

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
24 de fevereiro de 2019

Sumário

1	Introdução	3
2	Aquisições Sísmicas	4
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
3	A arquitetura computacional atual e a necessidade de paralelização	7
3.1	A arquitetura de von Neumann	7
3.1.1	O gargalo de von Neumann	8
3.2	O processador	8
3.3	A memória principal	8
3.4	A cache	8
3.5	Disco rígido	8
3.6	Conseguir mais em menos tempo	8
3.6.1	A barreira da memória - <i>Memory wall</i>	9
3.6.2	A barreira do paralelismo a nível de instruções - <i>ILP wall</i>	9
3.6.3	A barreira no gasto de energia dos processadores - <i>Power wall</i>	9
3.7	Paralelismo - a alternativa para se contornar as barreiras	9
3.7.1	Arquiteturas de memória na computação paralela	10
3.7.2	Modelos da computação paralela	10
3.7.3	Desenhando programas paralelos	11
4	Paralelismo em prática	13
4.1	OpenMP	13
4.2	Pthreads	13
4.3	MPI	13
5	Do serial ao paralelo	14
5.1	A construção do código serial	14
5.2	Primeiro contato do código com as <i>threads</i> - OpenMP	14
5.2.1	Construindo o caminho para a OpenMP	14
5.3	Um contato mais profundo do código com as <i>threads</i> - Pthreads	14
5.3.1	Construindo o caminho para a Pthreads	14
5.4	Realizando a mescla de Pthreads e MPI	14
5.4.1	Contruindo o caminho para a mescla	14
6	Comparando o paralelo com o serial	15

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 2

Aquisições Sísmicas

introduzir

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. 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, o que será melhor explicado mais a frente.

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

buscar referências

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 colocado (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 facilitar a modelagem do meio de propagação das ondas.

Esse colhimento dos dados consistirá em traços, que são o gráfico das amplitudes das ondas sonoras captadas pelos hidrofones/geofones, como se pode ver na Figura ???. A partir desses traços, detecta-se, por análise técnica, onde se encontram as interfaces entre as camadas do domínio analisado e do que são feitas essas. Nisso consiste o processamento dos dados colhidos.

Vale lembrar que, quanto aos métodos de processamento utilizados, nesse trabalho simularemos um problema direto, ou seja, estipulando o meio (nesse caso, não-homogêneo) da aquisição, veremos como as ondas se propagam nele. Para tal, usaremos um método matemático específico. Nesse trabalho, como já foi dito no Capítulo 1, é o de Diferenças Finitas.

conferir se procede

Colocar a imagem dos traços

colocar isso

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 do código 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 (no caso desse trabalho) v representa a velocidade da frente de onda. Trata-se de uma **equação diferencial parcial hiperbólica** com solução analítica, mas que pode ser resolvida de forma fácil numericamente, utilizando, por exemplo, o **método de diferenças finitas**, a ser mais explicado 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 para derivações de segundo grau, sobre a qual podemos ver um exemplo na Tabela 2.1 para o caso da parte espacial em x da equação.

Tabela 2.1: Fórmula de Diferenças Finitas para cálculo de derivada de segunda ordem, aqui representando a derivada na dimensão espacial x

$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$	$\frac{u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}}{\Delta x^2}$
-------------------------------------	---

Para entender o que significa o índice i visto na tabela acima é bom se seguir uma analogia: suponhamos um *array* de tamanho maior que três. A posição i seria qualquer posição intermediária, $i - 1$ a antecessora e a $i + 1$ sucessora. Tal estrutura é chamada de *stencil*. O mesmo vale para os índices j e k . Podemos ver uma alegoria dessa analogia na Figura ??.

Inserir uma imagem para o stencil 1D

No caso desse trabalho, para a simulação da propagação de ondas em um meio bidimensional ao longo do tempo, teremos que usar três *stencils* (os dois restantes podem ser vistos na Tabela 2.2), um para cada dimensão espacial ou temporal. Para tal, podemos utilizar outra analogia: um *array* tridimensional, onde cada plano de posições no espaço é um instante no tempo. Tal analogia é representada na Figura ??.

