

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
DE MINAS GERAIS

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

---

# **Paralelização de Métodos Numéricos para Resolver Equações Diferenciais Parciais**

---

*Orientando:*

Marcelo Lopes de Macedo  
FERREIRA CÂNDIDO

*Orientador:*

Prof. Dr. Luis Alberto  
D'AFONSECA

BELO HORIZONTE  
8 de setembro de 2019

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Aquisições Sísmicas</b>	<b>4</b>
2.1	O Que São Aquisições Sísmicas e Como Modelá-las . . . . .	4
2.2	A Equação da Onda . . . . .	5
2.3	O Método de Diferenças Finitas (MDF) . . . . .	5
<b>3</b>	<b>A Arquitetura Computacional Atual e a Necessidade de Paralelização</b>	<b>7</b>
3.1	O Processador . . . . .	7
3.2	A Memória Principal . . . . .	8
3.3	Conseguir Mais Em Menos Tempo . . . . .	9
3.3.1	A Barreira do Paralelismo a Nível de Instruções - <i>ILP Wall</i> . . . . .	9
3.3.2	A Barreira no Gasto de Energia dos Processadores - <i>Power Wall</i> . . . . .	10
3.4	Paralelismo - A Alternativa Para Se Contornar As Barreiras . . . . .	10
3.4.1	Arquiteturas de Memória na Computação Paralela . . . . .	11
3.4.2	Modelos da Computação Paralela . . . . .	12
3.4.3	Projetando Programas Paralelos . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Paralelismo em prática</b>	<b>14</b>
4.1	OpenMP . . . . .	14
4.1.1	Diretiva Utilizada . . . . .	14
4.2	Pthreads . . . . .	14
4.2.1	Rotinas Utilizadas . . . . .	15
4.3	MPI . . . . .	15
4.3.1	Rotinas Utilizadas . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Do serial ao paralelo</b>	<b>17</b>
5.1	A Construção do Código Serial . . . . .	17
5.1.1	Camadas . . . . .	17
5.1.2	Onda . . . . .	18
5.1.3	O Programa Principal . . . . .	18
5.1.4	Os Códigos Auxiliares “Falsos” . . . . .	18
5.2	Primeiro contato do código com as <i>threads</i> - OpenMP . . . . .	19
5.2.1	Avaliação de uma função . . . . .	19
5.3	Um contato mais profundo do código com as <i>threads</i> - Pthreads . . . . .	19
5.3.1	Construindo o caminho para a Pthreads . . . . .	19
5.4	Realizando a mescla de Pthreads e MPI . . . . .	19
5.4.1	Contruindo o caminho para a mescla . . . . .	19

<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>20</b>
	<b>Abreviações</b>	<b>21</b>
	<b>Definições</b>	<b>22</b>
<b>A</b>	<b>Códigos seriais</b>	<b>24</b>
A.1	Códigos seriais falsos . . . . .	24
A.1.1	Cálculo da função de um parabolóide . . . . .	24
A.1.2	Propagação de onda em uma dimensão . . . . .	25
A.2	Propagação de ondas em duas dimensões . . . . .	27
A.2.1	Interface de linha de comando para o usuário . . . . .	27
A.2.2	Bibliotecas criadas . . . . .	29
A.2.3	Ferramentas . . . . .	38
A.2.4	Código principal . . . . .	42
<b>B</b>	<b>Códigos falsos sobre OpenMP</b>	<b>45</b>
B.1	Cálculo da função de um parabolóide . . . . .	45
B.2	Propagação de onda em uma dimensão . . . . .	46
<b>C</b>	<b>Códigos falsos sobre Pthreads</b>	<b>47</b>
C.1	Cálculo da função de um parabolóide . . . . .	47
C.2	Propagação de onda em uma dimensão . . . . .	49
<b>D</b>	<b>Códigos falsos sobre MPI</b>	<b>54</b>
D.1	Cálculo da função de um parabolóide . . . . .	54
<b>E</b>	<b>Códigos finais</b>	<b>57</b>
E.1	Códigos serial final falso . . . . .	57
E.1.1	Propagação de onda em uma dimensão . . . . .	57
E.2	Propagação de ondas em duas dimensões . . . . .	61
E.2.1	Código principal . . . . .	61

# **Capítulo 1**

## **Introdução**

## Capítulo 2

# Aquisições Sísmicas

Nesse capítulo, será explicado o que são aquisições sísmicas e algumas formas pelas quais elas são realizadas. Além disso, se mostrará o instrumento matemático pelo qual se pode modelar as ondas sonoras (equação da onda) utilizadas nas aquisições sísmicas e, por fim, um método para resolver tal instrumento numericamente.

### 2.1 O Que São Aquisições Sísmicas e Como Modelá-las

No ramo da mineração, não se pode tentar a esmo a descoberta de recursos minerais no subterrâneo de um local em que se já se suspeita sua existência. Do contrário, tal processo imprudente levaria a um alto custo monetário. É necessário que, de alguma forma, se obtenha a forma dessa estrutura oculta para se saber os pontos onde se encontram as jazidas/poços desse recurso. A obtenção dos dados de como é essa estrutura se chama **aquisição sísmica**.

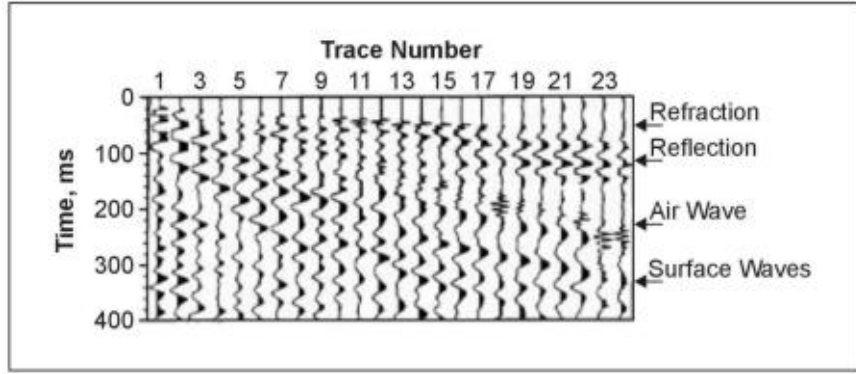
A forma de se realizar essa aquisição pode variar com o ambiente e os métodos adotados para coleta de dados e processamento dos mesmos. Os recursos minerais desejados podem se encontrar tanto em meios terrestres e/ou subaquáticos. Contudo, o meio em que a aquisição será realizada pouco importa nesse trabalho.

Para a coleta dos dados a serem processados podemos citar dois exemplos de aquisição

1. **marítima**: um navio equipado com um canhão sonoro emite ondas sonoras cujas reflexões e refrações nas camadas terrestres submarinas são captadas por filas de hidrofones puxadas pelo mesmo navio.
2. **terrestre**: um explosivo é (preferencialmente) enterrado em um terreno. Sua explosão gera uma onda sonora cujas reflexões são captadas por geofones distribuídos relativamente próximos, na superfície.

Costuma-se alterar a posição da fonte sonora na realização da aquisição para se obter mais dados de como aquele ambiente se comporta com o transporte de ondas e, baseando-se nisso, modelar sua estrutura em si.

Esse recolhimento dos dados consistirá em **traços**, como se pode ver na Figura 2.1. Esses consistem em gráficos das amplitudes das ondas sonoras, obtidas através dos hidrofones/geofones, ao longo do tempo. A partir desses traços, detecta-se, por análise técnica, onde se encontram as interfaces entre as camadas do domínio analisado e do que elas são feitas. Nisso consiste o processamento dos dados colhidos [DAf17].



**Fig. 2.1:** Exemplo de traços sísmicos

Contudo, quanto aos métodos de processamento utilizados, nesse trabalho será simulado um problema direto, ou seja, estipulando o meio (nesse caso, não-homogêneo) da aquisição, averiguar-se-á como as ondas se propagam nele. Para tal, será usado um método matemático específico. Nesse trabalho, como já foi dito no Capítulo 1, é o de Método de Diferenças Finitas.

## 2.2 A Equação da Onda

Para que seja possível avaliar matematicamente um fenômeno ondulatório produzido por uma fonte em um domínio é necessário se ter uma fórmula matemática para o que se entende por onda. Tal fórmula, que nos servirá durante todo esse trabalho (principalmente na parte da implementação computacional) é a **equação da onda**, dada por

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f(x, y, t) \quad (2.1)$$

onde  $x$  e  $y$  são variáveis espaciais e  $t$ , temporal. A constante  $v$  representa (no caso desse trabalho) a velocidade da frente de onda. Trata-se de uma **equação diferencial parcial hiperbólica** com solução analítica para alguns casos, mas que pode ser resolvida numericamente, utilizando, por exemplo, o Método de Diferenças Finitas, a ser discernido na próxima seção.

Caso o leitor se interesse por estudar ou revisar mais sobre Ondulatória, pode conferir em Cândido [MD18].

## 2.3 O Método de Diferenças Finitas (MDF)

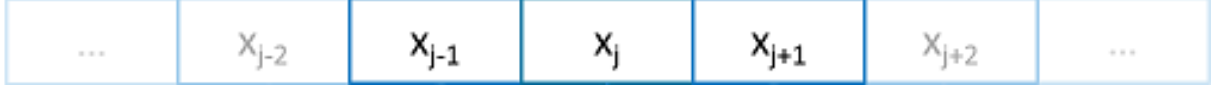
Uma equação diferencial parcial, que geralmente é considerada em um domínio contínuo, pode ser discretizada. Isso é feito para que a equação possa ser representada e resolvida computacionalmente.

No caso do Método de Diferenças Finitas para esse trabalho, basta transcrever cada termo da equação para o equivalente na fórmula de diferenças finitas nas derivações de segundo grau. Podemos ver um exemplo disso na Equação 2.2, para o caso da parte espacial em  $x$  da equação.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \rightarrow \frac{u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}}{\Delta x^2} \quad (2.2)$$

Para entender o que significa o índice  $i$  visto na Equação acima pode-se seguir uma analogia: suponhamos um *array* com mais que três posições. A posição  $i$  seria qualquer posição

intermediária,  $i - 1$  a antecessora e a  $i + 1$  sucessora. Tal estrutura é chamada de **estêncil**. O mesmo vale para os índices  $j$  e  $k$ , mas para um *array* com três dimensões. Podemos ver uma alegoria dessa analogia na Figura ??.



**Fig. 2.2:** *Stencil* unidimensional [Gro]

No caso desse trabalho, para a simulação da propagação de ondas em um meio bidimensional ao longo do tempo, teremos que usar três estênceis (os dois restantes podem ser vistos nas Equações 2.3 e 2.4), dois para as dimensões espaciais e um para a temporal. Para tal, podemos utilizar outra analogia: um *array* tridimensional, onde cada plano de posições no espaço é um instante no tempo.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \rightarrow \frac{u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \rightarrow \frac{u_{i,j,k-1} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t^2} \quad (2.4)$$

Contudo, até então, não falamos sobre o Método de Diferenças Finitas em si. Trata-se de uma sequência de iterações que marcham em função de alguma variável. No caso desse trabalho, o avanço se dá no tempo. Essa marcha no tempo quer dizer que o valor para um ponto no espaço no próximo instante de tempo será calculado com base nos valores para pontos no espaço em instantes anteriores. Vamos ser explícitos. Temos que a equação 2.1 traduzida nas fórmulas vistas nas Equações 2.2, 2.3 e 2.4 se dá por

$$\begin{aligned} \frac{u_{i,j,k-1} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t^2} = \frac{1}{v^2} & \left( \frac{u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}}{\Delta x^2} \right. \\ & \left. + \frac{u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} \right) + f(x,y,t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde  $u_{k+1}$  é o ponto com valor a ser calculado para o próximo instante. Logo, ele precisa ser isolado, o que é mostrado na equação 2.6

$$\begin{aligned} u_{i,j,k+1} = \frac{\Delta t^2}{v^2} & \left( \frac{u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} \right) + \\ & \Delta t^2 f(x,y,t) - u_{i,j,k-1} + 2u_{i,j,k} \end{aligned} \quad (2.6)$$

## Capítulo 3

# A Arquitetura Computacional Atual e a Necessidade de Paralelização

Para compreender a questão da paralelização envolvida nesse trabalho é necessário entender de onde e porque ela veio. Para tal, é necessário se apresentar as principais peças que constituem um computador moderno, os problemas que surgiram no processo de evolução da **arquitetura computacional** convencional (baseando-se na arquitetura de Von Neumann) e como isso culminou no paralelismo [Bar18].

Antes de iniciar esse processo, é também necessário se explicar o que se entende por arquitetura computacional. Trata-se da área do conhecimento que estuda a interface entre *software* e *hardware*, desde o mais baixo nível, no qual o processador manipula as informações (instruções de máquina e dados) entregues a ele, para toda operação realizada no computador. Após esse nível, tem-se as políticas de manipulação de dados nas memórias cache (e seus níveis), de acesso aleatório (RAM) e de armazenamento não-volátil (discos rígidos, por exemplo). Por fim, chega-se à interação dos computadores com os demais periféricos que por ventura estão nele conectados, realizando *inputs* (entradas) e/ou *outputs* (saídas), também conhecidas pela abreviação "I/O", como teclado, *mouse*, monitor, etc [Cat09].

O presente capítulo abordará alguns componentes da arquitetura computacional (processador e memória RAM) de uma forma básica, além de explicar por quais motivos a paralelização se tornou necessária e como ela se desenvolveu.

### 3.1 O Processador

Um processador consiste em um módulo de *hardware* capaz de manipular instruções de máquina armazenadas em memória e produzir os resultados desejados através dessas instruções. Tais resultados podem ser de cunho ou lógico-aritmético ou manipulação de dados, no geral. Tal módulo é indispensável para o conceito de computadores como conhecemos hoje, de tal forma que, se não fosse pela necessidade de memória para a armazenagem de dados, um processador poderia ser a definição de um computador. Um exemplo de processador pode ser visualizado nas Figuras 3.1a e 3.1b.





(a) Um processador Intel® 2500 [Com18a].



(b) Os pinos de um processador Intel® 2600 [Com18b]

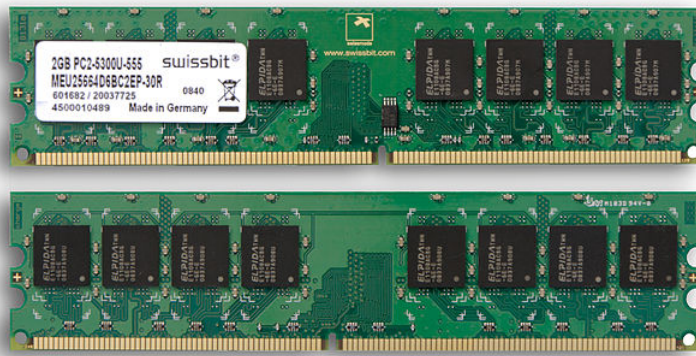
**Fig. 3.1:** Exemplos de processadores

## 3.2 A Memória Principal

Quando se fala sobre memória computacional, pode-se estar referindo à memória cache, Read-Only Memory (ROM), Random Access Memory (RAM) ou à capacidade de armazenamento de um disco rígido. Dentre essas, a RAM é considerada a principal e um exemplo dela pode ser visto na Figura 3.2. Ela é responsável por armazenar os programas em forma de processos gerenciados pelo sistema operacional, ou seja, enquanto eles estão sendo executados. Ela também é responsável por armazenar todos os dados gerados por um programa que ainda não foram ou descartados, ou salvos em disco ou cujo acesso ainda é requisitado.

Outras características sobre a RAM são:

- o fato de que ela apenas armazena os dados até ser desligada, o que a classifica como memória volátil;
- sua capacidade de armazenamento, que, na maioria dos casos, é maior do que a de memórias cache e menor do que a de discos rígidos;
- sua velocidade, que segue o inverso da capacidade de armazenamento, ou seja, é menor do que a de memórias cache e maior do que a de discos rígidos.



**Fig. 3.2:** Dois módulos de RAM Swissbit® PC2-5300 DDR2 com capacidade de 2 Gigabytes, utilizada em computadores de mesa [Com19].

### 3.3 Conseguir Mais Em Menos Tempo

Considerando-se que a computação iniciou com o ábaco, passando pelo uso de estruturas mecânicas (como a máquina de Charles Babbage), cartões perfurados, relés e válvulas, chegando aos atuais transistores, essa área foi uma das principais ferramentas humanas para avanços tecnológicos nos últimos séculos. Seja na engenharia, medicina, área militar, biologia, química, sísmica e até no cinema, os computadores tem sido utilizados em tarefas como mecânicas, estudos sobre patologias, ataques/defesas nacionais, enovelamento de proteínas, dinâmica molecular, monitoramento sísmico e animações tridimensionais.

Todas essas áreas costumam requerer resultados o mais rápido possível. Além disso, muitas (senão quase todas) as simulações numéricas não podem ser executadas em tempo hábil com um único processador. Visto isso, os projetistas por trás dos processadores precisaram implementar mecanismos nos processadores para explorá-los ao máximo. Contudo, encontrou-se barreiras nessa tarefa [Pac11].

#### 3.3.1 A Barreira do Paralelismo a Nível de Instruções - *ILP Wall*

Os primeiros processadores possuíam a capacidade de executar uma instrução por ciclo de *clock*. Por isso eram chamados processadores **monociclo**. Com isso, a duração do ciclo devia ser a mesma da execução da instrução mais demorada, para que essa pudesse ser executada com segurança. Na necessidade de se adquirir mais velocidade, os projetistas perceberam que podiam particionar as instruções, de modo a executar cada estágio resultante em um ciclo de *clock*, deixando o resultado para o próximo estágio operar. Assim nasceu o processador **multi-ciclo**. Dessa forma, a duração do ciclo de *clock* reduziu para a mesma do estágio mais demorado dentre as instruções e a execução tornou-se mais rápida [PH17].

