Programação em OpenCL
Uma introdução prática

INE 5645 Programação Paralela e Distribuída

Prof. João Bosco M. Sobral

Programação em OpenCL: Uma introdução prática

- César L. B. Silveira[1], Luiz G. da Silveira Jr.[2], Gerson Geraldo H. Cavalheiro[3]

[1] V3D Labs, São Leopoldo, RS, Brasil

[2] Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, Brasil

[3] Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil

{cesar,gonzaga}@v3d.com.br, gerson.cavalheiro@ufpel.edu.br

Introdução

Plataformas Heterogêneas

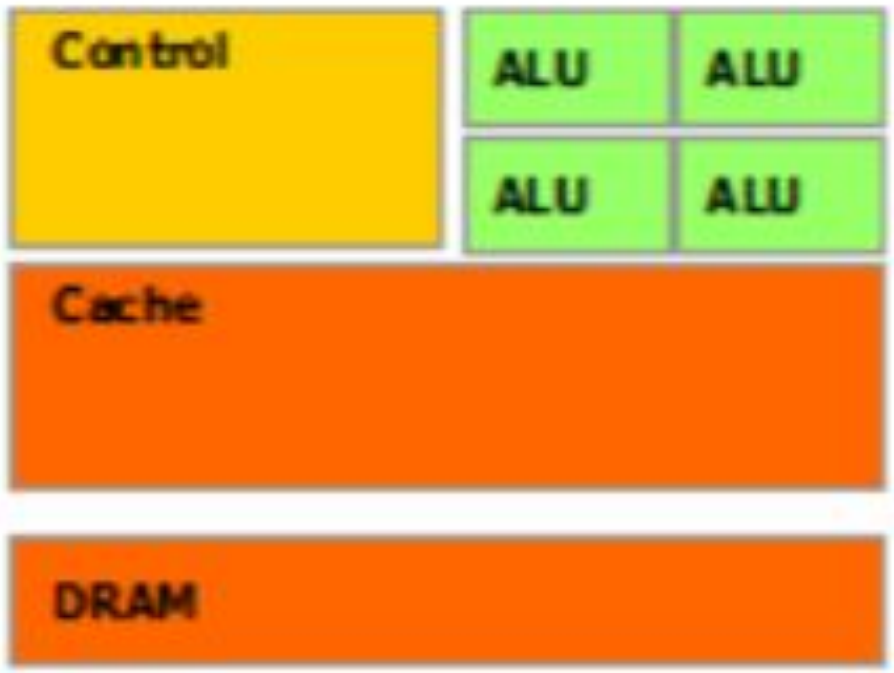
- Computadores dotados de processadores *multicore* e placas gráficas dotadas de múltiplas unidades de processamento *manycore.*
- Tais plataformas são ditas heterogêneas, dada a natureza dos recursos de processamento.
- Indica a necessidade de uma convergência dos esforços de desenvolvimento de software.
- Permitem um processador com CPUs executar tarefas gerais e a GPU executar tarefas de paralelismo de dados.

GPU – Graphics Processing Unit

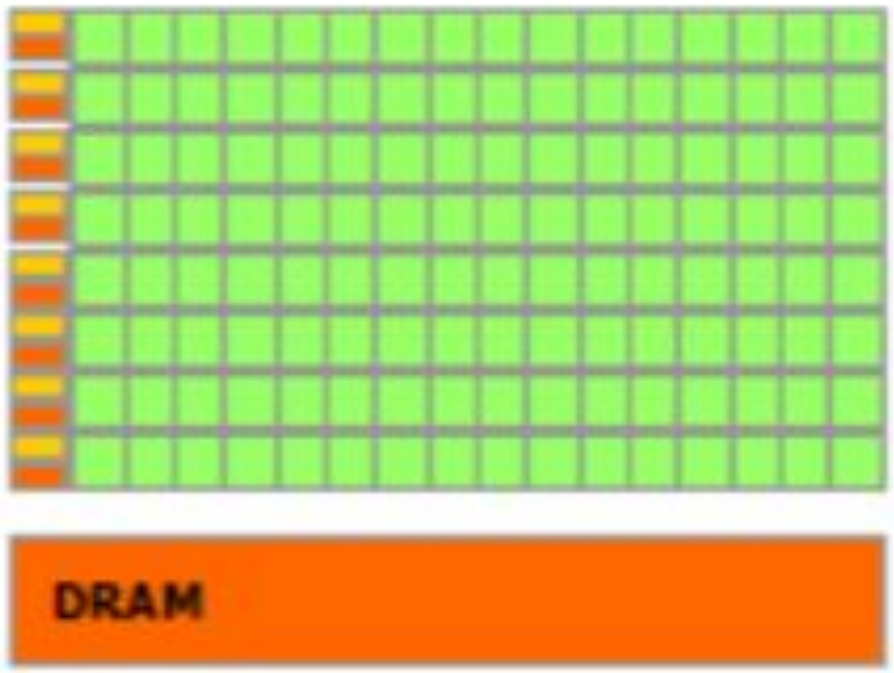
- O uso tradicional das placas gráficas, esteve durante muito tempo associado às aplicações de computação gráfica e/ou processamento de imagens.

- Nos últimos anos, arquiteturas de placas gráficas tem sido consideradas para implementações de aplicações científicas em um escopo mais genérico, uma vez que seus processadores, chamados de GPU (Graphics Processing Unit), dispõem de grande capacidade de processamento.

Uma comparação entre a arquitetura de uma CPU com apenas quatro unidades lógica e aritmética (ULAs) e uma GPU com 128 ULAs.



