usuário se comunicar com o *software*. O componente em roxo, é a biblioteca de gráficos utilizados pelo *software*.

Os componentes em verde, são responsáveis por calcular as propriedades dos materiais, por interpolação ou correlação.

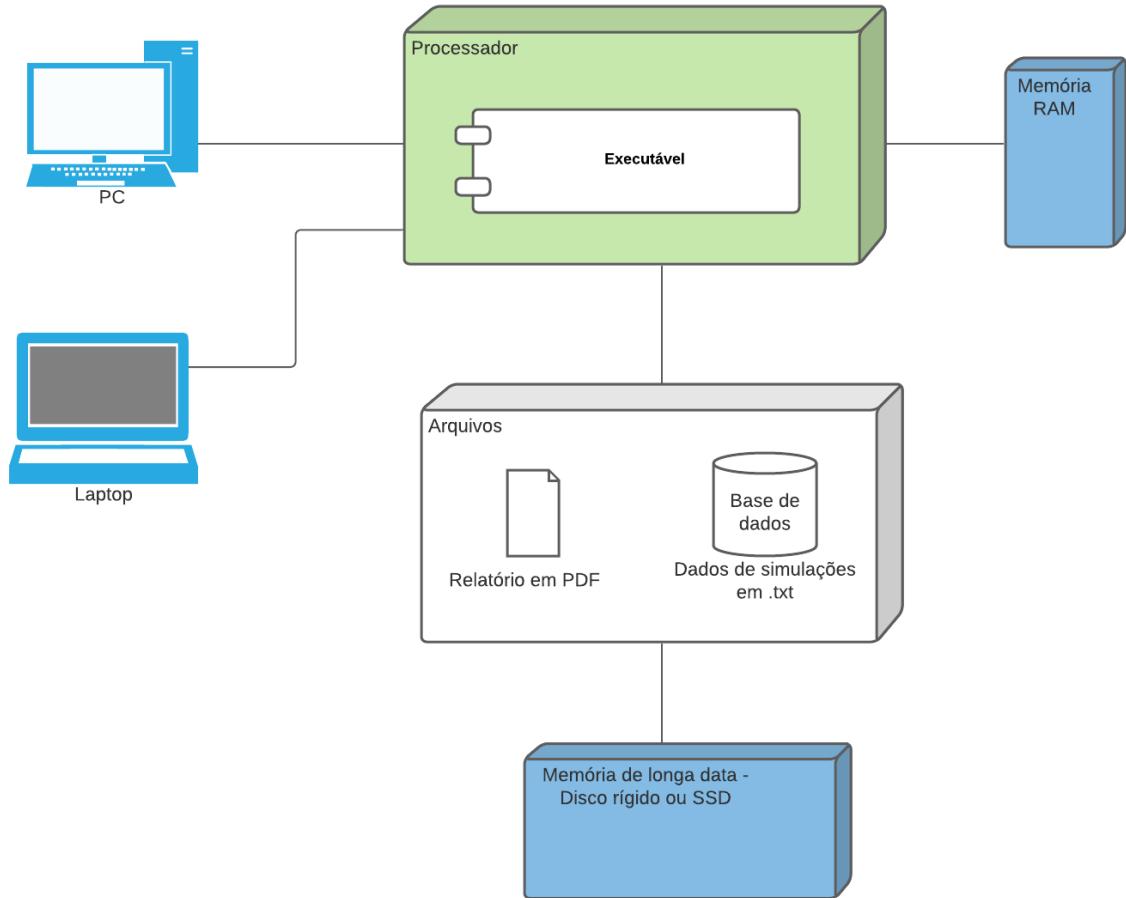
Por fim, os componentes em laranja claro são responsáveis pela simulação da difusão térmica.

5.3 Diagrama de implementação

O diagrama de implementação é um diagrama que apresenta as relações entre sistema e *hardware*, mostrando quais equipamentos são necessários para que o *software* seja executado corretamente.

Na Figura 5.2, são mostrados quais equipamentos o *software* SDT-3D utiliza. No caso, são utilizados os periféricos de um *desktop* ou *notebook*, o processador, memória RAM e memória de longo prazo, como um HD ou SSD.

Figura 5.2: Diagrama de implementação



Fonte: Produzido pelo autor.

O software foi desenvolvido utilizando o padrão apresentado pelo Prof. André Bueno na disciplina de programação e ilustrado na Figura 1.1. Note que o “Ciclo de Concepção e Análise” é composto pelo que foi apresentado nos capítulos anteriores e neste capítulo. Os “Ciclos de Planejamento/Detalhamento” e “Ciclo Construção”, envolvem a construção das diferentes versões do software, e serão apresentados nos próximos capítulos.

Capítulo 6

Ciclos de Planejamento/Detalhamento

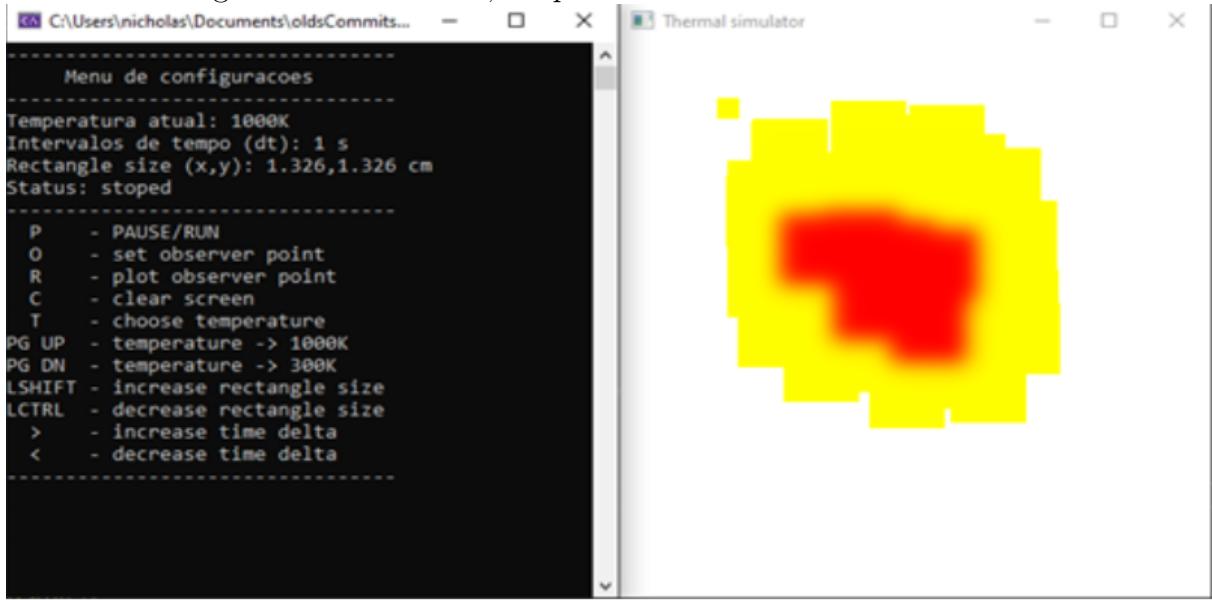
Apresenta-se neste capítulo as versões do software desenvolvido.

6.1 Versão 0.1 - Uso modo terminal e biblioteca SFML para saída gráfica

Na primeira versão foi utilizado um sistema de entrada de dados via terminal e saída de dados gráfica. A biblioteca *SFML*¹ foi utilizada para a criação de janelas para o usuário. Esta versão foi desenvolvida usando ambiente de desenvolvimento *Visual Studio*, tudo isso no sistema operacional *Windows 10*.

Note que é um *software* simples, com uma mistura de janela-terminal. O usuário podia desenhar e simular, mas não tinha muita liberdade para escolher e adicionar materiais. Veja Figura 6.1.

¹*Simple and Fast Multimedia Library* é uma biblioteca de interface gráfica multi-linguagem, ver em <<https://www.sfml-dev.org/>>.

Figura 6.1: Versão 0.1, simples e utilizando a biblioteca *SFML*

Fonte: Produzido pelo autor.

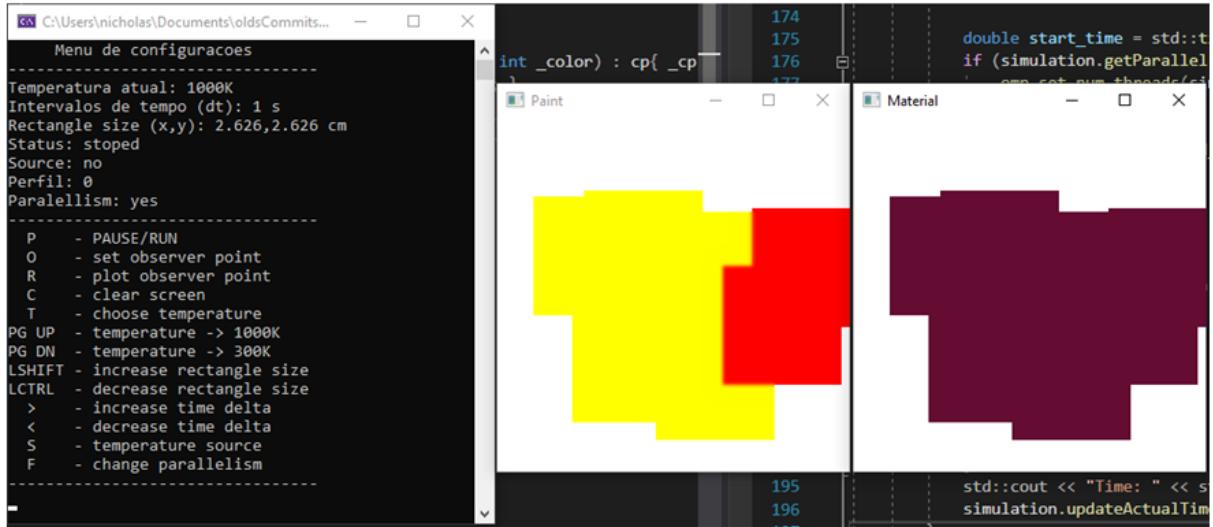
6.2 Versão 0.2 - Adição de visualização para os tipos de materiais

Nesta versão foram implementadas as seguintes melhorias:

- Criada uma segunda janela, a qual replica o desenho com as cores do material escolhido.
- Opção de navegação entre perfis, tornando o simulador tridimensional.
- Opção de escolher paralelismo por *grids* ou sem paralelismo.
- Foram realizadas otimizações e organizações de código.
- Adição da opção da temperatura ser uma fonte/sumidouro de calor (temperatura constante no ponto analisado).

Veja Figura 6.2.

Figura 6.2: Versão 0.2, simples, mas contendo uma segunda janela dos materiais



Fonte: Produzido pelo autor.

6.3 Versão 0.3 - Adição de atalhos na tela

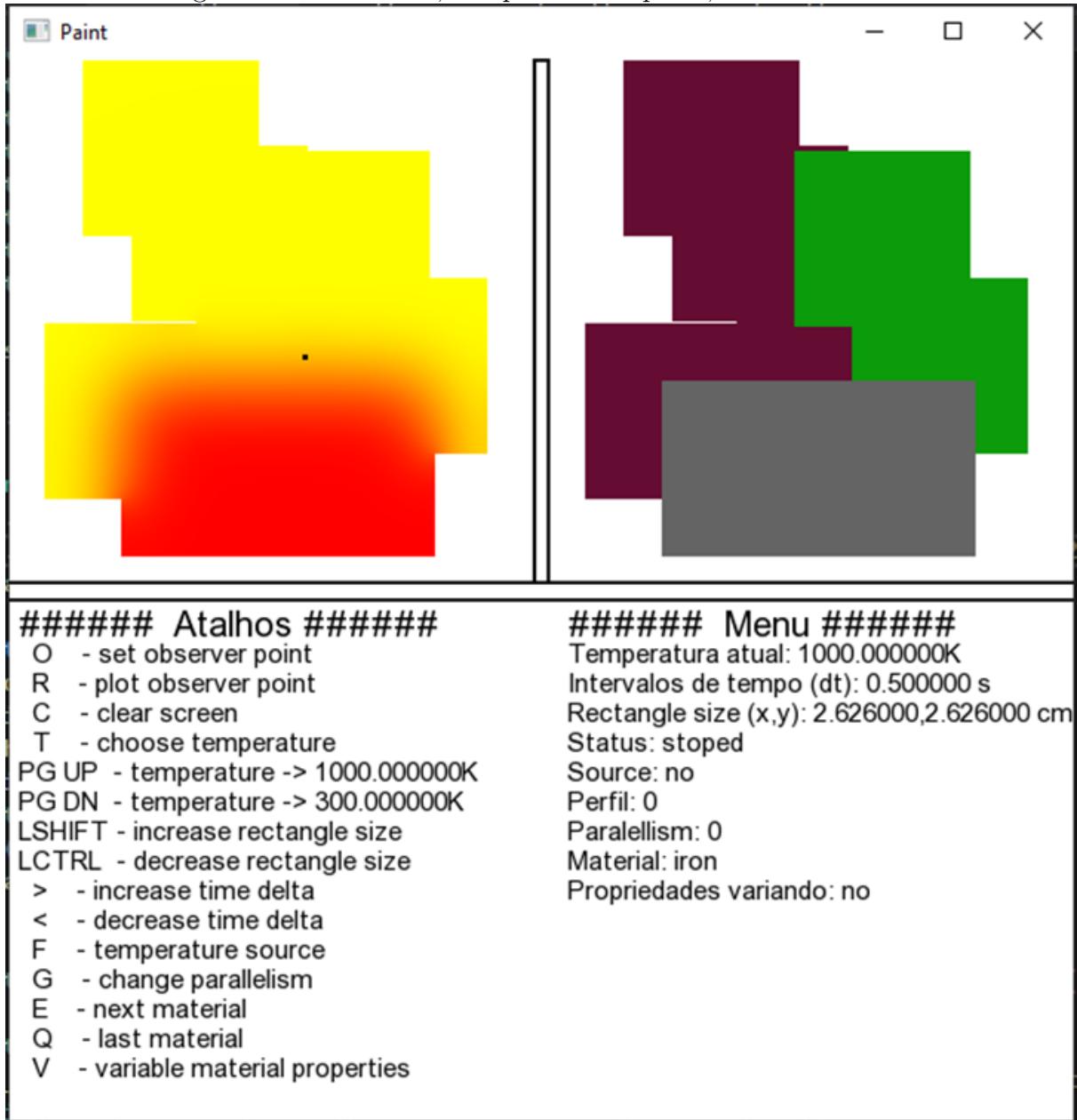
Esta foi a última versão montada utilizando a biblioteca *SFML*. Foi uma versão importantíssima para o aprendizado, pois o usuário não desenhava diretamente no *software*, mas era enviado uma lista de propriedades do desenho para o *grid* e, quando o desenho era atualizado, a biblioteca utilizava os valores do *grid*. Isso permitiu juntar as duas janelas.

Foram implementadas as seguintes melhorias:

- Adição de instruções de uso incluindo teclas de atalho.
- Junção das três janelas anteriores (terminal, janela de desenho e janela de materiais) em uma única janela.
- Implementado a opção do material variar com a temperatura, em versão básica de teste. Essa melhoria se desdobrou na opção de escolher materiais com condutividade térmica calculada por valor constante, correlação ou interpolação.

Esta versão é ilustrada na Figura 6.3.

Figura 6.3: Versão 0.3, completa e complexa, mas muito lenta



Fonte: Produzido pelo autor.

6.4 Versão 0.4 - Mudança para biblioteca Qt

Durante o desenvolvimento das versões anteriores, foram identificados problemas sobre a dificuldade de lidar com mudanças na interface, quando se usa a biblioteca *SFML*. Também foi identificado problema de desempenho.

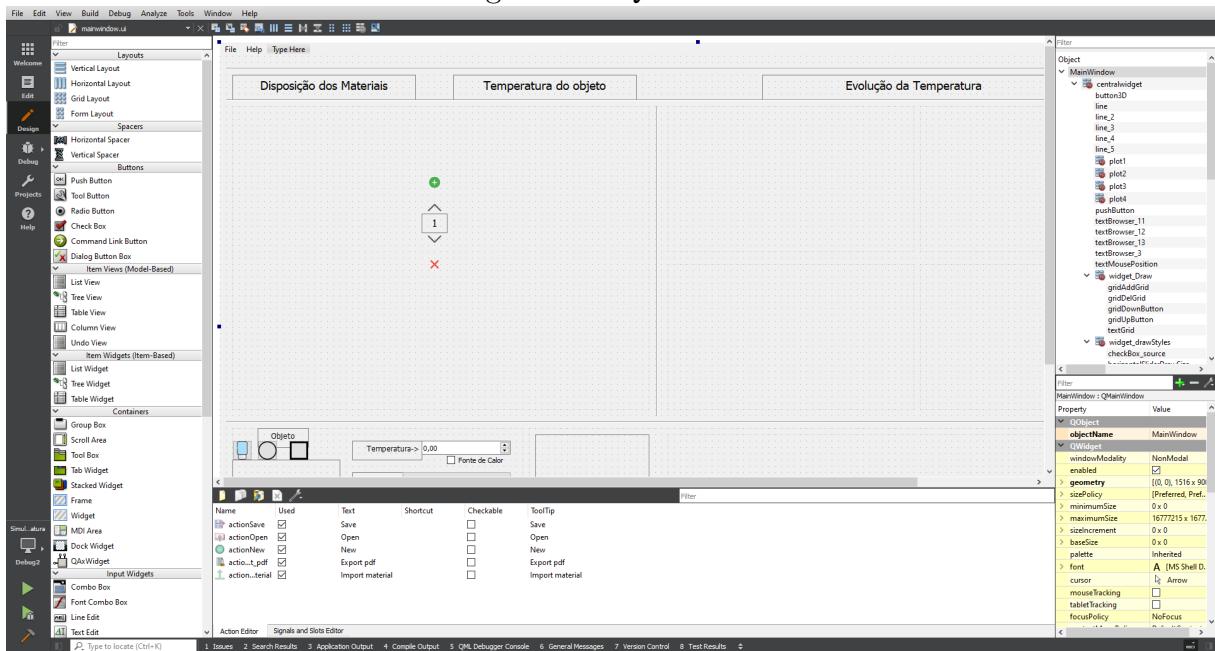
Então surgiu essa necessidade de mudança e a biblioteca gráfica *Qt* (<https://www.qt.io/>), foi escolhida por ser:

- mais completa.
- mais rápida.

- de amplo uso em programas de engenharia.
- com versões livres.
- multiplataforma.

Para utilizar as ferramentas fornecidas por essa biblioteca, foi migrado do editor de texto *Visual Studio* para o *Qt Creator*, a Figura 6.4 apresenta o ambiente de trabalho do *Qt Creator*.

Figura 6.4: *Qt Creator*



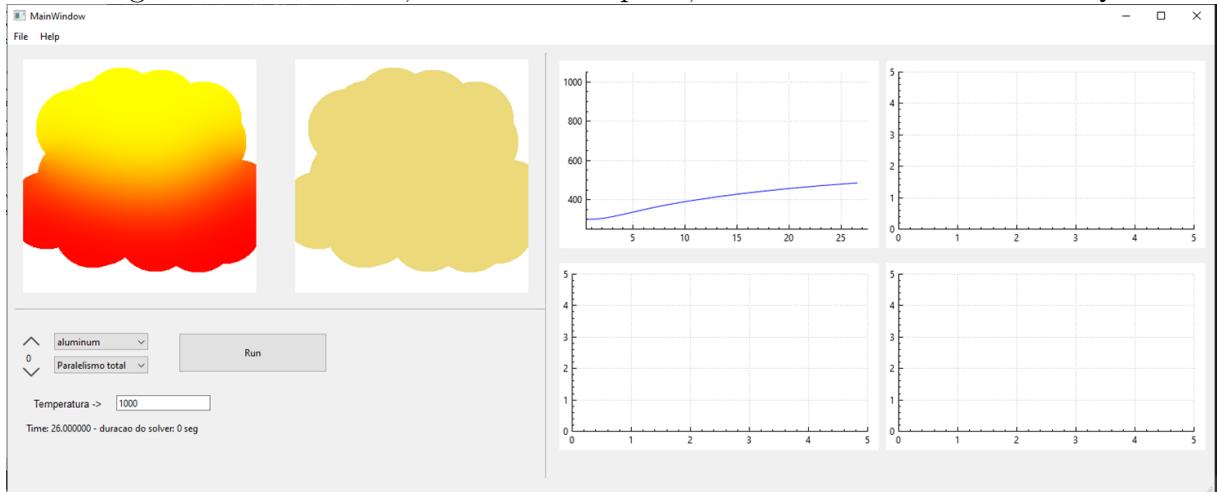
Fonte: Produzido pelo autor.

Como o *software* foi todo programado utilizando o paradigma da orientação a objeto, esta migração foi muito rápida. Tivemos de modificar, quase que somente, a classe da janela.

Foram implementadas as seguintes melhorias:

- Adição na interface gráfica da entrada de dados da temperatura.
- Botão para selecionar o tipo de material.
- Definição de 4 áreas para saída gráfica.

A versão 0.4 do software é apresentada na Figura 6.5.

Figura 6.5: Versão 0.4, inicial e incompleta, mas utilizando a biblioteca *Qt*

Fonte: Produzido pelo autor.

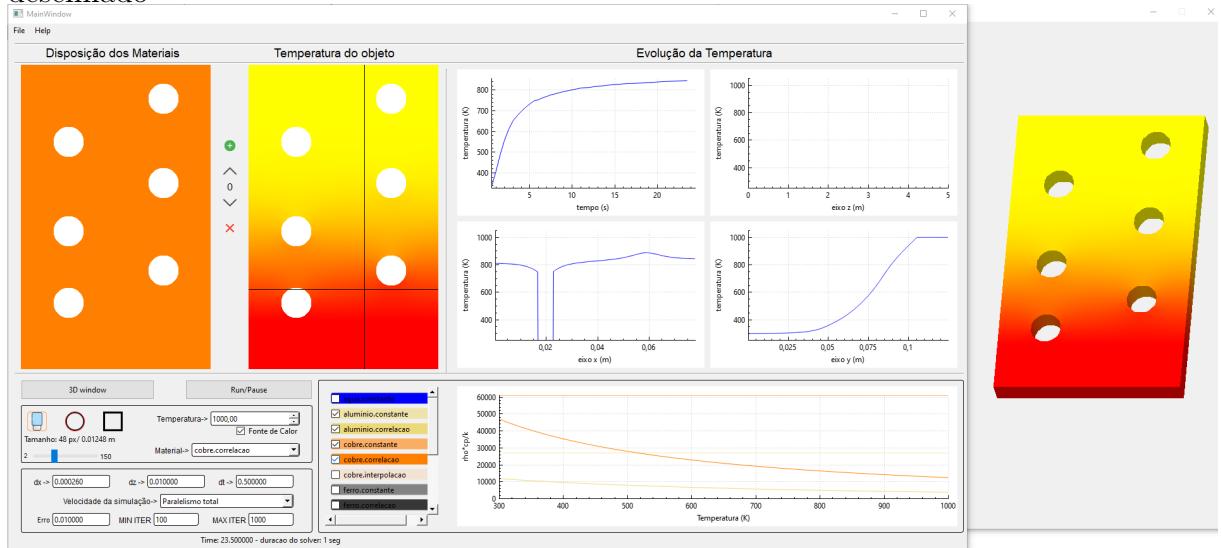
6.5 Versão 0.5 - Melhorias na interface gráfica - usabilidade

A curva de evolução do *software* dentro do *Qt Creator* foi exponencial, chegando à versão final apresentada na Figura 6.6.

Foram implementadas as seguintes melhorias:

- Duas áreas que apresentam os cortes desenhados.
- Quatro gráficos com valores da temperatura ao longo do tempo ou espaço.
- No canto inferior esquerdo, adicionamos opções para a simulação ou criação do objeto a ser simulado.
- No lado direito, parte inferior, são mostradas as propriedades termofísicas de vários materiais como função da temperatura.
- Janela mostrando o objeto em renderização 3D.

Figura 6.6: Versão 0.5, final. Na direita é apresentado a visualização 3D do objeto desenhado



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 7

Ciclos Construção - Implementação

Neste capítulo, são apresentados os códigos fonte implementados.

7.1 Versão 0.3 - Código fonte - SFML

Como visto na seção 6.3, a versão 0.3 foi a última desenvolvida utilizando a biblioteca *SFML*, apresenta-se a seguir o código da última versão usando *SFML*. Será apresentado somente os códigos para a geração da janela, pois os outros arquivos são similares ao da última versão, com pequenas alterações.

Apresenta-se na listagem 7.1 o arquivo de cabeçalho da classe mainwindow.

Listagem 7.1: Arquivo de implementação da janela usando a biblioteca SFML

```
1 #ifndef CWINDOW_HPP
2 #define CWINDOW_HPP
3
4 #include <SFML/Graphics.hpp>
5 #include "CSimulator.hpp"
6 #include <iostream>
7 #include <windows.h>
8 #include <string>
9 #include <omp.h>
10
11 class CWindow {
12 public:
13     CWindow(int _width, int _height);
14     void Run();
15     void printStudy();
16
17 private: // variables
18     int mat = 0;
```

```

20     int height, width;
21     int distance_of_draws = 10;
22     sf::Font font;
23     sf::RenderWindow window;
24     sf::RenderTexture canvas;
25     sf::Sprite sprite;
26     CSimulator simulation;
27     sf::Vector2f recSize;
28     sf::Vector2i studyCoordinates;
29
30     bool runningSimulator = false;
31     bool isSourceActive = false;
32     int currentGrid = 0;
33
34 private: // functions
35     sf::Vector2f case_LShift(sf::Vector2f recSize);
36     sf::Vector2f case_LCtrl(sf::Vector2f recSize);
37     sf::Color getRGB(double temp);
38
39     void printMenu(sf::Vector2f recSize);
40     void paint_results();
41     void paint_design();
42     void paint_shortcuts();
43     void paint_menu();
44     void paintStudyPoint();
45     int draw_text(std::string _text, int start_x, int start_y);
46 };
47
48 #endif

```

Apresenta-se na listagem 7.2 a implementação da classe mainwindow.