Contudo, a necessidade de se acelerar os processadores continuava. Em seguida, os projetistas perceberam que as unidades funcionais dos processadores ficavam ociosas quando não se tratava do estágio de uma instrução em que elas eram utilizadas. Era então possível executar uma instrução ao mesmo tempo que outra, desde que ambas se encontrassem, cada uma, em estágios *A* e *B*, sendo *A* o estágio da instrução mais antiga e *B* o da mais nova, ou seja  $B = A - 1$ , onde *A* e *B* representam os estágios por números inteiros.

Ou seja, por exemplo, considere uma instrução *i* liberada no tempo de *clock* 1, passando por seu primeiro estágio. No tempo 2, ela estará em sua segunda etapa e as unidades funcionais

responsáveis pela primeira estariam ociosas, se não fosse pela inovação apresentada acima. Com esta, a próxima instrução  $j$  é buscada da memória ainda nesse tempo, tendo seu primeiro estágio executado. No tempo de ciclo de *clock* 3, a instrução  $i$  passará para o seu terceiro estágio, enquanto a  $j$  passará para o segundo e uma nova instrução poderá ser buscada. A esse encadeamento de estágios foi dado o nome de *pipeline* e a essa ideia, foi dado o nome de **paralelismo a nível de instruções**, visto que se tem mais de uma instrução sendo executada ao mesmo tempo e uma pronta a cada ciclo de *clock*, após todas as unidades funcionais estarem ocupadas.

Em seguida, para mais velocidade, os projetistas decidiram construir estágios menores, consequentemente aumentando a frequência de *clock* (que é  $\frac{1}{\text{tempo de ciclo do clock}}$  e dada em hertz (Hz)), o tamanho do *pipeline* e o número de instruções operadas simultaneamente. Com isso, nasceu o **superpipeline**.

Por fim, os projetistas de *hardware* ainda deram mais um passo em busca de mais performance: a **superescalaridade**, que consiste, basicamente em *pipelines* em paralelo, o que propicia a execução de múltiplas instruções ao mesmo tempo. Contudo, essa arquitetura também apresentou seus defeitos. Os *pipelines* em paralelo leva a problemas para acessar os recursos comuns, como memória, por exemplo, sendo necessário duplicá-los. Além disso, a ocorrência de dependências de Dados e dependências de Controle faz com que em alguns ciclos não haja instruções para serem executadas, visto o atraso necessário para que as dependências sejam resolvidas [Sil09].

### 3.3.2 A Barreira no Gasto de Energia dos Processadores - *Power Wall*

Em 1965, Gordon Moore publicou um artigo em que descrevia uma observação de que o número de componentes por circuitos integrados, transistores no caso, dobrava a cada dois anos. Ele então estimou que essa taxa de crescimento deveria continuar por pelo menos uma década. Essa estimativa foi batizada por **Lei de Moore** e o período da dita taxa veio então a ser alterada depois para um ano e meio e a estimativa se manteve consistente por muitas décadas [Wik19b].

O crescimento da densidade desses componentes permitiu aos processadores alcançarem uma taxa muito mais alta de *clock*, passando de milhões de ciclos por segundo a bilhões [Hen12]. Tal evolução permitiu a execução de mais instruções de *hardware* em menos tempo, diminuindo o tempo de execução das aplicações em geral. Contudo, essa evolução proporcionada pela Lei de Moore não duraria para sempre.

A alta taxa de *clock* acaba levando os processadores a gastarem muita energia. Esse gasto leva a um aumento na dissipação de calor pelo dispositivo, fenômeno conhecido por efeito joule. O atingimento de altas temperaturas leva ao *transistor leakage* [Liu+00] (vazamento nos transistores, tradução nossa), que é o gasto energético nos transistores. Logo, tem-se um ciclo, pois o gasto energético levará novamente ao efeito joule. As altas temperaturas criam uma barreira para taxas de *clock* maiores [Fis12].

## 3.4 Paralelismo - A Alternativa Para Se Contornar As Barreiras

Visto a incapacidade de se transpor o alto gasto energético das unidades de processamento, junto com as consequentes altas temperaturas, além da incapacidade de se aumentar o número de instruções prontas por ciclo de *clock*, necessitou-se de uma alternativa para se continuar aumentando o poder de processamento dos computadores.

Tal alternativa foi então aumentar o número de unidades de processamento, seja em um *chip* com mais de uma unidade (chamada núcleo, ou **core** em inglês) e/ou em um sistema com mais de uma máquina, que por sua vez possui uma ou mais unidades de processamento. Dessa forma, o número de tarefas concluídas por unidade de tempo aumentou, visto que há um número maior de unidades para realizá-las simultaneamente. A isso foi dado o nome de **paralelismo**.

Existem muitos motivos para se utilizar o paralelismo. O mais importante é que o universo possui muitos processos paralelos, ou seja, ocorrendo ao mesmo tempo, tais como mudanças climáticas, montagens de veículos e aeronaves, tráfego em um pedágio e acessos a um site. Em consequência da necessidade de se processar esses eventos por computadores, surgem outros motivos para a computação paralela:

- poupar tempo e/ou dinheiro: existem problemas computacionais que são muito demorados, senão impossíveis, para se resolver serialmente (ou seja, com um processador isolado). Dessa forma, usando-se a computação serial, se paga mais, visto o uso por mais tempo do poder computacional;
- resolver problemas maiores e/ou mais complexos, visto o processamento mais rápido e a possibilidade de se dividir o trabalho para mais máquinas;
- prover concorrência: realizar várias tarefas simultaneamente, o que é essencial em sistemas operacionais, por exemplo [Bar18].

Quando se fala em paralelismo, é importante mostrar que existem diferentes arquiteturas de memória nesse meio, o que veremos na subseção 3.4.1. Além disso, existem diferentes paradigmas de paralelismo, sendo alguns brevemente explicados na subseção 3.4.2. Há também outros assuntos a serem tratados ao se projetar programas paralelos, sendo alguns abordados na subseção 3.4.3. Fora isso, mais informações sobre paralelismo podem ser encontradas em Barney [Bar18].

### 3.4.1 Arquiteturas de Memória na Computação Paralela

Na computação paralela, existem diferentes formas pelas quais a memória é implementada em um sistema. No caso deste trabalho, são elucidadas as três seguintes:

- memória compartilhada: cada unidade de processamento de um sistema tem acesso à toda a memória, com um espaço de endereçamento global;
- memória distribuída: cada unidade de processamento possui sua própria memória, mapeada apenas para ela e que pode ser acessada pelos demais nós através de requisições feitas por meio de uma rede que os liga. Além disso, cada nó opera independentemente, visto que cada um tem sua própria memória. Dessa forma, as mudanças que um nó opera sobre sua própria memória não afetam as dos demais nós;
- híbrida: literalmente a mescla de ambas, ou seja, cada nó possui mais de uma unidade de processamento e sua própria memória, sendo também capaz de acessar as dos outros [Bar18].

Essas arquiteturas são implementadas fisicamente nos sistemas de computação paralela, contudo, o programador pode escolher interpretar a arquitetura do sistema, com o qual ele trabalha, de forma diferente ou não [Bar18]. Isso é o que veremos na próxima seção.

### 3.4.2 Modelos da Computação Paralela

Segundo Barney, os modelos de programação paralela funcionam “como uma abstração sobre o *hardware* e as arquiteturas de memória” (tradução nossa), ou seja, eles servem ao programador como formas de se mascarar (ou não) a estrutura física implementada para um dado sistema de computação paralela.

Isso quer dizer que pode-se ter, teoricamente, um sistema com memória distribuída que será vista pelo usuário (mediante implementação) como compartilhada. Esse foi o caso, por exemplo, do supercomputador *Kendall Square Research* (KSR). Semelhantemente, um sistema com memória compartilhada poderia ser interpretado como um de memória distribuída [Bar18].

Uma lista com modelos de computação paralela diretamente relacionados com esse trabalho é dada abaixo:

- modelo de memória compartilhada (sem *threads*): consiste em processos/tarefas compartilhando o mesmo espaço de endereçamento, onde eles podem ler e escrever assincronamente. Como vantagem, esse modelo não possui o conceito de posse de dados, o que torna desnecessária a explicitação de como os dados devem ser comunicados entre as tarefas. Como desvantagem, existe a necessidade de se controlar a localidade dos dados;
- modelo de *threads*: é também um tipo de programação com memória compartilhada que consiste em um programa principal capaz de lançar linhas de execução de instruções concorrentes chamadas *threads*. Essas são designadas e executadas simultaneamente, sendo desse fato que vem o paralelismo desse modelo. Algumas APIs que usam esse modelo são Open Multi-Processing (OpenMP) e POSIX Threads (Pthreads);
- modelo de memória distribuída / troca de mensagens: consiste em um conjunto de tarefas que podem residir no mesmo espaço de endereçamento e/ou ao longo de um número arbitrário de máquinas, usando a memória local durante a computação. Além disso, as tarefas podem precisar mandar/receber dados de outras tarefas, o que é feito através do envio/recebimento de mensagens. Uma que implementa esse modelo é a Message Passing Interface (MPI);
- modelo híbrido: mescla modelos acima, sendo um exemplo a aplicação da MPI para a comunicação entre as máquinas de um sistema (que teria, consequentemente, memória distribuída) e alguma de *threads* para a realização das computações dentro de cada máquina, que é um subsistema de memória compartilhada.

### 3.4.3 Projetando Programas Paralelos

Para se projetar programas paralelos para esse trabalho, mais alguns conceitos, detalhes e diferenças devem ser explicados. Um deles é a diferença entre a paralelização manual e a automática. A manual se dá com o programador (preferencialmente usando uma ) determinando o local e o tempo ou da criação de *threads*, ou do envio/recebimento de mensagens ou de qualquer outra ação relacionada; por si só, sem automação. Já a automática ou é realizada por um compilador/pré-processador, que identifica as regiões do código que podem ser paralelizadas; ou pelo programador, que seta flags ou diretivas para indicar ao compilador as partes do código a serem paralelizadas.

Outro detalhe importante é a necessidade de se entender o problema a se tentar paralelizar e o programa que o modela. Entender o programa é necessário para se saber se ele é paralelizável. Caso seja, o próximo passo seria construir um programa serial que o resolva. A partir daí, é

necessário que se entenda esse programa a fim de que se descubra os pontos onde ele leva mais tempo e a paralelização seria mais eficiente; e os pontos de gargalo, onde a execução desaceleraria desproporcionalmente e a paralelização se torna ineficiente. Pode também ser necessário reestruturar o programa ou até procurar outro algoritmo que o resolva.

Por fim, é preciso elucidar dois conceitos a serem utilizados nesse iniciação:

- **particionamento:** consiste em quebrar um problema (a ser resolvido por uma abordagem paralela) em partes discretas para serem distribuídas às tarefas. Isso pode ser feito de duas formas:
  1. **particionamento funcional:** distribuição do trabalho a ser realizado às tarefas. Se dá bem com trabalhos cujas partes são diferentes;
  2. **particionamento de domínio:** o conjunto de dados a ser processado é decomposto em partes. Cada um desses subconjuntos é distribuído para uma tarefa diferente e processado da mesma forma. Esse conceito será utilizado nesse trabalho;
- **sincronização:** relacionada com o problema de se gerenciar a sequência do trabalho e das tarefas. Se manifesta em diferentes tipos como trava/semáforo, operações síncronas de comunicação e “barreira”. Esse último conceito, que será utilizado nesse trabalho, consiste em cada tarefa trabalhar até atingir um determinado ponto do programa (a barreira), onde elas são bloqueadas. Quando a última tarefa chega a esse ponto, o processo está sincronizado e o que acontece a partir daí fica a cargo do programador [Bar18].

# Capítulo 4

## Paralelismo em prática

Para facilitar o desenvolvimento de *software* com paralelização, foram criadas interfaces com rotinas (funções) que servem de abstração para o desenvolvedor. Dessa forma, este se preocupará apenas com as estratégias de paralelização a serem adotadas e não como o paralelismo deve ocorrer em baixo nível. Tais interfaces são chamadas Application Programming Interface (API) e são indispensáveis para esse trabalho.

Nesse capítulo serão abordadas as três APIs que foram utilizadas para a realização desse trabalho: OpenMP, Pthreads e OpenMPI.

### 4.1 OpenMP

A API Open Multi-Processing (OpenMP) consiste em rotinas, variáveis de ambiente e diretivas de compilação reunidas em um modelo portátil e escalável que serve como uma interface para desenvolvedores criarem aplicações paralelas com simplicidade e flexibilidade [wiki:openmp]. Essa API se encontra incluída no modelo de computação paralela de memória compartilhada, assim como a Pthreads.

#### 4.1.1 Diretiva Utilizada

```
1 #pragma omp parallel for
```

Considerada uma diretiva de compartilhamento de trabalho, essa ferramenta permite que qualquer laço de repetição do tipo `for` (nas linguagens C/C++, `for(int i = 0; i < ALGUM_NUMERO; i++) // faz algo`, por exemplo) tenha seu número de iterações dividido entre  $n$  *thread*, sendo  $0 < n \leq$  número máximo de threads.

### 4.2 Pthreads

POSIX *Threads*, abreviada para Pthreads, é uma API que serve como um “modelo de execução paralela” usando memória compartilhada como a OpenMP, mas fornecendo rotinas para criação e manipulação de *threads* e outras funcionalidades fora do escopo desse trabalho [Wik19c; Bar17]. Essa API permite mais controle sobre o código, dando mais liberdade ao programador em definir a paralelização deste.

### 4.2.1 Rotinas Utilizadas

Nessa seção são listadas e brevemente explicadas as rotinas da API Pthreads usadas nesse trabalho.

#### **pthread\_create**

```
1 int pthread_create(pthread_t *restrict thread, const pthread_attr_t *restrict attr,
2 void *(*start_routine)(void*), void *restrict arg);
```

Essa rotina dá início a uma *thread* (primeiro argumento), podendo definí-la com um atributo previamente criado. Tal *thread* executará a rotina cuja referência é passada como argumento. O argumento *arg* é o parâmetro passado à rotina referenciada [03b].

#### **pthread\_exit**

```
1 void pthread_exit(void *value_ptr);
```

Rotina responsável por terminar a execução de uma *thread* [03c].

#### **pthread\_attr\_init**

```
1 int pthread_attr_init(pthread_attr_t *attr);
```

Rotina responsável por inicializar um atributo a ser utilizado na rotina `pthread_create`. Tal atributo pode determinar que as *thread* a serem criadas com ele sejam sincronizáveis, por exemplo, o que será utilizado no capítulo [5] [03a].

#### **pthread\_setdetachedstate**

```
1 int pthread_attr_setdetachstate(pthread_attr_t *attr, int detachstate);
```

Rotina que possibilita a determinação do atributo *attr*, a ser passado a uma *thread* em sua criação, como *joinable*, ou seja, sincronizável. Esse atributo também pode ser determinado como *detached*, ou seja, desanexado; contudo isso foge ao escopo desse trabalho [03e].

#### **pthread\_join**

```
1 int pthread_join(pthread_t thread, void **value_ptr);
```

Essa rotina é responsável por pausar a execução da *thread* que a chamou enquanto a *thread*-alvo (passada por argumento) não terminar. Caso a *thread*-alvo já tenha terminado, a função simplesmente retorna com sucesso.

Essa função pode ser utilizada pelo desenvolvedor para sincronizar o funcionamento de um conjunto de *threads*. Ou seja, ela permite a criação de “áreas paralelas” no código, cujo início se dá na criação das *threads* e o fim quando a dita rotina for chamada para todas as *threads* existentes. Dessa forma, o programa não passará da área paralela enquanto houver alguma *thread* sem terminar [03d].

## 4.3 MPI

Message Passing Interface (MPI) é uma especificação de biblioteca para comunicação entre nós através do envio e recebimento de mensagens (modelo distribuído de passagem de mensagens), sendo que os dados do espaço de endereçamento de um processo (instanciado pelo MPI)



são passados para o espaço de outro “através de operações cooperativas em cada processo” (tradução nossa) [For15].

É importante relatar que a MPI não é uma implementação em si, mas sim uma especificação, independente de fornecedores. Com isso, existem diversas implementações e será utilizada apenas uma delas nesse trabalho: OpenMPI.

### 4.3.1 Rotinas Utilizadas

#### MPI\_Init

```
1 int MPI_Init( int *argc , char ***argv )
```

Rotina responsável por inicializar o ambiente MPI, sendo que seus argumentos são referências aos argumentos do programa principal no qual o ambiente é inicializado [17d].

#### MPI\_Comm\_size

```
1 int MPI_Comm_size ( MPI_Comm comm, int *size )
```

A rotina acima retorna o tamanho de um grupo associado ao comunicador passado por parâmetro [17b]. No contexto do padrão MPI, um comunicador é um objeto que descreve um grupo de processos [Eij16].

#### MPI\_Comm\_rank

```
1 int MPI_Comm_rank ( MPI_Comm comm, int *rank )
```

Essa rotina retorna a posição do processo computacional, que a chama, no *rank* do comunicador [17a].

#### MPI\_Send

```
1 int MPI_Send( void *buf, int count, MPI_Datatype datatype, int dest ,  
2             int tag , MPI_Comm comm )
```

Rotina que tem como objetivo enviar o conteúdo do *buffer* apontado por *buf*, que contém um número (*count*) de elementos do tipo dado por *datatype* para o processo destino (*dest*), numerado conforme o *rank* do comunicador *comm*. O parâmetro *tag* é ignorado nesse trabalho.