CPU



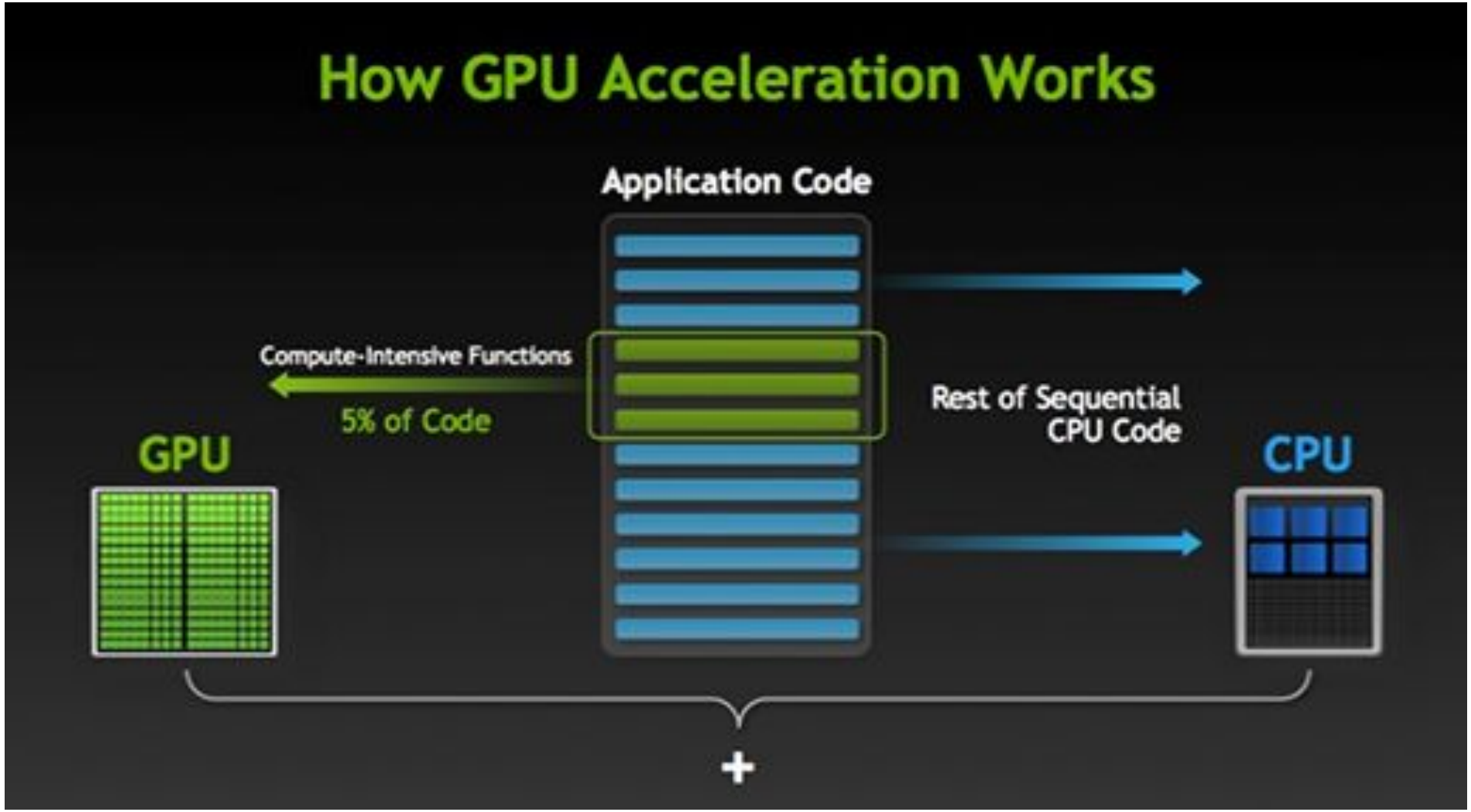
GPU

GPU – Graphics Processing Unit

- A GPU surgiu para "aliviar" o processador principal do computador (CPUs) da pesada tarefa de gerar imagens.

- Por isso, é capaz de lidar com um grande volume de cálculos matemáticos e geométricos, condição para o processamento de imagens 3D, utilizadas em jogos, exames médicos computadorizados, entre outros.

Computação acelerada por placas de vídeo é o uso de uma unidade de processamento gráfico (GPU) juntamente com uma CPU para acelerar aplicações complexas ...



Uso de GPUs

- GPU é um processador projetado para processamento gráfico, porém sua arquitetura paralela contendo centenas de núcleos, a torna adequada para processar dados em paralelo.

- O uso de GPUs, justifica-se em função do desempenho obtido pelo investimento realizado, o qual é altamente favorável ao usuário final.

Aplicações de GPUs

- Dinâmica Molecular (um método de simulação computacional que estuda o movimentos físico dos átomos e moléculas das quais se conhecem o potencial de interação entre estas partículas e as equações que regem o seu movimento)

- Jogos (Programas de entretenimento — um jogo *virtual*) (Gaming)

- Realidade Virtual (Uma tecnologia de interface avançada entre um usuário e um sistema operacional, com o objetivo de recriar ao máximo a sensação de **realidade** para um indivíduo, levando-o a adotar essa interação como uma de suas realidades temporais)

- Processamento gráfico de texto, áudio, imagem e vídeo (multimídia)
  Como visualizar fotos, reproduzir e editar vídeos, organizar músicas, obter informações de endereço, aplicativos de escritório e interagir com o sistema operacional.

- Algoritmos de inteligência artificial.

- Processamento gráfico e renderização 3D em tempo-real.
  Renderizar é o ato de compilar e obter o produto final de um processamento digital. Ou seja, toda aquela sequência de imagens que você montou na sua linha do tempo precisa ser condensada em um vídeo.

- Simulações de sistemas complexos
  Projetos de automóveis, aeronaves, navios, engenharia em geral.

Poder de processamento GPUs

- O poder de processamento oferecido pelas GPUs, vem sendo explorado através de *toolkits* específicos de fabricante, como NVIDIA CUDA, AMD ATI Streaming SDK, Intel SDK for OpenCL, ...

- No contexto das *APIs* (*Application Programming Interface*) direcionadas às aplicações gráficas, emprega-se, atualmente, a API gráfica OpenGL ou Direct3D, parte do DirectX SDK da Microsoft (conjunto de APIs para aplicações de áudio e vídeo).