Listagem 7.2: Arquivo de implementação da janela usando a biblioteca SFML

```

1 #include "CWindow.hpp"
2 CWindow::CWindow(int _width, int _height) {
3     height = _height; width = _width;
4     simulation.resetSize(width, height);
5     font.loadFromFile("arial.ttf");
6     recSize.x = 101;
7     recSize.y = 101;
8
9     HWND console = GetConsoleWindow();
10    RECT ConsoleRect;

```

```
11     GetWindowRect(console, &ConsoleRect);
12
13     MoveWindow(console, ConsoleRect.left, ConsoleRect.top, 450,
14                 600, TRUE);
15 }
16
17 void CWindow::Run() {
18     bool isDrawing = false;
19     int contador = 0;
20     double maxTemp, minTemp;
21
22     sf::Vector2f lastPos;
23
24     sf::RectangleShape brush(recSize);
25     sf::RectangleShape pixelPaint(sf::Vector2f(1, 1));
26
27     sf::RenderWindow window(sf::VideoMode(width*2+
28                                         distance_of_draws, height*2+ distance_of_draws), L"Paint",
29                           sf::Style::Default);
30
31
32     window.setPosition(sf::Vector2i(700, 300));
33     //window.setVerticalSyncEnabled(false);
34     window.setFramerateLimit(100);
35
36     canvas.create(width*2+distance_of_draws, height*2+
37                   distance_of_draws);
38     canvas.clear(sf::Color::White);
39
40     sprite.setTexture(canvas.getTexture(), true);
41
42     brush.setFillColor(sf::Color(255, 255, 0, 255));
43
44     printMenu(recSize); paint_menu(); paint_menu();
45     paint_design();
46     paint_shortcuts();
47     while (window.isOpen()) {
48         sf::Event event;
```

```
49             window.close();
50         break;
51     case sf::Event::KeyPressed:
52         switch (event.key.code) {
53             case sf::Keyboard::C:
54                 canvas.clear(sf::Color::White);
55                 simulation.resetGrid();
56                 canvas.display();
57                 break;
58             case sf::Keyboard::P:
59                 runningSimulator = runningSimulator ? false :
60                                         true;
61                 printMenu(recSize); paint_menu(); paint_menu();
62                 break;
63             case sf::Keyboard::T:
64                 std::cout << "Digite a nova temperatura:" ;
65                 double temperature;
66                 std::cin >> temperature;
67                 simulation.set_ActualTemperature(temperature);
68                 brush.setFillColor(getRGB(temperature));
69                 printMenu(recSize); paint_menu();
70                 break;
71             case sf::Keyboard::PageUp:
72                 brush.setFillColor(sf::Color(255, 0, 0, 255));
73                 simulation.set_ActualTemperature(simulation.
74                                         getMax());
75                 printMenu(recSize); paint_menu();
76                 break;
77             case sf::Keyboard::PageDown:
78                 brush.setFillColor(sf::Color(255, 255, 0, 255))
79                                         ;
80                 simulation.set_ActualTemperature(simulation.
81                                         getMin());
82                 printMenu(recSize); paint_menu();
83                 break;
84             case sf::Keyboard::Up:
85                 currentGrid++;
86                 if (currentGrid > 3) currentGrid = 3;
87                 paint_results();
88                 printMenu(recSize); paint_menu();
89                 break;
90             case sf::Keyboard::Down:
```

```
87         currentGrid--;
88         if (currentGrid < 0) currentGrid = 0;
89         paint_results();
90         printMenu(recSize); paint_menu();
91         break;
92     case sf::Keyboard::LShift:
93         recSize = case_LShift(recSize);
94         brush.setSize(recSize);
95         printMenu(recSize); paint_menu();
96         break;
97     case sf::Keyboard::LControl:
98         recSize = case_LCtrl(recSize);
99         brush.setSize(recSize);
100        printMenu(recSize); paint_menu();
101        break;
102    case sf::Keyboard::Comma:
103        simulation.minusDelta_t();
104        printMenu(recSize); paint_menu();
105        break;
106    case sf::Keyboard::Period:
107        simulation.plusDelta_t();
108        printMenu(recSize); paint_menu();
109        break;
110    case sf::Keyboard::O:
111        studyCoordinates = sf::Mouse::getPosition(
112            window);
113        simulation.studyPosition(studyCoordinates,
114            currentGrid);
115        pixelPaint.setFillColor(sf::Color::Black);
116        pixelPaint.setPosition((sf::Vector2f)
117            studyCoordinates);
118        canvas.draw(pixelPaint);
119        canvas.display();
120        break;
121    case sf::Keyboard::R:
122        simulation.plot();
123        break;
124    case sf::Keyboard::V:
125        simulation.changeMaterialPropertiesStatus();
126        printMenu(recSize); paint_menu();
127        break;
128    case sf::Keyboard::G:
```

```
126         simulation.changeParallel();
127         printMenu(recSize); paint_menu();
128         break;
129     case sf::Keyboard::S:
130         simulation.saveGrid("teste.txt");
131         break;
132     case sf::Keyboard::A:
133         simulation.openGrid("teste.txt");
134         paint_results();
135         break;
136     case sf::Keyboard::F:
137         isSourceActive = isSourceActive ? false : true;
138         printMenu(recSize); paint_menu();
139         break;
140     case sf::Keyboard::E:
141         simulation.changeRightMaterial();
142         printMenu(recSize); paint_menu();
143         break;
144     case sf::Keyboard::Q:
145         simulation.changeLeftMaterial();
146         printMenu(recSize); paint_menu();
147         break;
148     }
149
150     case sf::Event::Resized: {
151         sf::View view(window.getView());
152         const sf::Vector2f size(window.getSize().x, window.
153             getSize().y);
154         view.setSize(size);
155         view.setCenter(size / 2.f);
156         window.setView(view);
157         break;
158     }
159     case sf::Event::MouseButtonPressed:
160         if (event.mouseButton.button == sf::Mouse::Left) {
161             isDrawing = true;
162             lastPos = window.mapPixelToCoords({ event.
163                 mouseButton.x, event.mouseButton.y });
164             simulation.grid[currentGrid]->draw(lastPos,
165                 recSize, simulation.get_ActualTemperature(),
166                 isSourceActive, simulation.
167                 getActualMaterial());
```

```
163
164         paint_results();
165     }
166     break;
167 case sf::Event::MouseButtonReleased:
168     if (event.mouseButton.button == sf::Mouse::Left)
169         isDrawing = false;
170     break;
171 } // switch event type
172 }// while pollEvent
173
174 if (runningSimulator && contador >= -1) {
175
176     double start_time = std::time(0);
177
178     if (simulation.getParallel() == 0) {
179         simulation.run_optimization();
180     }
181     else if (simulation.getParallel() == 1) {
182         omp_set_num_threads(simulation.getNGRIDs());
183         #pragma omp parallel
184     {
185         simulation.run(omp_get_thread_num());
186     }
187 }
188 else {
189     simulation.run();
190 }
191 paint_results();
192 contador = -1;
193 std::cout << "Time:" << std::setw(5) << simulation.
194     get_time() << " - duracao:" << std::time(0) -
195     start_time << " segundos" << "\r";
196     simulation.updateActualTime();
197 }
198
199 contador++;
200 window.clear(sf::Color(64, 64, 64));
201 window.draw(sprite);
202 window.display();
203 }// while is open
204 }
```

```
203
204 sf::Color CWindow::getRGB(double temp) {
205     double maxTemp = simulation.getTmax();
206     double minTemp = simulation.getTmin();
207     int blue = 0;
208     int n = (maxTemp - temp)*255/(maxTemp - minTemp);
209
210     return sf::Color(255, n, 0, 255);
211 }
212
213 void CWindow::paint_results() {
214     sf::RectangleShape pixelPaint(sf::Vector2f(1, 1));
215     for (int i = 0; i < width; i++) {
216         for (int k = 0; k < height; k++) {
217             if (!simulation.grid[currentGrid]->operator()(i, k)->
218                 active)
219                 pixelPaint.setFillColor(sf::Color::White);
220             else
221                 pixelPaint.setFillColor(getRGB(simulation.grid[
222                     currentGrid]->operator()(i, k)->temp));
223             pixelPaint.setPosition(sf::Vector2f(i, k));
224             canvas.draw(pixelPaint);
225         }
226     }
227     for (int i = 0; i < width; i++) {
228         for (int k = 0; k < height; k++) {
229             if (!simulation.grid[currentGrid]->operator()(i, k)->
230                 active)
231                 pixelPaint.setFillColor(sf::Color::White);
232             else
233                 pixelPaint.setFillColor(simulation.grid[currentGrid
234                     ]->operator()(i, k)->material->getColor());
235             pixelPaint.setPosition(sf::Vector2f(i+width+
236                 distance_of_draws, k));
237             canvas.draw(pixelPaint);
238     }
239     canvas.display();
240     paintStudyPoint();
241 }
```

```
240 void CWindow::paint_design() {
241     sf::RectangleShape delimiter(sf::Vector2f(2, height));
242     delimiter.setFillColor(sf::Color::Black);
243     delimiter.setPosition(sf::Vector2f(width, 0));
244     canvas.draw(delimiter);
245     delimiter.setPosition(sf::Vector2f(width + distance_of_draws -
246         2, 0));
247     canvas.draw(delimiter);
248     delimiter.setSize(sf::Vector2f(width * 2 + distance_of_draws,
249         2));
250     delimiter.setPosition(sf::Vector2f(0, 0));
251     canvas.draw(delimiter);
252     delimiter.setPosition(sf::Vector2f(0, height));
253     canvas.draw(delimiter);
254 }
255
256 void CWindow::paint_shortcuts() {
257     sf::Text text;
258     text.setFont(font);
259     text.setFillColor(sf::Color::Black);
260     text.setCharacterSize(20);
261
262     text.setString("##### Atalhos #####");
263     text.move(sf::Vector2f(5, height + distance_of_draws + 2));
264     canvas.draw(text);
265
266     int y;
267     y = draw_text("0 - set_observer_point", 5, height +
268         distance_of_draws + 2+20);
269     y = draw_text("R - plot_observer_point", 5, y);
270     y = draw_text("C - clear_screen", 5, y);
271     y = draw_text("T - choose_temperature", 5, y);
272     y = draw_text("PGUP - temperature -> " + std::to_string(
273         simulation.getTmax()) + "K", 5, y);
274     y = draw_text("PGDN - temperature -> " + std::to_string(
275         simulation.getTmin()) + "K", 5, y);
276     y = draw_text("LSHIFT - increase_rectangle_size", 5, y);
277     y = draw_text("LCTRL - decrease_rectangle_size", 5, y);
278     y = draw_text("> - increase_time_delta", 5, y);
```

```

276     y = draw_text("uu<uuuuu-udecrease_time_delta", 5, y);
277     y = draw_text("uuFuuuuu-utemperature_source", 5, y);
278     y = draw_text("uuGuuuuu-uchange_parallelism", 5, y);
279     y = draw_text("uuEuuuuu-unext_material", 5, y);
280     y = draw_text("uuQuuuuu-ulast_material", 5, y);
281     y = draw_text("uuVuuumu-uvariable_material_properties", 5, y);
282
283     canvas.display();
284 }
285 void CWindow::paint_menu() {
286     // clear menu
287     sf::RectangleShape delimiter(sf::Vector2f(width, height));
288     delimiter.setFillColor(sf::Color::White);
289     delimiter.setPosition(sf::Vector2f(width+distance_of_draws,
290         height+distance_of_draws+2));
291     canvas.draw(delimiter);
292
293     sf::Text text;
294     text.setFont(font);
295     text.setFillColor(sf::Color::Black);
296     text.setCharacterSize(20);
297     int x = width + distance_of_draws + 10;
298     text.setString("##### uMenu #####");
299     text.move(sf::Vector2f(x, height + distance_of_draws + 2));
300     canvas.draw(text);
301
302     int y;
303     y = draw_text("Temperaturaatual:" + std::to_string(simulation
304         .get_ActualTemperature()) + "K", x, height +
305         distance_of_draws + 2 + 20);
306
307     y = draw_text("Intervalosdetempo(dt):" + std::to_string(
308         simulation.get_delta_t()) + "us", x, y);
309     y = draw_text("Rectanglesize(x,y):" + std::to_string(
310         recSize.x * 0.026) + "," + std::to_string(recSize.y *
311         0.026) + "cm", x, y);
312     std::string _temp_text = (runningSimulator ? "running" :
313         "stoped");
314     y = draw_text("Status:" + _temp_text, x, y);
315     _temp_text = (isSourceActive ? "yes" : "no");
316     y = draw_text("Source:" + _temp_text, x, y);
317     y = draw_text("Perfil:" + std::to_string(currentGrid), x, y);

```

```
311     y = draw_text("Paralellism:" + std::to_string(simulation.
312                   getParallel()), x, y);
313     y = draw_text("Material:" + simulation.getActualMaterial(), x
314                   , y);
315     (simulation.getMaterialStatus() ? "yes" : "no");
316     y = draw_text("Propriedades variando:" + _temp_text, x, y);
317
318     canvas.display();
319 }
320
321 int CWindow::draw_text(std::string _text, int start_x, int start_y)
322 {
323     sf::Text text;
324     int character_size = 15;
325     text.setCharacterSize(character_size);
326     text.setFont(font);
327     text.setFillColor(sf::Color::Black);
328
329     text.move(sf::Vector2f(start_x, start_y));
330     text.setString(_text);
331     canvas.draw(text);
332     return start_y + character_size + 2;
333 }
334
335 void CWindow::paintStudyPoint() {
336     if (currentGrid == simulation.getStudyGrid()) {
337         sf::RectangleShape pixelPaint(sf::Vector2f(3, 3));
338         pixelPaint.setFillColor(sf::Color::Black);
339         pixelPaint.setPosition(simulation.getPositionStudyVector())
340             ;
341         canvas.draw(pixelPaint);
342         canvas.display();
343     }
344 }
345
346 sf::Vector2f CWindow::case_LShift(sf::Vector2f recSize) {
347     if (recSize.x < 120) {
348         recSize.x += 2;
349         recSize.y += 2;
350     }
351     return recSize;
352 }
```

```

349
350 sf::Vector2f CWindow::case_LCtrl(sf::Vector2f recSize) {
351     if (recSize.x > 2) {
352         recSize.x -= 2;
353         recSize.y -= 2;
354     }
355     return recSize;
356 }
357
358 void CWindow::printStudy() {
359     std::vector<double> temp = simulation.getTemperatureStudy();
360     std::vector<double> time = simulation.getTimeStudy();
361
362     std::cout << "time\u00d7\u00d7temp" << std::endl;
363     for (int i = 0; i < temp.size(); i++)
364         std::cout << time[i] << "\u00d7\u00d7" << temp[i] << std::endl;
365 }
366
367 void CWindow::printMenu(sf::Vector2f recSize) {
368     system("cls");
369     std::cout << "-----" << std::endl;
370     std::cout << "Menu de configuracoes" << std::endl;
371     std::cout << "-----" << std::endl;
372     std::cout << "Temperatura\u00e1tual:\u20ac" << simulation.
373         get_ActualTemperature() << "K" << std::endl;
374     std::cout << "Intervalos\u00e1de\u00e1tempo(dt):\u20ac" << simulation.
375         get_delta_t() << "s" << std::endl;
376     std::cout << "Rectangle\u00e1size(x,y):\u20ac" << recSize.x*0.026 << ", "
377         << recSize.y*0.026 << "cm" << std::endl;
378     std::cout << "Status:\u20ac" << (runningSimulator ? "running" :
379         "stoped") << std::endl;
380     std::cout << "Source:\u20ac" << (isSourceActive ? "yes" : "no") <<
381         std::endl;
382     std::cout << "Perfil:\u20ac" << currentGrid << std::endl;
383     std::cout << "Paralellism:\u20ac" << simulation.getParallel() << std
384         ::endl;
385     std::cout << "Material:\u20ac" << simulation.getActualMaterial() <<
386         std::endl;
387     std::cout << "Propriedades\u00e1variando:\u20ac" << (simulation.
388         getMaterialStatus() ? "yes" : "no") << std::endl;
389     std::cout << "-----" << std::endl;
390     std::cout << "P\u00e1us-\u00d7PAUSE/RUN" << std::endl;

```

```

383     std::cout << "uu0uuuu-set_observer_point" << std::endl;
384     std::cout << "uuRuuuu-plot_observer_point" << std::endl;
385     std::cout << "uuCuuuu-clear_screen" << std::endl;
386     std::cout << "uuTuuuu-choose_temperature" << std::endl;
387     std::cout << "PG_UPuu-temperature->" << simulation.getTmax()
388             << "K" << std::endl;
389     std::cout << "PG_DNuu-temperature->" << simulation.getTmin()
390             << "K" << std::endl;
391     std::cout << "LSHIFT_u-increase_rectangle_size" << std::endl;
392     std::cout << "LCTRL_u-decrease_rectangle_size" << std::endl;
393     std::cout << "uu>uuuu-increase_time_delta" << std::endl;
394     std::cout << "uu<uuuu-decrease_time_delta" << std::endl;
395     std::cout << "uuFuuuu-temperature_source" << std::endl;
396     std::cout << "uuGuuuu-change_parallelism" << std::endl;
397     std::cout << "uuEuuuu-next_material" << std::endl;
398     std::cout << "uuQuuuu-last_material" << std::endl;
399     std::cout << "uuVuuuu-variable_material_properties" << std::endl;
400 }
```

7.2 Versão 0.5 - Código fonte - Qt

Apresenta-se a seguir um conjunto de classes (arquivos .h e .cpp) além do programa `main`.

Apresenta-se na listagem 7.3 o arquivo com código da função `main`.

Listagem 7.3: Arquivo de implementação da função `main`

```

1 #include "mainwindow.h"
2 #include <QApplication>
3
4 int main(int argc, char *argv[])
5 {
6     QApplication a(argc, argv);
7     MainWindow w;
8     w.show();
9     return a.exec();
10 }
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.4 o arquivo de cabeçalho da classe `mainwindow`.

Listagem 7.4: Arquivo de implementação da classe MainWindow

```
1#ifndef MAINWINDOW_H
2#define MAINWINDOW_H
3
4
5#include <QDir>                                ///< Biblioteca que permite
6                                         // acessar diretorios.
7#include <QImage>                               /// desenhar pixels
8#include <QColor>                               /// escolher a cor dos pixels
9#include <string>
10#include <iostream>
11#include <QPainter>                            /// desenhar pixels
12#include <QPrinter>                           ///< Biblioteca que habilita a
13                                         // geracao de pdf.
14#include <QPainter>                           ///< Biblioteca que auxilia a
15                                         // geracao do pdf.
16#include <QPdfWriter>
17#include <QMainWindow>
18#include <QMouseEvent>                         /// pegar acoes/posicao do mouse
19#include "CRender3D.h"
20#include "ui_mainwindow.h"
21#include "CSimuladorTemperatura.h"
22
23
24QT_BEGIN_NAMESPACE
25namespace Ui { class MainWindow; }
26QT_END_NAMESPACE
27
28class MainWindow : public QMainWindow {
29    Q_OBJECT
30
31public:
32    MainWindow(QWidget *parent = nullptr);
33    ~MainWindow();
34
35private:
36    QDir dir;
37    Ui::MainWindow *ui;
38    QPoint m_mousePos;
```

```
39     QPixmap pixmap;
40     QImage *mImage;
41     QWidget* checkboxes;
42     QVBoxLayout* layout;
43     std::vector<QCheckBox*> myCheckbox;
44     CSimuladorTemperatura *simulador;
45     std::string drawFormat = "circulo";
46
47     int timerId;
48     int parallelType = 2;
49     int size_x = 300, size_y = 480;
50     int currentGrid = 0;
51     int space_between_draws = 60;
52     int left_margin = 20, up_margin = 65;
53     bool runningSimulator = false;
54     bool eraserActivated = false;
55     QPoint studyPoint = QPoint(0,0);
56     int studyGrid;
57     double minTempPlot = 0, maxTempPlot = 0;
58     std::vector<bool> selectedMaterialis;
59     QVector<double> time, temperature;
60
61 protected:
62     void start_buttons();
63     void mousePressEvent(QMouseEvent *event) override;
64     void printPosition();
65     void printDrawSize();
66     void paintEvent(QPaintEvent *e) override;
67     QImage paint(int grid);
68
69     QColor calcRGB(double temperatura);
70     void runSimulator();
71     void timerEvent(QTimerEvent *e) override;
72
73 private slots:
74     void on_pushButton_clicked();
75     void on_gridDownButton_clicked();
76     void on_gridUpButton_clicked();
77
78     void createWidgetProps();
79
80     void makePlot1();
```

```

81     void makePlot2();
82     void makePlot3();
83     void makePlot4();
84     void makePlotMatProps();
85     bool checkChangeMaterialsState();
86     void on_actionSave_triggered();
87     void on_actionOpen_triggered();
88     void on_actionNew_triggered();
89     void on_actionExport_pdf_triggered();
90     QString save_pdf(QString file_name);
91     void on_buttonCircle_clicked();
92     void on_buttonSquare_clicked();
93     void on_actionImport_material_triggered();
94     void on_gridAddGrid_clicked();
95     void on_gridDelGrid_clicked();
96     void on_buttonEraser_clicked();
97     void on_button3D_clicked();
98     void on_actionAbout_triggered();
99     void on_actionRun_triggered();
100    void on_action3D_window_triggered();
101};

102#endif

```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.5 a implementação da classe `mainwindow`.

Listagem 7.5: Arquivo de implementação da classe `MainWindow`

```

1 #include "mainwindow.h"
2
3 MainWindow::MainWindow(QWidget *parent)
4     : QMainWindow(parent), ui(new Ui::MainWindow)
5 {
6     simulador = new CSimuladorTemperatura();
7     simulador->resetSize(size_x, size_y);
8     ui->setupUi(this);
9     mImage = new QImage(size_x*2+space_between_draws, size_y, QImage
10                      ::Format_ARGB32_Premultiplied);
11     timerId = startTimer(20);
12
13     ui->plot1->addGraph();
14     ui->plot2->addGraph();
15     ui->plot3->addGraph();
16     ui->plot4->addGraph();

```

```

16     ui->plot_MatProps->addGraph();
17     ui->plot1->xAxis->setLabel("tempo\u20ac(s)");
18     ui->plot1->yAxis->setLabel("temperatura\u20ac(K)");
19     ui->plot2->xAxis->setLabel("eixo\u20acz\u20ac(m)");
20     ui->plot2->yAxis->setLabel("temperatura\u20ac(K)");
21     ui->plot3->xAxis->setLabel("eixo\u20acx\u20ac(m)");
22     ui->plot3->yAxis->setLabel("temperatura\u20ac(K)");
23     ui->plot4->xAxis->setLabel("eixo\u20acy\u20ac(m)");
24     ui->plot4->yAxis->setLabel("temperatura\u20ac(K)");
25     ui->plot_MatProps->xAxis->setLabel("Temperatura\u20ac(K)");
26     ui->plot_MatProps->yAxis->setLabel("rho*cp/k");
27
28     for(unsigned int i = 0; i < simulador->getMateriais().size(); i
29        ++)
30         ui->plot_MatProps->addGraph();
31     start_buttons();
32 }
33 MainWindow::~MainWindow() {
34     delete mImage;
35     delete simulador;
36     delete ui;
37 }
38
39 void MainWindow::mousePressEvent(QMouseEvent *event) {
40     if (event->buttons() == Qt::LeftButton){
41         std::string actualMaterial = ui->material_comboBox->
42             currentText().toStdString();
43         double temperature = ui->spinBox_Temperature->value();
44         bool isSource = ui->checkBox_source->checkState();
45         int size = ui->horizontalSliderDrawSize->value();
46         simulador->setActualTemperature(temperature); /**
47             importante para atualizar Tmin/Tmax
48
49         if (drawFormat == "circulo")
50             simulador->grid[currentGrid]->draw_cir(event->pos().x()
51                 -left_margin-size_x-space_between_draws, event->pos()
52                 .y()-up_margin, size/2, temperature, isSource,
53                 simulador->getMaterial(actualMaterial),
54                 eraserActivated);
55
56         else
57             simulador->grid[currentGrid]->draw_rec(event->pos().x()
58
59

```

```

    -left_margin_size_x-space_between_draws, event->pos()
    () .y() -up_margin, size, temperature, isSource,
    simulador->getMaterial(actualMaterial),
    eraserActivated);
51 }
52 else if (event->buttons() == Qt::RightButton){
53     int x = event->pos().x() -left_margin_size_x -
    space_between_draws;
54     int y = event->pos().y() -up_margin;
55     if (x >= 0 && x < size_x && y >= 0 && y < size_y){
56         studyPoint = QPoint(x, y);
57         studyGrid = currentGrid;
58         time.clear();
59         temperature.clear();
60     }
61 }
62 update();
63 }
64
65 void MainWindow::printPosition(){
66     int x = QWidget::mapFromParent(QCursor::pos()).x() -
    left_margin_size_x-space_between_draws;
67     int y = QWidget::mapFromParent(QCursor::pos()).y() - up_margin;
68     QWidget::mapFromParent(QCursor::pos()).x();
69     std::string txt;
70     if ((x>0) && (x<size_x) && (y>0) && (y<size_y))
71         if (!simulador->grid[currentGrid]->operator()(x, y)->active
            )
72             txt = "(" + std::to_string(x) + ", " + std::to_string(y
                ) + ")";
73         else
74             txt = "(" + std::to_string(x) + ", " + std::to_string(y
                ) + ") T: " +
75                 std::to_string(simulador->grid[currentGrid]->
                    operator()(x, y)->temp) + " K " +
                    simulador
                    ->grid[currentGrid]->operator()(x, y)->
                    material->getName();
76     else
77         txt = "";
78
79     ui->textMousePosition->setText(QString::fromStdString(txt));
80 }

```

```
81
82 void MainWindow::printDrawSize(){
83     int size = ui->horizontalSliderDrawSize->value();
84     simulador->setDelta_x(std::stod(ui->input_dx->text() .
85         toStdString()));
86     ui->textDrawSize->setText("Tamanho: " + QString::number(size) + " "
87         "px/ " + QString::number(size * simulador->getDelta_x()) + " m")
88 }
89
90 void MainWindow::start_buttons(){
91     /// adicionar borda em widget
92     ui->widget_props->setStyleSheet("border-width: 1px;
93                                     border-radius: 3px;
94                                     border-style: solid;
95                                     border-color: #rgb(10,10,10);");
96
97     ui->widget_simulator_deltas->setStyleSheet("border-width: 1px;
98                                     border-radius: 3px;
99                                     border-style: solid;
100                                    border-color: #rgb(10,10,10);");
101
102     ui->widget_drawStyles->setStyleSheet("border-width: 1px;
103                                     border-radius: 3px;
104                                     border-style: solid;
105                                     border-color: #rgb(10,10,10);");
106
107     ui->widget_buttonCircle->setStyleSheet("border-width: 1px;
108                                     border-radius: 15px;
109                                     border-style: solid;
110                                     border-color: #rgb(255,0,0);");
111
112     /// remover borda das caixas de texto
113     ui->textBrowser_3->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
114     ui->textBrowser_4->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
```

```
113     ui->textBrowser_5->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
114     ui->textBrowser_6->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
115     ui->textBrowser_7->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
116     ui->textBrowser_8->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
117     ui->textBrowser_9->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
118     ui->textBrowser_10->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
119     ui->textBrowser_11->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
120     ui->textBrowser_12->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
121     ui->textBrowser_13->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
122     ui->textBrowser_14->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
123     ui->textBrowser_17->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
124     ui->textBrowser_18->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
125     ui->textBrowser_19->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
126     ui->text.mousePosition->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
127     ui->textDrawSize->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);

128
129     /// spinBox temperatura
130     ui->spinBox_Temperature->setSingleStep(50);
131     ui->spinBox_Temperature->setMaximum(2000);
132     ui->spinBox_Temperature->setValue(300);

133
134     /// texto do grid
135     ui->textGrid->setFrameStyle(QFrame::NoFrame);
136     ui->textGrid->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
137         currentGrid)));
138     QFont f = ui->textGrid->font();
139     f.setPixelSize(16);
140     ui->textGrid->setFont(f);
141     ui->textGrid->setAlignment(Qt::AlignCenter);

142     /// lista de materiais
143     std::vector<std::string> materiais = simulador->getMateriais();
144     for (unsigned int i = 0; i < materiais.size(); i++)
145         ui->material_comboBox->addItem(QString::fromStdString(
146             materiais[i]));

147     ui->horizontalSliderDrawSize->setMinimum(2);
148     ui->horizontalSliderDrawSize->setMaximum(150);
149     ui->horizontalSliderDrawSize->setValue(50);

150
151     /// lista de paralelismo
152     ui->parallel_comboBox->addItem("Paralelismo total");
```

```
153     ui->parallel_comboBox->addItem("Sem paralelismo");
154     ui->parallel_comboBox->addItem("Paralelismo por grid");
155
156     ui->input_dt->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
157         simulador->getDelta_t())));
158     ui->input_dx->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
159         simulador->getDelta_x())));
160     ui->input_dz->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
161         simulador->getDelta_z())));
162     ui->input_min_iter->setText(QString::fromStdString(std::
163         to_string(simulador->MIN_ITER())));
164     ui->input_max_iter->setText(QString::fromStdString(std::
165         to_string(simulador->MAX_ITER())));
166     ui->input_erro->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
167         simulador->ERRO_MIN())));
168
169     createWidgetProps();
170
171
172 void MainWindow::createWidgetProps(){
173     // scroll com os materiais para o gráfico
174     std::vector<std::string> materiais = simulador->getMateriais();
175     checkboxes = new QWidget(ui->scrollArea);
176     layout = new QVBoxLayout(checkboxes);
177     myCheckbox.resize(materiais.size());
178     selectedMaterails.resize(materiais.size(), false);
179     QString qss;
180     for(unsigned int i = 0; i < materiais.size(); i++){
181         myCheckbox[i] = new QCheckBox(QString::fromStdString(
182             materiais[i]), checkboxes);
183         qss = QString("background-color:\u00e7%1").arg(simulador->
184             getColor(materiais[i]).name(QColor::HexArgb));
185         myCheckbox[i]->setStyleSheet(qss);
186         layout->addWidget(myCheckbox[i]);
187     }
188     ui->scrollArea->setWidget(checkboxes);
189     makePlotMatProps();
190 }
191
192
193 void MainWindow::paintEvent(QPaintEvent *e) {
194     QPainter painter(this);
195     *mImage = paint(currentGrid);
```