Quando o comando dessa rotina é alcançado no código, a execução do mesmo não continua até que a mensagem que está sendo enviada seja recebida [17f].

#### MPI\_Recv

```
1 int MPI_Recv( void *buf, int count, MPI_Datatype datatype, int source ,  
2             int tag , MPI_Comm comm, MPI_Status *status )
```

Essa rotina trabalha semelhantemente à *MPI\_Send*, mas dessa vez recebe uma mensagem de *src* [17e]. O argumento *status* é ignorado nesse trabalho.

#### MPI\_Finalize

```
1 int MPI_Finalize ()
```

Simplesmente finaliza o ambiente de execução MPI [17c].

# Capítulo 5

## Do serial ao paralelo

Como já dito anteriormente, o objetivo desse trabalho é a construção de um código paralelizado capaz de resolver a equação da onda utilizando o Método de Diferenças Finitas. O presente capítulo apresentará a construção desse código, partindo do serial equivalente, passando pelos estudos realizados com as Application Programming Interfaces (APIs) e concluindo com a construção do código paralelo final.

### 5.1 A Construção do Código Serial

Como dito anteriormente na Seção Código 3.4.3, após se compreender o problema a ser programado em termos paralelos, deve-se então criar o código serial que resolve o problema.

Para tal, criaram-se as classes `_2Dwave` (Código A.7), que visa representar as características da onda e também da sua fonte; `interface` (Código A.9) e `velocity` (Código A.11), que buscam representar as características do meio em que a onda propagará. Para unir essas informações e realizar os cálculos da propagação da onda utilizando o Método de Diferenças Finitas, foi criado o programa principal (Código A.19).

#### 5.1.1 Camadas

É importante lembrar que quando se fala de camadas se refere às porções de solo subterrâneas que estão isoladas umas das outras por características diferentes e bem definidas (como o material de que são feitas e o quanto esse está comprimido, por exemplo). Duas características do meio podem ser usadas para a simulação da propagação das ondas: ângulo que as interfaces (limite de uma camada para a outra, sendo representadas por funções de primeiro nesse projeto) possuem e a velocidade (representada por uma função de primeiro grau com duas variáveis) das camadas.

#### Interfaces

Tanto no código serial quanto no final (paralelo), as interfaces das camadas são representadas pela classe `interface`. Tal classe possui dois atributos: `a` (coeficiente angular) e `b` (termo constante). Além disso, ela também possui um método, `getY(double x)`, responsável por retornar o `y` da reta para um dado `x`.

## Velocidades

Já quanto às velocidades das camadas, no código serial e no final (paralelo), elas são representadas pela classe `velocity`. Essa classe possui três atributos: `a`, `b` e `c`, sendo os dois primeiros os multiplicadores das variáveis  $x$  e  $y$  da função que representa a velocidade; e o último sendo o termo constante. A classe também possui o método `getGradientVelocity(double x, double y)` que retorna a velocidade encontrada em um determinado ponto  $(x,y)$  da camada.

### 5.1.2 Onda

A onda bidimensional que será propagada através do meio é representada pela classe `_2Dwave`, que possui como atributos: a extensão do domínio em  $x$  (`Lx`) e  $y$  (`Ly`), o tempo máximo que a simulação da propagação deve durar (`tMax`), número de pontos em  $x$  (`Mx`) e  $y$  (`Ny`), para a discretização do domínio; a frequência da onda (`w`), sua amplitude (`A`), seu ponto  $(x,y)$  e tempo iniciais (`Xp`, `Yp` e `Tp`).

Além desses atributos, a classe também possui os métodos `evaluateFXYT(double x, double y, t)`, que retorna a amplitude da onda para determinado ponto  $(x,y,t)$ ; e `getVelocitiesMatrix(interfaces, vector<velocity> velocities)`, que retorna uma matriz da velocidade de cada ponto  $(x,y)$  do domínio.

### 5.1.3 O Programa Principal

O programa principal consiste, basicamente, em recolher as informações dadas pelo usuário por meio do Código A.5; Em seguida, realizar os cálculos do Método de Diferenças Finitas e, por fim, salvar os dados resultantes a esses cálculos, que podem ser matrizes, das quais se pode obter imagens da onda propagando; ou vetores, dos quais se pode obter os traços sísmicos registrados pelos receptores simulados.

### 5.1.4 Os Códigos Auxiliares “Falsos”

Também foram criados códigos seriais “falsos” para que a construção do código final acontecesse de forma mais gradual e didaticamente. São chamados “falsos” porque buscam resolver problemas mais fáceis que o problema real que o projeto busca solucionar. Sobre eles foram construídos níveis de paralelização como forma de estudo para que os níveis a serem implementadas no código real fossem feitos mais facilmente.

O primeiro desses códigos (Código A.1) preenche uma matriz com os valores em  $z$  do parabolóide  $z = 2x^2 + y^2$ , sendo os limites de  $x$  e  $y$  delimitados pelo usuário. Já o segundo (Código A.3) calcula a propagação de uma onda unidimensional sobre uma corda ao longo do tempo, cujos limites também são definidos pelo usuário.

O primeiro código citado propõe a introdução facilitada de níveis de paralelização, não havendo nenhum problema que exija um nível maior de atenção. Já o segundo, por conta de que os cálculos do próximo instante de tempo  $t_1$  dependem de que os cálculos de  $t_0$  (com  $t_0 < t_1$ ) estejam finalizados, insere o problema da sincronização ao se aplicar paralelismo com `thread`. Estudar esse problema é essencial antes de se implementar o código final.

## 5.2 Primeiro contato do código com as *threads* - OpenMP

Essa seção pretende demonstrar os esforços realizados para se construir dois códigos “falsos” que, como já dito, foram criados para facilitar a criação do código final. Esses códigos são variações dos códigos “falsos” seriais, realizando as mesmas tarefas (avaliação de função e cálculo da propagação de ondas em meio unidimensional), mas com o auxílio da API OpenMP.

### 5.2.1 Avaliação de uma função

O Código B.1 utiliza a estrutura

```
1 #pragma omp parallel for default(none) shared(A, x_b, y_b, x_ofst, y_ofst, x_points, y_points)
   private(i, j, x_i, y_i)
```

cujas versão mais simples foi descrita na Seção 4.1, para aplicar o paralelismo no problema.

A estrutura `default(none)` serve para explicitar que o tipo das variáveis (`shared` ou `private`) deve ser declarado pelo programador e não seguir o padrão da API, que é utilizar as variáveis como `shared` [Sob]. Quando declaradas como `shared`, as variáveis são compartilhadas entre as *thread* criadas pela OpenMP. Já quando declaradas com a cláusula `private`, cada *thread* possui uma cópia da variável, sendo cada cópia isolada das demais [Sob].

Como a API já sabe quantas iterações os laços `for` devem realizar (pela própria estrutura do laço), ela divide essa quantidade pelo número de *thread* determinadas pelo usuário, inicializando as variáveis de iteração `i` e `j` de acordo com a porção de iterações que cada *thread* recebeu para trabalhar.

- explicar o código fake das diferenças finitas 1D.

## 5.3 Um contato mais profundo do código com as *threads* - Pthreads

### 5.3.1 Construindo o caminho para a Pthreads

- explicar o código fake das diferenças finitas 1D.

## 5.4 Realizando a mescla de Pthreads e MPI

### 5.4.1 Construindo o caminho para a mescla

- explicar o código fake híbrido;
- explicar como o código fake foi rodado no cluster (?).

## **Capítulo 6**

### **Considerações Finais**

# Abreviações

**API** Application Programming Interface. 14, 15, 17, 19

**MPI** Message Passing Interface. 12, 15, 16

**OpenMP** Open Multi-Processing. 12, 14, 19

**OpenMPI** Open Message Passing Interface. 14

**Pthreads** POSIX Threads. 12, 14, 15

**RAM** Random Access Memory. 7–9

**ROM** Read-Only Memory. 8

# Definições

**API** Interface de Programação de Aplicação, “é um conjunto de definições de subrotinas, protocolos de comunicação e ferramentas para a construção de *software*” [Wik19a]. 12, 14

**arquitetura de Von Neumann** A DEFINIR. 7

**baixo nível** A DEFINIR. 14

**circuitos integrados** . 10

**classe** A DEFINIR. 17, 18

**dependências de Controle** semelhantemente às de dados, são situações em que uma instrução precisa que uma de suas anteriores leve a um resultado que permita a sua execução, como na estrutura `if (...) {...}` na linguagem C, cujo código presente dentro das chaves só poderá ser executado se a condição dentro dos parênteses for verdadeira [Wik18]. 10

**dependências de Dados** eventos problemáticos que ocorrem quando duas ou mais instruções utilizam um mesmo recurso (um registrador, por exemplo) de forma que a primeira instrução não pode ler/escrever sobre esse recurso sem que a segunda (ou qualquer ordem próxima) já o tenha feito (ou vice-versa), de forma que não venha a ter interferência na coesão dos dados [Wik18]. 10

**efeito joule** . 10

**espaço de endereçamento** “série de endereços discretos” que nomeiam as posições de memória [con19]. 11

**flag** (bandeira, no português), é um termo utilizado na computação para designar mecanismos que servem como indicadores para outros agentes de um mesmo sistema.. 12

**instruções de máquina** A DEFINIR. 7

**localidade** A DEFINIR. 12

**nó** nome dado na computação paralela para cada unidade de processamento (ou conjunto dessas) independente. 11, 15

**processo computacional** A DEFINIR. 16

**programa serial** é aquele que seus comandos são executados em ordem, sequencialmente, sem paralelismo. 12

**thread** de forma básica, uma *thread* pode ser entendida como uma tarefa (no inglês, *task*), composta por instruções e lançada por um programa, a ser executada pelo sistema operacional de forma independente (concorrente) a quem a lançou. Essa independência permite, por exemplo, que várias *threads* sejam lançadas e executem de forma independente entre si citeLLNL:pthread. 12, 14, 15, 18, 19

**transistores** . 10



# Apêndice A

## Códigos seriais

### A.1 Códigos seriais falsos

#### A.1.1 Cálculo da função de um parabolóide

```
1  #include <iostream>
2  #include <stdio.h>
3  #include <armadillo>
4
5  using namespace std;
6  using namespace arma;
7
8  /* Args
9   * x_points - number of points of the domain in the x axis
10  * x_b      - beginning of the domain in x
11  * x_e      - end of the domain in x
12  * y_points - number of points of the domain in the y axis
13  * y_b      - beginning of the domain in y
14  * y_e      - end of the domain in y
15  */
16
17  int main(int argc, char const *argv[]) {
18
19      int    x_points, y_points;
20      float  x_b      , y_b      ;
21      float  x_e      , y_e      ;
22
23      // Creating objects for conversion of arguments
24      stringstream convert0(argv[1]);
25      stringstream convert1(argv[2]);
26      stringstream convert2(argv[3]);
27      stringstream convert3(argv[4]);
28      stringstream convert4(argv[5]);
29      stringstream convert5(argv[6]);
30
31      // Putting arguments on variables
32      convert0 >> x_points;
33      convert1 >> x_b;
34      convert2 >> x_e;
35      convert3 >> y_points;
36      convert4 >> y_b;
37      convert5 >> y_e;
38
39      cout << "X points: " << x_points << "\n";
40      cout << "X beginning: " << x_b << "\n";
41      cout << "X end: " << x_e << "\n";
42      cout << "Y points: " << y_points << "\n";
43      cout << "Y beginning: " << y_b << "\n";
44      cout << "X end: " << x_e << "\n";
45
46      mat A(x_points, y_points);
47      rowvec parameters(6);
```

```

48
49 // determining the space between points in x and y
50 float x_ofst = (x_e - x_b) / x_points;
51 float y_ofst = (y_e - y_b) / y_points;
52
53 // Storing parameters in a vector for a file
54 parameters(0) = x_points; parameters(1) = x_ofst; parameters(2) = x_b;
55 parameters(3) = y_points; parameters(4) = y_ofst; parameters(5) = y_b;
56
57 // Calculating function
58 float x_i = x_b;
59 float y_i = y_b;
60
61 for (int i = 0; i < x_points; i++) {
62     for (int j = 0; j < y_points; j++) {
63         A(i, j) = 2. * x_i * x_i + y_i * y_i;
64         y_i += y_ofst;
65     }
66     x_i += x_ofst;
67     y_i = y_b;
68 }
69
70 parameters.save("data/outputs/pmts.dat", raw_ascii);
71 A.save("data/outputs/A.dat", raw_binary);
72
73 return 0;
74 }

```

Listing A.1: solver.cpp: programa que calcula um paraboloide.

```

1 #!/usr/bin/python2.7
2 #!-*- coding: utf8 -*-
3
4 import numpy as np;
5 import matplotlib.pyplot as plt;
6
7 # Loading data
8 A = np.fromfile('data/outputs/A.dat', dtype=float);
9 [x_points, x_ofst, xi, y_points, y_ofst, yi] = np.loadtxt('data/outputs/pmts.dat');
10
11 # Preparing data for plotting
12 X = np.linspace(xi, xi + x_points * x_ofst, num=int(x_points));
13 Y = np.linspace(yi, yi + y_points * y_ofst, num=int(y_points));
14 A = A.reshape(int(x_points), int(y_points));
15
16 [B, C] = np.meshgrid(X, Y)
17
18 # Preparing plot
19 fig, ax = plt.subplots();
20 CS = ax.contourf(B, C, A.transpose(), 20, cmap='RdGy');
21 ax.clabel(CS, inline=False, fontsize=10);
22 ax.set_title('z = 2x^2 + y^2');
23
24 ax.plot();
25 plt.savefig('data/images/A.png');

```

Listing A.2: viewer.py: script que cria a imagem das projeções de camadas do paraboloide em um plano.

## A.1.2 Propagação de onda em uma dimensão

```

1 #include <iostream>
2 #include <stdio.h>
3 #include <armadillo>
4
5 using namespace std;
6 using namespace arma;
7
8 /** solver.cpp
9  * usage: make run xp=a xofst=b xb=c xw=d tt=e tw=f f=i
10  * where

```

```

11  * xp - x points
12  * xb - x start
13  * xt - x total
14  * xw - wave's peak position
15  * tt - total time
16  * tw - wave's peak time
17  * f - frequency
18  **/
19
20 #define PI 3.14159265359
21
22 // some global variables to be used in the calculations
23 float A, R, t_w/*ave */, x_w/*ave */, freq, freq2, pi2 = PI * PI, pi2_freq2;
24
25 float fxt(float x, float t) {
26     float Dx = x - x_w;
27     float Dx2 = Dx * Dx;
28     float Dt = t - t_w;
29     float Dt2 = Dt * Dt;
30     // printf("%f %f\n", x, t);
31     float result = ((1. - 2. * pi2_freq2 * Dt2) * exp(-pi2_freq2 * Dt2)) * \
32                 ((1. - 2. * pi2_freq2 * Dx2) * exp(-pi2_freq2 * Dx2));
33     return result;
34 }
35
36 int main(int argc, char const *argv[]) {
37
38     int x_points, t_points;
39     float x_ofst, t_ofst, x_t;
40     float x_b/*egin*/, t_t/*otal*/;
41
42     // Creating objects for conversion of arguments
43     stringstream convert0(argv[1]);
44     stringstream convert1(argv[2]);
45     stringstream convert2(argv[3]);
46     stringstream convert3(argv[4]);
47     stringstream convert4(argv[5]);
48     stringstream convert5(argv[6]);
49     stringstream convert6(argv[7]);
50
51     // Putting arguments on variables
52     convert0 >> x_points;
53     convert1 >> x_b;
54     convert2 >> x_t;
55     convert3 >> x_w;
56     convert4 >> t_t;
57     convert5 >> t_w;
58     convert6 >> freq;
59
60     x_ofst = x_t / x_points;
61     t_ofst = .5 * x_ofst;
62     t_points = (int) t_t / t_ofst;
63     freq2 = freq * freq;
64     pi2_freq2 = pi2 * freq2;
65
66     cout << "X points : " << x_points << "\n";
67     cout << "T points : " << t_points << "\n";
68     cout << "X offset : " << x_ofst << "\n";
69     cout << "T offset : " << t_ofst << "\n";
70     cout << "X total : " << x_points * x_ofst << "\n";
71     cout << "T total : " << t_t << "\n";
72     cout << "X wave's pic: " << x_w << "\n";
73     cout << "T wave's pic: " << t_w << "\n";
74
75     mat A(t_points, x_points);
76     A.fill(0.);
77     rowvec parameters(5);
78
79     // Storing parameters in a vector for a file
80     parameters(0) = x_points;
81     parameters(1) = x_ofst;
82     parameters(2) = x_b;
83     parameters(3) = t_t;

```

```

84     parameters(4) = t_points;
85
86     // Calculating function
87     float x_j = x_b;
88     float t_i = 0.;
89
90     float x_ofst_2 = x_ofst * x_ofst;
91     float t_ofst_2 = t_ofst * t_ofst;
92     float termA = t_ofst_2 / x_ofst_2;
93
94     // TODO: verificar se t_i e x_j nao deveriam ser iniciados com t_ofst e \
95     // x_ofst respectivamente
96
97     for (int i = 1; i < t_points - 1; i++) {
98         for (int j = 1; j < x_points - 1; j++) {
99             A(i + 1, j) = termA * (A(i, j - 1) - 2. * A(i, j) + A(i, j + 1)) - A(i - 1, j) +
100             2. * A(i, j) + t_ofst_2 * fxt(x_j, t_i);
101             x_j += x_ofst;
102             t_i += t_ofst;
103             x_j = x_b;
104         }
105
106         parameters.save("data/outputs/pmts.dat", raw_ascii);
107         A.save("data/outputs/A.dat", raw_binary);
108
109         return 0;
110     }

```

Listing A.3: solver.cpp: programa que calcula a propagação de uma onda em uma dimensão.

```

1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np;
5  import matplotlib.pyplot as plt;
6
7  # Loading data
8  A = np.fromfile('data/outputs/A.dat', dtype=float);
9  [x_points, x_ofst, xi, tt, t_points] = np.loadtxt('data/outputs/pmts.dat');
10
11 # Preparing data for plotting
12 X = np.linspace(xi, xi + x_points * x_ofst, num=int(x_points));
13 T = np.linspace(0., tt, num=int(t_points));
14 A = A.reshape(int(x_points), int(t_points)).transpose();
15
16 # TODO: remove this line
17 [B, C] = np.meshgrid(X, T)
18
19 # Preparing plot
20 M = max(abs(A.min()), abs(A.max()))
21 fig, ax = plt.subplots();
22 ax.set_title('Wave in a string');
23 CS = ax.contourf(B, C, A, np.linspace(-M, M, 52), cmap='seismic', vmin=-M, vmax=M);
24 ax.clabel(CS, inline=False, fontsize=10);
25 plt.xlabel('X')
26 plt.ylabel('T')
27
28 cbar = fig.colorbar(CS)
29
30 ax.plot();
31 plt.savefig("data/images/A.png");

```

Listing A.4: viewer.py: script que cria a imagem da propagação da onda no plano  $v \times t$ .