O que é OpenCL - Open Computing Language

- OpenCL é um padrão aberto para *programação de alto desempenho* em *ambientes computacionais heterogêneos* equipados com processador *multicore (*CPUs) e GPUs *manycore*.

- Com foco no paralelismo, a programação em OpenCL baseia-se na escrita de funções que são executadas em múltiplas instâncias simultâneas.

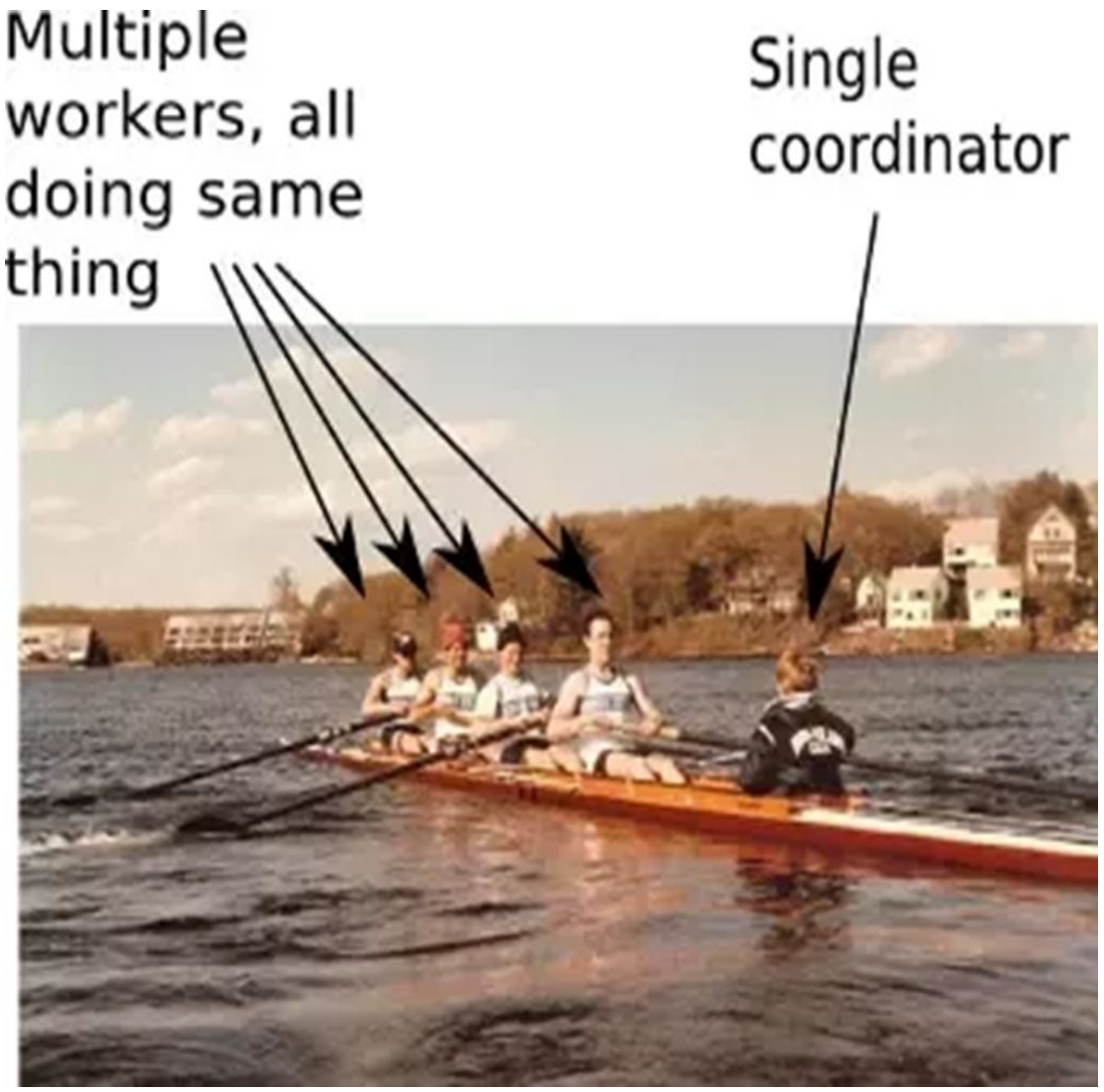
OpenCL – Open Computing Language

- Multiplataforma - disponível em várias classes de hardware e sistemas operacionais.
- Código portável entre arquiteturas (Nvidia, AMD, Intel, Apple, IBM).
- *Paralelismo de dados* (“SIMD”) e *paralelismo de tarefas* (“MIMD”).
- Especificação baseada nas linguagens C e C++.
- Define requisitos para operações em ponto flutuante (números reais)
- Integração com outras tecnologias (*OpenCL + OpenGL*).

Tipos de arquiteturas paralelas SIMD e MIMD

- SIMD (**Single Instruction Multiple Data**)

- Significa que todas as unidades paralelas compartilham a mesma instrução, mas a realizam em diferentes elementos de dados.