```
187     painter.drawImage(left_margin, up_margin, *mImage);
188     e->accept();
189 }
190
191 QImage MainWindow::paint(int grid) {
192     QImage img = QImage(size_x*2+space_between_draws, size_y, QImage
193                         ::Format_ARGB32_Premultiplied);
194
195     /// desenho da temperatura
196     for (int i = 0; i < size_x; i++){
197         for (int k = 0; k < size_y; k++){
198             if (!simulador->grid[grid]->operator()(i, k)->active)
199                 img.setPixelColor(i+size_x+space_between_draws, k,
200                                   QColor::fromRgb(255,255,255));
201             else
202                 img.setPixelColor(i+size_x+space_between_draws, k,
203                                   calcRGB(simulador->grid[grid]->operator()(i, k)
204                                           ->temp));
205         }
206     }
207
208     if ((studyPoint.x() > 0 && studyPoint.x() < size_x) &&
209         studyPoint.y() > 0 || studyPoint.y() < size_y) && grid ==
210         studyGrid){
211         for(int i = 0; i < size_x; i++)
212             img.setPixelColor(i+size_x+space_between_draws,
213                               studyPoint.y(), QColor::fromRgb(0,0,0));
214         for(int i = 0; i < size_y; i++)
215             img.setPixelColor(studyPoint.x()+size_x+
216                               space_between_draws, i, QColor::fromRgb(0,0,0));
217     }
218
219     /// desenho dos materiais
220     for (int i = 0; i < size_x; i++){
221         for (int k = 0; k < size_y; k++){
222             if (!simulador->grid[grid]->operator()(i, k)->active)
223                 img.setPixelColor(i,k, QColor::fromRgb(255,255,255)
224                                   );
225             else
226                 img.setPixelColor(i,k, simulador->grid[grid]->
227                                   operator()(i, k)->material->getColor());
228         }
229     }
```

```
219     }
220     return img;
221 }
222
223 QColor MainWindow::calcRGB(double temperatura){
224     double maxTemp = simulador->getTmax();
225     double minTemp = simulador->getTmin();
226     return QColor::fromRgb(255, (maxTemp - temperatura)*255/(
227         maxTemp - minTemp), 0, 255);
228 }
229 void MainWindow::runSimulator(){
230     simulador->setDelta_t(std::stod(ui->input_dt->text() .
231         toStdString()));
232     simulador->setDelta_x(std::stod(ui->input_dx->text() .
233         toStdString()));
234     simulador->setDelta_z(std::stod(ui->input_dz->text() .
235         toStdString()));
236     simulador->set_MIN_ITER(std::stoi(ui->input_min_iter->text() .
237         toStdString()));
238     simulador->set_MAX_ITER(std::stoi(ui->input_max_iter->text() .
239         toStdString()));
240     simulador->set_MIN_ERR0(std::stod(ui->input_erro->text() .
241         toStdString()));
242
243     time_t start_time = std::time(0);
244     std::string type = ui->parallel_comboBox->currentText() .
245         toStdString();
246     if(type == "Sem_parallelismo")
247         simulador->run_sem_parallelismo();
248     if(type=="Parallelismo_por_grid")
249         simulador->run_parallelismo_por_grid();
250     if(type=="Parallelismo_total")
251         simulador->run_parallelismo_total();
252     time.append((time.size()+1)*simulador->getDelta_t());
253
254     std::string result = "Time:" + std::to_string(time[time.size()-
255         1]) + " duracao do solver:" + std::to_string(std::time
256         (0) - start_time) + " seg";
257     ui->textBrowser_3->setText(QString::fromStdString(result));
258 }
```

```
251     update();
252     makePlot1();
253     makePlot2();
254     makePlot3();
255     makePlot4();
256 }
257
258 void MainWindow::timerEvent(QTimerEvent *e){
259     Q_UNUSED(e);
260     if (runningSimulator)
261         runSimulator();
262     makePlotMatProps();
263     printPosition();
264     printDrawSize();
265 }
266
267 void MainWindow::on_pushButton_clicked()
268 {
269     runningSimulator = runningSimulator?false:true;
270 }
271
272 void MainWindow::on_gridDownButton_clicked()
273 {
274     currentGrid--;
275     if (currentGrid < 0)
276         currentGrid = 0;
277     /// texto do grid
278     ui->textGrid->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
279         currentGrid)));
280     ui->textGrid->setAlignment(Qt::AlignCenter);
281     update();
282 }
283
284 void MainWindow::on_gridUpButton_clicked()
285 {
286     currentGrid++;
287     if (currentGrid > simulador->getNGrids()-1)
288         currentGrid = simulador->getNGrids()-1;
289     /// texto do grid
290     ui->textGrid->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
291         currentGrid)));
292     ui->textGrid->setAlignment(Qt::AlignCenter);
```

```
291     update();
292 }
293
294 void MainWindow::makePlot1(){
295     double temp = simulador->grid[studyGrid]->operator()(studyPoint
296         .x(), studyPoint.y())->temp;
297     if (minTempPlot == 0){
298         minTempPlot = temp-10;
299         maxTempPlot = temp+10;
300     }
301     else{
302         minTempPlot = minTempPlot > temp-10 ? temp-10:minTempPlot;
303         maxTempPlot = maxTempPlot < temp+10 ? temp+10:maxTempPlot;
304     }
305     temperature.append(temp);
306
307     ui->plot1->graph(0)->setData(time,temperature);
308     ui->plot1->xAxis->setRange(time[0], time[time.size()-1]+1);
309     ui->plot1->yAxis->setRange(minTempPlot, maxTempPlot);
310     ui->plot1->replot();
311     ui->plot1->update();
312 }
313
314 void MainWindow::makePlot2(){
315     QVector<double> temperature_z(simulador->getNGrids());
316     QVector<double> labor_z(simulador->getNGrids());
317     for (int i = 0; i < simulador->getNGrids(); i++){
318         labor_z[i] = simulador->getDelta_z()*(i+1);
319         temperature_z[i] = simulador->grid[i]->operator|(
320             studyPoint.x(), studyPoint.y())->temp;
321     }
322
323     ui->plot2->graph(0)->setData(labor_z,temperature_z);
324     ui->plot2->xAxis->setRange(labor_z[0], labor_z[labor_z.size()
325         -1]);
326     ui->plot2->yAxis->setRange(simulador->getTmin()-50, simulador->
327         getTmax()+50);
328     ui->plot2->replot();
329     ui->plot2->update();
330 }
331
332 void MainWindow::makePlot3(){
```

```
329     QVector<double> temperature_x(size_x);
330     QVector<double> labor_x(size_x);
331     std::ofstream file(dir.absolutePath().toString() + "\\"
332                         "save_results\\horizontal_" + std::to_string(time[time.size()
333                                         - 1] + 1) + ".dat");
334     for (int i = 0; i < size_x; i++) {
335         labor_x[i] = simulador->getDelta_x() * (i + 1);
336         temperature_x[i] = simulador->grid[studyGrid]->operator()(i
337                         , studyPoint.y())->temp;
338         file << labor_x[i] << ";" << temperature_x[i] << std::endl
339         ;
340     }
341     file.close();
342     ui->plot3->graph(0)->setData(labor_x, temperature_x);
343     ui->plot3->xAxis->setRange(labor_x[0], labor_x[size_x - 1]);
344     ui->plot3->yAxis->setRange(simulador->getTmin() - 50, simulador->
345                                     getTmax() + 50);
346     ui->plot3->replot();
347     ui->plot3->update();
348 }
349
350 void MainWindow::makePlot4(){
351     QVector<double> temperature_y(size_y);
352     QVector<double> labor_y(size_y);
353     std::ofstream file(dir.absolutePath().toString() + "\\"
354                         "save_results\\vertical_" + std::to_string(time[time.size()
355                                         - 1] + 1) + ".dat");
356     for (int i = 0; i < size_y; i++) {
357         labor_y[i] = simulador->getDelta_x() * (i + 1);
358         temperature_y[i] = simulador->grid[studyGrid]->operator()(i
359                         , studyPoint.x(), i)->temp;
360         file << labor_y[i] << ";" << temperature_y[i] << std::endl
361         ;
362     }
363     file.close();
364     ui->plot4->graph(0)->setData(labor_y, temperature_y);
365     ui->plot4->xAxis->setRange(labor_y[0], labor_y[size_y - 1]);
366     ui->plot4->yAxis->setRange(simulador->getTmin() - 50, simulador->
367                                     getTmax() + 50);
368     ui->plot4->replot();
369     ui->plot4->update();
370 }
```

```
361
362 void MainWindow::makePlotMatProps(){
363     bool changeState = checkChangeMaterialsState();
364     if (!changeState)
365         return;
366     int nPoints = 100;
367     QVector<double> props(nPoints);
368     QVector<double> temperature_x(nPoints);
369     std::vector<std::string> materiais = simulador->getMateriais();
370     double max_props = 700;
371
372     double dT = (simulador->getTmax() - simulador->getTmin()) /(
373         nPoints - 1);
374     for (unsigned int mat = 0; mat < materiais.size(); mat++){
375         if (selectedMaterials[mat]){
376             for (int i = 0; i < nPoints; i++){
377                 temperature_x[i] = dT*i + simulador->getTmin();
378                 props[i] = simulador->getProps(temperature_x[i],
379                     materiais[mat]);
380             }
381             ui->plot_MatProps->graph(mat)->setPen(QPen(simulador->
382                 getColor(materiais[mat])));
383             ui->plot_MatProps->graph(mat)->setData(temperature_x,props)
384             ;
385             for (int i = 0; i < nPoints; i++)
386                 max_props = max_props < props[i]? props[i] : max_props;
387                 // aqui ajusto o ylabel
388             }else{
389                 ui->plot_MatProps->graph(mat)->data()->clear();
390             }
391         }
392     }
393
394 bool MainWindow::checkChangeMaterialsState(){
395     bool change = false;
396     bool temp = false;
```

```
397     for (unsigned int i = 0; i<selectedMateriails.size(); i++) {
398         temp = myCheckbox[i]->checkState();
399         if (!(selectedMateriails[i] == temp)){
400             change = true;
401             selectedMateriails[i] = temp;
402         }
403     }
404     return change;
405 }
406
407 void MainWindow::on_actionSave_triggered()
408 {
409     QDir dir; QString path = dir.absolutePath();
410     QString file_name = QFileDialog::getSaveFileName(this, "Save a file",
411             file", path+ "// save", tr("Dados (*.dat)"));
412     if (!file_name.isEmpty()){
413         std::string txt = simulador->saveGrid(file_name.toStdString()
414             ());
415         ui->textBrowser_3->setText(QString::fromStdString(txt));
416     }
417 }
418 void MainWindow::on_actionOpen_triggered()
419 {
420     QDir dir; QString path = dir.absolutePath();
421     QString file_name = QFileDialog::getOpenFileName(this, "Open a file",
422             file", path+ "// save", tr("Dados (*.dat)"));
423     if (!file_name.isEmpty()){
424         std::string txt = simulador->openGrid(file_name.toStdString()
425             ());
426         ui->textBrowser_3->setText(QString::fromStdString(txt));
427     }
428 void MainWindow::on_actionNew_triggered()
429 {
430     simulador->resetGrid();
431     update();
432 }
433
434
```

```
435 void MainWindow::on_actionExport_pdf_triggered()
436 {
437     QString file_name = QFileDialog::getSaveFileName(this, "Save report as", "C://Users", tr("Dados (*.pdf)"));
438     if (!file_name.isEmpty()){
439         QString txt = save_pdf(file_name);
440         ui->textBrowser_3->setText(txt);
441     }
442 }
443
444 void MainWindow::on_actionImport_material_triggered() {
445     QString file_name = QFileDialog::getOpenFileName(this, QObject
446             ::tr("Open a file"), dir.absolutePath()+"//materiais",
447             QObject::tr("*.constante;;*.correlacao;;*.interpolacao"));
448     std::cout<<file_name.toStdString();
449     if (!file_name.isEmpty()){
450         simulador->openMaterial(file_name);
451         createWidgetProps();
452     }
453
454 void MainWindow::on_buttonCircle_clicked()
455 {
456
457     ui->widget_buttonCircle->setStyleSheet(
458             "border-width: 1px;
459             border-radius: 15px;
460             border-style: solid;
461             border-color: #rgb(255,0,0);");
462
463     ui->widget_buttonSquare->setStyleSheet(
464             "border-width: 0px;
465             border-radius: 0px;
466             border-style: solid;
467             border-color: #rgb(255,0,0);");
468
469     drawFormat = "circulo";
470 }
```

```
469 void MainWindow::on_buttonSquare_clicked()
470 {
471     ui->widget_buttonSquare->setStyleSheet("border-width:1px;
472                                                 border-radius:0px;
473                                                 border-style:solid;
474                                                 border-color:rgb(255,0,0)");
475     ui->widget_buttonCircle->setStyleSheet("border-width:0px;
476                                                 border-radius:15px;
477                                                 border-style:solid;
478                                                 border-color:rgb(255,0,0)");
479     drawFormat = "quadrado";
480
481 }
482
483
484 void MainWindow::on_buttonEraser_clicked()
485 {
486     if (eraserActivated){
487         ui->widget_eraser->setStyleSheet("border-width:0px;
488                                                 border-radius:0px;
489                                                 border-style:solid;
490                                                 border-color:rgb(255,0,0)");
491         eraserActivated = false;
492     }
493     else{
494         ui->widget_eraser->setStyleSheet("border-width:1px;
495                                                 border-radius:5px;
496                                                 border-style:solid;
497                                                 border-color:rgb(255,170,100)");
498         eraserActivated = true;
499     }
500 }
501
502 QString MainWindow::save_pdf(QString file_name){
```

```
504     QPdfWriter writer(file_name);
505     writer.setPageSize(QPageSize::A4);
506     writer.setPageMargins(QMargins(30, 30, 30, 30));
507
508     QPrinter pdf;
509     pdf.setOutputFormat(QPrinter::PdfFormat);
510     pdf.setOutputFileName(file_name);
511
512     QPainter painterPDF(this);
513     if (!painterPDF.begin(&pdf))           //Se não conseguir abrir o
514         arquivo PDF ele não executa o resto.
515         return "Erro ao abrir PDF";
516
517     painterPDF.setFont(QFont("Arial", 8));
518     painterPDF.drawText(40,140, "==> PROPRIADES DO GRID<==");
519     painterPDF.drawText(40,160, "Delta_x:" + QString::number(
520         simulador->getDelta_x())+"m");
521     painterPDF.drawText(40,180, "Delta_z:" + QString::number(
522         simulador->getDelta_z())+"m");
523     painterPDF.drawText(40,200, "Delta_t:" + QString::number(
524         simulador->getDelta_t())+"s");
525
526     painterPDF.drawText(40,240, "Largura total horizontal:" +
527         QString::number(simulador->getDelta_x()*size_x)+"m");
528     painterPDF.drawText(40,260, "Largura total vertical:" +
529         QString::number(simulador->getDelta_x()*size_y)+"m");
530     painterPDF.drawText(40,280, "Largura total entre perfis (eixo z)：" +
531         QString::number(simulador->getDelta_z()*simulador->
532             getNGrids())+"m");
533
534     painterPDF.drawText(400,140, "==> PROPRIADES DA SIMULAÇÃO<==");
535     painterPDF.drawText(400,160, "Temperatura máxima:" + QString
536         ::number(simulador->getTmax())+"K");
537     painterPDF.drawText(400,180, "Temperatura mínima:" + QString
538         ::number(simulador->getTmin())+"K");
539     painterPDF.drawText(400,200, "Tempo máximo:" + QString::
540         number(time[time.size()-1])+"s");
```

```
534     painterPDF.drawText(400,240, "Tipo de paralelismo: " + ui->
535         parallel_comboBox->currentText());
536
537     painterPDF.drawText(400,260, "Coordenada do ponto de estudo (x,
538         y,z): " + QString::number(studyPoint.x()*simulador->
539             getDelta_x())+", "+QString::number(studyPoint.y()*simulador->
540             getDelta_y())+", "+QString::number(studyGrid*simulador->
541             getDelta_z()));
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
```

painterPDF.drawText(400,240, "Tipo de paralelismo: " + ui->parallel_comboBox->currentText());
painterPDF.drawText(400,260, "Coordenada do ponto de estudo (x, y,z): " + QString::number(studyPoint.x()*simulador->getDelta_x())+", "+QString::number(studyPoint.y()*simulador->getDelta_y())+", "+QString::number(studyGrid*simulador->getDelta_z()));

536
537 /// print dos 4 desenhos
538 painterPDF.setPen(Qt::blue);
539 painterPDF.setRenderHint(QPainter::LosslessImageRendering);
540 int startDraw_x = 40;
541 int startDraw_y = 300;
542 int space_draw_x = 40;
543 int space_draw_y = 30;
544 int d = 5;
545 painterPDF.setFont(QFont("Arial", 8));
546
547 painterPDF.drawPixmap(startDraw_x, startDraw_y, (size_x*2+space_between_draws)/2, size_y/2, ui->plot1->toPixmap());
548 QRect retangulo5(startDraw_x-d, startDraw_y-d, (size_x*2+space_between_draws)/2+2*d, size_y/2+2*d);
549 painterPDF.drawRoundedRect(retangulo5, 2.0, 2.0);
550
551 painterPDF.drawPixmap((size_x*2+space_between_draws)/2+startDraw_x+space_draw_x, startDraw_y, (size_x*2+space_between_draws)/2, size_y/2, ui->plot2->toPixmap());
552 QRect retangulo6((size_x*2+space_between_draws)/2+startDraw_x+space_draw_x-d, startDraw_y-d, (size_x*2+space_between_draws)/2+2*d, size_y/2+2*d);
553 painterPDF.drawRoundedRect(retangulo6, 2.0, 2.0);
554
555 painterPDF.drawPixmap(startDraw_x, size_y/2+startDraw_y+space_draw_y, (size_x*2+space_between_draws)/2, size_y/2, ui->plot3->toPixmap());
556 QRect retangulo7(startDraw_x-d, size_y/2+startDraw_y+space_draw_y-d, (size_x*2+space_between_draws)/2+2*d, size_y/2+2*d);
557 painterPDF.drawRoundedRect(retangulo7, 2.0, 2.0);
558
559 painterPDF.drawPixmap((size_x*2+space_between_draws)/2+startDraw_x+space_draw_x, size_y/2+startDraw_y+space_draw_y,

```
(size_x*2+space_between_draws)/2, size_y/2, ui->plot4->
toPixmap());
560 QRect retangulo8((size_x*2+space_between_draws)/2+startDraw_x+
space_draw_x-d, size_y/2+startDraw_y+space_draw_y-d, (size_x
*2+space_between_draws)/2+2*d, size_y/2+2*d);
561 painterPDF.drawRoundedRect(retangulo8, 2.0, 2.0);
562
563 painterPDF.drawPixmap(startDraw_x, size_y+startDraw_y+
space_draw_y*2, (size_x*2+space_between_draws*2), size_y/2,
ui->widget_props->grab());
564
565
566 startDraw_y = 100;
567 space_draw_y = 50;
568
569 for (int i = 0; i<simulador->getNGRIDs(); i++){
570     if (i%6 == 0){
571         startDraw_y = 100;
572         writer.newPage();
573         pdf.newPage();
574     }
575     if (i%2 == 0){
576         painterPDF.drawText(startDraw_x+size_x/2, startDraw_y-d
-8, "Grid\u25bc"+QString::number(i));
577         painterPDF.drawPixmap(startDraw_x, startDraw_y, (size_x
*2+space_between_draws)/2, size_y/2, QPixmap::
fromImage(paint(i)));
578         QRect retangulo1(startDraw_x-d, startDraw_y-d, (size_x
*2+space_between_draws)/2+2*d, size_y/2+2*d);
579         painterPDF.drawRoundedRect(retangulo1, 2.0, 2.0);
580     }
581     else {
582         painterPDF.drawText(startDraw_x+space_draw_x+size_x+
size_x/2+4*d, startDraw_y-d-8, "Grid\u25bc"+QString::
number(i));
583         painterPDF.drawPixmap((size_x*2+space_between_draws)/2+
startDraw_x+space_draw_x, startDraw_y, (size_x*2+
space_between_draws)/2, size_y/2, QPixmap::fromImage
(paint(i)));
584         QRect retangulo2((size_x*2+space_between_draws)/2+
startDraw_x+space_draw_x-d, startDraw_y-d, (size_x
*2+space_between_draws)/2+2*d, size_y/2+2*d);
```

```
585         painterPDF.drawRoundedRect(retangulo2, 2.0, 2.0);
586         startDraw_y+=size_y/2+space_draw_y;
587     }
588 }
589 return "PDF salvo!";
590 }
591
592
593 void MainWindow::on_gridAddGrid_clicked()
594 {
595     simulador->addGrid();
596     currentGrid = simulador->getNGRIDES()-1;
597
598     // texto do grid
599     ui->textGrid->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
600         currentGrid)));
601     ui->textGrid->setAlignment(Qt::AlignCenter);
602     update();
603 }
604
605 void MainWindow::on_gridDelGrid_clicked()
606 {
607     if (simulador->getNGRIDES() > 1){
608         simulador->delGrid(currentGrid);
609         currentGrid = currentGrid==0? 0:currentGrid-1;
610     }
611
612     // texto do grid
613     ui->textGrid->setText(QString::fromStdString(std::to_string(
614         currentGrid)));
615     ui->textGrid->setAlignment(Qt::AlignCenter);
616     update();
617 }
618 void MainWindow::on_button3D_clicked(){
619     CRender3D *newWindow = new CRender3D(simulador);
620     //CRender3D *newWindow = new CRender3D();
621     newWindow->show();
622 }
623 void MainWindow::on_actionAbout_triggered()
624 {
```

```

625     QMessageBox *msgBox = new QMessageBox(this);
626     QString msg = "Simulador de Difusão Térmica.\nVersão 1.0.\n"
627             "Criado por: Nicholas de Almeida Pinto\n09/03/2022";
628     msgBox->setText(msg);
629     int ret = msgBox->exec();
630     Q_UNUSED(ret);
631 }
632 void MainWindow::on_actionRun_triggered()
633 {
634     runSimulator();
635 }
636
637
638 void MainWindow::on_action3D_window_triggered()
639 {
640     on_button3D_clicked();
641 }
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.6 o arquivo de cabeçalho da classe CRender3D.

Listagem 7.6: Arquivo de implementação da classe CRender3D

```

1 #ifndef CRENDER3D_H
2 #define CRENDER3D_H
3
4 #include <math.h>
5 #include <QVector>
6 #include <QVector3D>
7 #include < QPainter >
8 #include <algorithm>
9 #include <QMainWindow>
10 #include <QPaintEvent>
11 #include <QMouseEvent>
12 //Permite acesso direto a pi; veja https://en.cppreference.com/w/
13 //cpp/numeric/constants
14 // #include <numbers> // C++20
15 //using namespace std::numbers; //ou numbers::pi
15 #include "CSimuladorTemperatura.h"
16
17
18 QT_BEGIN_NAMESPACE
19 namespace Ui { class CRender3D; }
```

```
20 QT_END_NAMESPACE
21
22 class CRender3D : public QMainWindow
23 {
24     Q_OBJECT
25
26 public:
27     CRender3D( QWidget *parent = nullptr);
28     CRender3D( CSimuladorTemperatura *simulador, QWidget *parent =
29                 nullptr);
30     ~CRender3D();
31 protected:
32     void paintEvent(QPaintEvent *event) override;
33
34     QVector3D rotate(QVector3D a);
35     QColor getRGB(double x, double min, double max);
36
37     void timerEvent(QTimerEvent *e) override;
38     void keyPressEvent(QKeyEvent *event) override;
39     void mousePressEvent(QMouseEvent *e) override;
40     void mouseReleaseEvent(QMouseEvent *e) override;
41     void mouseMoveEvent(QMouseEvent *e) override;
42
43     void minimizeAngles();
44     void createPoints();
45     void createTriangles();
46
47     QVector<bool> edges(int i, int j, int g);
48     QVector<QVector3D> createCube(QVector3D point);
49     QVector3D produtoVetorial(QVector3D origem, QVector3D a,
50                               QVector3D b);
51
52 private:
53     int size;
54     int timerId;
55     QImage *mImage;
56     QPoint mousePos;
57     int size_x, size_y;
58     int margin_x = 250;
59     int margin_y = 250;
60     double angle_x = 0.0; // para efeito de imagens um float atende
```

```

    e sobra

60     double angle_y = 0.0;
61     double angle_z = 0.0;
62     double distance = 1.0;
63     bool mousePress = false;
64     bool corMaterial = false;
65     const float PI = 3.141592;
66     double dx = 1, dy = 1, dz = 2;
67     CSimuladorTemperatura *simulador;
68     QVector<QVector3D> drawCube;
69     QVector<QVector3D> triangles;
70     QVector<QColor> colorsMaterial;
71     QVector<QColor> colorsTemperature;
72     QVector<QVector<QVector3D>> cube;
73     QVector<QVector<bool>> activeEdges;

74
75 };
76 #endif // MAINWINDOW_H

```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.7 a implementação da classe CRender3D.