## A.2 Propagação de ondas em duas dimensões

### A.2.1 Interface de linha de comando para o usuário

```

1  #include "stdio.h"

```

```

2 #include "util.h"
3 #include "_2DWave.h"
4
5 #define SPECS_DIR "./specs/"
6
7 using namespace std;
8
9 int main(int argc, char const *argv[]) {
10
11     double Lx, Ly, tMax, Mx, Ny, w, A, Xp, Yp, Tp;
12     int N, aux;
13     char buffer[64];
14
15     aux = scanf("%s", buffer);
16     aux = scanf("%lf", &Lx);
17
18     aux = scanf("%s", buffer);
19     aux = scanf("%lf", &Ly);
20
21     aux = scanf("%s", buffer);
22     aux = scanf("%lf", &tMax);
23
24     aux = scanf("%s", buffer);
25     aux = scanf("%lf", &Mx);
26
27     aux = scanf("%s", buffer);
28     aux = scanf("%lf", &Ny);
29
30     aux = scanf("%s", buffer);
31     aux = scanf("%lf", &w);
32
33     aux = scanf("%s", buffer);
34     aux = scanf("%lf", &A);
35
36     aux = scanf("%s", buffer);
37     aux = scanf("%lf", &Xp);
38
39     aux = scanf("%s", buffer);
40     aux = scanf("%lf", &Yp);
41
42     aux = scanf("%s", buffer);
43     aux = scanf("%lf", &Tp);
44
45     aux = scanf("%s", buffer);
46     aux = scanf("%d", &N);
47
48     double vl[N + 1][3];
49     double it[N][2];
50
51     for (int i = 0; i < N; i++) {
52         aux = scanf("%s", buffer);
53         aux = scanf("%lf %lf %lf", &vl[i][0], &vl[i][1], &vl[i][2]);
54
55         aux = scanf("%s", buffer);
56         aux = scanf("%lf %lf", &it[i][0], &it[i][1]);
57     }
58
59     aux = scanf("%s", buffer);
60     aux = scanf("%lf %lf %lf", &vl[N][0], &vl[N][1], &vl[N][2]);
61
62     int snaps;
63     aux = scanf("%s", buffer);
64     aux = scanf("%d\n", &snaps);
65     if (snaps) {
66         aux = scanf("%s", buffer);
67         aux = scanf("%d", &snaps);
68     }
69
70     int nSrcs;
71     double offset_srcs;
72
73     aux = scanf("%s", buffer);
74     aux = scanf("%d", &nSrcs);

```

```

75
76     aux = scanf("%s", buffer);
77     aux = scanf("%lf", &offset_srcs);
78
79     printf("\n\n");
80     printf("Lenght in x: %lf\n", Lx);
81     printf("Lenght in y: %lf\n", Ly);
82     printf("Lenght in time: %lf\n", tMax);
83     printf("Points in x: %lf\n", Mx);
84     printf("Points in y: %lf\n", Ny);
85     printf("Frequency of the wave: %lf\n", w);
86     printf("Amplitude of the wave: %lf\n", A);
87     printf("Peak's X coordinate: %lf\n", Xp);
88     printf("Peak's Y coordinate: %lf\n", Yp);
89     printf("Peak's time instant: %lf\n", Tp);
90     printf("Number of interfaces/velocities (interfaces + 1): %d\n", N);
91     for (int i = 0; i < N; i++) {
92         printf("vI0 vI1 vI2: %lf %lf %lf\n", vI[i][0], vI[i][1], vI[i][2]);
93         printf("it0 it1: %lf %lf\n", it[i][0], it[i][1]);
94     }
95     printf("vI0 vI1 vI2: %lf %lf %lf\n", vI[N][0], vI[N][1], vI[N][2]);
96     printf("Snaps: %d\n", snaps);
97     printf("\n\n");
98
99     ofstream wOut( SPECS_DIR "wOut.dat", ios::out | ios::binary);
100     _2DWave wv(Lx, Ly, tMax, Mx, Ny, w, A, Xp, Yp, Tp);
101     wv.serialize(&wOut);
102     wOut.close();
103
104     ofstream vOut( SPECS_DIR "vOut.dat", ios::out | ios::binary);
105     for (int i = 0; i < N + 1; i++) {
106         velocity v(vI[i][0], vI[i][1], vI[i][2]);
107         v.serialize(&vOut);
108     }
109     vOut.close();
110
111     ofstream iOut( SPECS_DIR "iOut.dat", ios::out | ios::binary);
112     for (int i = 0; i < N; i++) {
113         interface j(it[i][0], it[i][1]);
114         j.serialize(&iOut);
115     }
116     iOut.close();
117
118     ofstream interfaces_ascii( SPECS_DIR "interfaces.dat", ios::out );
119     for (int i = 0; i < N; i++) {
120         interfaces_ascii << it[i][0] << " " << it[i][1] << endl;
121     }
122     interfaces_ascii.close();
123
124
125     ofstream nInt( SPECS_DIR "nInt.dat", ios::out);
126     nInt << N << '\n';
127     nInt << snaps << '\n';
128     nInt << nSrcs << '\n';
129     nInt << offset_srcs;
130
131     nInt.close();
132
133     return 0;
134 }

```

Listing A.5: cli-main.cpp: programa para gerar as receber as entradas do usuário para o programa serial.

## A.2.2 Bibliotecas criadas

```

1 #include "util.h"
2 #include "interface.h"
3 #include "velocity.h"
4
5 class _2DWave {
6     /**

```

```

7      * TODO: document
8      */
9  private :
10     double Lx, Ly, tMax, Mx, Ny, w, A, Xp, Yp, Tp; // Entries by the user
11     double dx, dy, dt, Ot, R; // Method's internal variables
12
13  public :
14     // TODO: document
15     _2DWave ( double Lx,
16               double Ly,
17               double tMax,
18               double Mx,
19               double Ny,
20               double w,
21               double A,
22               double Xp,
23               double Yp,
24               double Tp);
25
26     double getLx () ;
27     void setLx(double Lx);
28     double getLy () ;
29     void setLy(double Ly);
30     double getTMax () ;
31     void setTMax(double tMax);
32     double getMx () ;
33     void setMx(double Mx);
34     double getNy () ;
35     void setNy(double Ny);
36     double getW () ;
37     void setW(double w);
38     double getA () ;
39     void setA(double A);
40     double getXp () ;
41     void setXp(double Xp);
42     double getYp () ;
43     void setYp(double Yp);
44     double getTp () ;
45     void setTp(double Tp);
46     double getOt () ;
47     void setOt(double Ot);
48     double getDx () ;
49     void setDx(double Dx);
50     double getDy () ;
51     void setDy(double Dy);
52     double getDt () ;
53     void setDt(double Dt);
54
55     /**
56      * Function that returns a bidimensional velocities array.
57      * TODO: redocument
58      */
59     double evaluateFXYT(double X, double Y, double T);
60
61     /** Function that returns the bidimensional velocities matrix
62      * of the medium.
63      * For each medium's point that the wave propagates, we calculate
64      * a velocity based on which layer of the medium this point is
65      * found.
66      *
67      * Receives:      interfaces — a vector of interface objects
68      *                velocities — a vector of velocity objects,
69      *                where each object represents the
70      *                velocity function of its
71      *                respective layer
72      */
73     mat getVelocitiesMatrix( vector<interface> interfaces ,
74                             vector<velocity> velocities );
75
76     void serialize(ofstream *file);
77
78     void deserialize(ifstream *file);

```

79 };

Listing A.6: \_2DWave.h: arquivo-cabeçalho para a classe que representa a onda.

```
1 #include "_2DWave.h"
2
3 // TODO: document
4 _2DWave::_2DWave (double Lx,
5                  double Ly,
6                  double tMax,
7                  double Mx,
8                  double Ny,
9                  double w,
10                 double A,
11                 double Xp,
12                 double Yp,
13                 double Tp) {
14     this->Lx = Lx; // Extension of medium in x
15     this->Ly = Ly; // Depth of the medium in y
16     this->tMax = tMax; // Maximum simulation time
17     this->Mx = (int) Mx; // Number of points in the x axis
18     this->Ny = (int) Ny; // Number of points in the y axis
19     this->w = w; // Dominant frequency omega
20     this->A = A; // Wave's amplitude
21     this->Xp = Xp; // X coordinate of the peak of the pulse
22     this->Yp = Yp; // Y coordinate of the peak of the pulse
23     this->Tp = Tp; // Instant of the peak of the pulse
24     this->dx = Lx / (Mx - 1); // x axis's interval
25     this->dy = Ly / (Ny - 1); // y axis's interval
26     this->dt = this->dy / 10.; // Time step
27     this->Ot = (int) ceil(tMax / this->dt); // Number of instants in the time
28     this->R = PI * PI + w * w; // TODO: explain
29 }
30
31 // TODO: Esses funcoes deveriam ser inline
32
33 double _2DWave::getLx() {
34     return this->Lx;
35 }
36
37 void _2DWave::setLx(double Lx) {
38     this->Lx = Lx;
39 }
40
41 double _2DWave::getLy() {
42     return this->Ly;
43 }
44
45 void _2DWave::setLy(double Ly) {
46     this->Ly = Ly;
47 }
48
49 double _2DWave::getTMax() {
50     return this->tMax;
51 }
52
53 void _2DWave::setTMax(double tMax) {
54     this->tMax = tMax;
55 }
56
57 double _2DWave::getMx() {
58     return this->Mx;
59 }
60
61 void _2DWave::setMx(double Mx) {
62     this->Mx = Mx;
63 }
64
65 double _2DWave::getNy() {
66     return this->Ny;
67 }
68
69 void _2DWave::setNy(double Ny) {
```



```

70     this->Ny = Ny;
71 }
72
73 double _2DWave::getW() {
74     return this->w;
75 }
76
77 void _2DWave::setW(double w) {
78     this->w = w;
79 }
80
81 double _2DWave::getA() {
82     return this->A;
83 }
84
85 void _2DWave::setA(double A) {
86     this->A = A;
87 }
88
89 double _2DWave::getXp() {
90     return this->Xp;
91 }
92
93 void _2DWave::setXp(double Xp) {
94     this->Xp = Xp;
95 }
96
97 double _2DWave::getYp() {
98     return this->Yp;
99 }
100
101 void _2DWave::setYp(double Yp) {
102     this->Yp = Yp;
103 }
104
105 double _2DWave::getTp() {
106     return this->Tp;
107 }
108
109 void _2DWave::setTp(double Tp) {
110     this->Tp = Tp;
111 }
112
113 double _2DWave::getOt() {
114     return this->Ot;
115 }
116
117 void _2DWave::setOt(double Ot) {
118     this->Ot = Ot;
119 }
120
121 double _2DWave::getDx() {
122     return this->dx;
123 }
124
125 void _2DWave::setDx(double dx) {
126     this->dx = dx;
127 }
128
129 double _2DWave::getDy() {
130     return this->dy;
131 }
132
133 void _2DWave::setDy(double dy) {
134     this->dy = dy;
135 }
136
137 double _2DWave::getDt() {
138     return this->dt;
139 }
140
141 void _2DWave::setDt(double dt) {
142     this->dt = dt;

```

```

143 }
144
145 double _2DWave::evaluateFXYT(double x, double y, double t) {
146     // TODO: Refactor
147     /**
148      * Function that returns a bidimensional velocities array.
149      * TODO: redocument
150      */
151
152     // Defining Tterm
153     double tTerm = t - this->Tp;
154
155     if( tTerm > 0.1*this->tMax ) return 0;
156
157     tTerm *= tTerm;
158     tTerm *= this->R;
159
160     // Defining Xterm
161     double xTerm = x - this->Xp;
162     xTerm *= xTerm;
163
164     // Defining Yterm
165     double yTerm = y - this->Yp;
166     yTerm *= yTerm;
167
168     // Defining Dterm
169     double dTerm = xTerm + yTerm;
170
171     if( dTerm > 0.2*this->Lx ) return 0;
172
173     dTerm *= this->R;
174
175     // CAUTION: the minus in front of Tterm and Dterm
176     return this->A * exp(-tTerm) * ((1 - 2 * dTerm) * exp(-dTerm));
177 }
178 }
179
180 mat _2DWave::getVelocitiesMatrix( vector<interface> interfaces ,
181                                   vector<velocity> velocities ) {
182     // TODO: Refactor
183     /** Function that returns the bidimensional velocities matrix
184      * of the medium.
185      * For each medium's point that the wave propagates, we calculate
186      * a velocity based on which layer of the medium this point is
187      * found.
188      *
189      * Receives:      interfaces - a vector of interface objects
190      *                velocities - a vector of velocity objects,
191      *                            where each object represents the
192      *                            velocity function of its
193      *                            respective layer
194      */
195
196     // Instatiating matrix for velocities
197     mat v((int) this->Mx, (int) this->Ny);
198
199     int k = 0;
200
201     // Putting the values on the velocities matrix
202     for (int i = 0; i < this->Mx; i++) {
203
204         double x;
205
206         x = i * this->dx;    // Step in the abscissas
207
208         for (int j = 0, k = 0; j < this->Ny; j++, k = 0) {
209
210             double y;
211
212             y = j * this->dy;    // Step in the ordinates
213
214             // cout << interfaces.size() - 1 << '\n';
215             while ((y > interfaces[k].getY(x)) && (k < interfaces.size()))

```

```

216         {
217             k += 1; // Looking for on which layer the point is
218         }
219
220         // Calculating the velocity in the point
221         v(i, j) = velocities[k].getGradientVelocity(x, y);
222     }
223 }
224
225 return v;
226 }
227
228 /** Function for serialization of velocity objects
229 * Receives:      ofstream object – file that will receive the data
230 *                of the this velocity object
231 */
232 void _2DWave::serialize(ofstream *file) {
233     if((*file).is_open()) {
234         double data[10]; // for writing attributes of the class
235                          // in the file
236         data[0] = this->Lx;
237         data[1] = this->Ly;
238         data[2] = this->tMax;
239         data[3] = this->Mx;
240         data[4] = this->Ny;
241         data[5] = this->w;
242         data[6] = this->A;
243         data[7] = this->Xp;
244         data[8] = this->Yp;
245         data[9] = this->Tp;
246         (*file).write((char *) &data, sizeof(data));
247     } else {
248         printf("Error: The file isn't open.\nAborting...");
249         // exit(1);
250     }
251 }
252
253 /** Function for deserialization of velocity objects
254 * Receives:      ifstream object – file that will supply the data
255 *                for the this velocity object
256 */
257 void _2DWave::deserialize(ifstream *file) {
258     if((*file).is_open()) {
259         double data[10]; // for writing attributes of the class
260                          // in the file
261         (*file).read((char *) &data, sizeof(data));
262         this->Lx = data[0];
263         this->Ly = data[1];
264         this->tMax = data[2];
265         this->Mx = data[3];
266         this->Ny = data[4];
267         this->w = data[5];
268         this->A = data[6];
269         this->Xp = data[7];
270         this->Yp = data[8];
271         this->Tp = data[9];
272         // Redoing the atributions that depend of the data deserialize above
273         this->dx = this->Lx / (this->Mx - 1); // x axis's interval
274         this->dy = this->dx;                // y axis's interval
275         this->dt = this->dy / 2.;
276         // Number of instants in the time
277         this->Ot = (int) ceil(this->tMax / this->dt);
278         this->R = PI * PI + this->w * this->w; // TODO: explain
279     } else {
280         printf("Error: The file isn't open.\nAborting...");
281         // exit(1);
282     }
283 }

```

Listing A.7: \_2DWave.h: arquivo fonte para a classe que representa a onda.

```

1
2 #include <fstream>