SIMD - Single Instruction Multiple Data

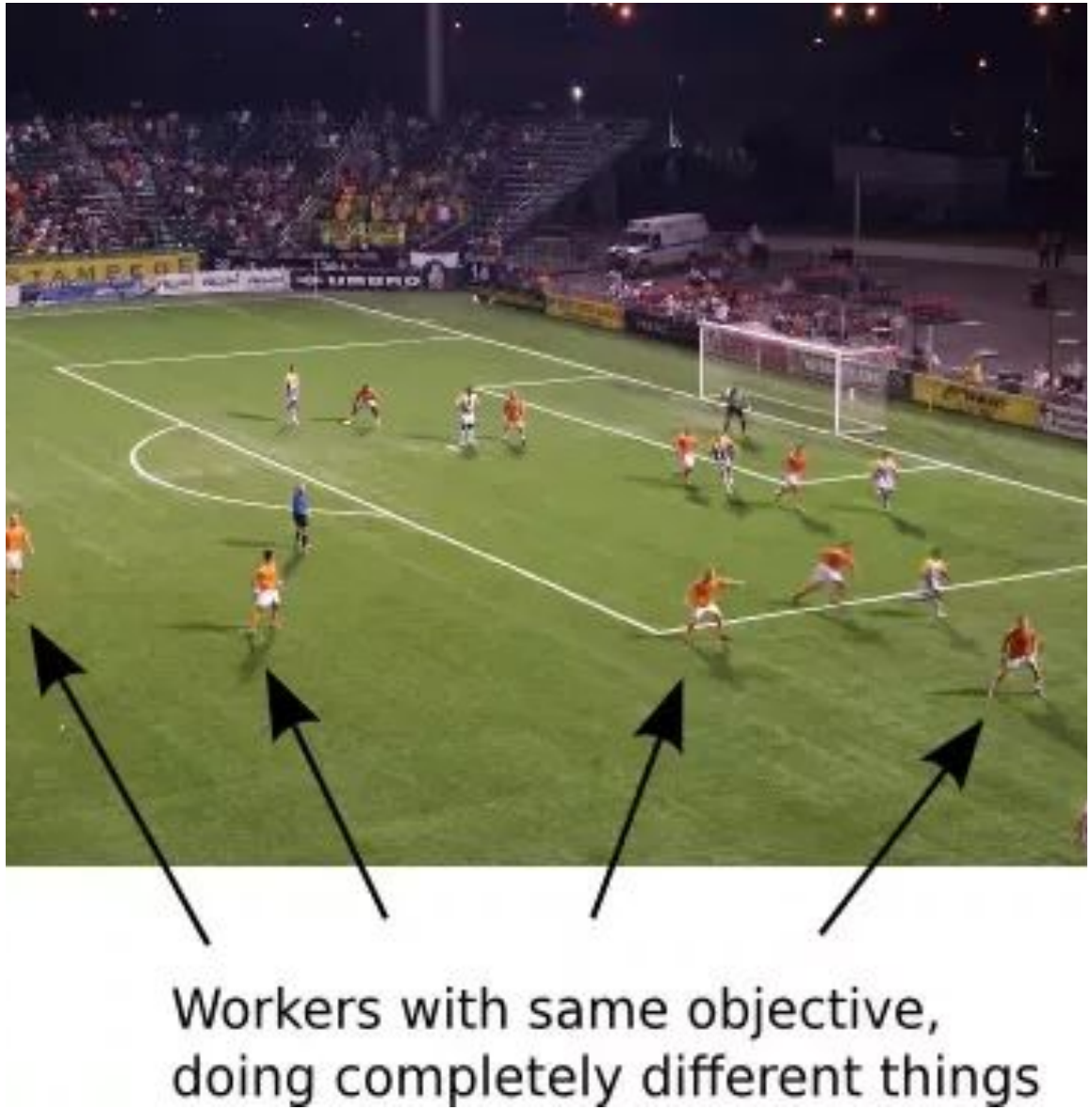
- A idéia é que podemos adicionar os arrays A=[1,2,3,4] e B=[5,6,7,8] para obter o array S=[6, 8, 10, 12] .

- Para isso, tem que haver quatro unidades aritméticas no trabalho, mas todos podem compartilhar a mesma instrução (aqui, "*add*").

Tipos de arquiteturas paralelas SIMD e MIMD

- MIMD (**Multiple Instruction Multiple Data**)

- Significa que as unidades paralelas têm instruções distintas, então cada uma delas pode fazer algo diferente em um dado momento.

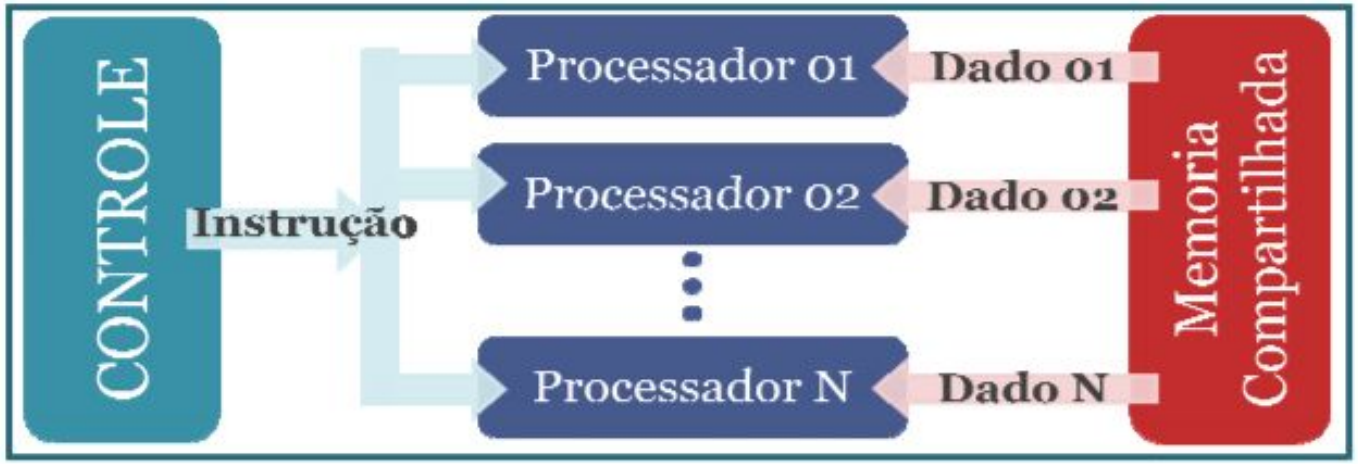


Tipos de Paralelismo

(a) MIMD

(b) SIMD

(a)



(b)

Paralelismo de dados

- A mesma operação é executada simultaneamente (isto é, em paralelo) aos elementos em uma coleção de origem ou uma matriz.
- Em operações paralelas de dados, a coleção de origem é particionada para que vários threads possam funcionar simultaneamente em diferentes segmentos.