Listagem 7.7: Arquivo de implementação da função main()

```

1 #include "CRender3D.h"
2
3 CRender3D::CRender3D(QWidget *parent)
4     : QMainWindow(parent)
5 {
6     //ui->setupUi(this);
7     this->setFixedSize(800,800);
8     this->adjustSize();
9     size_x = 500;
10    mImage = new QImage(size_x, size_y, QImage::
11                           Format_ARGB32_Premultiplied);
11    timerId = startTimer(0);
12
13    QVector3D point(0.,0.,0.);
14    cube.push_back(createCube(point));
15
16    createTriangles();
17    drawCube.resize(8);
18    update();
19}

```

```
20
21 CRender3D::CRender3D(CSimuladorTemperatura *_simulador, QWidget *
22     parent)
23 {
24     simulador = _simulador;
25     this->setFixedSize(800,800);
26     this->adjustSize();
27     size_x = 500;
28     mImage = new QImage(size_x, size_y,QImage::
29         Format_ARGB32_Premultiplied);
30     timerId = startTimer(0);
31     margin_x = 400;//simulador->getWidth();
32     margin_y = 400;//simulador->getHeight();
33     std::cout<<"criando_cubos"<<std::endl;
34     dx = 1;//simulador->getDelta_x();
35     dy = dx;
36     dz = 1*simulador->getDelta_z()/simulador->getDelta_x();
37     double maxTemp = simulador->getTmax();
38     double minTemp = simulador->getTmin();
39     for(int g = 0; g<simulador->getNGRIDs(); g++){
40         for(int i = 0; i < simulador->grid[g]->getWidth(); i++){
41             for(int j = 0; j < simulador->grid[g]->getHeight(); j
42                 ++){
43                 if (simulador->grid[g]->operator()(i,j)->active){
44                     cube.push_back(createCube(QVector3D(i,j,(g+1)*
45                         dz)));
46                     activeEdges.push_back(edges(i,j,g));
47                     colorsMaterial.push_back(simulador->grid[g]->
48                         operator()(i,j)->material->getColor());
49                     colorsTemperature.push_back(getRGB(simulador->
50                         grid[g]->operator()(i,j)->temp, minTemp,
51                         maxTemp));
52                 }
53             }
54         }
55         std::cout<<"cubos_criados"<<std::endl;
56         createTriangles();
57         drawCube.resize(8);
58         update();
59     }
```

```
55 }
56
57
58 CRender3D::~CRender3D()
59 {
60     //delete ui;
61 }
62
63 QVector<bool> CRender3D::edges(int i, int j, int g){
64     QVector<bool> actives(12, true);
65     int max_i = simulador->getWidth()-1;
66     int max_j = simulador->getHeight()-1;
67     int max_g = simulador->grid.size()-1;
68
69
70     if (g > 0){
71         if (simulador->grid[g-1]->operator()(i,j)->active){
72             actives[0] = false;
73             actives[1] = false;
74         }
75     }
76     if (i < max_i){
77         if (simulador->grid[g]->operator()(i+1,j)->active){
78             actives[2] = false;
79             actives[3] = false;
80         }
81     }
82     if (i > 0){
83         if (simulador->grid[g]->operator()(i-1,j)->active){
84             actives[4] = false;
85             actives[5] = false;
86         }
87     }
88     if (j < max_j){
89         if (simulador->grid[g]->operator()(i,j+1)->active){
90             actives[6] = false;
91             actives[7] = false;
92         }
93     }
94     if (g < max_g){
95         if (simulador->grid[g+1]->operator()(i,j)->active){
96             actives[8] = false;
```

```
97         actives[9] = false;
98     }
99 }
100 if (j > 0){
101     if (simulador->grid[g]->operator()(i,j-1)->active){
102         actives[10] = false;
103         actives[11] = false;
104     }
105 }
106 return actives;
107 }
108
109 void CRender3D::createTriangles(){
110     triangles.resize(12);
111     triangles[0] = QVector3D( 0,1,2);
112     triangles[1] = QVector3D( 4,2,1);
113
114     triangles[2] = QVector3D( 1,5,4);
115     triangles[3] = QVector3D( 7,4,5);
116
117     triangles[4] = QVector3D( 6,3,2);
118     triangles[5] = QVector3D( 0,2,3);
119
120     triangles[6] = QVector3D( 4,7,2);
121     triangles[7] = QVector3D( 6,2,7);
122
123     triangles[8] = QVector3D( 6,7,3);
124     triangles[9] = QVector3D( 5,3,7);
125
126     triangles[10] = QVector3D( 1,0,5);
127     triangles[11] = QVector3D( 3,5,0);
128 }
129
130 QVector<QVector3D> CRender3D::createCube(QVector3D point){
131     double x = point.x(), y = point.y(), z = point.z();
132
133     QVector<QVector3D> cube(8);
134     cube[0] = QVector3D( x-dx/2.0, y-dy/2.0, z-dz/2.0);
135     cube[1] = QVector3D( x+dx/2.0, y-dy/2.0, z-dz/2.0);
136     cube[2] = QVector3D( x-dx/2.0, y+dy/2.0, z-dz/2.0);
137     cube[3] = QVector3D( x-dx/2.0, y-dy/2.0, z+dz/2.0);
138     cube[4] = QVector3D( x+dx/2.0, y+dy/2.0, z-dz/2.0);
```

```
139     cube[5] = QVector3D( x+dx/2.0, y-dy/2.0, z+dz/2.0);
140     cube[6] = QVector3D( x-dx/2.0, y+dy/2.0, z+dz/2.0);
141     cube[7] = QVector3D( x+dx/2.0, y+dy/2.0, z+dz/2.0);
142     return cube;
143 }
144
145 void CRender3D::keyPressEvent(QKeyEvent *event){
146     if (event->key() == Qt::Key_Up){
147         margin_y+=30.0f;
148     }
149     else if (event->key() == Qt::Key_Down){
150         margin_y-=30.0f;
151     }
152     else if (event->key() == Qt::Key_Left){
153         margin_x+=30.0f;
154     }
155     else if (event->key() == Qt::Key_Right){
156         margin_x-=30.0f;
157     }
158     else if (event->key() == Qt::Key_PageUp){
159         distance*=1.1;
160     }
161     else if (event->key() == Qt::Key_PageDown){
162         distance*=0.9;
163     }
164     else if (event->key() == Qt::Key_W){
165         angle_x-=0.1;
166     }
167     else if (event->key() == Qt::Key_S){
168         angle_x+=0.1;
169     }
170     else if (event->key() == Qt::Key_D){
171         angle_y-=0.1;
172     }
173     else if (event->key() == Qt::Key_A){
174         angle_y+=0.1;
175     }
176     else if (event->key() == Qt::Key_Space){
177         corMaterial = corMaterial ? false:true;
178     }
179     update();
180 }
```

```
181
182 void CRender3D::mousePressEvent(QMouseEvent *e){
183     mousePos = e->pos();
184     mousePress = true;
185     update();
186 }
187 void CRender3D::mouseReleaseEvent(QMouseEvent *e){
188     angle_y -= (e->pos().x() - mousePos.x());
189     angle_x -= (e->pos().y() - mousePos.y());
190     mousePress = false;
191     update();
192 }
193
194 void CRender3D::mouseMoveEvent(QMouseEvent *e){
195     if (mousePress){
196         angle_y -= (e->pos().x() - mousePos.x())/60.0;
197         angle_x += (e->pos().y() - mousePos.y())/60.0;
198         mousePos = e->pos();
199     }
200     update();
201 }
202
203 void CRender3D::minimizeAngles(){
204     if(angle_x > 2.0f*PI)
205         angle_x = 0.0f;
206     if(angle_x < 0.0f)
207         angle_x = 2.0f*PI;
208
209     if(angle_y > 2.0f*PI)
210         angle_y = 0.0f;
211     if(angle_y < 0.0f)
212         angle_y = 2.0f*PI;
213
214     if(angle_z > 2.0f*PI)
215         angle_z = 0.0f;
216     if(angle_z < 0.0f)
217         angle_z = 2.0f*PI;
218 }
219
220 void CRender3D::paintEvent(QPaintEvent *e) {
221
222     //QPolygon triangle;
```

```
223
224     QPainter painter(this);
225     minimizeAngles();
226     QVector<QPolygon> triangulosDesenho;
227     QVector<QColor> coresDesenho;
228     QVector<std::pair<int, double>> pos_norm;
229     QVector<QColor> color;
230     if (corMaterial)
231         color = colorsMaterial;
232     else
233         color = colorsTemperature;
234     double prodVet;
235     int a, b, c;
236     int count = 0;
237     for(int cb = 0; cb < cube.size(); cb++){
238         for(int i = 0; i < 8; i++)
239             drawCube[i] = rotate(cube[cb][i]);
240
241         for(int r = 0; r < 12; r++){
242             if(activeEdges[cb][r]){
243                 a = triangles[r].x();
244                 b = triangles[r].y();
245                 c = triangles[r].z();
246                 prodVet = produtoVetorial(drawCube[a], drawCube[b],
247                                           drawCube[c]).z();
248                 if(prodVet > 0){
249                     pos_norm.push_back(std::pair(count, prodVet));
250                     count++;
251                     if(r == 0 || r == 1 || r == 8 || r == 9) ////
252                         fronteiras de g
253                         coresDesenho.push_back(QColor(color[cb].red()
254                                         , color[cb].green(), color[cb].blue(),
255                                         255));
256                     else
257                         coresDesenho.push_back(QColor(QColor(color[
258                                         cb].red()*0.6, color[cb].green()*0.6,
259                                         color[cb].blue()*0.6, 255)));
260
261                 QPolygon pol;
262                 pol << QPoint(drawCube[a].x(),drawCube[a].y())
263                   << QPoint(drawCube[b].x(),drawCube[b].y())
264                   << QPoint(drawCube[c].x(),drawCube[c].y());
```

```
259                     triangulosDesenho.push_back(pol);
260                 }
261             }
262         }
263     }
264
265     /// organizo conforme a profundidade
266     std::sort(pos_norm.begin(), pos_norm.end(), [](auto &left, auto
267             &right) {
268         return left.second > right.second;
269     });
270
271     /// desenho na tela
272     int pos;
273     painter.setPen(QColor(0,0,0,0));
274     for(int i = 0; i<triangulosDesenho.size(); i++){
275         pos = pos_norm[i].first;
276         painter.setBrush(coresDesenho[pos]);
277         painter.drawPolygon(triangulosDesenho[pos]);
278     }
279
280     painter.drawImage(0,0, *mImage);
281     e->accept();
282 }
283 QColor CRender3D::getRGB(double x, double min, double max){
284     return QColor::fromRgb(255, (max - x)*255/(max - min), 0, 255);
285 }
286
287 void CRender3D::timerEvent(QTimerEvent *e){
288     update();
289     Q_UNUSED(e);
290 }
291
292 QVector3D CRender3D::rotate(QVector3D a){
293     double A[3] = {a.x(), a.y(), a.z()};
294     double rotation[3][3];
295     double result[3] = {0,0,0};
296
297     /// rotation in x
298     rotation[0][0] = cos(angle_z)*cos(angle_y);
299     rotation[0][1] = cos(angle_z)*sin(angle_y)*sin(angle_x)-sin(
```

```

        angle_z)*cos(angle_x);
300     rotation[0][2] = cos(angle_z)*sin(angle_y)*cos(angle_x)+sin(
        angle_z)*sin(angle_x);

301
302     rotation[1][0] = sin(angle_z)*cos(angle_y);
303     rotation[1][1] = sin(angle_z)*sin(angle_y)*sin(angle_x)+cos(
        angle_z)*cos(angle_x);
304     rotation[1][2] = sin(angle_z)*sin(angle_y)*cos(angle_x)-cos(
        angle_z)*sin(angle_x);

305
306     rotation[2][0] = -sin(angle_y);
307     rotation[2][1] = cos(angle_y)*sin(angle_x);
308     rotation[2][2] = cos(angle_y)*cos(angle_x);

309
310     for( int i = 0;i<3; i++)
311         for(int j = 0;j<3; j++)
312             result[i]+=A[j]*rotation[i][j];
313
314     return QVector3D((result[0]+margin_x-200)*distance,(result[1]+
            margin_y-200)*distance,result[2]*distance);
315 }
316
317 QVector3D CRender3D::produtoVetorial(QVector3D origem, QVector3D a,
    QVector3D b){
318     QVector3D ax = a - origem;
319     QVector3D bx = b - origem;
320     return QVector3D(ax.y()*bx.z()-ax.z()*bx.y(), -ax.x()*bx.z()+ax
            .z()*bx.x(), ax.x()*bx.y()-ax.y()*bx.x());
321 }
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.8 o arquivo de cabeçalho da classe `CSimuladorTemperatura`.

Listagem 7.8: Arquivo de implementação da classe `CSimuladorTemperatura`

```

1 #ifndef CSIMULADORTEMPERATURA_H
2 #define CSIMULADORTEMPERATURA_H
3
4 #include <map>
5 #include <QDir>
6 #include <omp.h>
7 #include <QPoint>
8 #include <fstream>
9 #include <iomanip>
```

```
10 #include <QDirIterator>
11
12 #include "CGrid.h"
13 #include "CMaterial.h"
14 #include "CMaterialCorrelacao.h"
15 #include "CMaterialInterpolacao.h"
16
17 class CSimuladorTemperatura {
18 private:
19     QDir dir;
20     int MAX_THREADS = omp_get_max_threads() - 1;
21     int width, height;
22     bool materialPropertiesStatus = true;
23     int NGRIDS = 1;
24     double MIN_ERRO = 0.01;
25     int MAX_ITERATION = 1000;
26     int MIN_ITERATION = 100;
27     double delta_x = 2.6e-4, delta_t = 5.0e-1, delta_z = 0.05;
28
29     double Tmax = 400, Tmin = 300;
30
31     double actualTemperature = 300;
32     double actual_time = 0.0;
33     std::map<std::string, CMaterial*> materiais;
34     std::vector<std::string> name_materiais;
35
36 public:
37     std::vector<CGrid*> grid;
38 public:
39     // ----- FUNCOES DE CRIACAO -----
40     CSimuladorTemperatura() { createListOfMaterials(); }
41
42     void resetSize(int width, int height);
43     void resetGrid();
44
45     void createListOfMaterials();
46     CMaterial* chooseMaterialType(std::string name, std::string type);
47
48     void addGrid();
49     void delGrid(int _grid);
```

```
51  /// ----- FUNCOES DO SOLVER -----
52  void run_sem_parallelismo();
53  void run_parallelismo_por_grid();
54  void run_parallelismo_total();
55  void solverByGrid(int g);
56  void solverByThread(int thread_num);
57  double calculatePointIteration(int x, int y, int g);

58
59  std::string saveGrid(std::string nameFile);
60  std::string openGrid(std::string nameFile);
61  void openMaterial(QString nameFile);

62
63  /// ----- FUNCOES SET -----
64  void setActualTemperature(double newTemperature);
65  void changeMaterialPropertiesStatus();
66  void setDelta_t(double _delta_t) { delta_t = _delta_t; }
67  void setDelta_x(double _delta_x) { delta_x = _delta_x; }
68  void setDelta_z(double _delta_z) { delta_z = _delta_z; }

69
70  /// ----- FUNCOES GET -----
71  int getWidth(){return width;}
72  int getHeight(){return height;}
73  double getProps(double temperature, std::string material);
74  QColor getColor(std::string material);
75  int getNGrids() { return NGRIDS; }
76  bool getMaterialStatus() { return materialPropertiesStatus; }
77  double maxTemp();
78  double minTemp();
79  double get_ActualTemperature() { return actualTemperature; }

80
81  double getMaxTemp() { return Tmax; }
82  double getMinTemp() { return Tmin; }

83
84  double getDelta_t() { return delta_t; }
85  double getDelta_x() { return delta_x; }
86  double getDelta_z() { return delta_z; }
87  double getTime() { return actual_time; }

88
89  int MIN_ITER(){return MIN_ITERATION;}
90  int MAX_ITER(){return MAX_ITERATION;}
91  double ERRO_MIN(){return MIN_ERRO;}
```

```
93     void set_MIN_ITER(int MIN){MIN_ITERATION=MIN; }
94     void set_MAX_ITER(int MAX){MAX_ITERATION=MAX; }
95     void set_MIN_ERRO(double ERRO){MIN_ERRO=ERRO; }
96
97     CMaterial* getMaterial(std::string mat) { return materiais[mat];
98         }
99
100    std::vector<std::string> getMateriais() { return name_materiais;
101    }
102};
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.9 a implementação da classe `CSimuladorTemperatura`.

Listagem 7.9: Arquivo de implementação da função `main()`

```
1 #include "CSimuladorTemperatura.h"
2
3 void CSimuladorTemperatura::resetSize(int width, int height) {
4     grid.resize(NGRIDS);
5     this->width = width;
6     this->height = height;
7     for (int i = 0; i < NGRIDS; i++)
8         grid[i] = new CGrid(width, height, 0.0);
9 }
10
11 void CSimuladorTemperatura::resetGrid() {
12     for (int i = 0; i < NGRIDS; i++)
13         grid[i]->resetGrid(0.0);
14 }
15
16 void CSimuladorTemperatura::createListOfMaterials() {
17     /**
18     std::string matName;
19     QDirIterator it(dir.absolutePath()+"//materiais", {"*.
20         correlacao", "*.constante", "*.interpolacao"}, QDir::Files,
21         QDirIterator::Subdirectories);
22     while (it.hasNext()) {
23         it.next();
24         matName = it.fileName().toString();
25         QFileinfo fi(it.fileName());
26         std::string type = fi.suffix().toString();
27         materiais[matName] = chooseMaterialType(matName, type);
28     }
29 }
```

```
26     }
27     for(auto const& imap: materiais)
28         name_materiais.push_back(imap.first);
29 }
30
31 CMaterial* CSimuladorTemperatura::chooseMaterialType(std::string
32             name, std::string type){
33     //std::ifstream file(dir.getAbsolutePath().toStdString() + /
34     //    materiais/+name);
35
36     if (type == "correlacao" || type == "constante")
37         return new CMaterialCorrelacao(name);
38     else if (type == "interpolacao")
39         return new CMaterialInterpolacao(name);
40     else // COLOQUEI ESTE ELSE PARA COMPLETAR AS POSSIBILIDADES E
41         // ELIMINAR MSG WARNING
42     return new CMaterialInterpolacao(name);
43 }
44
45 void CSimuladorTemperatura::addGrid(){
46     NGRIDS++;
47     grid.push_back(new CGrid(width, height, 0.0));
48 }
49
50 void CSimuladorTemperatura::delGrid(int _grid){
51     NGRIDS--;
52     grid.erase(grid.begin() + _grid);
53 }
54
55 void CSimuladorTemperatura::openMaterial(QString nameFile){
56     QFileinfo fi(nameFile);
57
58     std::string matName = fi.fileName().toStdString();
59     std::string type = fi.suffix().toStdString();
60
61     materiais[matName] = chooseMaterialType(matName, type);
62     name_materiais.push_back(matName);
63 }
64
65 void CSimuladorTemperatura::run_sem_paralelismo() {
66     double erro, _erro;
```

```
65     int iter = 0;
66     for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
67         grid[g] -> startIteration();
68     }
69     while (iter <= MAX_ITERATION) {
70         erro = 0.0;
71         for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
72             grid[g] -> updateIteration();
73         }
74         /// atualizo temp_nu para calcular o erro da iteracao
75         for (int i = 0; i < width; i++)
76             for (int k = 0; k < height; k++)
77                 for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
78                     _erro = calculatePointIteration(i, k, g);
79                     erro = erro < _erro ? _erro : erro;
80                 }
81         iter++;
82         if (erro < MIN_ERR0 && iter >= MIN_ITERATION)
83             break;
84     }
85     for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
86         grid[g] -> updateSolver();
87     }
88 }
89
90 void CSimuladorTemperatura::run_parallelismo_por_grid() {
91     omp_set_num_threads(NGRIDS);
92
93     int iter = 0;
94     double maior_erro = 0.0;
95     QVector<double> erros(NGRIDS);
96
97     for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
98         grid[g] -> startIteration();
99     }
100
101    while (iter <= MAX_ITERATION) {
102        for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
103            grid[g] -> updateIteration();
104            erros[g] = 0.0;
105        }
106        #pragma omp parallel
```

```
107     {
108         /// atualizo temp_nu para calcular o erro da iteracao
109         for (int i = 0; i < width; i++)
110             for (int k = 0; k < height; k++){
111                 int g = omp_get_thread_num();
112                 double _erro = calculatePointIteration(i, k
113                     , g);
114                 erros[g] = erros[g] < _erro ? _erro : erros
115                     [g];
116             }
117         } // fim do paralelismo
118         iter++;
119
120         for (int i = 0; i < NGRIDS; i++)
121             maior_erro = maior_erro < erros[i] ? erros[i] :
122                 maior_erro;
123
124         if (maior_erro < MIN_ERRO && iter >= MIN_ITERATION)
125             break;
126     }
127 }
128
129 void CSimuladorTemperatura::run_parallelismo_total() {
130     omp_set_num_threads(MAX_THREADS);
131
132     int iter = 0;
133     double maior_erro = 0.0;
134     QVector<double> erros(MAX_THREADS);
135
136     for (int g = 0; g < NGRIDS; g++)
137         grid[g]->startIteration();
138
139     while (iter <= MAX_ITERATION) {
140         maior_erro = 0.0;
141         for (int g = 0; g < NGRIDS; g++){
142             grid[g]->updateIteration();
143         }
144
145 #pragma omp parallel
```

```

146     {
147         int x, y;
148         double _erro;
149         int thread_num = omp_get_thread_num();
150         for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
151             for (int i = thread_num; i < grid[g]->getSize(); i
152                 +=MAX_THREADS) {
153                 x = i % grid[g]->getWidth();
154                 y = i / grid[g]->getWidth();
155
156                 (*grid[g])(x, y)->temp_nu = (*grid[g])(x, y)->
157                     temp_nup1;
158                 _erro = calculatePointIteration(x, y, g);
159                 erros[thread_num] = erros[thread_num] < _erro ?
160                     _erro : erros[thread_num];
161             }
162         }
163     } // fim do paralelismo
164     iter++;
165
166     for (int i = 0; i < MAX_THREADS; i++){
167         maior_erro = maior_erro < erros[i] ? erros[i] :
168             maior_erro;
169         erros[i] = 0.0;
170     }
171
172     if (maior_erro < MIN_ERRO && iter >= MIN_ITERATION)
173         break;
174     }
175
176 double CSimuladorTemperatura::calculatePointIteration(int x, int y,
177     int g) {
178     if (!(*grid[g])(x,y)->active)
179         return 0.0;
180     if ((*grid[g])(x, y)->source)
181         return 0.0;
182     float T_esq = .0, T_dir = .0, T_sup = .0, T_inf = .0, T_cim =

```

```

        .0, T_bai = .0;
183    float k_esq = .0, k_dir = .0, k_sup = .0, k_inf = .0, k_cim =
        .0, k_bai = .0;
184    float C1, C2;
185
186    float k1;
187    float k2 = (*grid[g])(x, y)->material->getK((*grid[g])(x, y)->
        temp_nup1);
188
189    float temp_iter_anterior = (*grid[g])(x, y)->temp_nup1;
190    if (y - 1 > 0) {
191        if ((*grid[g])(x, y - 1)->active) {
192            k1 = (*grid[g])(x, y - 1)->material->getK((*grid[g])(x,
                y - 1)->temp_nup1);
193            k_inf = 2*k1*k2/(k1+k2);
194            T_inf = (*grid[g])(x, y - 1)->temp_nup1;
195        }
196    }
197
198    if (y + 1 < grid[g]->getHeight()) {
199        if ((*grid[g])(x, y + 1)->active) {
200            k1 = (*grid[g])(x, y + 1)->material->getK((*grid[g])(x,
                y + 1)->temp_nup1);
201            k_sup = 2*k1*k2/(k1+k2);
202            T_sup = (*grid[g])(x, y + 1)->temp_nup1;
203        }
204    }
205
206    if (x - 1 > 0) {
207        if ((*grid[g])(x - 1, y)->active) {
208            k1 = (*grid[g])(x - 1, y)->material->getK((*grid[g])(x
                - 1, y)->temp_nup1);
209            k_esq = 2*k1*k2/(k1+k2);
210            T_esq = (*grid[g])(x - 1, y)->temp_nup1;
211        }
212    }
213
214    if (x + 1 < grid[g]->getWidth()) {
215        if ((*grid[g])(x + 1, y)->active) {
216            k1 = (*grid[g])(x + 1, y)->material->getK((*grid[g])(x
                + 1, y)->temp_nup1);
217            k_dir = 2*k1*k2/(k1+k2);

```

```

218         T_dir = (*grid[g])(x + 1, y)->temp_nup1;
219     }
220 }
221
222 if ( g < NGRIDS-1) {
223     if (grid[g + 1]->operator()(x, y)->active) {
224         k1 = (*grid[g + 1])(x, y)->material->getK((*grid[g +
225             1])(x, y)->temp_nup1);
226         k_cim = 2*k1*k2/(k1+k2);
227         T_cim = (*grid[g + 1])(x, y)->temp_nup1;
228     }
229 }
230
231 if (g > 0) {
232     if (grid[g - 1]->operator()(x, y)->active) {
233         k1 = (*grid[g - 1])(x, y)->material->getK((*grid[g -
234             1])(x, y)->temp_nup1);
235         k_bai = 2*k1*k2/(k1+k2);
236         T_bai = (*grid[g - 1])(x, y)->temp_nup1;
237     }
238 }
239
240 C2 = (delta_z*delta_z*delta_x*delta_x/delta_t) * (*grid[g])(x,
241     y)->material->getCp() * (*grid[g])(x, y)->material->getRho()
242     ;
243 C1 = 1/(C2 + delta_z*delta_z*(k_esq+k_dir) + delta_z*delta_z*(
244     k_sup+k_inf) + delta_x*delta_x*(k_cim+k_bai));
245 (*grid[g])(x, y)->temp_nup1 = C1*(C2*(*grid[g])(x, y)->temp +
246     delta_z*delta_z*(k_esq*T_esq+k_dir*T_dir) + delta_z*delta_z
247     *(k_sup*T_sup+k_inf*T_inf) + delta_x*delta_x*(k_cim*T_cim+
248     k_bai*T_bai));
249
250 return abs((*grid[g])(x, y)->temp_nup1 - temp_iter_anterior);
251 }

252
253 std::string CSimuladorTemperatura::saveGrid(std::string nameFile) {
254     std::ofstream file(nameFile);
255     int sizeGrid = grid[0]->getSize();
256     file << NGRIDS << "\n";
257     for (int g = 0; g < NGRIDS; g++) {
258         for (int i = 0; i < sizeGrid; i++) {
259             if ((*grid[g])[i]->active){

```

```
252         file << i << " " << g << " ";
253         file << (*grid[g])[i]->temp << " ";
254         file << (*grid[g])[i]->active << " ";
255         file << (*grid[g])[i]->source << " ";
256         file << (*grid[g])[i]->material->getName() << "\n";
257     }
258 }
259 }
260 file.close();
261 return "Arquivo salvo!";
262 }
263
264 std::string CSimuladorTemperatura::openGrid(std::string nameFile) {
265
266     std::ifstream file(nameFile);
267
268     std::string _name;
269     int i, g;
270     double _temperature;
271     int _active, _source;
272     std::string _strGrids;
273     std::getline(file, _strGrids);
274
275     NGRIDS = std::stoi(_strGrids);
276     grid.resize(NGRIDES);
277     for(int gg = 0; gg<NGRIDES; gg++)
278         grid[gg] = new CGrid(width, height, 0.0);
279     while(file >> i >> g >> _temperature >> _active >> _source >>
280           _name){
281         grid[g]->draw(i, _temperature, _active, _source, _name)
282             ;
283         Tmax = Tmax < _temperature ? _temperature : Tmax;
284     }
285     file.close();
286     return "Arquivo carregado!";
287 }
288 void CSimuladorTemperatura::setActualTemperature(double
289 newTemperature) {
290     if (newTemperature > Tmax)
291         Tmax = newTemperature;
```

```
291     if (newTemperature < Tmin)
292         Tmin = newTemperature;
293     actualTemperature = newTemperature;
294 }
295
296 void CSimuladorTemperatura::changeMaterialPropertiesStatus() {
297     materialPropertiesStatus = materialPropertiesStatus ? false :
298         true;
299 }
300
301 double CSimuladorTemperatura::getProps(double temperature, std::
302     string material){
303     return materiais[material]->getThermalConst(temperature);
304 }
305
306 QColor CSimuladorTemperatura::getColor(std::string material){
307     return materiais[material]->getColor();
308 }
309
310 double CSimuladorTemperatura::maxTemp() {
311     double maxErro = 0;
312     double tempErro = 0;
313     for (int i = 0; i < NGRIDS; i++) {
314         tempErro = grid[i]->maxTemp();
315         maxErro = maxErro < tempErro ? tempErro : maxErro;
316     }
317     return maxErro;
318 }
319
320 double CSimuladorTemperatura::minTemp() {
321     double minErro = 0;
322     double tempErro = 0;
323     for (int i = 0; i < NGRIDS; i++) {
324         tempErro = grid[i]->minTemp();
325         minErro = minErro > tempErro ? tempErro : minErro;
326     }
327 }
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.10 o arquivo de cabeçalho da classe CGrid.

Listagem 7.10: Arquivo de implementação da classe CGrid

```
1 #ifndef CGRID_HPP
2 #define CGRID_HPP
3
4 #include <vector>
5 #include <string>
6 #include "CCell.h"
7 #include <iostream>
8 #include "CMaterialCorrelacao.h"
9
10 class CGrid {
11 private:
12     int width, height;
13     std::vector<CCell> grid;
14 public:
15     CGrid() {
16         width = 0;
17         height = 0;
18     }
19
20     CGrid(int _width, int _height) : width{_width}, height{_height}
21     {
22         grid.resize(width * height);
23     }
24
25     CGrid(int _width, int _height, double temperature) {
26         resetSize(_width, _height, temperature);
27     }
28
29     void resetGrid(double temperature);
30
31     void resetSize(int _width, int _height, double temperature);
32
33     void draw_rec(int x, int y, double size, double temperature,
34                   bool isSourceActive, CMaterial* _material, bool eraser);
35     void draw_cir(int x, int y, double size, double temperature,
36                   bool isSourceActive, CMaterial* _material, bool eraser);
37     void draw(int x, double temperature, bool active, bool isSource
38               , std::string _material);
39
40     int getSize() { return width * height; }
41
42     void updateIteration();
```