```

```

3
4 using namespace std;
5
6 class interface {
7     /**
8      * Defines an interface as a linear function
9      */
10
11     private:
12         double a, b;
13
14     public:
15         interface(double a, double b);
16
17         // Getters
18         // (setters are not made because it's not
19         // supposed that 'a' and 'b' change after defined by
20         // the constructor)
21         double getA();
22
23         double getB();
24
25         // The interface was imagined like a linear function:
26         //  $y = ax + b$ 
27         // So, to get a the height of an point (the y coordinate)
28         // in the interface, we just give a point x to it
29         double getY(double x);
30
31         /** Function for serialization of interface objects
32          * Receives:      ofstream object – file that will receive the data
33          *                                     of the this interface object
34          */
35         void serialize(ofstream *file);
36
37         /** Function for deserialization of interface objects
38          * Receives:      ifstream object – file that will supply the data
39          *                                     for the this interface object
40          */
41         void deserialize(ifstream *file);
42 };

```

Listing A.8: interface.h: arquivo-cabeçalho para a classe que representa as interfaces.

```

1
2 #include "interface.h"
3
4 interface::interface(double a, double b) {
5     /**
6      * Constructor
7      * Receives:      a – angular coefficient
8      *                                     b – independent term
9      */
10     this->a = a;
11     this->b = b;
12 }
13
14 // Getters
15 // (setters are not made because it's not
16 // supposed that 'a' and 'b' change after defined by
17 // the constructor)
18 double interface::getA() {
19     return this->a;
20 };
21
22 double interface::getB() {
23     return this->b;
24 };
25
26 // The interface was imagined like a linear function:
27 //  $y = ax + b$ 
28 // So, to get a the height of an point (the y coordinate)
29 // in the interface, we just give a point x to it
30 double interface::getY(double x) {

```

```

31  /**
32  * Function definition
33  * Receives:    x – point's coordinate in the abscissas
34  * Returns:     y – point's coordinate in the ordinates
35  */
36  return this->a * x + this->b;
37  }
38
39  /** Function for serialization of interface objects
40  * Receives:    ofstream object – file that will receive the data
41  *              of the this interface object
42  */
43  void interface::serialize(ofstream *file) {
44      if((*file).is_open()) {
45          double data[2]; // for writing attributes of the class
46                          // in the file
47          data[0] = this->a; data[1] = this->b;
48          (*file).write((char *) &data, sizeof(data));
49      } else {
50          printf("Error: The file isn't open.\nAborting...");
51          // exit(1);
52      }
53  }
54
55  /** Function for deserialization of interface objects
56  * Receives:    ifstream object – file that will supply the data
57  *              for the this interface object
58  */
59  void interface::deserialize(ifstream *file) {
60      if((*file).is_open()) {
61          double data[2];
62          (*file).read((char *) &data, sizeof(data));
63          this->a = data[0]; this->b = data[1];
64      } else {
65          printf("The file isn't open.\nAborting...");
66          // exit(1);
67      }
68  }

```

Listing A.9: interface.cpp: arquivo-cabeçalho para a classe que representa as interfaces.

```

1
2 #include <fstream>
3
4 using namespace std;
5
6 class velocity {
7     /**
8     * Defines velocity as a quadratic function of the form
9     *               $v(x, y) = ax + by + c$ 
10    */
11    private:
12        double a, b, c;
13
14    public:
15        velocity(double a, double b, double c);
16
17        // Getters
18        // (setters are not made because it's not
19        // supposed that 'a' and 'b' change after defined by
20        // the constructor)
21        double getA();
22
23        double getB();
24
25        double getC();
26
27        // TODO: document
28        double getGradientVelocity(double x, double y);
29
30        void serialize(ofstream *file);
31
32        void deserialize(ifstream *file);

```

```

33
34 };

```

Listing A.10: velocity.h: arquivo-cabeçalho para a classe que representa as velocidades das camadas.

```

1
2 #include "velocity.h"
3
4 velocity::velocity(double a, double b, double c) {
5     /**
6      * Constructor
7      * Receives:      a - term 'a' of the velocity function
8      *                b - term 'b' of the velocity function
9      *                c - term 'c' of the velocity function
10     */
11     this->a = a;
12     this->b = b;
13     this->c = c;
14 }
15
16 // Getters
17 // (setters are not made because it's not
18 // supposed that 'a' and 'b' change after defined by
19 // the constructor)
20
21 double velocity::getA() {
22     return this->a;
23 }
24
25 double velocity::getB() {
26     return this->b;
27 }
28
29 double velocity::getC() {
30     return this->c;
31 }
32
33 // TODO: document
34 double velocity::getGradientVelocity(double x, double y) {
35     return this->a * x + this->b * y + this->c;
36 }
37
38 /** Function for serialization of velocity objects
39 * Receives:      ofstream object - file that will receive the data
40 *                of the this velocity object
41 */
42 void velocity::serialize(ofstream *file) {
43     if((*file).is_open()) {
44         double data[3]; // for writing attributes of the class
45                        // in the file
46         data[0] = this->a; data[1] = this->b; data[2] = this->c;
47         (*file).write((char *) &data, sizeof(data));
48     } else {
49         printf("Error: The file isn't open.\nAborting...");
50         // exit(1);
51     }
52 }
53
54 /** Function for deserialization of velocity objects
55 * Receives:      ifstream object - file that will supply the data
56 *                for the this velocity object
57 */
58 void velocity::deserialize(ifstream *file) {
59     if((*file).is_open()) {
60         double data[3];
61         (*file).read((char *) &data, sizeof(data));
62         this->a = data[0]; this->b = data[1]; this->c = data[2];
63     } else {
64         printf("The file isn't open.\nAborting...");
65         // exit(1);
66     }
67 }

```

67 }

Listing A.11: velocity.cpp: arquivo fonte para a classe que representa as velocidades das camadas.

```
1 #include <cmath>
2 #include <vector>
3 #include <queue>
4 #include <iostream>
5 #include <iomanip>
6 #include <fstream>
7 #include <limits>
8 #include <armadillo>
9
10 using namespace arma;
11 using namespace std;
12
13 #define PI 3.141592653589793238463
```

Listing A.12: util.h: arquivo-cabeçalho para a definição das bibliotecas de sistema e constantes a serem utilizadas.

### A.2.3 Ferramentas

```
1 #!/usr/bin/python2.7
2 #!-*- coding: utf8 -*-
3
4 import sys
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import re
8 import glob
9
10 M = -1
11
12 # Set fized amplitude value
13 if( len(sys.argv) > 1 ):
14     M = float(sys.argv[1])
15
16 # Carregando arrays a partir de arquivos
17 X = np.loadtxt('./specs/X.dat')
18 Y = np.loadtxt('./specs/Y.dat')
19 params = np.loadtxt('./specs/output.dat')
20 inter = np.loadtxt('./specs/interfaces.dat', ndmin=2 )
21
22 xx = X[(0, -1)]
23
24 # Criando figura
25 fig = plt.figure()
26
27 # Adicionando eixos
28 fig.add_axes()
29
30 # Criando eixo para plotagem
31 ax = fig.add_subplot(111)
32
33 # Formando base para o plot (?)
34 [Y, X] = np.meshgrid(Y, X)
35
36 # Colocando limites no plot
37 plt.xlim(0., params[4])
38 plt.ylim(0., params[5])
39
40 # Invertendo o eixo y
41 plt.gca().invert_yaxis()
42
43 # Search for all snapshot files
44 dat_files = sorted( glob.glob( "./snaps/*.dat" ) )
45
46 add_colorbar = True
47
```

```

48 # Create an image for each snapshot
49 for dat_file in dat_files:
50
51     Z = np.loadtxt( dat_file )
52
53     # Amplitude for plotting
54     if( M < 0 ):
55         M = 0.8 * max( abs(Z.min()), abs(Z.max()) )
56
57     png_file = dat_file.replace( ".dat", ".png" ).replace( "snaps/", "snaps/snap_" )
58
59     print "Creating file %s"%( png_file )
60
61     # Criando plot
62     plot = ax.contourf( X, Y, Z, np.linspace(-M,M,51), cmap=plt.cm.seismic, vmin=-M, vmax=M )
63
64     # Desenhando a barra de cores
65     if( add_colorbar ):
66         plt.colorbar( plot )
67         add_colorbar = False
68
69     # Draw interfaces
70     plt.hold(True)
71
72     for ii in range(inter.shape[0]):
73         plt.plot( xx, inter[ii,0]*xx+inter[ii,1], '-k' )
74
75     plt.hold(False)
76
77     # Salvando a imagem
78     plt.savefig( png_file )

```

Listing A.13: plot\_snapshots.py: *script* para geração dos instantâneos (*snapshots*) da propagação da onda.

```

1 #include "util.h"
2 #include "_2DWave.h"
3
4 #define SPECS_DIR "./specs/"
5 #define VEL_DIR   "./velocity/"
6
7 /**
8  * This program has the purpose of generate the velocities model.
9  * That consists in a matrix with the values of velocity of each point that
10  * the matrix aims to represent.
11  */
12
13 int main(int argc, char const *argv[]) {
14
15     // Getting external data
16     ifstream wf ( SPECS_DIR "wOut.dat", ios::in | ios::binary);
17     ifstream vf ( SPECS_DIR "vOut.dat", ios::in | ios::binary);
18     ifstream ifl( SPECS_DIR "iOut.dat", ios::in | ios::binary);
19
20     vector<interface> it;
21     vector<velocity> vl;
22     ifstream nInt( SPECS_DIR "nInt.dat", ios::in);
23     int N;
24     nInt >> N;
25     nInt.close();
26     for (int i = 0; i < N; i++) {
27         interface auxI(0., 0.);
28         velocity auxV(0., 0., 0.);
29         auxI.deserialize(&ifl);
30         auxV.deserialize(&vf);
31         it.push_back(auxI);
32         vl.push_back(auxV);
33     }
34     velocity auxV(0., 0., 0.);
35     auxV.deserialize(&vf);
36     vl.push_back(auxV);
37
38     _2DWave wv(0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.);

```



```

39
40     ww.deserialize(&wf);
41     wf.close();
42     vf.close();
43     ifl.close();
44
45     // Creating velocities matrix
46     mat velocities((int) ww.getMx(), (int) ww.getNy());
47     velocities = ww.getVelocitiesMatrix(it, vl);
48
49     // Saving velocities matrix
50     velocities.save( VEL_DIR "velocity.dat", raw_ascii);
51
52     return 0;
53 }

```

Listing A.14: gen-velocities-model.cpp: *script* para geração do modelo de velocidades.

```

1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np
5  import matplotlib.pyplot as plt
6
7  # Carregando arrays a partir de arquivos
8  X = np.loadtxt('./specs/X.dat')
9  Y = np.loadtxt('./specs/Y.dat')
10 V = np.loadtxt('./velocity/velocity.dat')
11
12 # Criando figura
13 fig = plt.figure()
14
15 # Adicionando eixos
16 fig.add_axes()
17
18 # Criando eixo para plotagem
19 ax = fig.add_subplot(111)
20
21 # Formando base para o plot (?)
22 [Y, X] = np.meshgrid(Y,X)
23
24 # TODO: Os pontos laterais devem ser recebidos atraves do userInterface.py
25 # markers = np.array([(0., 0.), (1.5, 1.9), (3., 2.3), (4., 3.8), (6.5, 8.)], dtype=(float, 2))
26
27 # Invertendo o eixo y
28 plt.gca().invert_yaxis()
29
30 # Buscando o maior valor de U para fixar o eixo em z
31 M = np.ceil( V.max() )
32
33 # Criando plot
34 plot = ax.contourf(X, Y, V, np.linspace(0,M,50), cmap=plt.cm.rainbow_r )
35
36 # Desenhando a barra de cores
37 cbar = plt.colorbar(plot)
38 cbar.ax.invert_yaxis()
39
40 # Plotando as Camadas
41 # for i in range(0, markers.size / 2):
42 #     # TODO: Trocar o 15. por uma variavel passada por parametro
43 #     ax.plot((0., 15.), (markers[i][0], markers[i][1]), '-k')
44
45 # Configurando o titulo do grafico e suas legendas
46 ax.set(title='Velocity', ylabel='Y', xlabel='X')
47
48 # Definindo caminho da plotagem
49 caminho = './velocity/velocity.png'
50
51 # Salvando a imagem

```

```
52 plt.savefig(caminho)
```

Listing A.15: plot\_velocity.py: *script* para geração da imagem do modelo de velocidades criado.

```
1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np;
5  import matplotlib.pyplot as plt;
6
7  # Loading arrays from files
8  traces = np.loadtxt('./traces/traces.dat');
9  T       = np.loadtxt('./specs/T.dat');
10 params = np.loadtxt('./output.dat');
11
12 traces = traces.transpose();
13
14 # Criando figura
15 fig = plt.figure();
16
17 # Adicionando eixos
18 fig.add_axes();
19
20 # Creating axis for plotting
21 ax = fig.add_subplot(111);
22
23 # Editing details of plotting
24 title = 'Traces';
25 ax.set(title=title, ylabel='T', xlabel='Trace');
26
27 plt.hold(1);
28
29 for i in range(int(params[6])):
30     ax.plot(T, traces[i, :]);
31     plt.savefig('./traces/' + str(i));
32     ax.clear();
```

Listing A.16: tracer.py: *script* para geração dos traços resultantes da simulação.

```
1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np;
5
6  # Loading arrays from files
7  traces = np.loadtxt('./traces/traces.dat');
8
9  # Number of traces and samples
10 Nt = traces.shape[0];
11 Ns = traces.shape[1];
12
13 # Writing the RSF header file
14
15 header = open( './traces/traces.rsf', "w+" )
16
17 header.write( 'tracer\n' )
18 header.write( 'data_format="native_float"\n' )
19 header.write( 'in="./traces/traces.rsf@"\n' )
20 header.write( 'n1=%d\n'%( Nt ) )
21 header.write( 'n2=%d\n'%( Ns ) )
22
23 header.close()
24
25 np.transpose(traces.astype('float32')).tofile( './traces/traces.rsf@' );
```

Listing A.17: traces2rsf.py: *script* para conversão dos traços resultantes da simulação para o formato *.rsf* usado pelo Madagascar.

```
1  #!/bin/bash
2
```

```

3 # Produces wiggle plot of traces
4 sfwiggle < ./traces/traces.rsrf \
5     transp=y \
6     yreverse=y \
7     plotcol=7 \
8     zplot=.15 \
9     poly=y \
10    xmax=10 \
11    title='' \
12    nltic=0 \
13    > ./traces/traces.vpl
14
15 # Convert vpl to png
16 vpconvert ./traces/traces.vpl \
17     format=png \
18     > ./traces/traces.png

```

Listing A.18: plot\_traces.sh: *script* para geração da imagem dos traços pelo Madagascar.

## A.2.4 Código principal

```

1 #include "util.h"
2 #include "_2DWave.h"
3
4 #define SPECS_DIR    "./specs/"
5 #define VEL_DIR      "./velocity/"
6 #define SNAPS_DIR    "./snaps/"
7 #define TRACES_DIR   "./traces/"
8
9 /*
10  *   This program aims to solve the bidimensional wave equation
11  *   by the finite differences method. This methods will be im-
12  *   plemented with the help of Eigen library, that provides the
13  *   necessary tools of the Linear Algebra, mainly the vectors
14  *   and matrices that will be used to store and manipulate data,
15  *   as well the methods that are necessary to this.
16  */
17
18 int main () {
19
20     // Getting external data
21     ifstream wf ( SPECS_DIR "wOut.dat", ios::in | ios::binary);
22     ifstream vf ( SPECS_DIR "vOut.dat", ios::in | ios::binary);
23     ifstream ifl( SPECS_DIR "iOut.dat", ios::in | ios::binary);
24
25     vector<interface> it;
26     vector<velocity> vl;
27     ifstream nInt( SPECS_DIR "nInt.dat", ios::in);
28     int N;
29     nInt >> N;
30     for (int i = 0; i < N; i++) {
31         interface auxI(0., 0.);
32         velocity auxV(0., 0., 0.);
33         auxI.deserialize(&ifl);
34         auxV.deserialize(&vf);
35         it.push_back(auxI);
36         vl.push_back(auxV);
37     }
38     velocity auxV(0., 0., 0.);
39     auxV.deserialize(&vf);
40     vl.push_back(auxV);
41
42     _2DWave ww(0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.);
43
44     ww.deserialize(&wf);
45
46     wf.close(); vf.close(); ifl.close();
47
48     // Creating velocities matrix
49     mat v;
50     v.load( VEL_DIR "velocity.dat", raw_ascii);
51