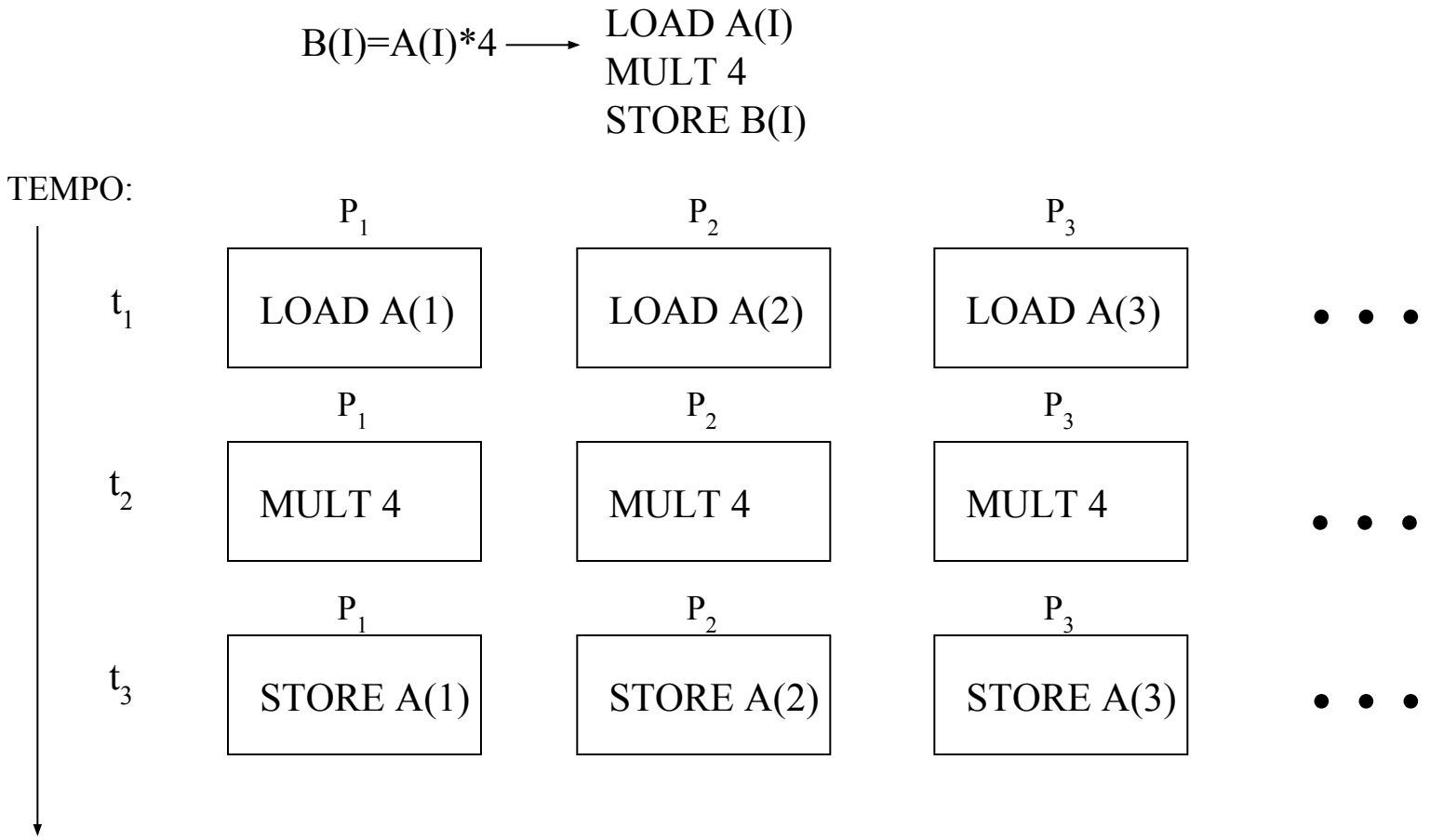
Paralelismo de dados

- Uma técnica de programação que divide uma grande quantidade de dados em partes menores que podem ser operadas em paralelo.

Single Instruction, Multiple Data (SIMD)

- **Síncrono**
  - Todas as unidades devem receber a mesma instrução no mesmo instante de tempo de modo que todas possam executá-la de forma simultânea
- **Determinismo**
  - Em cada instante de tempo só existe uma instrução sendo executada por várias unidades, então se o programa é executado com os mesmo dados de entrada, utilizando o mesmo número de unidades de execução, o resultado será o mesmo
- **Apropriado para aplicações que utilizam paralelismo orientado a instrução**