```

39     void updateSolver();
40     void startIteration();
41     double maxErrorIteration();
42
43     int getWidth() { return width; }
44     int getHeight() { return height; }
45     double getTemp(int position) { return grid[position].temp_nup1;
46                           }
47
48     double maxTemp();
49     double minTemp();
50
51     bool isActive(int x){ return grid[x].active; }
52     CCell* operator () (int x, int y) { return &grid[y * width + x
53                           ]; }
54     CCell* operator [] (int x) { return &grid[x]; }
55 };
56 #endif

```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.11 a implementação da classe CGrid.

Listagem 7.11: Arquivo de implementação da função main()

```

1 #include "CGrid.h"
2
3 void CGrid::resetSize(int _width, int _height, double temperature)
4 {
5     width = _width;
6     height = _height;
7     grid.resize(width * height);
8     for (int i = 0; i < width * height; i++)
9         grid[i].temp = temperature;
10
11 void CGrid::resetGrid(double temperature) {
12     for (int i = 0; i < width * height; i++) {
13         grid[i].active = false;
14         grid[i].active = false;
15         grid[i].source = false;
16         grid[i].temp = temperature;
17         grid[i].temp_nup1 = temperature;
18         grid[i].material = new CMaterial();

```

```
19     }
20 }
21
22 void CGrid::draw_rec(int x, int y, double size, double _temperature
23 , bool isSourceActive, CMaterial* _material, bool eraser) {
24     int start_x = (x - size / 2 >= 0) ? x - size / 2 : 0;
25     int start_y = (y - size / 2 >= 0) ? y - size / 2 : 0;
26     int max_x    = (x + size / 2 >= width) ? width : x - size/2 +
27                     size;
28     int max_y    = (y + size / 2 >= height) ? height : y - size/2 +
29                     size;
30     double temperatura = eraser?0:_temperature;
31
32
33     for (int i = start_x; i < max_x; i++){
34         for (int k = start_y; k < max_y; k++) {
35             grid[k * width + i].active = !eraser;
36             grid[k * width + i].temp = temperatura;
37             grid[k * width + i].source = isSourceActive;
38             grid[k * width + i].material = _material;
39         }
40     }
41 }
42
43
44 void CGrid::draw_cir(int x, int y, double radius, double
45 _temperature, bool isSourceActive, CMaterial* _material, bool
46 eraser) {
47     /// vou montar um quadrado, e analisar se o cada ponto dessa
48     /// regiao faz parte do circulo
49     int start_x = (x - (int)radius >= 0) ? ((int)x - (int)radius) :
50                 0;
51     int start_y = (y - (int)radius >= 0) ? ((int)y - (int)radius) :
52                 0;
53     int max_x    = (x + (int)radius >= width) ? width : ((int)x +
54                     (int)radius);
55     int max_y    = (y + (int)radius >= height) ? height : ((int)y +
56                     (int)radius);
57     double temperatura = eraser?0:_temperature;
58
59
60     for (int i = start_x; i < max_x; i++) {
61         for (int k = start_y; k < max_y; k++) {
62             if (((i*1.0 - x) * (i*1.0 - x) + (k*1.0 - y) * (k*1.0 -
63                 y)) < radius * radius) {
```

```
50             grid[k * width + i].active = !eraser;
51             grid[k * width + i].temp = temperatura;
52             grid[k * width + i].source = isSourceActive;
53             grid[k * width + i].material = _material;
54         }
55     }
56 }
57 }
58
59 void CGrid::draw(int x, double _temperature, bool active, bool
60                   isSource, std::string _material) {
61     grid[x].temp = _temperature;
62     grid[x].active = active;
63     grid[x].source = isSource;
64     if (active)
65         grid[x].material = new CMaterialCorrelacao(_material);
66     else
67         grid[x].material = new CMaterial();
68 }
69
70 void CGrid::updateIteration() {
71     for (int i = 0; i < width * height; i++)
72         grid[i].temp_nu = grid[i].temp_nup1;
73 }
74
75 void CGrid::updateSolver() {
76     for (int i = 0; i < width * height; i++)
77         grid[i].temp = grid[i].temp_nup1;
78 }
79
80 double CGrid::maxErroIteration() {
81     double erro = 0.0;
82     double erro_posicao = 0.0;
83     for (int i = 0; i < width * height; i++) {
84         erro_posicao = grid[i].temp_nup1 - grid[i].temp_nu;
85         erro = abs(erro_posicao) > erro ? erro_posicao : erro;
86     }
87     return erro;
88 }
89
90 void CGrid::startIteration() {
91     for (int i = 0; i < width * height; i++)
```

```

91         grid[i].temp_nup1 = grid[i].temp;
92     }
93
94 double CGrid::maxTemp() {
95     double maxTemp = 0;
96     for (int i = 0; i < width * height; i++)
97         maxTemp = maxTemp < grid[i].temp ? grid[i].temp : maxTemp;
98     return maxTemp;
99 }
100
101 double CGrid::minTemp() {
102     double minTemp = 1000000;
103     for (int i = 0; i < width * height; i++)
104         minTemp = minTemp > grid[i].temp ? grid[i].temp : minTemp;
105     return minTemp;
106 }
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.12 o arquivo de cabeçalho da classe CCell.

Listagem 7.12: Arquivo de implementação da classe CCell

```

1 ifndef CCELL_HPP
2 define CCELL_HPP
3
4 include <iostream>
5 include "CMaterial.h"
6
7 class CCell {
8 public:
9     bool active = false;
10    bool source = false;
11    double temp = 0;
12    double temp_nu = 0;
13    double temp_nup1 = 0;
14
15    CMaterial *material;
16    friend std::ostream& operator << (std::ostream& os, const CCell
17        & cell) { return os << cell.temp; }
18};
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.13 a implementação da classe CCell.

Listagem 7.13: Arquivo de implementação da função main()

```
1 #include "CCell.h"
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.14 o arquivo de cabeçalho da classe CMaterial.

Listagem 7.14: Arquivo de implementação da classe CMaterial

```
1 #ifndef CMATERIAL_HPP
2 #define CMATERIAL_HPP
3
4 #include <string>
5 #include <QColor>
6
7 class CMaterial {
8 public:
9     CMaterial(){}
10    CMaterial(std::string _name) {name = _name;}
11    virtual double getThermalConst(double T) {return 0.0*T;}
12    virtual double getK(double T) {return 0.0*T;}
13    virtual double getCp() {return 0.0;}
14    virtual double getRho() {return 0.0;}
15
16    virtual QColor getColor() { return QColor(0,0,0); }
17    virtual std::string getName() { return name; }
18
19 protected:
20    std::string name;
21    QColor color;
22};
23#endif
```

Apresenta-se na listagem 7.15 a implementação da classe CMaterial.

Listagem 7.15: Arquivo de implementação da função main()

```
1 #include "CMaterial.h"
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.16 o arquivo de cabeçalho da classe CMaterialCorrelacao.

Listagem 7.16: Arquivo de implementação da classe CMaterialCorrelacao

```
1 #ifndef CMATERIALCORRELACAO_H
2 #define CMATERIALCORRELACAO_H
3
4 #include <QDir>
```

```

5 #include <string>
6 #include <QColor>
7 #include <fstream>
8 #include <iostream>
9
10 #include "CMaterial.h"
11
12 class CMaterialCorrelacao:public CMaterial {
13 public:
14     CMaterialCorrelacao(std::string fileName);
15     double getThermalConst(double T);
16     double getK(double T);
17     double getCp() {return rho;}
18     double getRho() {return cp;}
19
20     QColor getColor() { return color; }
21     std::string getName() { return name; }
22
23 protected:
24     std::string name;
25     QColor color;
26
27     double rho;
28     double cp;
29     double C0_k, C1_k, C2_k;
30 };
31 #endif

```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.17 a implementação da classe CMaterialCorrelacao.

Listagem 7.17: Arquivo de implementação da função main()

```

1 #include "CMaterialCorrelacao.h"
2
3 CMaterialCorrelacao::CMaterialCorrelacao(std::string fileName) {
4     std::string str_temp;
5     int r, g, b, alpha;
6     name = fileName;
7
8     QDir dir; std::string path = dir.absolutePath().toString();
9     std::ifstream file(path+"/materiais//"+fileName);
10    if (file.is_open()){
11        file >> str_temp; file >> r; file >> g; file >> b; file >>

```

```

        alpha;
12      color = QColor(r, g, b, alpha);
13      file >> str_temp; file >> cp;
14      file >> str_temp; file >> rho;
15      file >> str_temp; file >> str_temp; // texto explicando a
16      conta
17      file >> str_temp; file >> C0_k;    file >> C1_k;    file >>
18      C2_k;
19  }
20  else {
21      std::cout<<"can't open file!" << std::endl;
22  }
23
24 double CMaterialCorrelacao::getThermalConst(double T) {
25     double k = C0_k + C1_k * T + C2_k * T * T;
26     return rho * cp/k;
27 }
28 double CMaterialCorrelacao::getK(double T) {
29     double k = C0_k + C1_k * T + C2_k * T * T;
30     return k<0 ? C0_k : k;
31 }
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.18 o arquivo de cabeçalho da classe CMaterialInterpolacao.

Listagem 7.18: Arquivo de implementação da classe CMaterialInterpolacao

```

1 #ifndef CMATERIALINTERPOLACAO_H
2 #define CMATERIALINTERPOLACAO_H
3
4 #include <QDir>
5 #include <string>
6 #include <vector>
7 #include "CMaterial.h"
8 #include "CSegmentoReta.h"
9
10 class CMaterialInterpolacao : public CMaterial {
11 public:
12     CMaterialInterpolacao();
13     CMaterialInterpolacao(std::string _name);
14
15     double getThermalConst(double T);
```

```

16     double getK(double T);
17     double getCp() {return cp;}
18     double getRho() {return rho;}
19
20     QColor getColor()          { return color; }
21     std::string getName()     { return name; }
22 protected:
23     std::string name;
24     QColor color;
25
26 private:
27     std::vector<CSegmentoReta> retaInterpolacao;
28     double rho, cp;
29     double xmin, xmax, edx;
30 };
31
32 #endif // CMATERIALINTERPOLACAO_H

```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.19 a implementação da classe CMaterialInterpolacao.

Listagem 7.19: Arquivo de implementação da função main()

```

1 #include "CMaterialInterpolacao.h"
2 #include <iostream>
3
4 CMaterialInterpolacao::CMaterialInterpolacao(std::string fileName){
5     std::string str_temp;
6     int r, g, b, alpha;
7     name = fileName;
8
9     QDir dir; std::string path = dir.absolutePath().toStdString();
10    std::ifstream file(path+ "/materiais/" +fileName);
11    if (file.is_open()){
12
13        file >> str_temp; file >> r; file >> g; file >> b; file >>
14            alpha;
15        color = QColor(r, g, b, alpha);
16
17        file >> str_temp; file >> cp;
18        file >> str_temp; file >> rho;
19
20        file >> str_temp; /// texto

```

```
21     double x1, x2, y1, y2;
22     file >> x1 >> y1;
23     xmin = x1;
24     while(file >> x2 >> y2){
25         retaInterpolacao.push_back( CSegmentoReta(x1,y1,x2,y2)
26             );
27         x1 = x2;
28         y1 = y2;
29     }
30     xmax = x1;
31     edx = (xmax-xmin)/ (retaInterpolacao.size()-1);
32 }
33 else{
34     std::cout<<"can't open file!" << std::endl;
35 }
36
37 double CMaterialInterpolacao::getThermalConst(double T){
38     return rho*cp/getK(T);
39 }
40
41 double CMaterialInterpolacao::getK(double T){
42     if( T <= xmin )
43         return retaInterpolacao[0].Fx(T);
44     else if(T >= xmax)
45         return retaInterpolacao[retaInterpolacao.size()-1].Fx(T);
46     // chute inicial, et = Estimativa do Trecho de reta que atende
47     // valor de x.
48     //int et = (T - xmin) / edx; // verificar mudança para size_t ,
49     //msg warning
50     size_t et = (T - xmin) / edx;
51     while(true){ // procura pelo trecho de reta que contempla x.
52         if( T < retaInterpolacao[et].Xmin() and et > 1 )
53             et--;
54         else if ( T > retaInterpolacao[et].Xmax() and et <
55             retaInterpolacao.size()-1 )
56             et++;
57         else
58             break;
59     };
60     return retaInterpolacao[et].Fx( T ); // calculo de Fx(x).
61 }
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.20 o arquivo de cabeçalho da classe `CSegmentoReta`.

Listagem 7.20: Arquivo de implementação da classe `CSegmentoReta`

```

1 #ifndef CSegmentoReta_h
2 #define CSegmentoReta_h
3
4 #include <iomanip>
5 #include <vector>
6
7 #include "CReta.h"
8
9 /// Class CSegmentoReta, representa uma reta com intervalo xmin->
10 // xmax.
11 class CSegmentoReta : public CReta
12 {
13     private:
14         double xmin = 0.0; //< Inicio do segmento de reta.
15         double xmax = 0.0; //< Fim do segmento de reta.
16         bool ok = false; //< Se verdadeiro, x usado esta dentro
17             intervalo valido (xmin->xmax)
18
19 public:
20     /// Construtor default.
21     CSegmentoReta ( ) { }
22
23     /// Construtor sobreescarregado, recebe pontos (x1,y1), (x2,y2).
24     CSegmentoReta (double x1, double y1, double x2, double y2)
25         : CReta(x1,y1,x2,y2), xmin{x1}, xmax{x2} { TestarIntervalo(x1); }
26
27     /// Construtor copia.
28     CSegmentoReta (const CSegmentoReta& segmento) : CReta() {
29         x = segmento.x; y = segmento.y; a = segmento.a; b =
30             segmento.b;
31         xmin = segmento.xmin; xmax = segmento.xmax; ok = segmento.ok
32         ;
33     }
34
35     // Metodos Get/Set
36     double Xmin( ) { return xmin; }
37     void Xmin(double _xmin) { xmin = _xmin; }
38     double Xmax( ) { return xmax; }
39     void Xmax(double _xmax) { xmax = _xmax; }

```

```
36
37     /// Se retorno for verdadeiro, valor de y esta dentro intervalo
38     xmin->xmax .
39
40     bool Ok() { return ok; }
41
42     /// Verifica se esta no intervalo de xmin->xmax .
43     bool TestarIntervalo (double _x) { return ok = ( _x >= xmin and
44         _x <= xmax)? 1:0; }
45
46     /// Calcula valor de y = Fx(x);
47     virtual double Fx (double _x) {
48         TestarIntervalo(_x);
49         return CReta::Fx(_x);
50     }
51
52     /// Calcula valor de y = Fx(x);
53     double operator()(double _x) { return Fx(_x); }
54
55     /// Sobrecarga operador <<, permite uso cout << reta;
56     friend std::ostream& operator<<( std::ostream& os, const
57         CSegmentoReta& segmento ) {
58         os.precision(10);
59         os<< segmento.xmin << " -> " << segmento.xmax
60         << " : y = " << std::setw(15) << std::setprecision(10) <<
61             segmento.a << " + "
62             << std::setw(15) << std::setprecision(10) << segmento.b << "*"
63             x;
64         return os;
65     }
66
67     /// Sobrecarga operador >>, permite uso cin >> reta;
68     friend std::istream& operator>>( std::istream& in, CSegmentoReta&
69         segmento ) {
70         in >> segmento.xmin >> segmento.xmax
71         >> segmento.a >> segmento.b;
72         return in;
73     }
74
75     friend class CInterpolacaoLinear;
76 };
77 #endif // CSegmentoReta_h
```

Apresenta-se na listagem 7.21 a implementação da classe `CSegmentoReta`.

Listagem 7.21: Arquivo de implementação da função `main()`

```
1 #include "CSegmentoReta.h"
```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.22 o arquivo de cabeçalho da classe `CReta`.

Listagem 7.22: Arquivo de implementação da classe `CReta`

```
1 #ifndef CReta_H
2 #define CReta_H
3
4 #include <sstream>
5 #include <iomanip>
6 #include <fstream>
7
8 /// Class CReta, representa uma reta  $y = a + b * x$ .
9 class CReta
10 {
11 protected:
12     double x = 0.0; // Represeta valor de x.
13     double y = 0.0; // Represeta valor de y.
14     double b = 0.0; // Represeta valor de b da equacao  $y = a + b * x$ ; normalmente e calculado.
15     double a = 0.0; // Represeta valor de a da equacao  $y = a + b * x$ ; normalmente e calculado.
16
17 public:
18     /// Construtor default.
19     CReta () = default;
20     /// Construtor sobreescarregado, recebe a e b.
21     CReta (double _a, double _b): x{0.0}, y{_a}, b{_b}, a{_a} { }
22
23     /// Construtor sobreescarregado, recebe dados pontos (x1,y1) e (x2, y2).
24     // bug se x2=x1
25     CReta (double x1, double y1, double x2, double y2) : x{x1}, y{y1}, b{(y2-y1)/(x2-x1)}, a{y1-b*x1} { }
26
27     /// Construtor de copia.
28     CReta( const CReta& reta): x{reta.x}, y{reta.y}, b{reta.b}, a{reta.a} { }
```

```

30 // Metodos Get/Set
31 double X( ) { return x; }
32 void X(double _x) { x = _x; }
33 double Y( ) { return y; }
34 void Y(double _y) { y = _y; }
35 double A( ) { return a; }
36 void A(double _a) { a = _a; }
37 double B( ) { return b; }
38 void B(double _b) { b = _b; }

39
40 /// Calcula valor de y = Fx(x);
41 virtual double Fx (double _x) { x = _x; return y = a + b
42 * x; }

43 /// Calcula valor de y = Fx(x);
44 double operator()(double x) { return Fx(x); }

45
46 /// Sobrecarga operador <<, permite uso cout << reta;
47 friend std::ostream& operator<<( std::ostream& os, CRet a& reta )
48 {
49     os << "y=" << std::setw(10) << reta.a << "+" << std::setw
50 (10) << reta.b << "*x";
51     return os;
52 }

53 /// Sobrecarga operador >>, permite uso cin >> reta;
54 friend std::istream& operator>>( std::istream& in, CRet a& reta )
55 {
56     in >> reta.a >> reta.b;
57     return in;
58 }

59 /// Retorna string com a equação y = a + b*x;
60 std::string Equacao() { std::ostringstream os; os << *
61     this;
62     return os.str();
63 }
64 #endif // CRet a_H

```

Fonte: produzido pelo autor.

Apresenta-se na listagem 7.23 a implementação da classe CRet a.

Listagem 7.23: Arquivo de implementação da função main()

```
#include "CRet a.h"
```

Fonte: produzido pelo autor.

Capítulo 8

Resultados

Neste capítulo serão apresentados a validação e resultados do simulador.

Inicialmente, o simulador será validado comparando com a solução analítica unidimensional conhecida. A seguir, serão apresentados resultados aplicados à indústria do petróleo, como:

- injeção térmica em reservatórios,
- simulação reduzida de *five-spot*,
- uma aplicação real na tecnologia, resfriamento de processadores.

8.1 Validação do simulador

Para validar os resultados do simulador, foi comparado os resultados do simulador, com a solução proposta por (INCROPERA, 2008).

A solução para o caso unidimensional é:

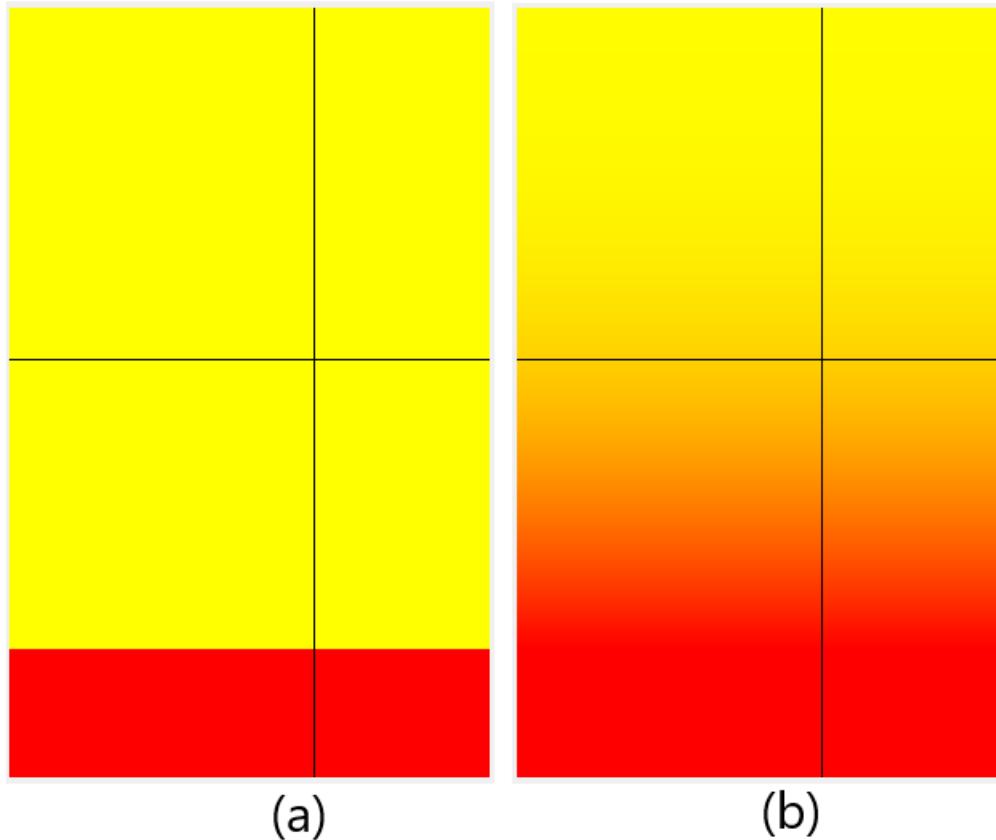
$$\frac{T - T_s}{T_i - T_s} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (8.1)$$

Onde erf é a *função erro de Gauss*, e α é a constante com as propriedades termofísicas:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (8.2)$$

As soluções horizontais e verticais do simulador são salvas em uma pasta em arquivos '.txt', com o respectivo tempo no nome do arquivo. A Figura 8.1 mostra a aplicação do problema no simulador. Como só há condução de temperatura em uma única direção, será considerado que a reta vertical preta de estudo é o cenário unidimensional.

Figura 8.1: Aplicação do problema unidimensional no simulador: (a) tempo inicial e (b) após 100 segundos



Fonte: Produzido pelo autor.

Para comparar os resultados do simulador com a solução analítica da Equação 8.1, foi programado um código em python apresentado na listagem 8.1.

Listagem 8.1: Arquivo de implementação da validação em Python

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import math
4
5 def temperature(x,t, alfa):
6     Ti = 300
7     Tf = 1000
8     return Tf - (Tf - Ti)*math.erf(x/(2.0*math.sqrt(alfa*t)))
9
10 def maior_erro(x_sim, t_sim, t, alfa):
11     T_analitico = []
12     erro = []
13     erro_relativo = []
14
15     for x in x_sim:
16         T_analitico.append(temperature(x, t, alfa))

```

```
17
18     for i in range(len(t_sim)):
19         erro.append(abs(t_sim[i] - T_analitico[i]))
20         erro_relativo.append(erro[i]/t_sim[i]*100.0)
21     print('tempo:' + str(t))
22     print('erro:' + str(max(erro)))
23     print('erro_relativo:' + str(max(erro_relativo)))
24
25 x = np.linspace(0,0.10374,100)
26 t = [50.0, 100.0]
27
28 k = 40
29 rho = 1600
30 cp = 4000
31 alfa = k/(rho*cp)
32
33 for _t in t:
34     T = []
35     for i in x:
36         T.append(temperature(i, _t, alfa))
37     plt.plot(x, T, 'bo')
38
39#####
40 f = open('vertical100.000000.dat', 'r')
41 x_sim = []
42 t_sim = []
43 for i in f:
44     split = i.split(';')
45     x_sim.append(float(split[0]))
46     t_sim.append(float(split[1].replace('\n', '')))
47
48 t_sim.sort(reverse=True)
49 for i in range(len(t_sim)):
50     if t_sim[0] == 1000.0:
51         t_sim.pop(0)
52         x_sim.pop(-1)
53     else:
54         break
55 print('Tamanho:' + str(max(x_sim) - min(x_sim)))
56 plt.plot(x_sim, t_sim, 'r+')
57 maior_erro(x_sim, t_sim, 100.0, alfa)
```

```

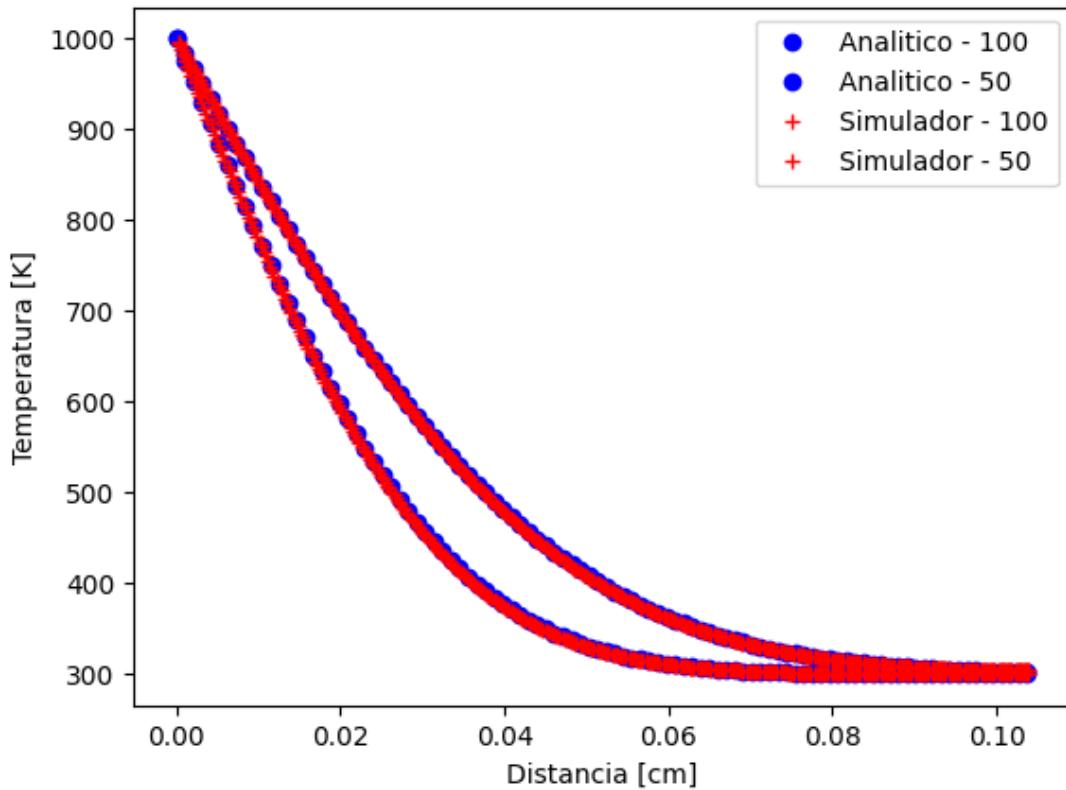
58
59 f = open('vertical50.000000.dat', 'r')
60 x_sim = []
61 t_sim = []
62 for i in f:
63     split = i.split(';')
64     x_sim.append(float(split[0]))
65     t_sim.append(float(split[1].replace('\n', '')).replace(' ', '')))
66
67 t_sim.sort(reverse=True)
68 for i in range(len(t_sim)):
69     if t_sim[0] == 1000.0:
70         t_sim.pop(0)
71         x_sim.pop(-1)
72     else:
73         break
74 print('Tamanho:' + str(max(x_sim) - min(x_sim)))
75 plt.plot(x_sim, t_sim, 'r+')
76 maior_erro(x_sim, t_sim, 50.0, alfa)
77
78
79 plt.legend(['Analitico-100', 'Analitico-50', 'Simulador-100',
80             'Simulador-50'])
81 plt.show()

```

Fonte: produzido pelo autor.