```

```

52 // Compute 1/v^2 only once for all steps
53 for (int i = 1; i < ww.getMx() - 1; i++) {
54     for (int j = 1; j < ww.getNy() - 1; j++) {
55         v(i,j) = 1.0 / ( v(i,j) * v(i,j) );
56     }
57 }
58
59 // Creating arrays for space dimensions X e Y and for time
60 vec X = linspace<vec>(0., ww.getLx(), ww.getMx());
61 vec Y = linspace<vec>(0., ww.getLy(), ww.getNy());
62 vec T = linspace<vec>(0., ww.getTMax(), ww.getOt());
63
64 // Saving arrays of dimensions in space
65 X.save( SPECS_DIR "X.dat", raw_ascii);
66 Y.save( SPECS_DIR "Y.dat", raw_ascii);
67 T.save( SPECS_DIR "T.dat", raw_ascii);
68
69 nInt >> N; // reusing N
70 queue<int> numSnaps;
71 if (N > 0) { // get the frames's numbers that must be saved as
72     // snapshots
73     int h = (int) ww.getOt() / N;
74     for (int i = 1; h * i < ww.getOt(); i++) { numSnaps.push(h * i); }
75 }
76
77 // Receiving data about receivers
78 int nRecv;
79 double offset_Recv;
80 nInt >> nRecv;
81 nInt >> offset_Recv;
82
83 nInt.close();
84
85 // Matrix to armazenate traces
86 mat traces((int) ww.getOt(), nRecv);
87 traces.fill(0.);
88
89 // the number of points between receivers
90 int offset_Recv_int = ww.getMx() / nRecv;
91
92 // Creating 3 matrices for application of the Finite Difference Method (FDM)
93 mat U1((int) ww.getMx(), (int) ww.getNy());
94 mat U2((int) ww.getMx(), (int) ww.getNy());
95 mat U3((int) ww.getMx(), (int) ww.getNy());
96
97 // Filling the matrices with zeros
98 U1.fill(0.);
99 U2.fill(0.);
100 U3.fill(0.);
101
102 // Creating a queue for administrating the arrays of FDM
103 queue<mat> U;
104 U.push(U1); U.push(U2); U.push(U3);
105
106 double dt2 = ww.getDt() * ww.getDt();
107 double dt2dx2 = dt2 / ( ww.getDx() * ww.getDx() );
108 double dt2dy2 = dt2 / ( ww.getDy() * ww.getDy() );
109
110 for (int k = 1; k < ww.getOt() - 1; k++) {
111
112     // Getting the matrices from the queue
113     U1 = U.front(); U.pop(); // t + 1
114     U2 = U.front(); U.pop(); // t
115     U3 = U.front(); U.pop(); // t - 1
116
117     // Doing FDM calculations
118     for (int i = 1; i < ww.getMx() - 1; i++) {
119         for (int j = 1; j < ww.getNy() - 1; j++) {
120             U1(i,j) = v(i,j) * ( dt2dx2 * ( U2(i+1,j) - 2.0*U2(i,j) + U2(i-1,j) )
121                 + dt2dy2 * ( U2(i,j+1) - 2.0*U2(i,j) + U2(i,j-1) ) )
122                 + dt2 * ww.evaluateFXYT( X(i), Y(j), T(k) )
123                 + 2.0 * U2(i,j) - U3(i,j);
124         }
125     }
126 }

```

```

125     }
126
127     // Registering traces
128     for (int ii = 1; ii * offset_Recv_int < size(U1)(0) && ii < nRecv; ii++) {
129         traces(k, ii) = U1(ii * offset_Recv_int, 1);
130     }
131
132     // if frame k is one of the required for the snaps
133     if (N > 0 && k == numSnaps.front()) {
134         ostringstream oss;
135         int save = numSnaps.front();
136         oss << SNAPS_DIR << setfill('0') << setw(5) << save << ".dat";
137         numSnaps.pop(); numSnaps.push(save);
138         U1.save(oss.str(), raw_ascii);
139     }
140
141     // Putting the matrices again in the queue
142     U.push(U3); U.push(U1); U.push(U2);
143 }
144
145 vec d(7);
146 d(0) = (int) wv.getMx();
147 d(1) = (int) wv.getNy();
148 d(2) = (int) wv.getOt();
149 d(3) = N;
150 d(4) = wv.getLx();
151 d(5) = wv.getLy();
152 d(6) = nRecv;
153
154 d.save( SPECS_DIR "output.dat", raw_ascii);
155
156 traces.save( TRACES_DIR "traces.dat", raw_ascii);
157
158 return 0;
159
160 }

```

Listing A.19: main-reflect-bound.cpp: código fonte que realiza os cálculos da propagação da onda.

# Apêndice B

## Códigos falsos sobre OpenMP

### B.1 Cálculo da função de um paraboloide

```
1 #include <iostream>
2 #include <armadillo>
3 #include <stdio.h>
4 #include <omp.h>
5
6 using namespace std;
7 using namespace arma;
8
9 /* Args
10  * x_points - number of points of the domain in the x axis
11  * x_b      - beggining of the domain in x
12  * x_e      - end of the domain in x
13  * y_points - number of points of the domain in the y axis
14  * y_b      - beggining of the domain in y
15  * y_e      - end of the domain in y
16 */
17
18 int main(int argc, char const *argv[]) {
19
20     int x_points, y_points;
21     float x_b, y_b;
22     float x_e, y_e;
23
24     // Creating objects for conversion of arguments
25     stringstream convert0(argv[1]);
26     stringstream convert1(argv[2]);
27     stringstream convert2(argv[3]);
28     stringstream convert3(argv[4]);
29     stringstream convert4(argv[5]);
30     stringstream convert5(argv[6]);
31
32     // Putting arguments on variables
33     convert0 >> x_points;
34     convert1 >> x_b;
35     convert2 >> x_e;
36     convert3 >> y_points;
37     convert4 >> y_b;
38     convert5 >> y_e;
39
40     cout << "X points: " << x_points << "\n";
41     cout << "X beggining: " << x_b << "\n";
42     cout << "X end: " << x_e << "\n";
43     cout << "Y points: " << y_points << "\n";
44     cout << "Y beggining: " << y_b << "\n";
45     cout << "X end: " << x_e << "\n";
46
47     mat A(x_points, y_points);
48     rowvec parameters(6);
49
50     // determining the space between points in x and y
```

```

51     float x_ofst = (x_e - x_b) / x_points;
52     float y_ofst = (y_e - y_b) / y_points;
53
54     // Storing parameters in a vector for a file
55     parameters(0) = x_points; parameters(1) = x_ofst; parameters(2) = x_b;
56     parameters(3) = y_points; parameters(4) = y_ofst; parameters(5) = y_b;
57
58     // Calculating function
59     float x_i = x_b;
60     float y_i = y_b;
61
62     int i, j;
63     #pragma omp parallel for default(none) shared(A, x_b, y_b, x_ofst, y_ofst, x_points,
64     y_points) private(i, j, x_i, y_i)
65     for (i = 0; i < x_points; i++) {
66         x_i = x_b + i * x_ofst;
67         y_i = y_b;
68         for (j = 0; j < y_points; j++) {
69             A(i, j) = 2. * x_i * x_i + y_i * y_i;
70             y_i += y_ofst;
71         }
72
73     parameters.save("data/outputs/pmts.dat", raw_ascii);
74     A.save("data/outputs/A.dat", raw_binary);
75
76     return 0;
77 }

```

Listing B.1: solver.cpp: código fonte que realiza os cálculos da função de um parabolóide com o auxílio da OpenMP.

```

1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np;
5  import matplotlib.pyplot as plt;
6
7  # Loading data
8  A = np.fromfile('data/outputs/A.dat', dtype=float)
9  [x_points, x_ofst, xi, y_points, y_ofst, yi] = np.loadtxt('data/outputs/pmts.dat')
10
11 # Preparing data for plotting
12 X = np.linspace(xi, xi + x_points * x_ofst, num=int(x_points))
13 Y = np.linspace(yi, yi + y_points * y_ofst, num=int(y_points))
14 A = A.reshape(int(x_points), int(y_points))
15
16 [B, C] = np.meshgrid(X, Y)
17
18 # Preparing plot
19 fig, ax = plt.subplots()
20 CS = ax.contourf(B, C, A.transpose(), 20, cmap='RdGy')
21 ax.clabel(CS, inline=False, fontsize=10)
22 ax.set_title('z = 2x^2 + y^2')
23
24 ax.plot()
25 plt.savefig('data/images/A.png')

```

Listing B.2: viewer.py: código fonte que gera a imagem resultante dos cálculos da função de um parabolóide.

## B.2 Propagação de onda em uma dimensão

# Apêndice C

## Códigos falsos sobre Pthreads

### C.1 Cálculo da função de um parabolóide

```
1 #include <iostream>
2 #include <stdio.h>
3 #include <armadillo>
4 #include <pthread.h>
5
6 using namespace std;
7 using namespace arma;
8
9 #define NUM_THREADS 4
10 #define PI 3.14159265359
11
12 typedef struct {
13     mat *A;
14     int num_p_x_sub_mtx, num_p_y_sub_mtx_start, num_p_y_sub_mtx_end;
15     float x_start, y_start;
16     float x_ofst, y_ofst;
17 } kit;
18
19 void *calculate(void *p) {
20
21     kit *m = ((kit *) p);
22
23     float x = m->x_start, y = m->y_start;
24
25     printf("%d %d\n", m->num_p_x_sub_mtx, m->num_p_y_sub_mtx_end);
26
27     for (int i = 0; i < m->num_p_x_sub_mtx; i++) {
28         for (int j = m->num_p_y_sub_mtx_start; j < m->num_p_y_sub_mtx_end; j++) {
29             (*(m->A))(i, j) = 2. * x * x + y * y;
30             y += m->y_ofst;
31             // (*(m->A))(i, j) = sin(exp(x)) * cos(log(y));
32             // (*(m->A))(i, j) = sin(PI * (x * x + y * y) / (2. * 50. * 50.));
33             // z = sqrt(x^2 + y^2 - 4)
34         }
35         x += m->x_ofst;
36         y = m->y_start;
37     }
38
39     pthread_exit(NULL);
40 }
41
42
43 int main(int argc, char const *argv[]) {
44
45     int x_points, y_points;
46     float x_ofst, y_ofst;
47     float x, y;
48
49     // Creating objects for conversion of arguments
50     stringstream convert0(argv[1]);
```



```

51     stringstream convert1(argv[2]);
52     stringstream convert2(argv[3]);
53     stringstream convert3(argv[4]);
54     stringstream convert4(argv[5]);
55     stringstream convert5(argv[6]);
56
57     // Putting arguments on variables
58     convert0 >> x_points;
59     convert1 >> x_ofst;
60     convert2 >> x;
61     convert3 >> y_points;
62     convert4 >> y_ofst;
63     convert5 >> y;
64
65     cout << "X points: " << x_points << "\n";
66     cout << "X offset: " << x_ofst << "\n";
67     cout << "Y points: " << y_points << "\n";
68     cout << "Y offset: " << y_ofst << "\n";
69
70     mat A(x_points, y_points);
71     rowvec parameters(6);
72
73     // Storing parameters in a vector for a file
74     parameters(0) = x_points; parameters(1) = x_ofst; parameters(2) = x;
75     parameters(3) = y_points; parameters(4) = y_ofst; parameters(5) = y;
76
77     // Initing Pthreads tools
78     pthread_t threads[NUM_THREADS];
79     long t;
80
81     // Defining threads as joinable threads
82     pthread_attr_t attr;
83     pthread_attr_init(&attr);
84     pthread_attr_setdetachstate(&attr, PTHREAD_CREATE_JOINABLE);
85
86     // Creating kit for calculate()
87     kit m[NUM_THREADS];
88
89     for (int i = 0; i < NUM_THREADS - 1; i++) {
90         m[i].A = &A;
91         m[i].x_ofst = x_ofst;
92         m[i].y_ofst = y_ofst;
93         m[i].x_start = x;
94         m[i].y_start = y + i * (y_points / NUM_THREADS) * y_ofst;
95         m[i].num_p_x_sub_mtx = x_points;
96         m[i].num_p_y_sub_mtx_start = i * ceil(y_points / NUM_THREADS);
97         m[i].num_p_y_sub_mtx_end = (i + 1) * ceil(y_points / NUM_THREADS);
98     }
99
100    m[NUM_THREADS - 1].A = &A;
101    m[NUM_THREADS - 1].x_ofst = x_ofst;
102    m[NUM_THREADS - 1].y_ofst = y_ofst;
103    m[NUM_THREADS - 1].x_start = x;
104    m[NUM_THREADS - 1].y_start = y + (NUM_THREADS - 1) * (y_points / NUM_THREADS) * y_ofst;
105    m[NUM_THREADS - 1].num_p_x_sub_mtx = x_points;
106    m[NUM_THREADS - 1].num_p_y_sub_mtx_start = (NUM_THREADS - 1) * ceil(y_points / NUM_THREADS);
107    m[NUM_THREADS - 1].num_p_y_sub_mtx_end = y_points;
108
109    // Calculating function
110    for (t = 0; t < NUM_THREADS; t++) {
111        if (pthread_create(&threads[t], &attr, calculate, (void *) &m[t])) {
112            printf("error: creation of thread %ld failed. Aborting...\n", t);
113            exit(-1);
114        }
115    }
116
117    // Joining threads
118    void *status;
119    for (t = 0; t < NUM_THREADS; t++) {
120        if (pthread_join(threads[t], &status)) {
121            printf("error: joining of thread %ld failed. Aborting...\n", t);
122            exit(-1);

```

```

123     }
124 }
125
126 // cout << size(A);
127
128 parameters.save("data/outputs/pmts.dat", raw_ascii);
129 A.save("data/outputs/A.dat", raw_binary);
130
131 pthread_exit(NULL);
132
133 return 0;
134 }

```

Listing C.1: solver.cpp: código fonte que realiza os cálculos da função de um parabolóide com o auxílio da Pthreads.

```

1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np;
5  import matplotlib.pyplot as plt;
6
7  # Loading data
8  A = np.fromfile('data/outputs/A.dat', dtype=float);
9  [x_points, x_ofst, xi, y_points, y_ofst, yi] = np.loadtxt('data/outputs/pmts.dat');
10
11 # Preparing data for plotting
12 X = np.linspace(xi, xi + x_points * x_ofst, x_points);
13 Y = np.linspace(yi, yi + y_points * y_ofst, y_points);
14 # print X
15 # print Y
16 # print A.shape;
17 A = A.reshape(int(x_points), int(y_points));
18
19 [B, C] = np.meshgrid(X, Y)
20
21 # Preparing plot
22 fig, ax = plt.subplots();
23 CS = ax.contourf(B, C, A.transpose(), 20, cmap='RdGy');
24 ax.clabel(CS, inline=False, fontsize=10);
25 ax.set_title('z = x^2 + y^2');
26
27 # plt.xlim(-2, 2);
28 # plt.ylim(-2, 2);
29 ax.plot();
30 plt.savefig("data/images/A.png");

```

Listing C.2: viewer.py: código fonte que gera a imagem resultante dos cálculos da função de um parabolóide.

## C.2 Propagação de onda em uma dimensão

```

1  #include <iostream>
2  #include <stdio.h>
3  #include <armadillo>
4  #include <queue>
5  #include <pthread.h>
6
7  using namespace std;
8  using namespace arma;
9
10 #define NUM_THREADS 6
11 #define PI 3.14159265359
12
13 typedef struct kit_t {
14     int thread_id;
15     mat *A;
16     int x_pt_start,
17         x_pt_end,
18     i;

```

```

19     float x_j,
20           t_i,
21           x_ofst;
22 } KIT_t;
23
24 // some global variables to be used in the calculations
25 float A,
26       R,
27       t_w/*ave */ ,
28       x_w/*ave */ ,
29       pi2_freq2 ,
30       x_ofst_2 ,
31       t_ofst_2 ,
32       termA;
33
34 float fxt(float x, float t) {
35     float Dx = x - x_w;
36     float Dx2 = Dx * Dx;
37     float Dt = t - t_w;
38     float Dt2 = Dt * Dt;
39
40     float result = ((1. - 2. * pi2_freq2 * Dt2) * exp(-pi2_freq2 * Dt2)) * \
41                   ((1. - 2. * pi2_freq2 * Dx2) * exp(-pi2_freq2 * Dx2));
42
43     return result;
44 }
45
46 void *eval(void *void_kit) {
47     KIT_t *kit = (KIT_t *) void_kit;
48
49     int thread_id = kit->thread_id ;
50     mat *A = kit->A ;
51     int x_pt_start = kit->x_pt_start;
52     int x_pt_end = kit->x_pt_end ;
53     float x_j = kit->x_j ;
54     float t_i = kit->t_i ;
55
56     float x_ofst = kit->x_ofst ;
57     int i = 1 ;
58
59     for (int j = x_pt_start; j <= x_pt_end; j++) {
60         (*A)(i + 1, j) = termA * ((*A)(i, j - 1) - 2. * (*A)(i, j) + \
61             (*A)(i, j + 1)) - (*A)(i - 1, j) + 2. * (*A)(i, j) + t_ofst_2 * \
62             fxt(x_j, t_i);
63         x_j += x_ofst;
64     }
65
66     pthread_exit(NULL);
67 }
68
69 int main(int argc, char const *argv[]) {
70
71     int x_points , t_points ;
72     float x_ofst , t_ofst , x_t;
73     float x_b/*egin*/ , t_t/*otal*/;
74
75     // auxiliary variables
76     float freq ,
77           freq2 ,
78           pi2 = PI * PI;
79
80     // Creating objects for conversion of arguments
81     stringstream convert0(argv[1]);
82     stringstream convert1(argv[2]);
83     stringstream convert2(argv[3]);
84     stringstream convert3(argv[4]);
85     stringstream convert4(argv[5]);
86     stringstream convert5(argv[6]);
87     stringstream convert6(argv[7]);
88
89     // Putting arguments on variables
90     convert0 >> x_points;
91     convert1 >> x_b;