Tabela 2.2: Demais fórmulas de Diferenças Finitas para as dimensões espacial y e temporal t

$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$	$\frac{u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k}}{\Delta y^2}$
$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$	$\frac{u_{i,j,k-1} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t^2}$

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 tabelas 2.1 e 2.2 se dá por

$$\frac{u_{i,j,k-1} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t^2} = \frac{1}{v^2} \left(\frac{u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} \right) + f(x,y,t) \quad (2.2)$$

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 2.3

$$u_{i,j,k+1} = \frac{\Delta t^2}{v^2} \left(\frac{u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} \right) + \Delta t^2 f(x,y,t) - u_{i,j,k-1} + 2u_{i,j,k} \quad (2.3)$$

buscar referências sobre o método na PIC01

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* atual 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 e dados) entregues a ele, para toda operação realizada no computador; passando pelas políticas de manipulação de dados nas memórias cache (e seus níveis), de acesso aleatório (RAM - *random access memory*) e de armazenamento não-volátil (discos rígidos, por exemplo); chegando também 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].

Ainda no âmbito da arquitetura de computadores, são estabelecidas análises e metas de performance. Por exemplo, tenta-se determinar se um processador A é mais rápido que um B (sendo B diferente de A) comparando-se o número de instruções que cada um processa, ou quantos ciclos (que serão explicados mais a frente) podem ser dados em um segundo [Wik19b]. Questão semelhante encontra-se na computação de alta performance¹: quão mais rápido um trecho de código executa ao ser paralelizado.

Essa organização focada em um processador, memórias cache, RAM e de armazenamento não-volátil vieram da **arquitetura de von Neumann**, que possui esse nome por conta de seu idealizador, John von Neumann.

3.1 A arquitetura de von Neumann

- von Neumann e o conceito de programa armazenado;
- a forma da arquitetura (componentes e ligações);

¹**computação de alta performance** (ou **supercomputação**) é um ramo da computação que usa supercomputadores e estuda técnicas de paralelismo visando alcançar velocidades de processamento maiores (do que as de computadores normais, como os pessoais) para a resolução de problemas computacionais complexos, como simulações, modelagens e análises computacionais. Esse ramo também pode, no lugar de focar em processamento mais rápido, resolver problemas de dimensões maiores, que não poderiam ser resolvidos em tempo hábil por computadores comuns (Tec)

conferir
se
deve
tratar
como
atual

- o contraste da arquitetura idealizada com as anteriores.

3.1.1 O gargalo de von Neumann

- o gargalo existente entre o processador e a memória, que não consegue acompanhá-lo.

3.2 O processador

- introdução ao que é um processador;
- apresentação de um processador MIPS simples;
 - entradas;
 - módulos internos;
 - saídas;
- incrementos que os processadores receberam ao longo da história (ILP).

3.3 A memória principal

- introdução do que é uma memória;
- apresentação básica dos tipos de memória (ênfase na RAM);
- apresentação básica das propriedades de uma memória RAM.

3.4 A cache

- O princípio da localidade no tempo e no espaço;
- A necessidade da existência de uma cache, visto o princípio da localidade;
- Explicação do que é uma cache;

3.5 Disco rígido

- O que são memórias voláteis e exemplos delas;
- A necessidade de memórias não-voláteis e o HD;
- Outras diferenças entre o HD e as outras memórias envolvidas no trabalho

3.6 Conseguir mais em menos tempo

- A necessidade de se aumentar a velocidade de processamento;
- introdução aos problemas encontrados na computação serial

3.6.1 A barreira da memória - *Memory wall*

Conferir se existe mesmo a memory wall

Revisar o que é a memory wall e completar o itemize abaixo

-

3.6.2 A barreira do paralelismo a nível de instruções - *ILP wall*

- Explicar do que se trata o paralelismo a nível de instruções;
- Explicar os conceitos de superpipeline e superescalar;
- Explicar que, ao se estender muito um pipeline, temos problemas;
- Explicar os problemas da superescalaridade

3.6.3 A barreira no gasto de energia dos processadores - *Power wall*

- Introduzir a lei de Moore;
- Explicar que houve evolução na taxa de clock ao longo do tempo;
- Explicar que essa evolução foi amortecida nos últimos anos devido ao gasto energético e às altas temperaturas que os processadores alcançaram

3.7 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*, precisamos 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) 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. 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. 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 mais máquinas;

- prover concorrência: realizar várias tarefas simultaneamente [Bar18].

Quando se fala em paralelismo, é importante mostrar que existem diferentes disposições de memória nesse meio, o que veremos na subseção 3.7.1. Além disso, existem diferentes paradigmas de paralelismo, sendo alguns brevemente explicados na subseção 3.7.2. Há também outros assuntos a serem tratados ao se projetar programas paralelos, sendo alguns abordados na subseção 3.7.3. Fora isso, mais informações sobre paralelismo podem ser encontradas em Barney [Bar18].