Como resultado é apresentado um gráfico com duas soluções, para os tempos de 50 e 100 segundos. Veja Figura 8.2. Observe que para os dois tempos a solução numérica, obtida com o simulador desenvolvido, esta de acordo com a solução teórica.

Figura 8.2: Comparação da solução da equação de calor com o resultado do simulador



Fonte: Produzido pelo autor.

Os dados da simulação foram obtidos utilizando um material com propriedades termofísicas constantes apresentadas na Tabela 8.1:

Tabela 8.1: Tabela com as propriedades termofísicas do modelo de validação

Propriedade	Valor
C_p	40.000
k	40
ρ	1.600

O erro do simulador foi de 0.69% para 50,0 segundos, e 0,88% para 100,0 segundos. O mínimo de iteração para cada mudança de tempo foi de 800 iterações, e o máximo permitido foi de 1.000 iterações.

O modelo para simulação pode ser obtido no arquivo “Modelo_validacao.dat”.

8.2 Injeção de calor em reservatório

Agora, será realizada uma simulação com as mesmas condições apresentadas nos resultados do Trabalho de Conclusão de Curso (LIMA, 2020), onde também foi desenvolvido um simulador de condução de temperatura, mas específico para misturas de materiais.

Para essa simulação, será considerado um reservatório de arenito com água, onde a porosidade é 20%. As fronteiras do reservatório estão com temperatura constante ao longo do tempo de 1000K (condição de contorno de Dirichlet), e um poço central com tamanho desprezível, também com temperatura constante de 1000K. O restante do reservatório está com temperatura de 300K.

As propriedades dos materiais estão na Tabela 8.2, esses valores foram obtidos em (DONG *et al.*, 2015).

Tabela 8.2: Tabela com propriedades termofísicas do arenito e da água

Material	$k [W/m.K]$	$\rho [kg/m^3]$	$c_p [J/kg.K]$
Arenito	2,10	2270,0	710,00
Água	0,56	999,87	4.200,00

Como o simulador não consegue tratar mistura de materiais, será utilizado o desenvolvimento utilizado por (LIMA, 2020), considerando porosidade de 0,20. Como não é apresentado uma equação para calcular densidade e a capacidade térmica da mistura isoladamente, será utilizado o mesmo modelo para a condutividade térmica (Eq. 8.3), onde ψ é a propriedade termofísica analisada.

$$\psi = \phi\psi_1 + (1 - \phi)\psi_2 \quad (8.3)$$

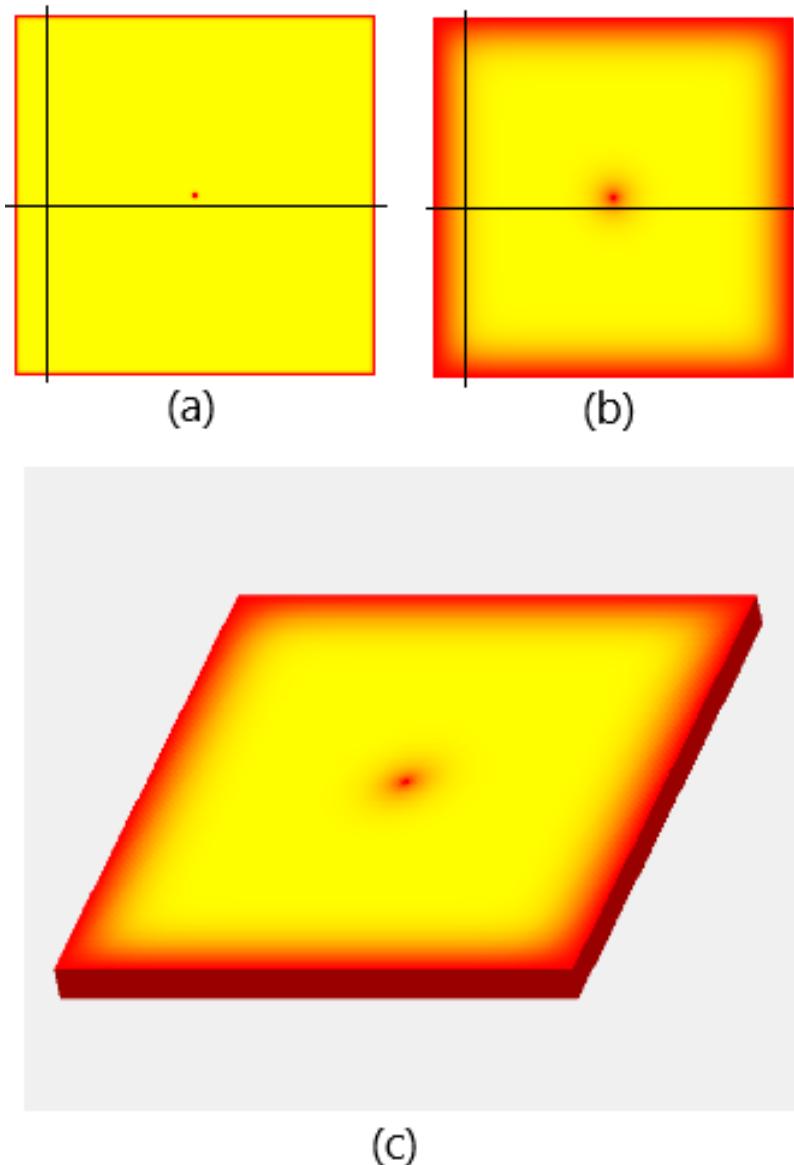
Com isso, é obtido a propriedade do arenito com água na Tabela 8.3.

Tabela 8.3: Tabela com propriedades termofísicas do arenito com água

Material	$k [W/m.K]$	$\rho [kg/m^3]$	$c_p [J/kg.K]$
Arenito com água	1,792	2015,974	1408,00

O resultado da simulação é mostrado na Figura 8.3. Em (a), é apresentado o modelo inicial, antes de iniciar a simulação. Em (b), é apresentado o modelo após 3600 segundos. Em (c), é mostrado o modelo pela renderização 3D.

Figura 8.3: Resultados da simulação com renderização 3D: (a) tempo inicial, (b) após 1 hora e (c) a renderização 3D

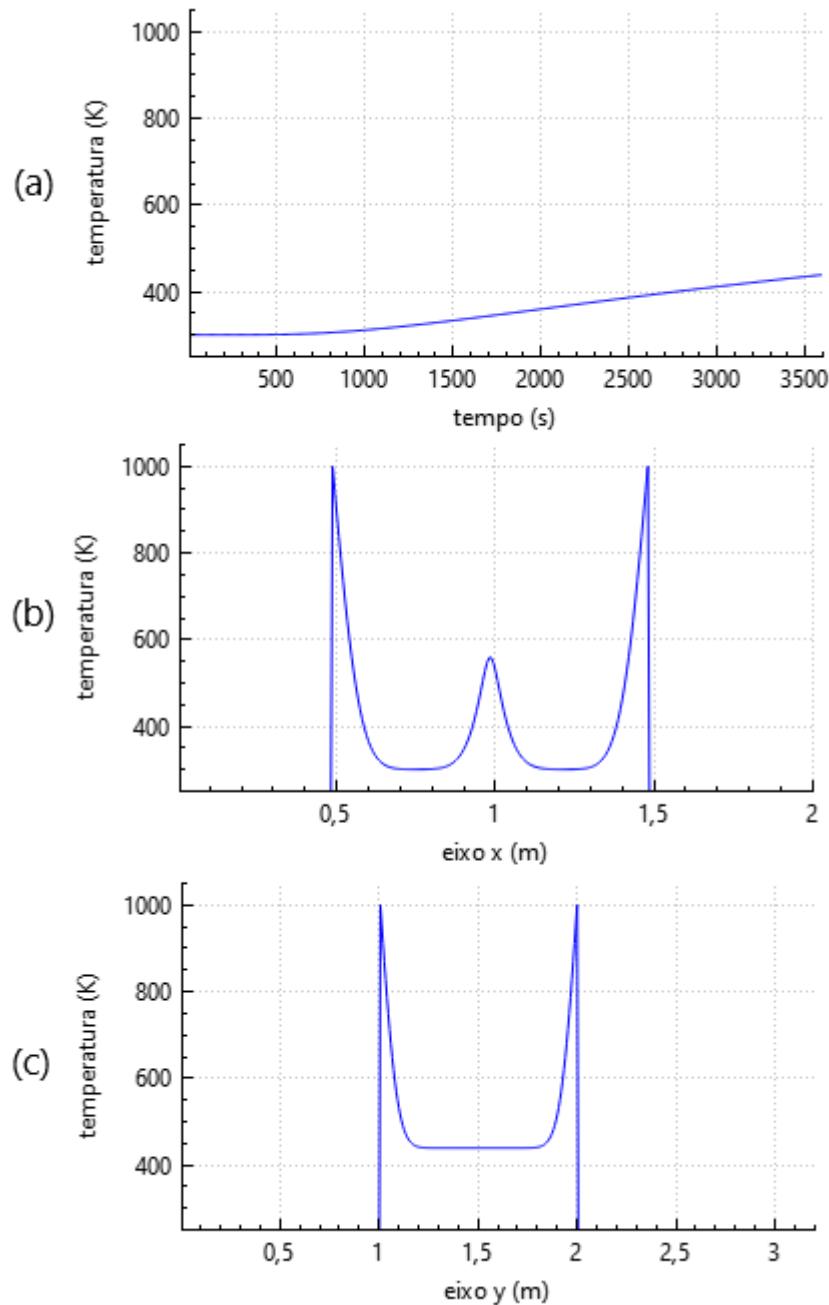


Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 8.4 mostra os gráficos da simulação. Em (a), é mostrada a temperatura ao longo do tempo, no ponto onde as duas retas de estudo se cruzam. Em (b), é mostrado a temperatura ao longo da reta horizontal de estudo. É possível observar os picos de temperatura elevada nas extremidades (região onde a temperatura é contante em 1000K), e um pico na região central, onde a reta se aproxima do ponto central de injeção térmica.

Em (c) é mostrado a temperatura ao longo da reta vertical de estudo, e é observado os dois picos das extremidades e uma região linear de temperatura.

Figura 8.4: Gráficos da simulação para o tempo de 1 hora definidos pelo ponto de estudo: (a) é a temperatura ao longo do tempo, (b) é a temperatura ao longo da horizontal e (c) a temperatura ao longo da vertical



Fonte: Produzido pelo autor.

Para resolver esse problema, foi utilizado no simulador um $dx=0.00667$, posição do ponto de estudo em (87, 229).

O modelo para simulação pode ser obtido no arquivo “Modelo_guilherme.dat”.

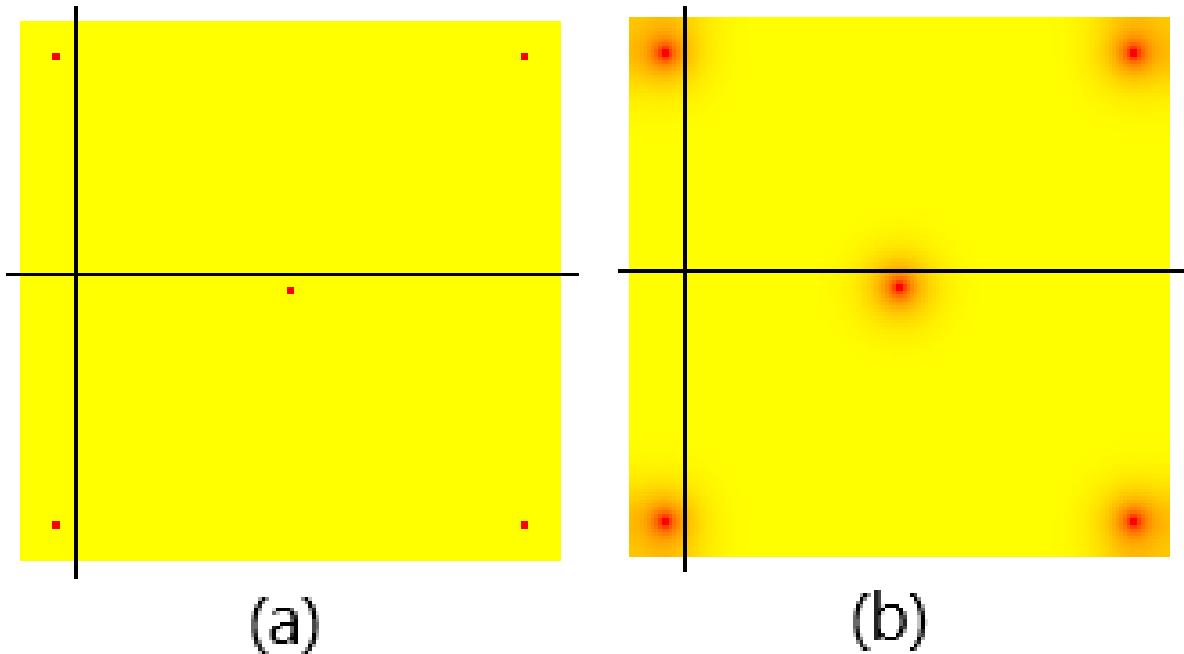
8.3 Injeção de calor em reservatório - modelo five-spot

Dando sequência para os modelos de injeção de calor em reservatórios, um modelo bastante utilizado é o *five-spot*, caracterizado pela presença de 5 poços em um reservatório, com 4 injetores, e 1 central produtor. Para a primeira simulação, os 5 poços serão injetores de calor.

As propriedades da rocha e do tamanho do reservatório são as mesmas da seção anterior (Tabela 8.3).

Na Figura 8.5 é apresentado o resultado do modelo *five-spot* com os 5 poços injetores.

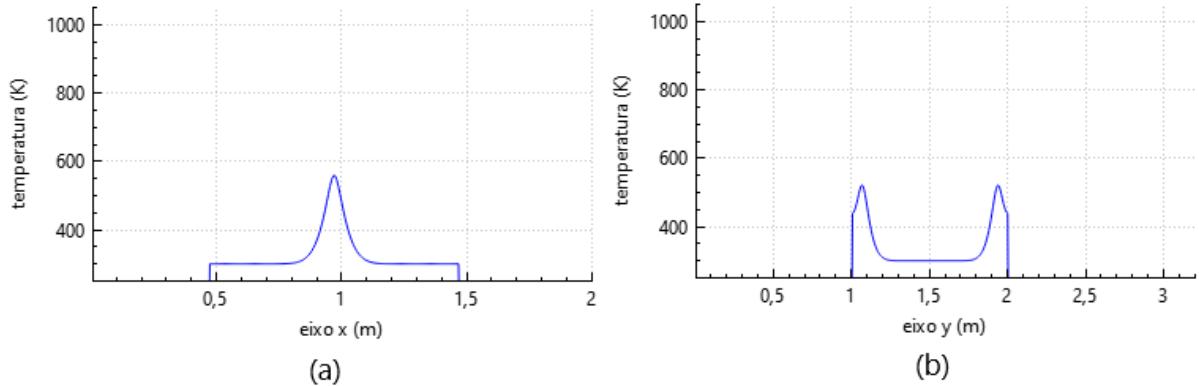
Figura 8.5: Resultados da simulação do primeiro modelo *five-spot* após 1 hora: (a) tempo inicial e (b) após 1 hora



Fonte: Produzido pelo autor.

Analizando os resultados gráficos na Figura 8.6, em (a) é possível perceber um pico de temperatura no meio do eixo x, devido a proximidade com o poço central, e em (b), os picos estão nas extremidades, por causa dos poços superior-esquerdo e inferior esquerdo.

Figura 8.6: Gráficos da simulação do primeiro modelo *five-spot*: (a) temperatura ao longo da horizontal de estudo, e (b) a temperatura ao longo da vertical



Fonte: Produzido pelo autor.

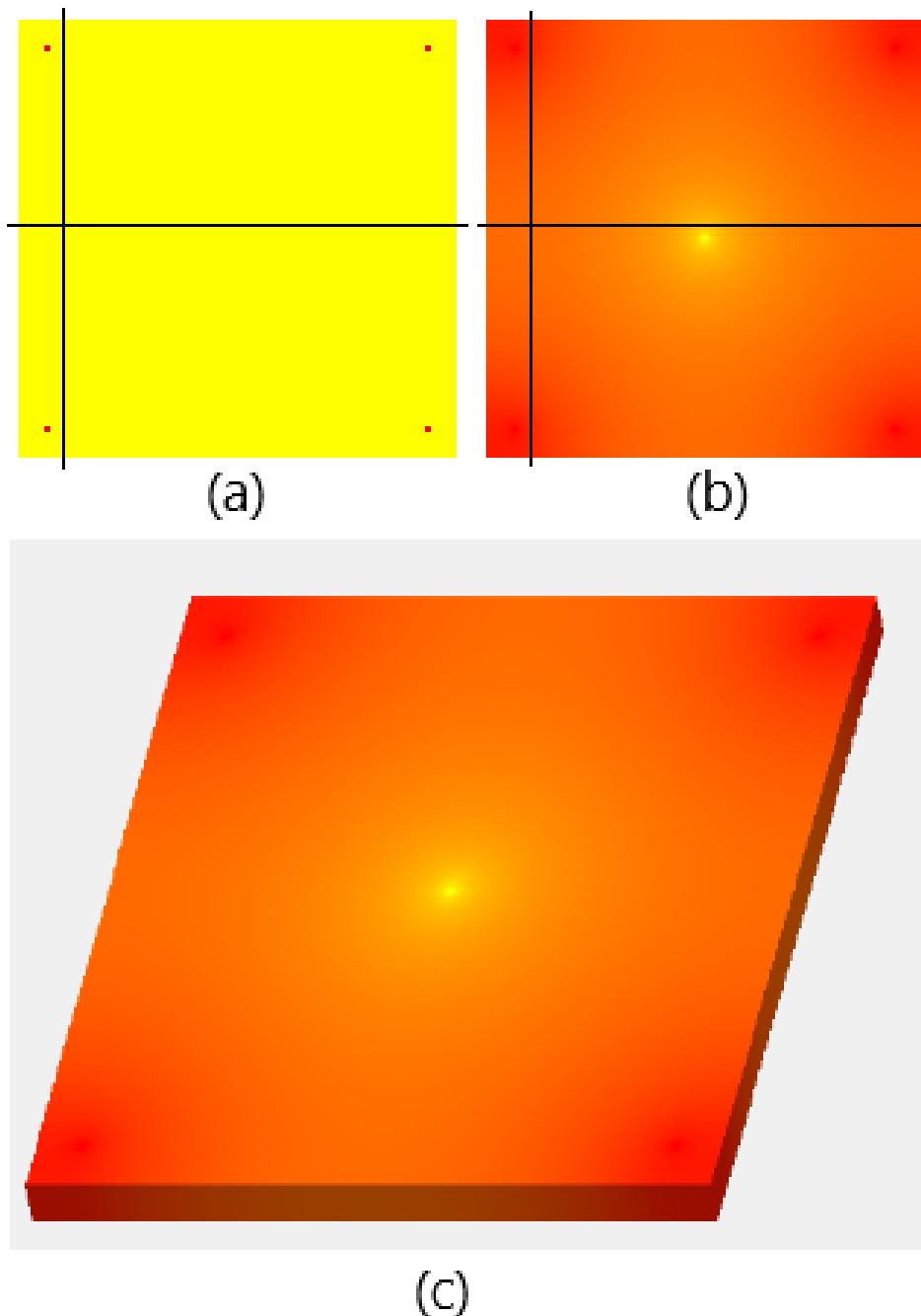
O modelo para simulação pode ser obtido no arquivo “Modelo_five_spot_1.dat”.

Agora será simulado um modelo *five-spot* com o poço central produtor. Para o simulador, será como um sumidouro de calor, onde a temperatura será constante em 300K (mesma temperatura do restante do reservatório).

Como é um sistema isolado, com fonte e sumidouro, após um longo período de tempo, é atingido regime permanente, onde a temperatura atingirá um equilíbrio, e não varia com o tempo. Na simulação, foi alcançado um regime próximo ao permanente, no tempo 460.800 segundos, ou 128 horas.

A Figura 8.7 mostra em (a) o cenário inicial, (b) o cenário final, próximo ao regime permanente e em (c) a renderização do reservatório em 3D.

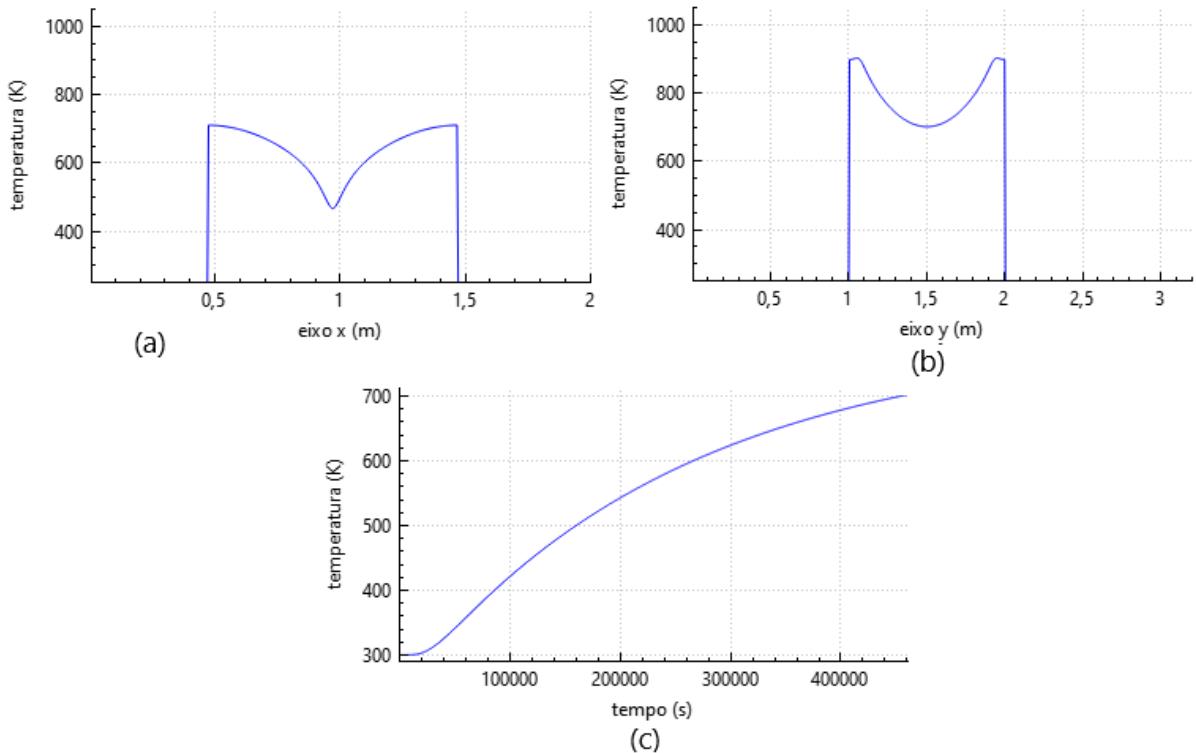
Figura 8.7: Resultados da simulação do segundo modelo *five-spot* após 128 horas: (a) tempo inicial, (b) após 128 horas e (c) renderização 3D



Fonte: Produzido pelo autor.

Abaixo, seguem os gráficos na Figura 8.8. Em (a), é possível perceber uma temperatura maior nas extremidades, diminuindo até as proximidades do poço. Em (b), é observado uma reta nas extremidades, e uma parábola na região central. Em (c), é apresentada a temperatura ao longo do tempo, no ponto central de estudo. Para atingir o regime permanente, a temperatura nesse gráfico deveria estabilizar, convergindo para uma reta constante.

Figura 8.8: Gráficos da simulação do segundo modelo *five-spot*: (a) temperatura ao longo da horizontal, (b) ao longo da vertical e (c) ao longo do tempo



Fonte: Produzido pelo autor.

O modelo para simulação pode ser obtido no arquivo “Modelo_five_spot_2.dat”.

8.4 Injeção de calor em reservatório - modelo 1

A seguir, é apresentado uma simulação para injeção térmica em um reservatório de petróleo, onde o poço está injetando calor.

As propriedades termofísicas utilizadas para a rocha são os mesmos apresentados na Tabela 8.2.

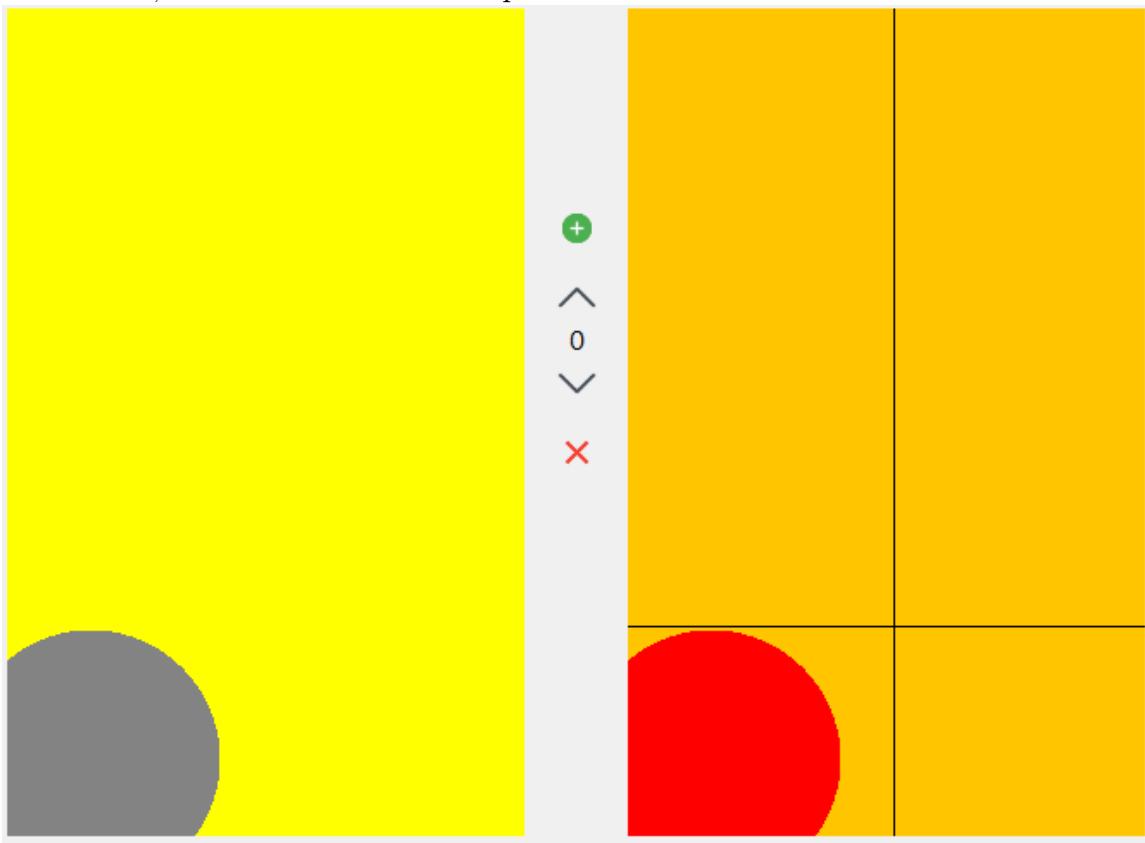
As propriedades do poço são:

Tabela 8.4: Tabela com as propriedades termofísicas do modelo 1 - Ferro

Propriedade	Valor
C_p	593
k	10,33
ρ	8.020

Esse caso pode ser interpretado como um poço com temperatura elevada que busca aquecer o reservatório, diminuindo assim a viscosidade do óleo e facilitando sua produção.