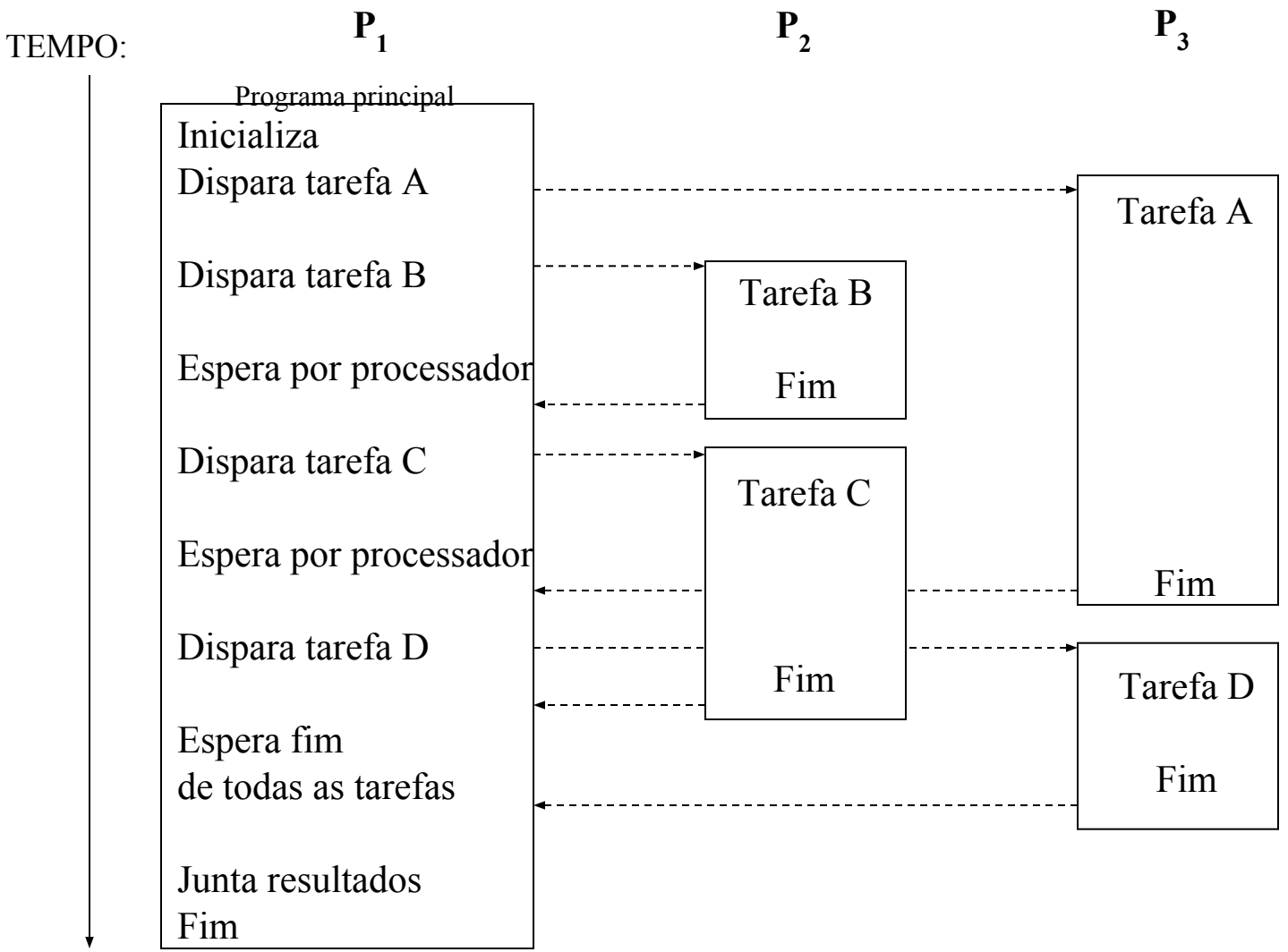
Single Instruction, Multiple Data (SIMD)



Terminologia CUDA e OpenCL

CUDA	OpenCL
Streamming Multiprocessor (SM)	Compute Unit (CU)
Streamming Processor (SP)	Processing Element (PE)
host	*host*
device	*device*
kernel	*kernel*
thread	*workitem*
bloco	*workgroup*
grid	*NDRange*

Multiple Instruction, Multiple Data (MIMD)



Ambientes OpenCL Disponíveis

- FOXC (Fixstars OpenCL Cross Compiler)
- NVIDIA OpenCL
- AMD (ATI) OpenCL
- Apple OpenCL
- IBM OpenCL

Objetivo

- OpenCL torna possível a escrita de código multi-plataforma para tais dispositivos (CPU + GPU), sem a necessidade do uso de linguagens e ferramentas específicas de fabricante.

- Introduzir conceitos-chave e explorar a arquitetura definida no padrão OpenCL.

- Capacitar recursos humanos a utilizar de forma efetiva todo este potencial de processamento disponível para computação de alto desempenho.

OpenCL

- A capacidade de processamento paralelo oferecida por processadores *multicore* pode ser explorada pelo uso de *multithreading*, habilitado por tecnologias como POSIX Threads, OpenMP, entre outras.

- O desenvolvimento de soluções em *plataformas computacionais heterogêneas* (CPU + GPU) apresenta-se com custo elevado para o desenvolvedor, que deve possuir domínio de diversos paradigmas e ferramentas para extrair o poder computacional oferecido por estas plataformas.

OpenCL

- Neste contexto, surge OpenCL, criada pela Apple [Apple Inc. 2009] e padronizada pelo Khronos Group [Khronos Group 2010a].

- Apple Inc. (2009). *OpenCL Programming Guide for Mac OS X*.

  http: //developer.apple.com/mac/library/documentation/Performance/Conceptual/OpenCL_MacProgGuide/Introduction/Introduction.html.

- Khronos Group (2010a). *OpenCL - The open standard for parallel programming of heterogeneous systems*. http://www.khronos.org/opencl/.

OpenCL

- OpenCL é uma plataforma aberta e livre de royalties para computação de alto desempenho em sistemas heterogêneos compostos por CPU e GPUs.

- OpenCL oferece aos desenvolvedores um ambiente de programação paralela para escrever códigos portáveis para estes sistemas heterogêneos.

Código Sequencial em C

```
void ArrayDiff(const int* a,
const int* b, int* c, int n)
{
    for (int i = 0; i < n; ++i)
    {
        c[i] = a[i] - b[i];
    }
}
```