```

```

92  convert2 >> x_t;
93  convert3 >> x_w;
94  convert4 >> t_t;
95  convert5 >> t_w;
96  convert6 >> freq;
97
98  x_ofst    = (x_t - x_b) / x_points;
99  t_ofst    = .5 * x_ofst;
100 t_points   = (int) t_t / t_ofst;
101 freq2      = freq * freq;
102 pi2_freq2  = pi2 * freq2;
103
104 cout << "X points      : " << x_points          << "\n";
105 cout << "T points      : " << t_points          << "\n";
106 cout << "X offset      : " << x_ofst           << "\n";
107 cout << "T offset      : " << t_ofst           << "\n";
108 cout << "X total        : " << x_points * x_ofst << "\n";
109 cout << "T total        : " << t_t             << "\n";
110 cout << "X wave's pic: " << x_w              << "\n";
111 cout << "T wave's pic: " << t_w              << "\n";
112
113 // creating the matrix for calculations and a row vector for saving
114 // parameters
115 mat B(t_points , x_points);
116 B.fill(0.);
117 mat A(3, x_points);
118 A.fill(0.);
119 rowvec parameters(5);
120
121 // Storing parameters in a vector for a file
122 parameters(0) = x_points;
123 parameters(1) = x_ofst;
124 parameters(2) = x_b;
125 parameters(3) = t_t;
126 parameters(4) = t_points;
127
128 // Calculating function
129 float x_j = x_b;
130 float t_i = 0.;
131
132 // setting some calculation variables
133 x_ofst_2 = x_ofst * x_ofst;
134 t_ofst_2 = t_ofst * t_ofst;
135 termA = t_ofst_2 / x_ofst_2;
136
137 // creating threads
138 pthread_t threads[NUM_THREADS];
139 pthread_attr_t attr;
140
141 // creating kits for the threads
142 KIT_t kits[NUM_THREADS];
143
144 // initializing pthreads attribute and setting threads as joinable
145 pthread_attr_init(&attr);
146 pthread_attr_setdetachstate(&attr , PTHREAD_CREATE_JOINABLE);
147
148 // determining how many points each thread will have to take care of
149 int x_pts_per_thread = (x_points - 2) / NUM_THREADS;
150
151 // distributing information for kits
152 for(int i = 0; i < NUM_THREADS - 1; i++) {
153     kits[i].thread_id = i ;
154     kits[i].A          = &A ;
155     kits[i].x_pt_start = i * x_pts_per_thread + 1 ;
156     kits[i].x_pt_end   = i * x_pts_per_thread + x_pts_per_thread;
157     kits[i].x_j         = x_ofst * x_pts_per_thread * i ;
158     kits[i].t_i         = t_ofst ;
159     kits[i].x_ofst      = x_ofst ;
160 }
161 kits[NUM_THREADS - 1].thread_id = NUM_THREADS - 1 ;
162 kits[NUM_THREADS - 1].A         = &A ;
163 kits[NUM_THREADS - 1].x_pt_start = (NUM_THREADS - 1) * x_pts_per_thread + 1;
164 kits[NUM_THREADS - 1].x_pt_end   = x_points - 2 ;

```

```

165     kits[NUM_THREADS - 1].x_j      = x_ofst * x_pts_per_thread * \
166         (NUM_THREADS - 1);
167     kits[NUM_THREADS - 1].t_i      = t_ofst
168     kits[NUM_THREADS - 1].x_ofst   = x_ofst
169
170     // Iterating in the time
171     for (int i = 1; i < t_points - 1; i++) {
172         // creating threads
173         for (long j = 0; j < NUM_THREADS; j++) {
174             kits[j].t_i = t_ofst * i;
175             if (pthread_create(&threads[j], &attr, eval, (void *) &kits[j])) {
176                 printf("Error on creating thread %ld\n", j);
177                 exit(1);
178             }
179         }
180
181         // joining threads
182         void *status;
183         for (long j = 0; j < NUM_THREADS; j++) {
184             int returnCode;
185             returnCode = pthread_join(threads[j], &status);
186             if (returnCode) {
187                 printf("Error on joining thread %ld\nThread returned %d", j,
188                     returnCode);
189             }
190         }
191
192         // we need always to save the last line of B before 'deleting' it
193         B.row(i - 1) = A.row(0);
194         A.rows(0, 1) = A.rows(1, 2);
195         A.row(2).zeros();
196     }
197
198     parameters.save("data/outputs/pmts.dat", raw_ascii);
199     B.save("data/outputs/A.dat", raw_binary);
200
201     return 0;
202 }

```

Listing C.3: solver.cpp: código fonte que realiza os cálculos da propagação de uma onda em meio unidimensional com o auxílio da Pthreads.

```

1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np;
5  import matplotlib.pyplot as plt;
6
7  # Loading data
8  A = np.fromfile('data/outputs/A.dat', dtype=float);
9  [x_points, x_ofst, xi, tt, t_points] = np.loadtxt('data/outputs/pmts.dat');
10
11 # Preparing data for plotting
12 X = np.linspace(xi, xi + x_points * x_ofst, num=int(x_points));
13 T = np.linspace(0., tt, num=int(t_points));
14 A = A.reshape(int(x_points), int(t_points)).transpose();
15
16 # TODO: remove this line
17 [B, C] = np.meshgrid(X, T)
18
19 # Preparing plot
20 M = max(abs(A.min()), abs(A.max()));
21 fig, ax = plt.subplots();
22 ax.set_title('Wave in a string');
23 CS = ax.contourf(B, C, A, 52, cmap='seismic', vmin=-M, vmax=M);
24 ax.clabel(CS, inline=False, fontsize=10);
25 plt.xlabel('X')
26 plt.ylabel('T')
27
28 cbar = fig.colorbar(CS)
29
30 ax.plot();
31 # plt.show();

```

```
32 plt.savefig("data/images/A.png");
```

Listing C.4: viewer.py: código fonte que gera a imagem resultante dos cálculos da propagação da onda em meio unidimensional.

# Apêndice D

## Códigos falsos sobre MPI

### D.1 Cálculo da função de um paraboloide

```
1 #include <armadillo>
2 #include <iostream>
3 #include <mpi.h>
4 #include <stdio.h>
5 #include <string>
6
7 using namespace std;
8 using namespace arma;
9
10 // Based on https://computing.llnl.gov/tutorials/mpi/samples/C/mpi\_pi\_reduce.c
11
12 #define MASTER 0
13
14 /* Args
15  * x_points - number of points of the domain in the x axis
16  * x_b      - beggining of the domain in x
17  * x_e      - end of the domain in x
18  * y_points - number of points of the domain in the y axis
19  * y_b      - beggining of the domain in y
20  * y_e      - end of the domain in y
21  */
22
23 int main(int argc, char *argv[]) {
24
25     // Variables for working with MPI
26     int task_id, // task NUM - the identification of a task
27         num_tasks, // number of tasks
28         rc, // for returning code
29         i;
30
31     // initiating MPI, starting tasks and identifying them
32     MPI_Init(&argc, &argv);
33     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &num_tasks);
34     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &task_id);
35
36     int x_points, y_points;
37     float x_b, y_b;
38     float x_e, y_e;
39
40     // Creating objects for conversion of arguments
41     stringstream convert0(argv[1]);
42     stringstream convert1(argv[2]);
43     stringstream convert2(argv[3]);
44     stringstream convert3(argv[4]);
45     stringstream convert4(argv[5]);
46     stringstream convert5(argv[6]);
47
48     // Putting arguments on variables
49     convert0 >> x_points;
50     convert1 >> x_b;
```

```

51  convert2 >> x_e;
52  convert3 >> y_points;
53  convert4 >> y_b;
54  convert5 >> y_e;
55
56  // determining the space between points in x and y
57  float x_ofst = (x_e - x_b) / x_points;
58  float y_ofst = (y_e - y_b) / y_points;
59  // determining the beggining and the end of the domain based on task_id
60  x_b = x_b + task_id * x_ofst * x_points;
61  x_e = x_b + x_ofst * x_points;
62
63  printf("Task %d: X points = %d \n", task_id, x_points);
64  printf("Task %d: X beggining = %.1f \n", task_id, x_b);
65  printf("Task %d: X ending = %.1f \n", task_id, x_e);
66  printf("Task %d: Y points = %d \n", task_id, y_points);
67  printf("Task %d: Y beggining = %.1f \n", task_id, y_b);
68  printf("Task %d: Y ending = %.1f \n", task_id, y_e);
69
70  mat A(x_points, y_points);
71  rowvec parameters(6);
72
73  // Storing parameters in a vector for a file
74  parameters(0) = x_points;
75  parameters(1) = x_ofst;
76  parameters(2) = x_b;
77  parameters(3) = y_points;
78  parameters(4) = y_ofst;
79  parameters(5) = y_b;
80
81  // Calculating function
82  float x_i = x_b;
83  float y_i = y_b;
84
85  printf("\nTask %d: calculation is beggining!\n", task_id);
86
87  for (int i = 0; i < x_points; i++) {
88      for (int j = 0; j < y_points; j++) {
89          A(i, j) = 2. * x_i * x_i + y_i * y_i;
90          y_i += y_ofst;
91      }
92      x_i += x_ofst;
93      y_i = y_b;
94  }
95
96  printf("\nTask %d: calculation is over!\n", task_id);
97
98  if (task_id != MASTER) { // if it's not the master
99      // sending matrix's beggining pointer to master
100     printf("\nTask %d: sending!\n", task_id);
101     MPI_Send(A.begin(), A.size(), MPI_DOUBLE, MASTER, 0, MPI_COMM_WORLD);
102 } else { // if it's the master
103     mat B(num_tasks * x_points, y_points);
104     B.rows(0, x_points - 1) = A;
105     for (int i = 1; i < num_tasks; i++) {
106         printf("\nMaster: receiving from task %d!\n", i);
107         MPI_Recv(A.begin(), A.size(), MPI_DOUBLE, i, 0, MPI_COMM_WORLD,
108                 MPI_STATUS_IGNORE);
109         B.rows(i * x_points, (i + 1) * x_points - 1) = A;
110     }
111     B.save("data/outputs/A.dat", raw_binary);
112     parameters(0) *= num_tasks;
113     parameters.save("data/outputs/pmts.dat", raw_ascii);
114 }
115
116 MPI_Finalize();
117
118 return 0;
119 }

```

Listing D.1: solver.cpp: código fonte que realiza os cálculos da função de um paraboloide com o auxílio da MPI.



```

1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np
5  import matplotlib.pyplot as plt
6
7  # Loading data
8  A = np.fromfile('data/outputs/A.dat', dtype=float)
9  [x_points, x_ofst, xi, y_points, y_ofst,
10   yi] = np.loadtxt('data/outputs/pmts.dat')
11
12 # Preparing data for plotting
13 X = np.linspace(xi, xi + x_points * x_ofst, num=int(x_points))
14 Y = np.linspace(yi, yi + y_points * y_ofst, num=int(y_points))
15 A = A.reshape(int(y_points), int(x_points))
16
17 [B, C] = np.meshgrid(X, Y)
18
19 # Preparing plot
20 fig, ax = plt.subplots()
21 CS = ax.contourf(B, C, A, 20, cmap='RdGy')
22 ax.clabel(CS, inline=False, fontsize=10)
23 ax.set_title('z = 2x^2 + y^2')
24
25 ax.plot()
26 plt.savefig('data/images/A.png')
27
28 exit(0)

```

Listing D.2: viewer.py: código fonte que gera a imagem resultante dos cálculos da função de um parabolóide.

# Apêndice E

## Códigos finais

### E.1 Códigos serial final falso

#### E.1.1 Propagação de onda em uma dimensão

```
1 #include <iostream>
2 #include <stdio.h>
3 #include <mpi.h>
4 #include <armadillo>
5 #include <queue>
6 #include <pthread.h>
7
8 using namespace std;
9 using namespace arma;
10
11 #define MASTER 0
12 #define NUM_THREADS 6
13 #define PI 3.14159265359
14
15 /** Args
16  * @brief
17  * x_points - number of points in x axis
18  * x_b - beggining of the x axis
19  * x_t - end of the x axis
20  * x_w - value in axis to begin the wave
21  * t_t - end of the t(ime) axis
22  * t_w - value of the end of the t axis
23  * freq - value of the frequency of the wave
24  */
25
26 typedef struct kit_t {
27     int thread_id;
28     mat *A;
29     int x_pt_start,
30         x_pt_end,
31         i;
32     float x_j,
33         t_i,
34         x_ofst;
35 } KIT_t;
36
37 // some global variables to be used in the calculations
38 float A,
39     R,
40     t_w/*ave*/,
41     x_w/*ave*/,
42     pi2_freq2,
43     x_ofst_2,
44     t_ofst_2,
45     termA;
46
47 float fxt(float x, float t) {
```

```

48     float Dx  = x - x_w;
49     float Dx2 = Dx * Dx;
50     float Dt  = t - t_w;
51     float Dt2 = Dt * Dt;
52
53     float result = ((1. - 2. * pi2_freq2 * Dt2) * exp(-pi2_freq2 * Dt2)) * \
54                   ((1. - 2. * pi2_freq2 * Dx2) * exp(-pi2_freq2 * Dx2));
55
56     return result;
57 }
58
59 void *eval(void *void_kit) {
60     KIT_t *kit = (KIT_t *) void_kit;
61
62     int thread_id = kit->thread_id ;
63     mat *A        = kit->A          ;
64     int x_pt_start = kit->x_pt_start;
65     int x_pt_end   = kit->x_pt_end  ;
66     float x_j      = kit->x_j       ;
67     float t_i      = kit->t_i       ;
68
69     float x_ofst   = kit->x_ofst    ;
70     int i          = 1              ;
71
72     for (int j = x_pt_start; j <= x_pt_end; j++) {
73         (*A)(i + 1, j) = termA * ((*A)(i, j - 1) - 2. * (*A)(i, j) + \
74                                (*A)(i, j + 1)) - (*A)(i - 1, j) + 2. * (*A)(i, j) + t_ofst_2 * \
75                                fxt(x_j, t_i);
76         x_j += x_ofst;
77     }
78
79     pthread_exit(NULL);
80 }
81
82 int main(int argc, char *argv[]) {
83
84     // Variables for working with MPI
85     int task_id, // task NUM - the identification of a task
86         num_tasks, // number of tasks
87         rc, // for returning code
88         i;
89
90     // initiating MPI, starting tasks and identifying them
91     MPI_Init(&argc, &argv);
92     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &num_tasks);
93     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &task_id);
94
95     int x_points, t_points;
96     float x_ofst, t_ofst, x_t/*otal*/;
97     float x_b/*egin*/, t_t/*otal*/;
98
99     // auxiliary variables
100     float freq,
101          freq2,
102          pi2 = PI * PI;
103
104     // Creating objects for conversion of arguments
105     stringstream convert0(argv[1]);
106     stringstream convert1(argv[2]);
107     stringstream convert2(argv[3]);
108     stringstream convert3(argv[4]);
109     stringstream convert4(argv[5]);
110     stringstream convert5(argv[6]);
111     stringstream convert6(argv[7]);
112
113     // Putting arguments on variables
114     convert0 >> x_points;
115     convert1 >> x_b;
116     convert2 >> x_t;
117     convert3 >> x_w;
118     convert4 >> t_t;
119     convert5 >> t_w;
120     convert6 >> freq;

```

```

121
122 // finding some different place to begin the wave (if this task is not MASTER)
123 if (task_id != MASTER) {
124     if (x_w + .5 * task_id >= x_b || x_w + .5 * task_id <= x_t) {
125         x_w += .5 * task_id;
126     } else {
127         float x_w_temp;
128         do {
129             x_w_temp = x_w + rand() / rand();
130         } while (x_w_temp < x_b || x_w_temp > x_t);
131         x_w = x_w_temp;
132     }
133 }
134
135 x_ofst = (x_t - x_b) / x_points;
136 t_ofst = .5 * x_ofst; // respecting Nyquist theorem
137 t_points = (int) t_t / t_ofst;
138 freq2 = freq * freq;
139 pi2_freq2 = pi2 * freq2;
140
141 printf("Task %d's specs report\n"
142        "X points      : \t%d      \n"
143        "T points      : \t%d      \n"
144        "X offset       : \t%f      \n"
145        "T offset       : \t%f      \n"
146        "X total        : \t%f      \n"
147        "X total        : \t%f      \n"
148        "X wave's pic: \t%f      \n"
149        "X wave's pic: \t%f      \n",
150        task_id
151        ,
152        x_points
153        ,
154        t_points
155        ,
156        x_ofst
157        ,
158        t_ofst
159        ,
160        x_points * x_ofst
161        ,
162        t_t
163        ,
164        x_w
165        ,
166        t_w
167        );
168
169 // creating the matrix for calculations and a row vector for saving
170 // parameters
171 mat B(t_points, x_points);
172 B.fill(0.);
173 mat A(3, x_points);
174 A.fill(0.);
175 rowvec parameters(6);
176
177 // Storing parameters in a vector for a file
178 parameters(0) = x_points;
179 parameters(1) = x_ofst;
180 parameters(2) = x_b;
181 parameters(3) = t_t;
182 parameters(4) = t_points;
183 parameters(5) = num_tasks;
184
185 // Calculating function
186 float x_j = x_b;
187 float t_i = 0.;
188
189 // setting some calculation variables
190 x_ofst_2 = x_ofst * x_ofst;
191 t_ofst_2 = t_ofst * t_ofst;
192 termA = t_ofst_2 / x_ofst_2;
193
194 // creating threads
195 pthread_t threads[NUM_THREADS];
196 pthread_attr_t attr;
197
198 // creating kits for the threads
199 KIT_t kits[NUM_THREADS];
200
201 // initializing pthreads attribute and setting threads as joinable
202 pthread_attr_init(&attr);