3.7.1 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**² global;
- memória distribuída: cada unidade de processamento possui sua própria memória, mapeada apenas para ele 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**³ 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.

3.7.2 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, teoricamente, se você tem 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:

²**espaço de endereçamento**, segundo a Wikipédia (con19), é uma “série de endereços discretos” que, no caso, nomeiam as posições de memória

³**nó** é o nome dado na computação paralela para cada unidade de processamento (ou conjunto dessas) independente.

- modelo de memória compartilhada (sem *threads*⁴): 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 que lança várias linhas de execução concorrentes com instruções chamadas *threads*. Essas últimas são designadas e executadas simultaneamente, sendo desse fato que vem o paralelismo desse modelo. Algumas **API's**⁵ que usam esse modelo são OpenMP (Multiprocessamento Aberto, do inglês *Open Multi-Processing*) e Pthreads (POSIX⁶ Threads);
- 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 precisam mandar/receber dados de outras tarefas, o que é feito através do envio/recebimento de mensagens. Uma API que implementa esse modelo é a MPI (Message Passing Interface);
- modelo híbrido: mescla modelos acima, sendo um exemplo a aplicação da MPI para a comunicação entre as máquinas de um sistema e alguma API de *threads* para a realização das computações dentro de cada máquina, que é um subsistema de memória compartilhada.

não deixar de explicar esse conceito na seção da memória

3.7.3 Desenhando programas paralelos

Para se desenhar 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 API) 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*⁷ 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**⁸ 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

⁴de 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 (Bar17).

⁵**API**, do inglês *Application Programming Interface* (Interface de Programação de Aplicação) “é um conjunto de definições de subrotinas, protocolos de comunicação e ferramentas para a construção de *software*” (Wik19a).

⁶Interface Portável entre Sistemas Operacionais, do inglês *Portable Operating System Interface* [Wik18].

⁷*flag* (bandeira, no português), é um termo utilizado na computação para designar mecanismos que servem como indicadores para outros agentes de um mesmo sistema.

⁸Um **programa serial** é aquele que seus comandos são executados em ordem, sem paralelismo.

tempo e a paralelização seria mais eficiente; e os pontos de gargalo, onde a execução desacelerava 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 nessa iniciação:

- **particionamento:** consiste em quebrar um problema (a ser resolvido por uma abordagem paralela) em partes discretas para serem distribuídas a tarefas. Isso pode ser feito de duas formas:
 1. **particionamento de domínio:** o conjunto de dados a ser processado é decomposto em partes e cada subconjunto é processado;
 2. **particionamento funcional:** distribuição do trabalho a ser realizado a tarefas. Esse é o tipo de particionamento a ser utilizado nessa iniciação.
- **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.

Capítulo 4

Paralelismo em prática

Introduzir as apis e porque elas existem

4.1 OpenMP

- Do que se trata a OpenMP e onde ela está incluída;
- um programa hello world com OpenMP.

4.2 Pthreads

- Do que se trata a Pthreads e onde ela está incluída;
- um programa hello world com Pthreads.

4.3 MPI

- Do que se trata a MPI e onde ela está incluída;
- um programa hello world com MPI.

Capítulo 5

Do serial ao paralelo

Introduzir

5.1 A construção do código serial

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

5.2.1 Construindo o caminho para a OpenMP

- Explicar o código fake da avaliação de função;
- 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

Comparando o paralelo com o serial

Capítulo 7

Considerações Finais

Bibliografia

- [Cat09] John Catsoulis. *Designing Embedded Hardware*. O'REILLY, 2009.
- [Bar17] Blaise Barney. *Pthreads*. Acessado em 24/02/2019. 2017. URL: <https://computing.llnl.gov/tutorials/pthreads/>.
- [Bar18] Blaise Barney. *Introduction to Parallel Computing*. Jun. de 2018. URL: https://computing.llnl.gov/tutorials/parallel_comp/.
- [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] Wikipédia. *POSIX — Wikipédia, a enciclopédia livre*. [Online; accessed 26-fevereiro-2018]. 2018. URL: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=POSIX&oldid=51373634%7D>.
- [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.
- [Wik19a] Wikipedia contributors. *Application programming interface — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Application_programming_interface&oldid=884701073. [Online; accessed 24-February-2019]. 2019.
- [Wik19b] Wikipedia contributors. *Computer architecture — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Computer_architecture&oldid=876516273. [Online; accessed 12-January-2019]. 2019.
- [Tec] Techopedia. *High-Performance Computing (HPC)*. URL: <https://www.techopedia.com/definition/4595/high-performance-computing-hpc>.