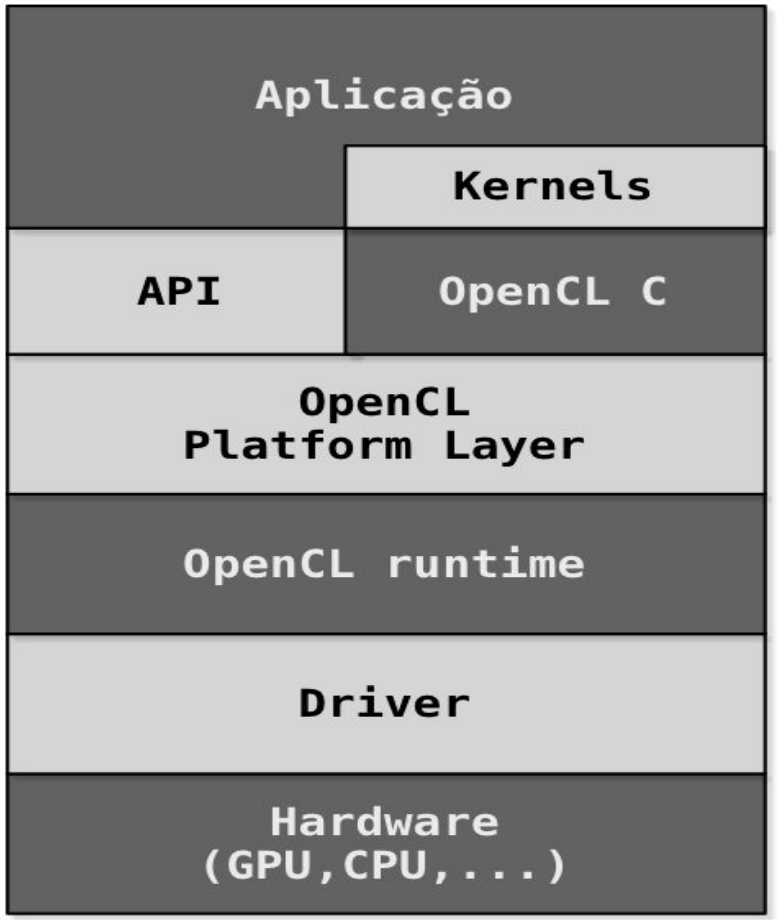
Código em OpenCL

```
__kernel void ArrayDiff(
    __global const int* a,
    __global const int* b,
    __global int* c)
{
  int id = get_global_id(0);
  c[id] = a[id] - b[id];
}
```

Arquitetura em Camadas - OpenCL

- Aplicações OpenCL são estruturadas em camadas, como mostra a Figura 1.

- OpenCL é um *framework* que inclui uma linguagem OpenCL C, uma API C, bibliotecas e um *runtime system*.



Importante observar no código OpenCL

- Não há um loop em kernels, para iterar sobre os arrays.

- O código escrito geralmente focaliza na computação de uma unidade do resultado desejado.

- O *OpenCL runtime* fica responsável por criar tantas instâncias de kernel, quantas forem necessárias para o processamento de todo o conjunto de dados, no momento da execução.

Importante observar no código OpenCL

- *Não é necessário informar ao kernel OpenCL* o tamanho do conjunto de dados, uma vez que a manipulação desta informação é responsabilidade do *OpenCL runtime*.

- O *OpenCL runtime* permite ao desenvolvedor *enfileirar comandos para execução nos dispositivos (GPUs)*, sendo também é responsável por *gerenciar os recursos de memória* e *computação* disponíveis.

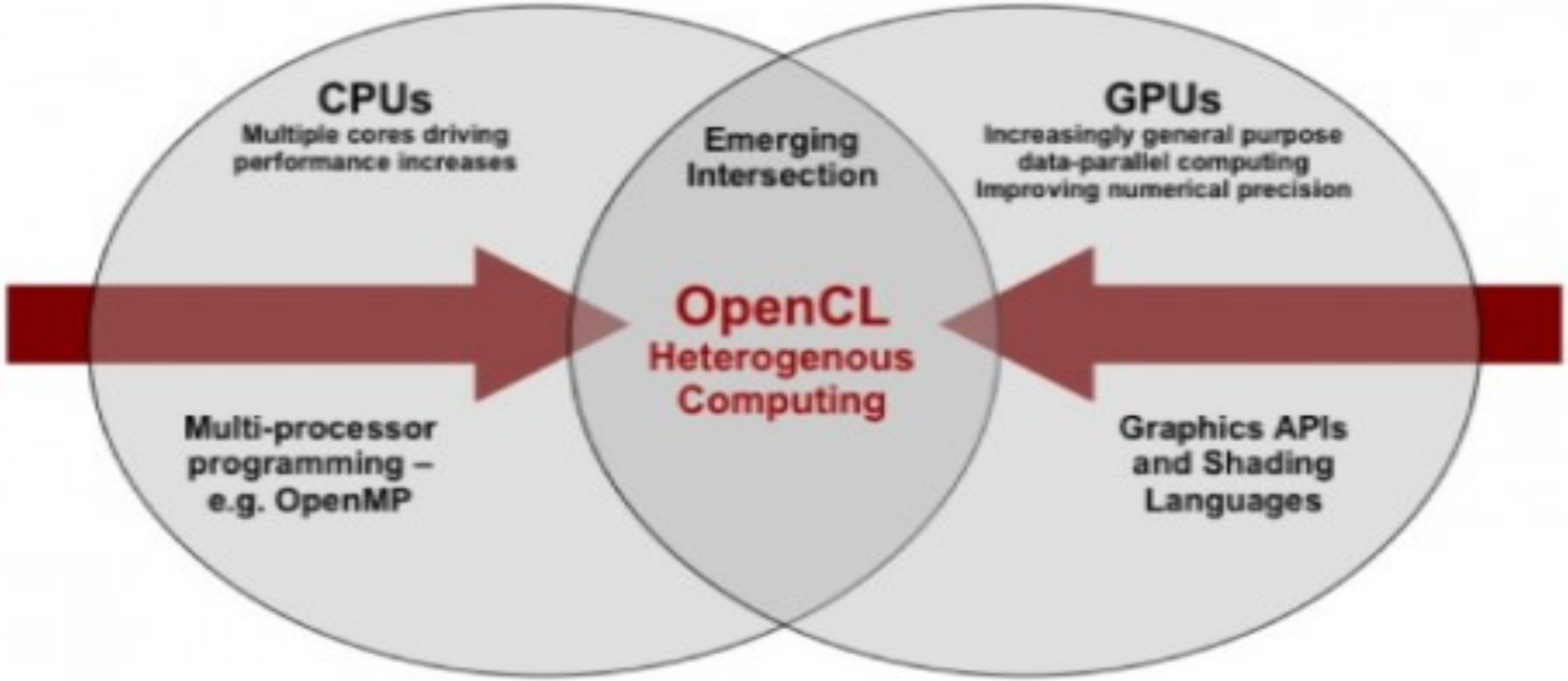
Kernels e a *API C*

- A aplicação faz uso da API C para comunicar-se com a camada *OpenCL Platform Layer*, enviando comandos ao *OpenCL runtime*, que gerencia diversos aspectos da execução.
- *Kernels* correspondem às entidades que são escritas pelo desenvolvedor na linguagem OpenCL C.