```

```

194 pthread_attr_setdetachstate(&attr, PTHREAD_CREATE_JOINABLE);
195
196 // determining how many points each thread will have to take care of
197 int x_pts_per_thread = (x_points - 2) / NUM_THREADS;
198
199 // distributing information for kits
200 for(int i = 0; i < NUM_THREADS - 1; i++) {
201     kits[i].thread_id = i;
202     kits[i].A = &A;
203     kits[i].x_pt_start = i * x_pts_per_thread + 1;
204     kits[i].x_pt_end = i * x_pts_per_thread + x_pts_per_thread;
205     kits[i].x_j = x_ofst * x_pts_per_thread * i;
206     kits[i].t_i = t_ofst;
207     kits[i].x_ofst = x_ofst;
208 }
209 kits[NUM_THREADS - 1].thread_id = NUM_THREADS - 1;
210 kits[NUM_THREADS - 1].A = &A;
211 kits[NUM_THREADS - 1].x_pt_start = (NUM_THREADS - 1) * x_pts_per_thread + 1;
212 kits[NUM_THREADS - 1].x_pt_end = x_points - 2;
213 kits[NUM_THREADS - 1].x_j = x_ofst * x_pts_per_thread * \
214     (NUM_THREADS - 1);
215 kits[NUM_THREADS - 1].t_i = t_ofst;
216 kits[NUM_THREADS - 1].x_ofst = x_ofst;
217
218 // Iterating in the time
219 printf("Task %d: calculation is beggining!\n", task_id);
220 for (int i = 1; i < t_points - 1; i++) {
221     // creating threads
222     for (long j = 0; j < NUM_THREADS; j++) {
223         kits[j].t_i = t_ofst * i;
224         if (pthread_create(&threads[j], &attr, eval, (void *) &kits[j])) {
225             printf("Error on creating thread %ld\n", j);
226             exit(1);
227         }
228     }
229
230     // joining threads
231     void *status;
232     for (long j = 0; j < NUM_THREADS; j++) {
233         int returnCode;
234         returnCode = pthread_join(threads[j], &status);
235         if (returnCode) {
236             printf("Error on joining thread %ld\nThread returned %d", j,
237                 returnCode);
238         }
239     }
240
241     // we need always to save the last line of B before 'deleting' it
242     B.row(i - 1) = A.row(0);
243     A.rows(0, 1) = A.rows(1, 2);
244     A.row(2).zeros();
245 }
246 printf("Task %d: calculation is over!\n", task_id);
247
248 if (task_id != MASTER) { // if it's not the master
249     // sending matrix's beggining pointer to master
250     printf("\nTask %d: sending!\n", task_id);
251     MPI_Send(B.begin(), B.size(), MPI_DOUBLE, MASTER, 0, MPI_COMM_WORLD);
252 } else { // if it's MASTER
253     // saving parameters
254     parameters(0) *= num_tasks;
255     parameters.save("data/outputs/pmts.dat", raw_ascii);
256     // creating auxiliary matrix for MPI_Recv()
257     mat C(size(B));
258     // resizing B for receiving data from the other tasks
259     B.resize(t_points, num_tasks * x_points);
260     // receiving data from other tasks
261     for (int i = 1; i < num_tasks; i++) {
262         printf("Master: receiving from task %d!\n", i);
263         MPI_Recv(C.begin(), C.size(), MPI_DOUBLE, i, 0, MPI_COMM_WORLD,
264             MPI_STATUS_IGNORE);
265         B.cols(i * x_points, (i + 1) * x_points - 1) = C;
266     }

```

```

267         B.save("data/outputs/A.dat", raw_binary);
268     }
269
270     MPI_Finalize();
271
272     return 0;
273 }

```

Listing E.1: solver.cpp: resolve a equação da onda unidimensional com o auxílio das APIs Pthreads e MPI

```

1  #!/usr/bin/python2.7
2  #!-*- coding: utf8 -*-
3
4  import numpy as np
5  import matplotlib.pyplot as plt
6
7  # Loading data
8  A = np.fromfile('data/outputs/A.dat', dtype=float)
9  [x_points, x_ofst, xi, tt, t_points, n_tasks] = \
10     np.loadtxt('data/outputs/pmts.dat')
11
12  # Preparing data for plotting
13  X = np.linspace(xi, xi + x_points / n_tasks * x_ofst, num=int(x_points / n_tasks))
14  T = np.linspace(0., tt, num=int(t_points))
15  A = A.reshape(int(x_points), int(t_points))
16
17  # TODO: remove this line
18  [B, C] = np.meshgrid(X, T)
19
20  # Preparing plot
21  for i in range(0, int(n_tasks)):
22      M = max(abs(A[int(i * (x_points / n_tasks)):int((i + 1) * (x_points / n_tasks))].min()),
23             abs(A[int(i * (x_points / n_tasks)):int((i + 1) * (x_points / n_tasks))].max()))
24
25      fig, ax = plt.subplots()
26      ax.set_title('Wave in a string')
27      CS = ax.contourf(C, B, A[int(i * (x_points / n_tasks)):int((i + 1) * (x_points / n_tasks))
28                        ].transpose(),
29                      52, cmap='seismic', vmin=-M, vmax=M)
30      ax.clabel(CS, inline=False, fontsize=10)
31      plt.xlabel('T')
32      plt.ylabel('X')
33      cbar = fig.colorbar(CS)
34
35      ax.plot()
36      plt.savefig('data/images/A' + str(i) + '.png')

```

Listing E.2: viewer.py: script que cria a imagem da propagação da onda no plano  $v \times t$ .

## E.2 Propagação de ondas em duas dimensões

### E.2.1 Código principal

```

1  #include "util.h"
2  #include "_2DWave.h"
3
4  #define SPECS_DIR    "./specs/"
5  #define VEL_DIR     "./velocity/"
6  #define SNAPS_DIR   "./snaps/"
7  #define TRACES_DIR  "./traces/"
8
9  /*
10 *   This program aims to solve the bidimensional wave equation
11 *   by the finite differences method. This methods will be im-
12 *   plemented with the help of Eigen library, that provides the
13 *   necessary tools of the Linear Algebra, mainly the vectors
14 *   and matrices that will be used to store and manipulate data,
15 *   as well the methods that are necessary to this.
16 */

```

```

17
18 int main () {
19
20     // Getting external data
21     ifstream wf ( SPECS_DIR "wOut.dat", ios::in | ios::binary);
22     ifstream vf ( SPECS_DIR "vOut.dat", ios::in | ios::binary);
23     ifstream ifl( SPECS_DIR "iOut.dat", ios::in | ios::binary);
24
25     vector<interface> it;
26     vector<velocity> vl;
27     ifstream nInt( SPECS_DIR "nInt.dat", ios::in);
28     int N;
29     nInt >> N;
30     for (int i = 0; i < N; i++) {
31         interface auxI(0., 0.);
32         velocity auxV(0., 0., 0.);
33         auxI.deserialize(&ifl);
34         auxV.deserialize(&vf);
35         it.push_back(auxI);
36         vl.push_back(auxV);
37     }
38     velocity auxV(0., 0., 0.);
39     auxV.deserialize(&vf);
40     vl.push_back(auxV);
41
42     _2DWave ww(0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.);
43
44     ww.deserialize(&wf);
45
46     wf.close(); vf.close(); ifl.close();
47
48     // Creating velocities matrix
49     mat v;
50     v.load( VEL_DIR "velocity.dat", raw_ascii);
51
52     // Compute 1/v^2 only once for all steps
53     for (int i = 1; i < ww.getMx() - 1; i++) {
54         for (int j = 1; j < ww.getNy() - 1; j++) {
55             v(i,j) = 1.0 / ( v(i,j) * v(i,j) );
56         }
57     }
58
59     // Creating arrays for space dimensions X e Y and for time
60     vec X = linspace<vec>(0., ww.getLx(), ww.getMx());
61     vec Y = linspace<vec>(0., ww.getLy(), ww.getNy());
62     vec T = linspace<vec>(0., ww.getTMax(), ww.getOt());
63
64     // Saving arrays of dimensions in space
65     X.save( SPECS_DIR "X.dat", raw_ascii);
66     Y.save( SPECS_DIR "Y.dat", raw_ascii);
67     T.save( SPECS_DIR "T.dat", raw_ascii);
68
69     nInt >> N; // reusing N
70     queue<int> numSnaps;
71     if (N > 0) { // get the frames's numbers that must be saved as
72         // snapshots
73         int h = (int) ww.getOt() / N;
74         for (int i = 1; h * i < ww.getOt(); i++) { numSnaps.push(h * i); }
75     }
76
77     // Receiving data about receivers
78     int nRecv;
79     double offset_Recv;
80     nInt >> nRecv;
81     nInt >> offset_Recv;
82
83     nInt.close();
84
85     // Matrix to armazenate traces
86     mat traces((int) ww.getOt(), nRecv);
87     traces.fill(0.);
88
89     // the number of points between receivers

```

```

90     int offset_Recv_int = vv.getMx() / nRecv;
91
92     // Creating 3 matrices for application of the Finite Difference Method (FDM)
93     mat U1((int) vv.getMx(), (int) vv.getNy());
94     mat U2((int) vv.getMx(), (int) vv.getNy());
95     mat U3((int) vv.getMx(), (int) vv.getNy());
96
97     // Filling the matrices with zeros
98     U1.fill(0.);
99     U2.fill(0.);
100    U3.fill(0.);
101
102    // Creating a queue for administrating the arrays of FDM
103    queue<mat> U;
104    U.push(U1); U.push(U2); U.push(U3);
105
106    double dt2      =      vv.getDt() * vv.getDt();
107    double dt2dx2 = dt2 / ( vv.getDx() * vv.getDx() );
108    double dt2dy2 = dt2 / ( vv.getDy() * vv.getDy() );
109
110    for (int k = 1; k < vv.getOt() - 1; k++) {
111
112        // Getting the matrices from the queue
113        U1 = U.front(); U.pop(); // t + 1
114        U2 = U.front(); U.pop(); // t
115        U3 = U.front(); U.pop(); // t - 1
116
117        // Doing FDM calculations
118        for (int i = 1; i < vv.getMx() - 1; i++) {
119            for (int j = 1; j < vv.getNy() - 1; j++) {
120                U1(i,j) = v(i,j) * ( dt2dx2 * ( U2(i+1,j) - 2.0*U2(i,j) + U2(i-1,j) )
121                                     + dt2dy2 * ( U2(i,j+1) - 2.0*U2(i,j) + U2(i,j-1) ) )
122                + dt2 * vv.evaluateFXYT( X(i), Y(j), T(k) )
123                + 2.0 * U2(i,j) - U3(i,j);
124            }
125        }
126
127        // Registering traces
128        for (int ii = 1; ii * offset_Recv_int < size(U1)(0) && ii < nRecv; ii++) {
129            traces(k, ii) = U1(ii * offset_Recv_int, 1);
130        }
131
132        // if frame k is one of the required for the snaps
133        if (N > 0 && k == numSnaps.front()) {
134            ostringstream oss;
135            int save = numSnaps.front();
136            oss << SNAPS_DIR << setfill('0') << setw(5) << save << ".dat";
137            numSnaps.pop(); numSnaps.push(save);
138            U1.save(oss.str(), raw_ascii);
139        }
140
141        // Putting the matrices again in the queue
142        U.push(U3); U.push(U1); U.push(U2);
143    }
144
145    vec d(7);
146    d(0) = (int) vv.getMx();
147    d(1) = (int) vv.getNy();
148    d(2) = (int) vv.getOt();
149    d(3) = N;
150    d(4) = vv.getLx();
151    d(5) = vv.getLy();
152    d(6) = nRecv;
153
154    d.save( SPECS_DIR "output.dat", raw_ascii);
155
156    traces.save( TRACES_DIR "traces.dat", raw_ascii);
157
158    return 0;
159

```



160 }

Listing E.3: `main-reflect-bound.cpp`: código fonte que realiza os cálculos da propagação da onda bidimensional com o auxílio das APIs Pthreads e MPI.

# Bibliografia

- [Liu+00] W. Liu et al. *BSIM 4.0.0 Technical Notes*. Rel. técn. UCB/ERL M00/39. EECS Department, University of California, Berkeley, 2000. URL: <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2000/3863.html>.
- [03a] *PTHREAD\_ATTR\_DESTROY(P) POSIX Programmer's Manual*. IEEE/The Open Group. 2003.
- [03b] *PTHREAD\_CREATE(P) POSIX Programmer's Manual*. IEEE/The Open Group. 2003.
- [03c] *PTHREAD\_EXIT(P) POSIX Programmer's Manual*. IEEE/The Open Group. 2003.
- [03d] *PTHREAD\_JOIN(P) POSIX Programmer's Manual*. IEEE/The Open Group. 2003.
- [03e] *PTHREAD\_SETDETAACHEDSTATE(P) POSIX Programmer's Manual*. IEEE/The Open Group. 2003.
- [Cat09] John Catsoulis. *Designing Embedded Hardware*. O'REILLY, 2009.
- [Sil09] Gabriel P. Silva. *Microarquiteturas Avançadas*. 2009. URL: <http://www.dcc.ufrj.br/~gabriel/arqcomp2/Avancadas.pdf>.
- [Pac11] Peter S. Pacheco. *An Introduction to Parallel Computing*. Elsevier, 2011. ISBN: 978-0-12-374260-5.
- [Fis12] Russell Fish. *Future of computers - Part 2: The Power Wall*. Jan. de 2012. URL: <https://www.edn.com/design/systems-design/4368858/Future-of-computers--Part-2-The-Power-Wall>.
- [Hen12] John Hennessy. *Computer architecture : a quantitative approach*. Amsterdam Boston: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2012. ISBN: 9780123838735.
- [For15] Message Passing Interface Forum. *MPI: A Message-Passing Interface Standard - Version 3.1*. Message Passing Interface Forum, 2015.
- [Eij16] Victor Eijkhout. *Parallel Programming in MPI and OpenMP*. 2016. URL: <http://pages.tacc.utexas.edu/~eijkhout/pcse/html/index.html>.
- [Bar17] Blaise Barney. *Pthreads*. Acessado em 24/02/2019. 2017. URL: <https://computing.llnl.gov/tutorials/pthreads/>.
- [DAf17] Luis Alberto D'Afonseca. "Notas de aula". Notas de aula obtidas durante as reuniões do projeto. 2017.
- [17a] *MPI\_Comm\_rank(3) Open MPI*. 2.1.1. Mai. de 2017.
- [17b] *MPI\_Comm\_size(3) Open MPI*. 2.1.1. Mai. de 2017.
- [17c] *MPI\_Finalize(3) Open MPI*. 2.1.1. Mai. de 2017.

- [17d] *MPI\_Init(3) Open MPI*. 2.1.1. Mai. de 2017.
- [17e] *MPI\_Recv(3) Open MPI*. 2.1.1. Mai. de 2017.
- [17f] *MPI\_Send(3) Open MPI*. 2.1.1. Mai. de 2017.
- [PH17] David A. Patterson e John L. Hennessy. *Organização e projeto de computadores*. Elsevier Inc., 2017.
- [Bar18] Blaise Barney. *Introduction to Parallel Computing*. Jun. de 2018. URL: [https://computing.llnl.gov/tutorials/parallel\\_comp/](https://computing.llnl.gov/tutorials/parallel_comp/).
- [Com18a] Wikimedia Commons. *File:Intel i5-2500.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository*. [Online; accessed 8-September-2019]. 2018. URL: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Intel\\_i5-2500.jpg&oldid=286036304](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Intel_i5-2500.jpg&oldid=286036304).
- [Com18b] Wikimedia Commons. *File:Pins on Core i7-2600 SR00B (16339768957).jpg — Wikimedia Commons, the free media repository*. [Online; accessed 8-September-2019]. 2018. URL: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Pins\\_on\\_Core\\_i7-2600\\_SR00B\\_\(16339768957\).jpg&oldid=278997345](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Pins_on_Core_i7-2600_SR00B_(16339768957).jpg&oldid=278997345).
- [MD18] Marcelo Lopes de Macedo Ferreira Cândido e Luis Alberto D'Afonseca. *Modelagem Matemática da Propagação de Ondas em Meios Não Homogêneos*. Iniciação Científica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.
- [Wik18] Wikipedia contributors. *Dependence analysis — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dependence\\_analysis&oldid=841756105](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dependence_analysis&oldid=841756105). [Online; accessed 7-March-2019]. 2018.
- [Com19] Wikimedia Commons. *File:Swissbit 2GB PC2-5300U-555.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository*. [Online; accessed 8-September-2019]. 2019. URL: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Swissbit\\_2GB\\_PC2-5300U-555.jpg&oldid=362853163](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Swissbit_2GB_PC2-5300U-555.jpg&oldid=362853163).
- [con19] Wikipedia contributors. *Address space — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Online; accessed 22-February-2019]. 2019. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Address\\_space&oldid=881301824](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Address_space&oldid=881301824).
- [Wik19a] Wikipedia contributors. *Application programming interface — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Application\\_programming\\_interface&oldid=884701073](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Application_programming_interface&oldid=884701073). [Online; accessed 24-February-2019]. 2019.
- [Wik19b] Wikipedia contributors. *Moore's law — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Online; accessed 7-March-2019]. 2019. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Moore's\\_law&oldid=886664781](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Moore's_law&oldid=886664781).
- [Wik19c] Wikipedia contributors. *POSIX Threads — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=POSIX\\_Threads&oldid=891039524](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=POSIX_Threads&oldid=891039524). [Online; accessed 22-May-2019]. 2019.
- [Gro] The STELLAR Group. *1D Stencil Program Flow*. [https://stellar-group.github.io/hpx/docs/sphinx/latest/html/\\_images/1d\\_stencil\\_program\\_flow.png](https://stellar-group.github.io/hpx/docs/sphinx/latest/html/_images/1d_stencil_program_flow.png).

[Sob] João Bosco Manguiera Sobral. “Conceitos em OpenMP”. Disponível em [http://www.inf.ufsc.br/~bosco/ensino/ine5645/Conceitos\\_OpenMP.pdf](http://www.inf.ufsc.br/~bosco/ensino/ine5645/Conceitos_OpenMP.pdf). Acessado em 07/09/2019.