Figura 8.9: Modelo 1 de injeção térmica em reservatório: esquerda mostra a distribuição dos materiais, e a direita mostra a temperatura



Fonte: Produzido pelo autor.

Com o modelo da Figura 8.9, é esperado que a variação de temperatura não atinja regiões distantes do reservatório devida à baixa condutividade térmica do arenito. E é exatamente isso que pode ser observado na Figura 8.10 com tempo de 4.000 segundos.

Figura 8.10: Modelo 1 de injeção térmica em reservatório após 4.000 segundos

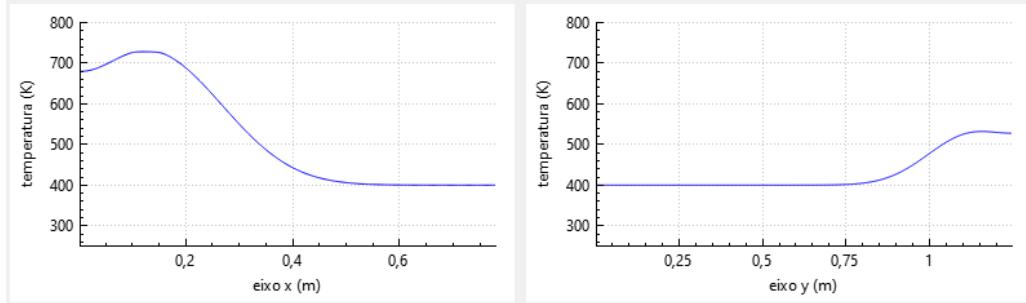


Fonte: Produzido pelo autor.

Os gráficos são mostrados na Figura 8.11. Na esquerda, é mostrado a temperatura ao longo da reta horizontal preta, escolhido como ponto de estudo do modelo.

É interessante analisar a alta variação de temperatura para um tempo longo. Isso é esperado para materiais com baixíssimas condutividades térmicas. Caso o reservatório tivesse uma condutividade térmica alta, seria esperado que a temperatura fosse bem distribuída ao longo do reservatório.

Figura 8.11: Graficos mostrando a variação de temperatura na região próxima ao poço. Esquerda é a temperatura ao longo da horizontal, e à direita é ao longo da vertical



Fonte: Produzido pelo autor.

O modelo para simulação pode ser obtido no arquivo “Modelo_reservatorio_sem_agua.dat”.

8.5 Injeção de calor em reservatório - modelo 2

A seguir, será simulado o modelo 2 para o caso de injeção de calor em reservatório. A diferença fundamental para o caso 1, são os *fingers* de água quente adentrando no reservatório. Caso mais próximo da realidade. Os *fingers* serão tratados como arenito com água, mostrado na Tabela 8.3

No modelo 2, o poço continua com a condutividade térmica infinita, mas a água e o reservatório podem variar suas temperaturas, conforme mostrado na Figura 8.12.

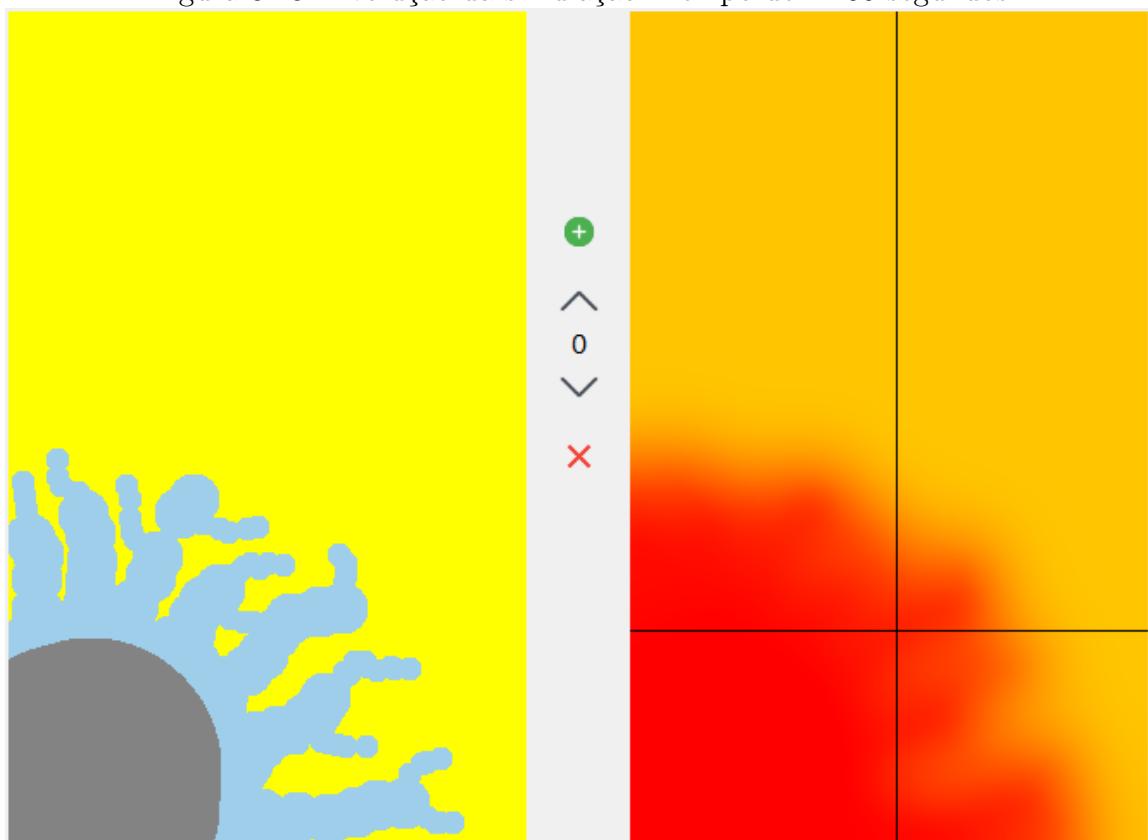
Figura 8.12: Tempo inicial da simulação. Na esquerda, o cinza representa o poço, azul a água e o amarelo, arenito. Na direita, é mostrado as temperaturas



Fonte: Produzido pelo autor.

Com a evolução do tempo, a região mais próxima dos *fingers* de água, é a mais alterada. A Figura 8.13 mostra esse cenário.

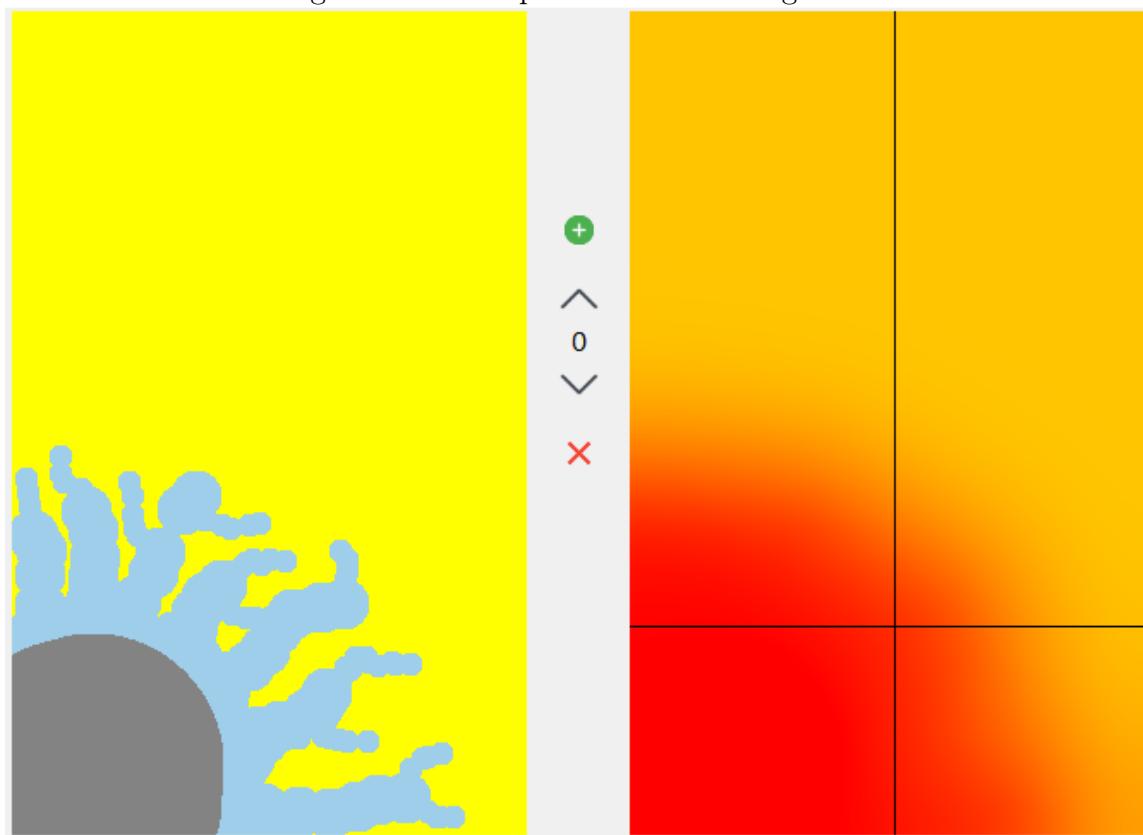
Figura 8.13: Evolução da simulação. Tempo de 1.200 segundos



Fonte: Produzido pelo autor.

Analisando mais no tempo, chegando a 4.100 segundos, é possível perceber que a região dos *fingers* de água está com temperatura bem distribuída (Figura 8.14), se assemelhando ao modelo 1, mas com poço muito mais largo.

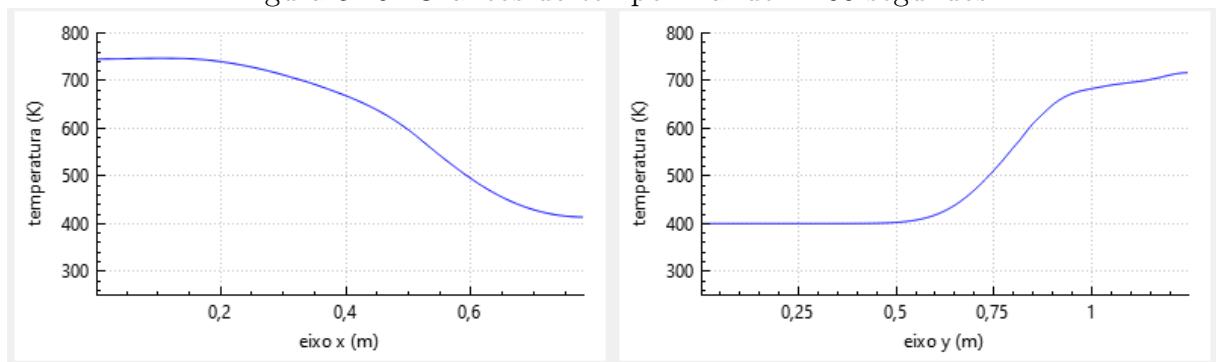
Figura 8.14: Tempo final de 4.100 segundos



Fonte: Produzido pelo autor.

A variação de temperatura ao longo das retas de estudo foram mais suaves em relação ao modelo 1 (Figura 8.15).

Figura 8.15: Gráficos do tempo final de 4.100 segundos



Fonte: Produzido pelo autor.

A comparação dos dois modelos, mostra quão efetivo é a injeção de água quente no reservatório em relação a um simples poço com temperatura elevada. A variação de temperatura atinge regiões mais distantes do reservatório, aquecendo um volume muito maior de óleo, que futuramente será produzido.

O modelo para simulação pode ser obtido no arquivo “Modelo_reservatorio_com_agua.dat”.

8.6 Resfriamento de processadores

Processadores são componentes elétricos de mais alta importância e complexidade do mundo moderno. São responsáveis por realizar numerosas operações matemáticas em curtíssimos espaços de tempo. Mas esse alto poder de processamento causa uma elevada geração de calor, a qual pode atrapalhar ou queimar o componente.

Então, para evitar danos no componente, foram criados diversos mecanismos de resfriamentos, como *air coolers* e *water coolers*. Mas esse problema fica complexo quando é analisado equipamentos com espaços reduzidos, como *smartphones* e *notebooks*.

Na figura 8.16, é mostrado o interior de um *notebook*. É possível perceber uma longa barra de cobre (*heatpipe*), cruzando pela GPU e CPU, os componentes com maior processamento e geração de calor.

Figura 8.16: Interior de um *notebook*, apresentando o *heatpipe*, que é a barra de cobre que cruza a GPU e CPU, e resfria na ventoinha



Fonte: Produzido pelo autor.

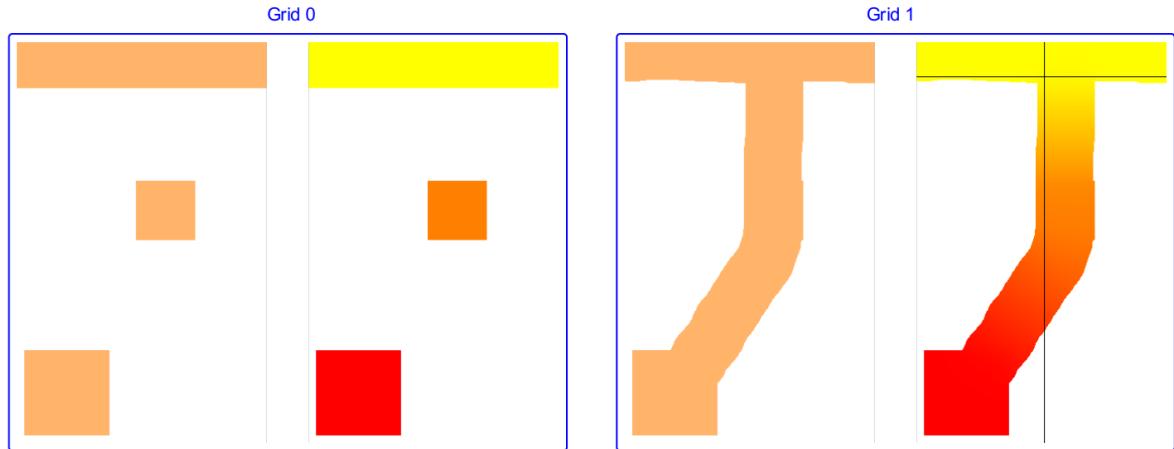
Utilizando o simulador, é possível simular o caso acima, utilizando cobre com propriedades constantes como material.

Tabela 8.5: Tabela com as propriedades termofísicas do modelo do *notebook* - Cobre

Propriedade	Valor
C_p	353
k	42
ρ	7.262

Na figura 8.17, é apresentado o modelo do resfriador. onde o grid 0, são referentes às fontes de calor (GPU, CPU), e acima é o sumidouro de calor (ventoinha). Já no grid 1, é mostrado o *heatpipe* interligando os componentes, e chegando à ventoinha.

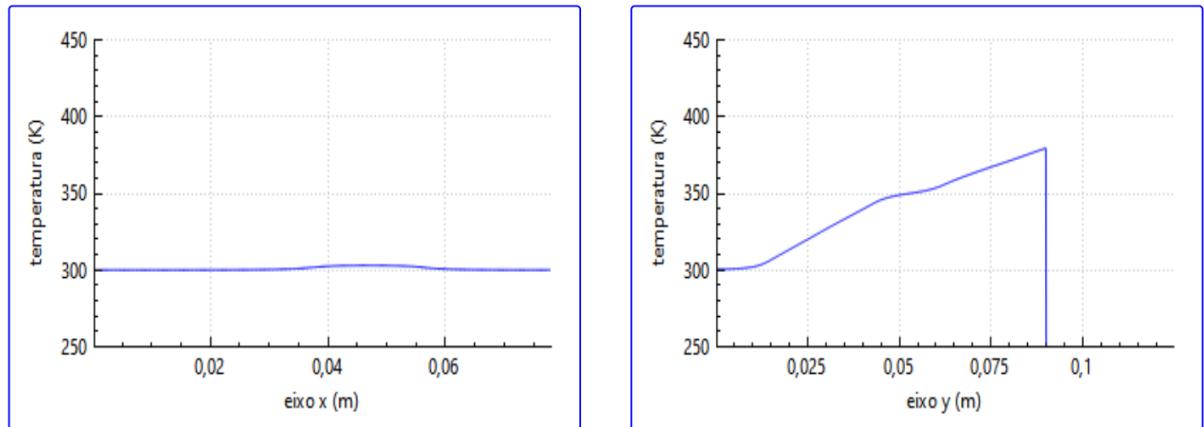
Figura 8.17: Simulação do sistema de resfriamento do notebook após chegar ao período permanente



Fonte: Produzido pelo autor.

Na figura 8.18, são apresentados os gráficos da temperatura ao longo da horizontal (esquerda) e vertical (direita).

Figura 8.18: Interior de um *notebook*, apresentando o *heatpipe*, que é a barra de cobre que cruza a GPU e CPU, e resfria na ventoinha



Fonte: Produzido pelo autor.

A temperatura é rapidamente dispersada quando chega à ventoinha. O gráfico da direita da Figura 8.18, mostra o eixo y com duas quedas de temperatura, indicando que o componente do meio (CPU), deveria estar mais próximo do outro componente (GPU) para que a queda de temperatura seja linear, evitando um super-aquecimento de uma das partes.

Esse problema da localização é específico do modelo simulado, o qual foi desenhado sem ser totalmente fiel ao modelo da Figura 8.16. Tornando um caso mais interessante de se analisar devido ao erro milimétrico das posições do desenho.

O modelo para simulação pode ser obtido no arquivo “Modelo_notebook.dat”.

Capítulo 9

Documentação

Neste capítulo é apresentado a documentação do software, mostrando como rodar o software, como utilizar e a documentação gerada pelo Doxygen. Por fim, são listadas as dependências externas.

9.1 Documentação do usuário

O Manual do Usuário é apresentado no Apêndice 10 - Manual do Usuário.

9.2 Documentação do desenvolvedor

Nesta seção são apresentadas informações para os desenvolvedores, como a documentação em html, e a listagem de algumas dependências específicas.

- Os códigos foram documentados utilizando o formato javadoc:
 - <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/technotes/tools/windows/javadoc.html>
 - <https://www.doxygen.nl/manual/docblocks.html>
- A documentação foi gerada utilizando o software doxygen:
 - <https://www.doxygen.nl/>

Na Figura 9.1 mostra uma imagem da documentação gerada.

Figura 9.1: Logo e documentação do *software*


Documentação Simulador de Difusão Térmica 1.0

Página Principal Namespaces Classes Arquivos Busca

Lista de Arquivos

Esta é a lista de todos os arquivos e suas respectivas descrições:

		[nível de detalhes 1 2]
▼	listagens	
	Ccell.cpp	
	Ccell.h	
	CGrid.cpp	
	CGrid.h	
	CMaterial.cpp	
	CMaterial.h	
	CMaterialCorrelacao.cpp	
	CMaterialCorrelacao.h	
	CMaterialInterpolacao.cpp	
	CMaterialInterpolacao.h	
	CRender3D.cpp	
	CRender3D.h	
	CReta.cpp	
	CReta.h	
	CSegmentoReta.cpp	
	CSegmentoReta.h	
	CSimuladorTemperatura.cpp	
	CSimuladorTemperatura.h	
	main.cpp	
	mainwindow.cpp	

Fonte: Produzido pelo autor.

Ao clicar sobre qualquer item da listagem acima, será possível analisar o código daquele arquivo, como mostrado na Figura 9.2

Figura 9.2: Código fonte da classe CSimuladorTemperatura, no Doxygen



Documentação Simulador de Difusão Térmica 1.0

Página Principal Namespaces Classes Arquivos Busca

listagens CSimuladorTemperatura.h

Vá para a documentação desse arquivo.

```

1 #ifndef CSIMULADORTEMPERATURA_H
2 #define CSIMULADORTEMPERATURA_H
3
4 #include <QPoint>
5 #include <QPoint3D>
6 #include <omp.h>
7 #include <QPoint>
8 #include <cmath>
9 #include <iomanip>
10 #include <QOIterator>
11
12 #include "CGrid.h"
13 #include "CMaterial.h"
14 #include "CMaterialCorrelacao.h"
15 #include "CMaterialInterpolacao.h"
16
17 class CSimuladorTemperatura {
18 private:
19     //int parallel = 0;
20     QPoint3D point;
21     int Max_THREADS = omp_get_max_threads() - 4;
22     int width, height;
23     bool materialPropertiesStatus = true;
24     int M_THREADS = 1;
25     const double MIN_ERROR = 0.05;
26     const int MAX_ITERATION = 500, MIN_ITERATION = 50;
27     double delta_x = 2.0e-4, delta_t = 5.0e-1, delta_z = 0.05;
28     double Tmax = 400, Tmin = 300;
29
30     double actualTemperature = 300;
31     double actual_time = 0.0;
32     std::map<std::string, CMaterial> materials;
33     std::vector<std::string> nome_materials;
34
35 public:
36     std::vector<CGrid*> grid;
37 public:
38     CSimuladorTemperatura() { createListOfMaterials(); }
39
40 }
```

Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 10

Manual do Usuário

10.1 Instalação

O software foi disponibilizado no site <https://github.com/ldsc>.

Lá você encontra instruções atualizadas para baixar e instalar.

Para um tutorial de como instalar e utilizar o programa, é possível assistir o vídeo https://www.youtube.com/watch?v=65e5s1MiY_c.

10.1.1 Dependências

Para compilar o software é necessário atender as seguintes dependências:

- Instalar o compilador g++ da GNU disponível em <http://gcc.gnu.org>.
 - Para instalar no GNU/Linux use o comando `dnf install gcc`.

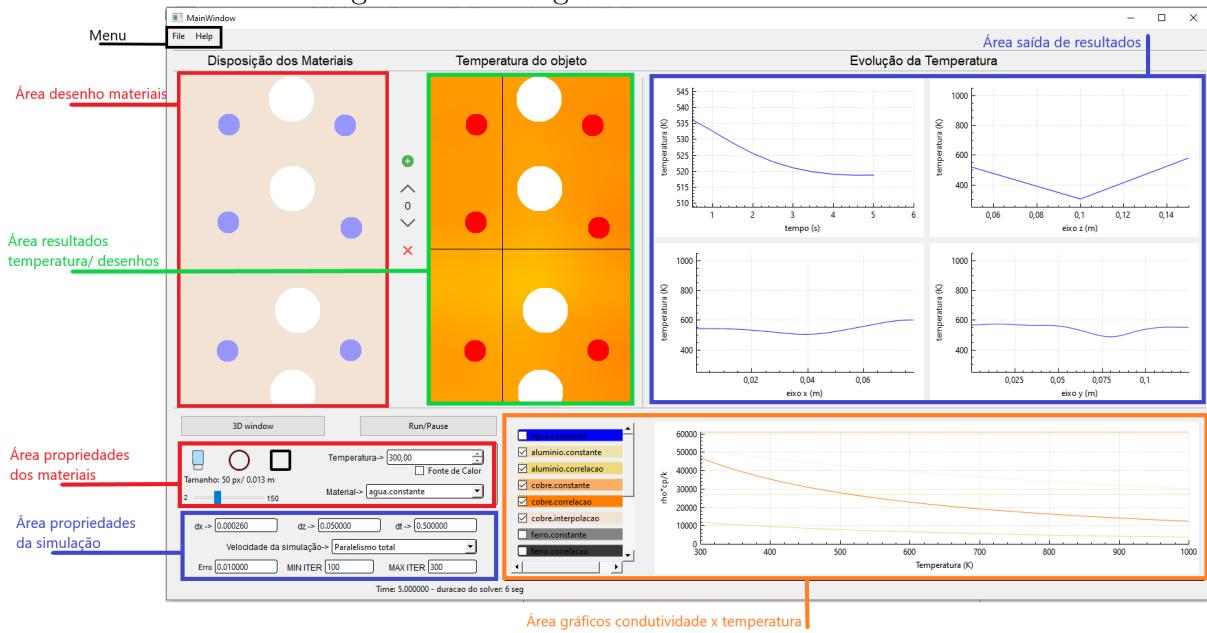
Ou, é possível utilizar o software Qt Creator:

- Biblioteca Qt disponível em <https://www.qt.io/download> - o *software* foi desenvolvido com o Qt na versão 6.1.3.

10.2 Interface gráfica

A interface do programa é apresentada na Figura 10.1.

Figura 10.1: Imagem da Interface Gráfica



Fonte: Produzido pelo autor.

O Figura 10.1 mostra a janela principal do software e foram listadas 14 grupos de funcionalidades importantes ao usuário.

- Região onde o usuário desenha o objeto desejado. Para desenhar, deve ser clicado com o botão esquerdo do mouse.
- Retas e ponto de estudo, a partir dele, serão gerados os quatro gráficos da direita (5-8). Para escolher a posição, o usuário deve clicar com o botão direito do mouse.
- Região onde o usuário consegue diferenciar os materiais utilizados na simulação.
- Botões para o usuário navegar entre as camadas. Clicando no 'mais', ele pode criar uma camada. No 'X', pode excluir a camada atual, e as setas são para navegação.
- Gráfico da temperatura ao longo do tempo. Mostra a temperatura no ponto de estudo escolhido em 3, e é atualizado em toda evolução temporal da simulação.
- Gráfico da temperatura ao longo das camadas. Como só foi criado uma única camada, o gráfico ficará vazio.
- Gráfico da temperatura ao longo da horizontal. Mostra a temperatura ao longo da reta horizontal de estudo.
- Gráfico da temperatura ao longo da vertical. Mostra a temperatura ao longo da reta vertical de estudo.
- Gráfico com as propriedades termofísicas ao longo da temperatura. O usuário pode selecionar o material que quer analisar na região esquerda da área destacada.

- Propriedades do desenho. Aqui o usuário pode escolher se quer apagar o desenho ou não, o formato do pincel, tamanho do pincel, temperatura e material da área desenhada e se é fonte/sumidouro de calor ou não.
- Propriedades da simulação. Aqui o usuário pode configurar o tamanho da malha (dx), a distância entre as camadas (dz), o intervalo de tempo (dt), e os diversos tipos de velocidade da simulação: sem paralelismo, paralelismo por grid, paralelismo total (este último é o mais rápido, e é a escolha padrão)
- Botão para iniciar a janela com a renderização 3D. Para navegar nessa janela, são listados os seguintes botões:
 1. Espaço: muda a cor entre temperatura ou materiais.
 2. Pg Up: zoom in.
 3. Pg Down: zoom out.
 4. w/a/s/d: configura o ângulo do objeto.
 5. setas: move o objeto na janela.
 6. mouse: mesmas funcionalidades de (d).
- Botão para iniciar ou parar a simulação.
- Área com informações da posição/temperatura/material do desenho à esquerda, e informações da simulação (tempo atual e quanto tempo levou para resolver as iterações para chegar no novo tempo)

10.3 Como adicionar materiais

Apresenta-se neste apêndice instruções para adição de novos materiais.

Para adicionar qualquer material ao simulador, é necessário clicar em *Arquivo->Import material* e escolher o arquivo desejado.

É importante lembrar que os arquivos devem ter o formato que será ensinado a seguir.

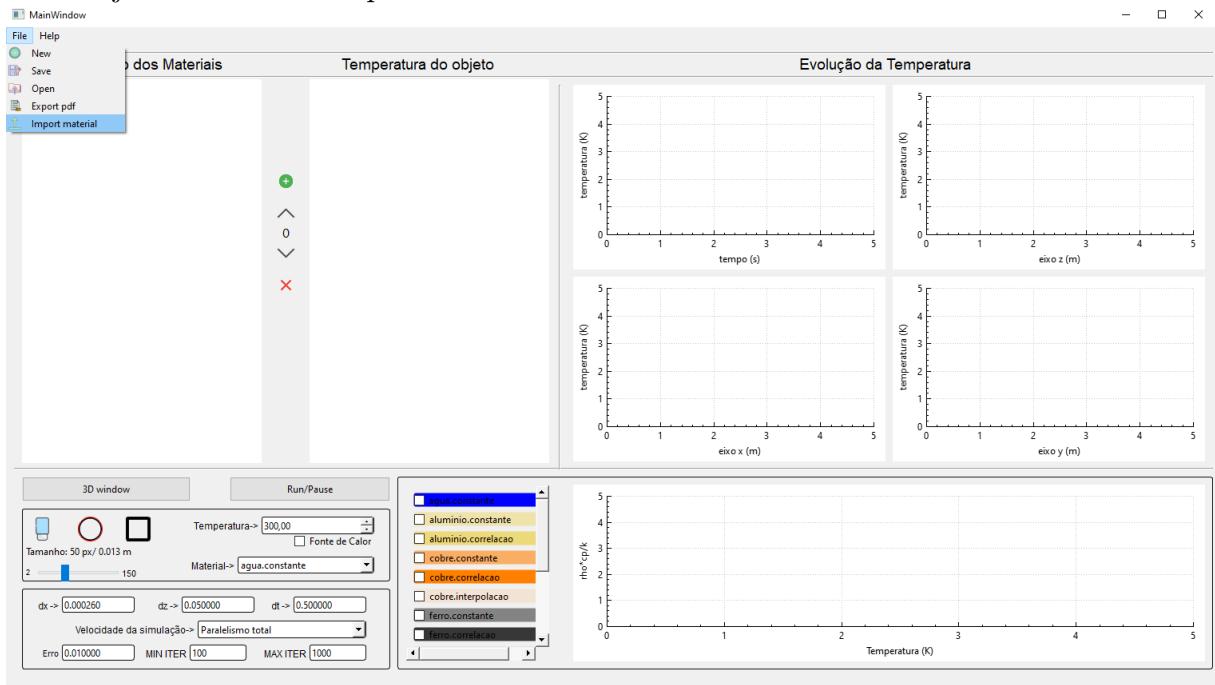
A extensão do arquivo deve ser:

- '.constante',
- '.correlacao'
- '.interpolacao'

conforme o modelo escolhido.

A Figura 10.2 ilustra o local do menu que deve ser selecionado para adicionar o material.

Figura 10.2: Adicionar um material no simulador: seleciona Arquivo, Import material, euUma janela será aberta para o usuário escolher o material



Fonte: Produzido pelo autor.

10.3.1 Método da correlação ou constante

Para adicionar um material que utilize métodos de correlação ou possuí propriedades termofísicas constantes, deverá ser criado um arquivo com extensão '.correlacao' ou '.constante', respectivamente.

O molde do arquivo é apresentado abaixo:

```
RGB: 236 217 122 255
Cp: 2753
rho: 747.3
/// k=C0+C1*T-C2*T^2
k: 76.64 0.2633 0.0002
```

Onde a primeira linha contém o RGBA do material, a segunda linha contém o valor de Cp, seguindo por rho. Na quarta linha tem um comentário mostrando a equação da correlação utilizada, e na última linha, devem ser inseridos os valores de C0, C1 e C2, respectivamente.

10.3.2 Método de interpolação

Em muitos casos práticos as propriedades físicas de um material são obtidas em experimentos laboratoriais. É comum medir a condutividade do material para diferentes valores de temperatura, nestes casos, podemos usar métodos de interpolação para obter o valor de $k(T)$.

Para adicionar um material que utilize métodos de interpolação, deverá ser criado um arquivo com extensão '.interpolacao'.

O molde do arquivo é apresentado abaixo:

```
RGBA: 255 128 0 30
```

```
Cp: 353.0
```

```
rho: 7262.0
```

```
-T---k:
```

```
100 0.2
```

```
200 0.4
```

```
300 0.5
```

```
400 0.55
```

```
500 0.6
```

```
600 0.65
```

```
700 0.7
```

```
800 0.75
```

```
900 0.8
```

Onde a primeira linha contém o *RGBA* do material, nas linhas abaixo o *Cp* e o *rho*. Abaixo da linha com *T* e *k*, são inseridos os valores da temperatura, e a respectiva condutividade térmica (*k*). O usuário pode adicionar quantas linhas desejar.

10.4 Como gerar relatório em PDF

Os resultados da simulação podem ser exportados em pdf, onde a primeira página apresenta informações da simulação, juntamente com os gráficos. Para isso, é necessário clicar em “File” e “Export pdf”.

Nas páginas a seguir, são apresentados os grids, com um máximo de 6 grids por página.

O objeto 3D do relatório pode ser interpretado como chapas furadas de cobre, ferro e alumínio, com fontes de calor de níquel em vários pontos de cada chapa.

==> PROPRIEDADES DO GRID <==

Delta x: 0.00026 m

Delta z: 0.05 m

Delta t: 0.5 s

Largura total horizontal: 0.078 m

Largura total vertical: 0.1248 m

Largura total entre perfis (eixo z): 0.15 m

==> PROPRIEDADES DA SIMULAÇÃO <==

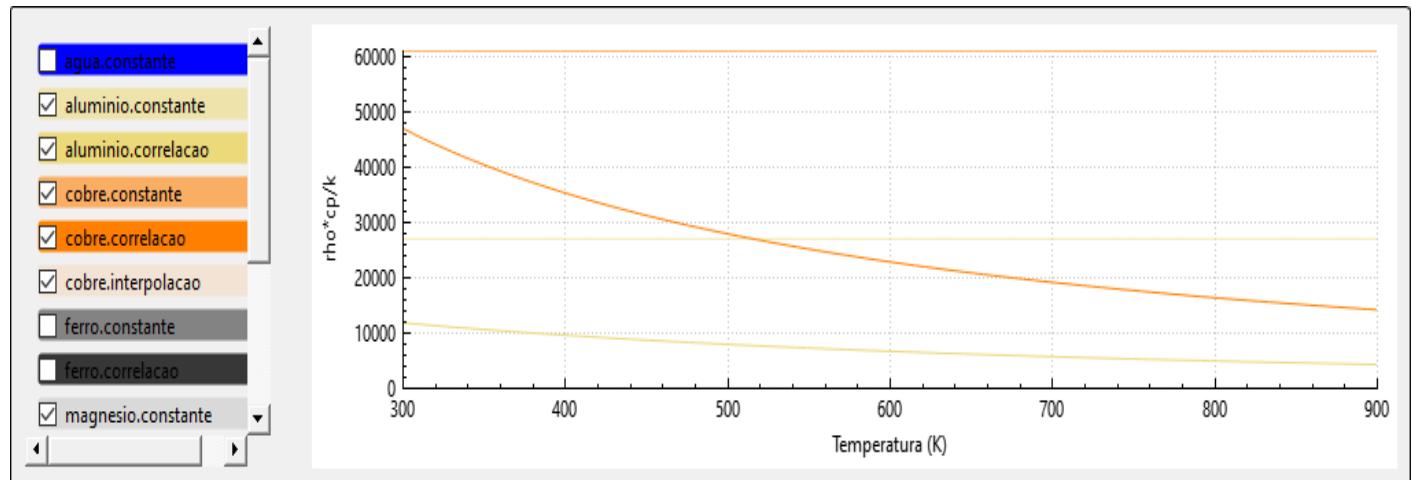
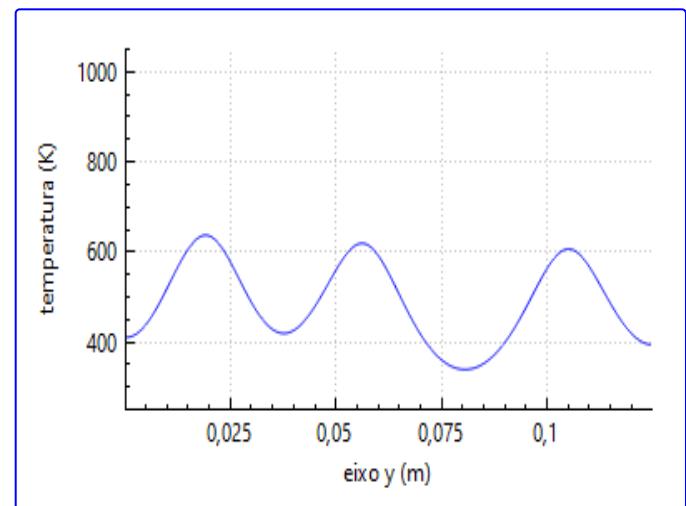
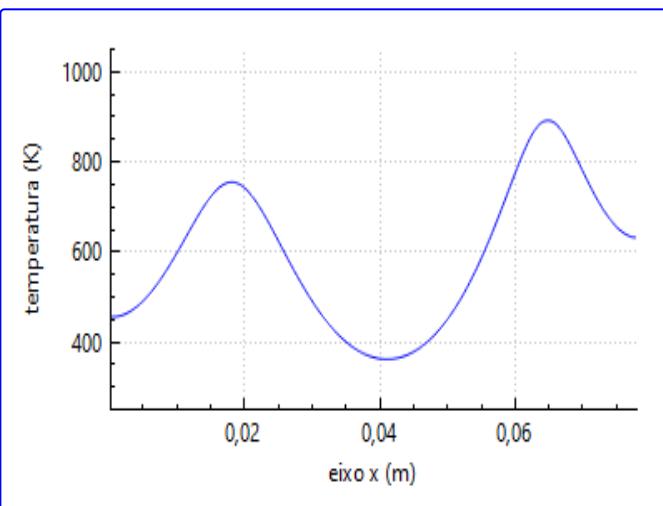
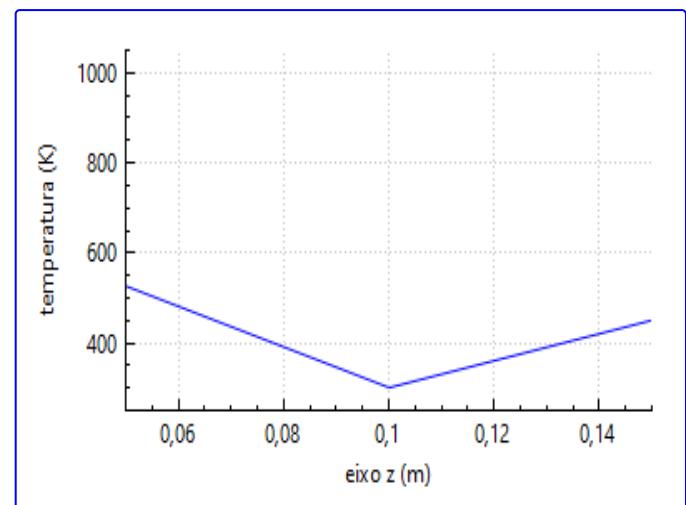
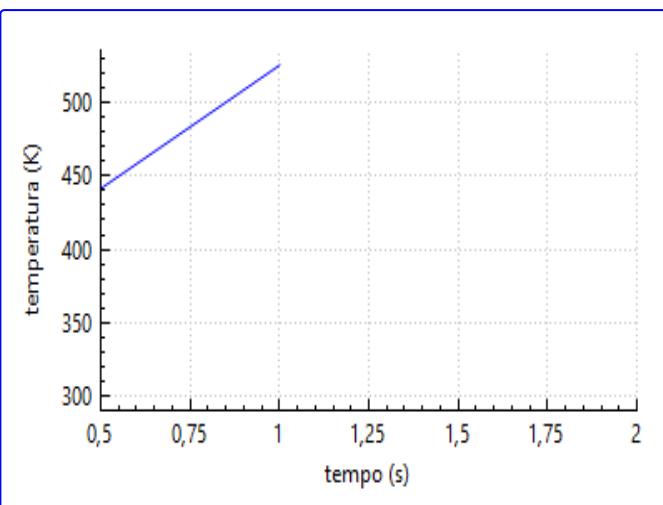
Temperatura máxima: 1000 K

Temperatura mínima: 300 K

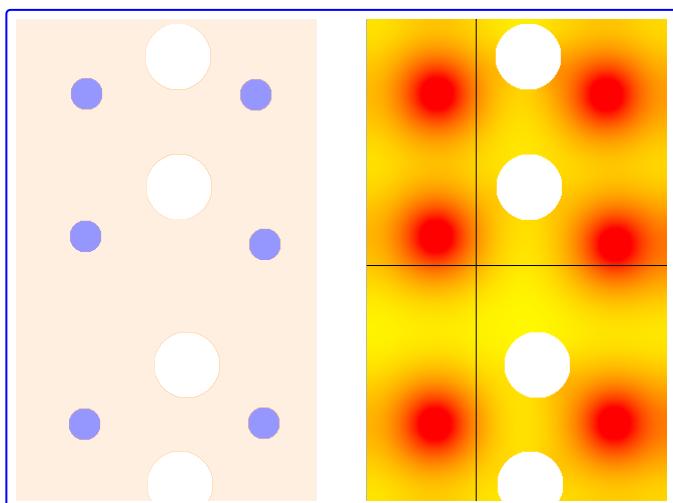
Tempo máximo: 1 s

Tipo de paralelismo: Paralelismo total

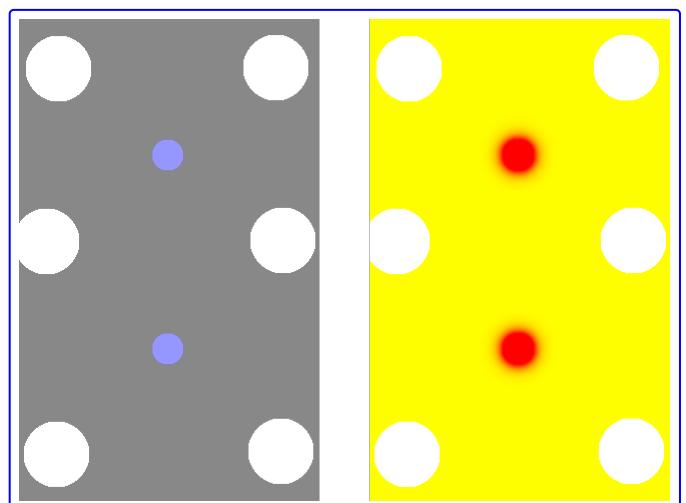
Coordenada do ponto de estudo (x,y,z): 0.02834,0.0637,0



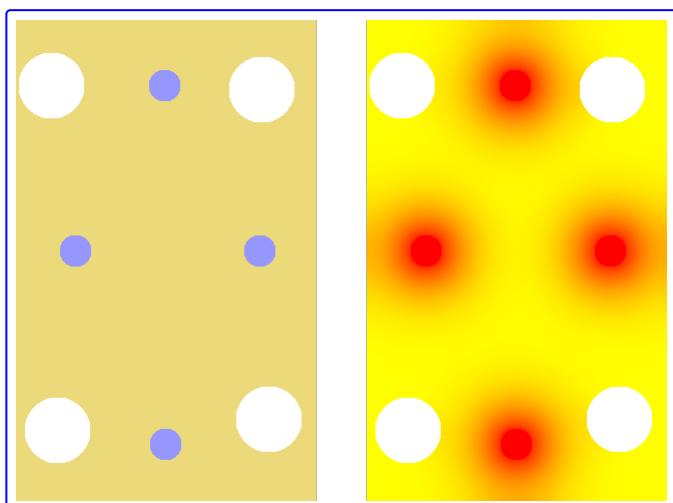
Grid 0



Grid 1



Grid 2



Referências Bibliográficas

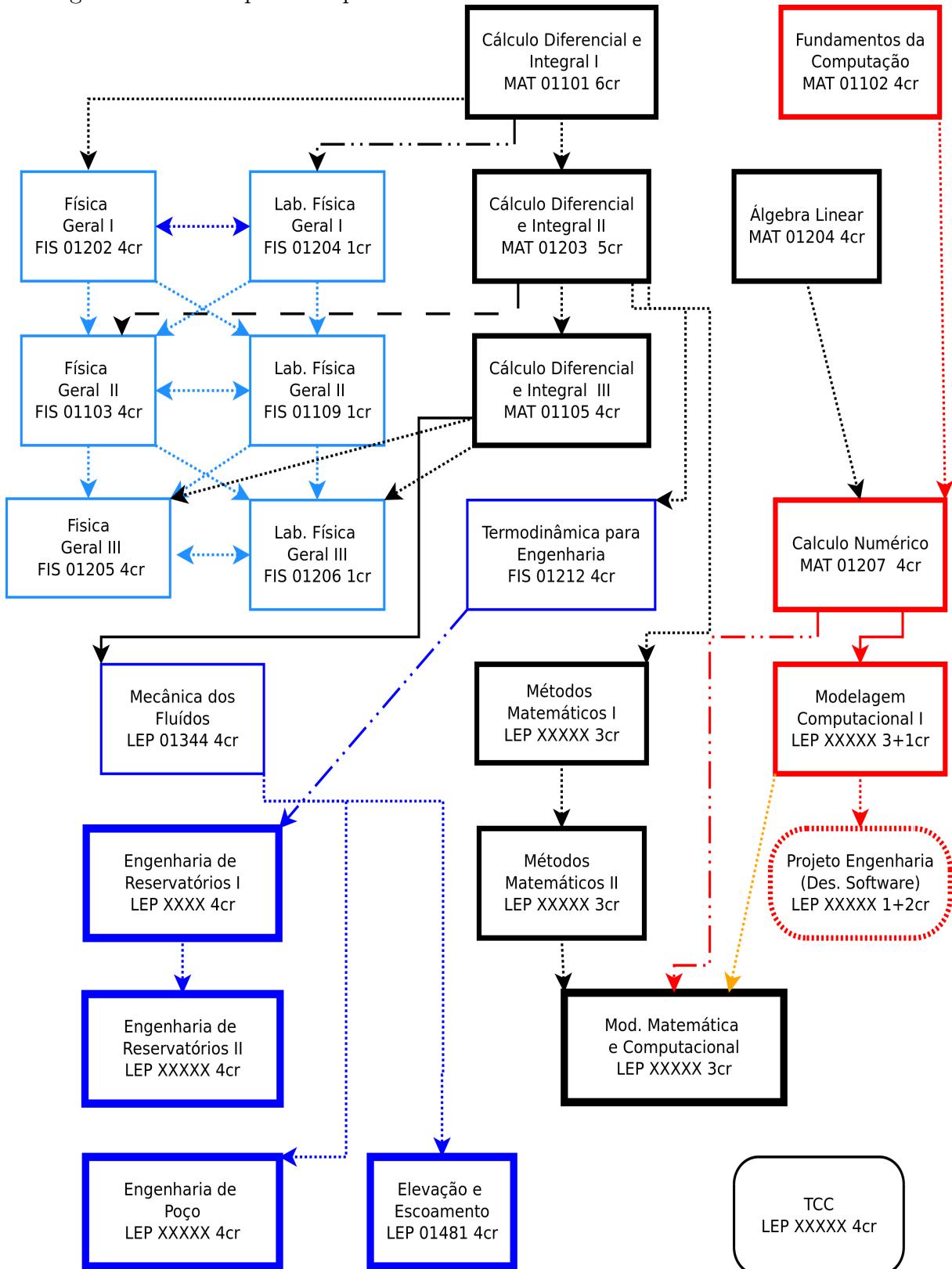
- BUENO, André Duarte. 2003. *Programação orientada a objeto com c++*. Novatec. 37
- DONG, Yi, MCCARTNEY, John S., & LU, Ning. 2015. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils. 156
- FOURIER, Jean Baptiste Joseph. 1822. *Theorie analytique de la chaleur*. 23, 39
- HALLIDAY, David, & RESNICK, Jearld Walker. 2009. *Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. 41
- HERTER, Thomas, & LOTT, Klaus. Algorithms for decomposing 3-d orthogonal matrices into primitive rotations. **17**(5), 517–527. 51
- HOFFMAN, Joe D. 2001. *Numerical methods for engineers and scientists*. 39
- INCROPERA, Frank. 2008. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. LTC. 39, 41, 47, 151
- LIMA, Guilherme Rodrigues. 2020. *Simulador bidimensional de transferência de calor em meios porosos utilizando métodos numéricos de diferenças finitas*. 155, 156
- NUSSENZVEIG, H. M. 2014. *Curso de física básica 2: fluidos, oscilações e ondas, calor*. Blucher. 37, 41
- ROSA, Adalberto José, CARVALHO, Renato de Souza, & XAVIER, José Augusto Daniel. 2006. *Engenharia de reservatórios de petróleo*. Interciênciac. 24, 41
- RUGGIERO, Márcia A. Gomes, & LOPES, Vera Lúcia da Rocha. 1996. *Cálculo numéricico: aspectos teóricos e computacionais*. 41
- THOMAS, José Eduardo. 2004. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. 24
- VALENCIA, Juan J., & QUESTED, Peter N. 2008. *Thermophysical properties*. 47

Apêndice A

Disciplinas Relacionadas a Transferência de Calor

A Figura A.1 ilustra o relacionamento das disciplinas do Curso de Engenharia de Petróleo da UENF que tem uma ligação mais direta com a transferência de calor.

Figura A.1: Principais disciplinas do curso relacionadas a Transferência de Calor



Fonte: Grade parcial do curso de graduação de Engenharia de Petróleo no LENEP.

A título ilustrativo um resumo das ementas de algumas destas disciplinas é apresentado a seguir:

- Matemática:

- MAT01101 : Cálculo Diferencial e Integral I : 1- Funções. 2- Derivada. 3- Integral.
- MAT01203 : Cálculo Diferencial e Integral II : 1- Algumas superfícies especiais. 2- Funções vetoriais de uma variável real. 3- Funções reais de várias variáveis reais. 4- Derivadas parciais e diferenciabilidade. 5- Máximos e mínimos.
- MAT01109 : Cálculo Diferencial e Integral III : 1- Integrais dupla e tripla. 2- Tópicos em análise vetorial. 3- Integral de linha. 4- Integral de superfície. 5- Teoremas fundamentais.
- MAT01204 : Álgebra Linear: 1- Vetores em R^n . 2- Sistema linear de equações. 3- Espaços vetoriais. 4- Transformações lineares. 5- Autovalores e autovetores.
- Física:
 - FIS01202 : Física Geral I: 1- Sistemas de medidas; 2- Movimento em uma dimensão; 3- Movimento em duas e três dimensões; 4- Leis de Newton; 5- Aplicações das Leis de Newton; 6- Trabalho e energia; 7- Conservação de energia; 8- Sistemas de partículas e conservação da quantidade de movimento linear; 9- Rotação; 10- Conservação da quantidade de movimento angular; 11- Equilíbrio estático e elasticidade; 12- Gravitação; 13- Fluídos.
 - FIS01103 : Física Geral II: 1- Lei Zero da Termodinâmica; 2- Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica; 3- Teoria Cinética dos Gases; 4- Propriedades Térmicas e Processos Térmicos; 5- Carga; 6- Lei de Coulomb; 7- Campo Elétrico; 8- Lei de Gauss; 9- Capacitores e Potencial Elétrico; 10- Campo Magnético; 11- Lei de Biot-Savart; 12- Lei de Ampère; 13- Indutores; 14- Leis de Maxwell.
 - FIS01205 : Física Geral III: 1- Oscilações; 2- Ondas mecânicas; 3- Ondas Electromagnéticas; 4- Propriedades da luz; 5- Interferência; 6- Difração; 7- Fótions, Ondas de Matéria; 8- Tópicos Especiais: Ótica Geométrica, Relatividade.
 - FIS01212 : Termodinâmica para Engenharia: 1- Conceitos. 2- Definições e Princípios Básico da Termodinâmica. 3- Propriedades de Substâncias Puras. 4- Leis da Termodinâmica. 5- Ciclos Motores e de Refrigeração. 6- Relações Termodinâmicas. 7- Sistemas Termodinâmicos. 8- Misturas e Soluções de Gases Perfeitos. 9- Equilíbrio Químico.
 - LEP01344 : Mecânica dos Fluidos: 1- Estática dos fluidos. 2- Determinação experimental de propriedades dos fluidos. 3- Aplicações da Cinemática dos Fluidos. 4- Aplicações da Dinâmica dos fluidos. 5- Escoamento em condutos. 6- Análise dimensional, semelhança e modelos.
 - LEP1852 : Transferência de Calor: 1- Introdução á Transferência de Calor. 2- Condução Unidimensional em Regime Permanente. 3- Fundamentos da

convecção e da Radiação. 4- Trocadores de Calor. [optativa].

- Modelagem numérica:

- MAT01207 : Cálculo Numérico: I. Sistemas Numéricos e Erros. II. Zeros de Funções Reais. III. Matrizes e Resolução Numérica de Sistemas de Equações Lineares. IV. Interpolação. V. Integração Numérica. VI. Resolução Numérica de Equações Diferenciais Ordinárias.
- LEP01366 : Técnicas de Modelamento Numérico I: 1- Equações em diferenças. 2- Métodos de diferenças finitas para equações diferenciais ordinárias. 3- Métodos de diferenças finitas para equações diferenciais parciais.
- LEP01366 : Técnicas de Modelamento Numérico II.

- Modelagem computacional:

- MAT01102 : Fundamentos da Ciência da Computação : 1. Introdução à Computação. 2. Introdução à Programação. Algoritmos. 3. Programação. 4. Uso de Programas Aplicativos.
- LEP01447 : Programação Orientada a Objeto em C++ : 1- Filosofia, modelagem e conceitos. Diagramas usando a modelagem UML. 2- Etapas de desenvolvimento de um programa. 3- Sintaxe e conceitos de C++, tipos, classes, objetos, atributos, métodos. 4- Herança, polimorfismo, sobrecarga de função e de operadores. 5- Entrada/saída e as classes string e complex. 6- Introdução a STL, containers, iteradores, funções genéricas.
- LEP01579 : Programação Paralela e Concorrente I: 1- Introdução ao processamento paralelo e concorrente; 2 - Processamento paralelo com múltiplos processos; 3- Processamento paralelo usando Boost.Interprocess; 4- Introdução ao processamento paralelo com múltiplas threads de C; 5- Processamento paralelo com múltiplas threads de C++11/14/17/20; 7- Introdução ao processamento paralelo em um cluster de computadores; [optativa].

- Aplicação:

- LEP01446 : Programação Prática: Desenvolvimento de um programa de engenharia utilizando a sequência padrão: Especificação do sistema, elaboração, desenvolvimento da análise orientada a objeto (diagramas usando UML), desenvolvimento do projeto do sistema, desenvolvimento do projeto orientado a objeto, implementação do programa usando C++, testes do funcionamento do programa; manutenção e documentação do programa desenvolvido.

Índice Remissivo

A

- Análise de domínio, 37
- Análise orientada a objeto, 57
- Apêndice A, 185

C

- Casos de uso, 33
- Ciclo construção, 79
- Ciclos de Planejamento/Detalhamento, 71
- Como adicionar materiais, 177
- Como gerar relatório em PDF, 179
- Concepção, 29
- Condição de fronteira, 43
- Condutividade térmica variável, 47

D

- Demonstrações matemáticas, 45
- Dependências, 175
- Diagrama de atividades, 64
- Diagrama de colaboração, 62
- Diagrama de componentes, 68
- Diagrama de comunicação, 62
- Diagrama de implantação-execução, 68
- Diagrama de máquina de estado, 63
- Diagrama de pacotes, 54
- Diagrama de sequência, 59
- Dicionário das classes, 57
- Documentação, 171
- Documentação do desenvolvedor, 171

E

- Elaboração, 37
- Escopo do problema, 23
- especificação, 30
- estado, 63

F

- Formulação modelos computacionais, 48
- Formulação modelos teóricos, 38
- Formulação teórica, 39

I

- Identificação de pacotes, 54
- Implementação, 79
- Injeção de calor em reservatório, 155
- Instalação, 175
- Interface gráfica, 175

M

- Manual do Usuário, 175
- Método da correlação ou constante, 178
- Método de interpolação, 178
- Metodologia utilizada, 26
- modelo five-spot, 159
- múltiplas-threads*, 49

O

- Objetivos, 25

P

- processamento paralelo, 48
- Projeto, 67
- Projeto do sistema, 67

R

- Renderização 3D, 51
- Requisitos funcionais, 31
- Requisitos não funcionais, 32
- Resfriamento de processadores, 168

T

- Termos e Unidades, 38

Teste, 151

V

Validação do simulador, 151

Versão 0.3 código fonte, 79

Versão 0.5 código fonte, 91