Uso de OpenCL

- O uso de OpenCL é, portanto, recomendado para aplicações que realizam operações computacionalmente custosas, porém paralelizáveis por permitirem o cálculo independente de diferentes porções do resultado.

Processor Parallelism



OpenCL – Open Computing Language

Open, royalty-free standard for portable, parallel programming of heterogeneous parallel computing CPUs, GPUs, and other processors

Arquitetura OpenCL

- A arquitetura OpenCL é descrita por quatro modelos, bem como por uma série de conceitos associados a estes.

- Arquitetura abstrata de baixo nível.
- Implementações mapeiam para entidades físicas.
- Quatro modelos:
  - Plataforma
  - Execução
  - Programação
  - Memória

Modelo de Plataforma

- Descreve as entidades presentes em um ambiente computacional OpenCL.
- Um ambiente computacional OpenCL é integrado por um hospedeiro (host), que agrega um ou mais dispositivos (devices).
- Cada dispositivo possui uma ou mais unidades de computação (*compute units*), sendo estas compostas de um ou mais elementos de processamento (*processing elements*).
- O hospedeiro é responsável pela descoberta e inicialização dos dispositivos, bem como pela transferência de dados e tarefas para execução nestes.
- A Figura 2 apresenta um diagrama do modelo de plataforma e de memória.

Modelo OpenCL

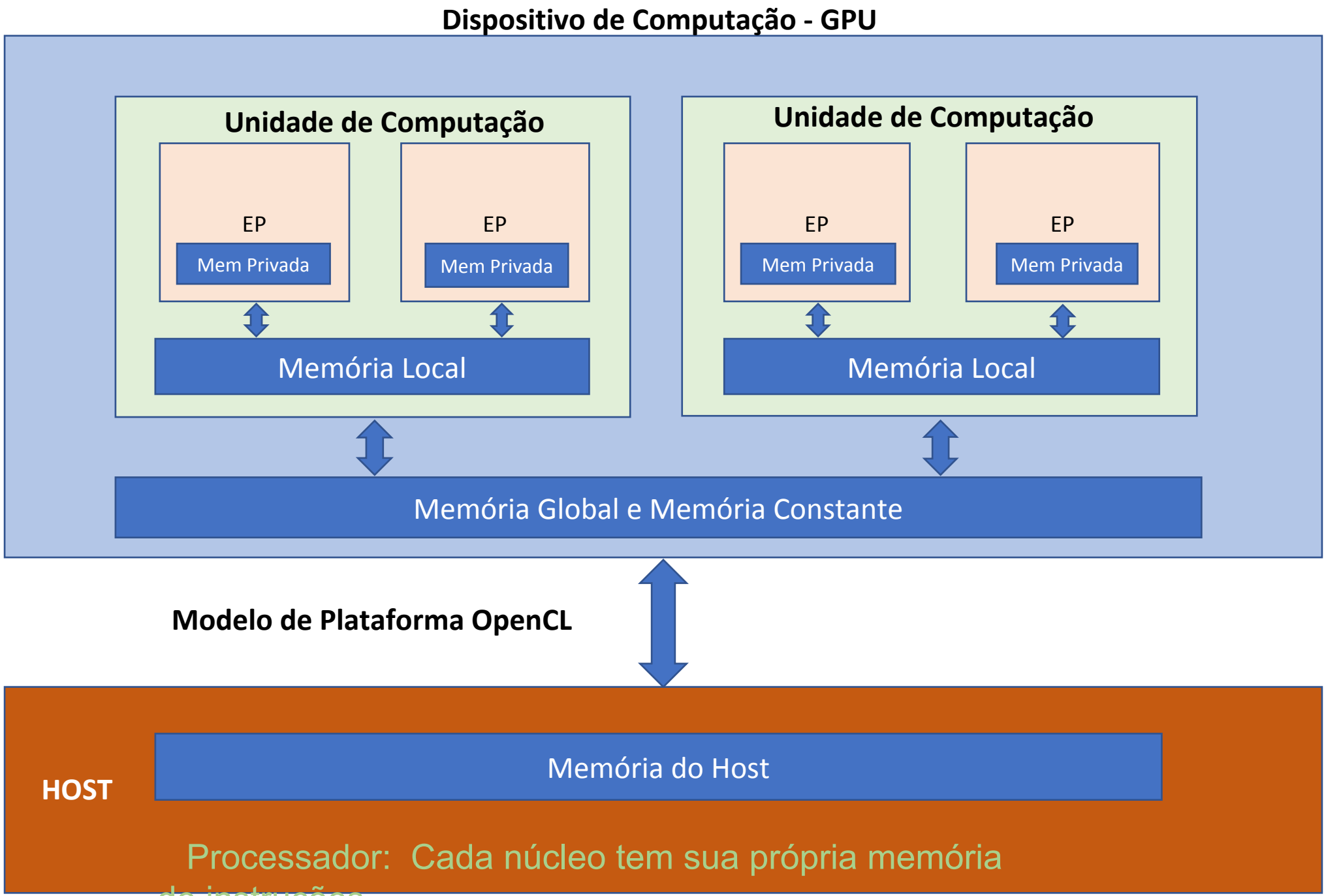
- Seguindo o estilo da especificação OpenCL, é possível descrever as principais ideias inerentes ao OpenCL usando uma hierarquia de modelos:
  - Modelo da Plataforma
  - Modelo de Execução
  - Modelo de Memória

Modelo de Plataforma

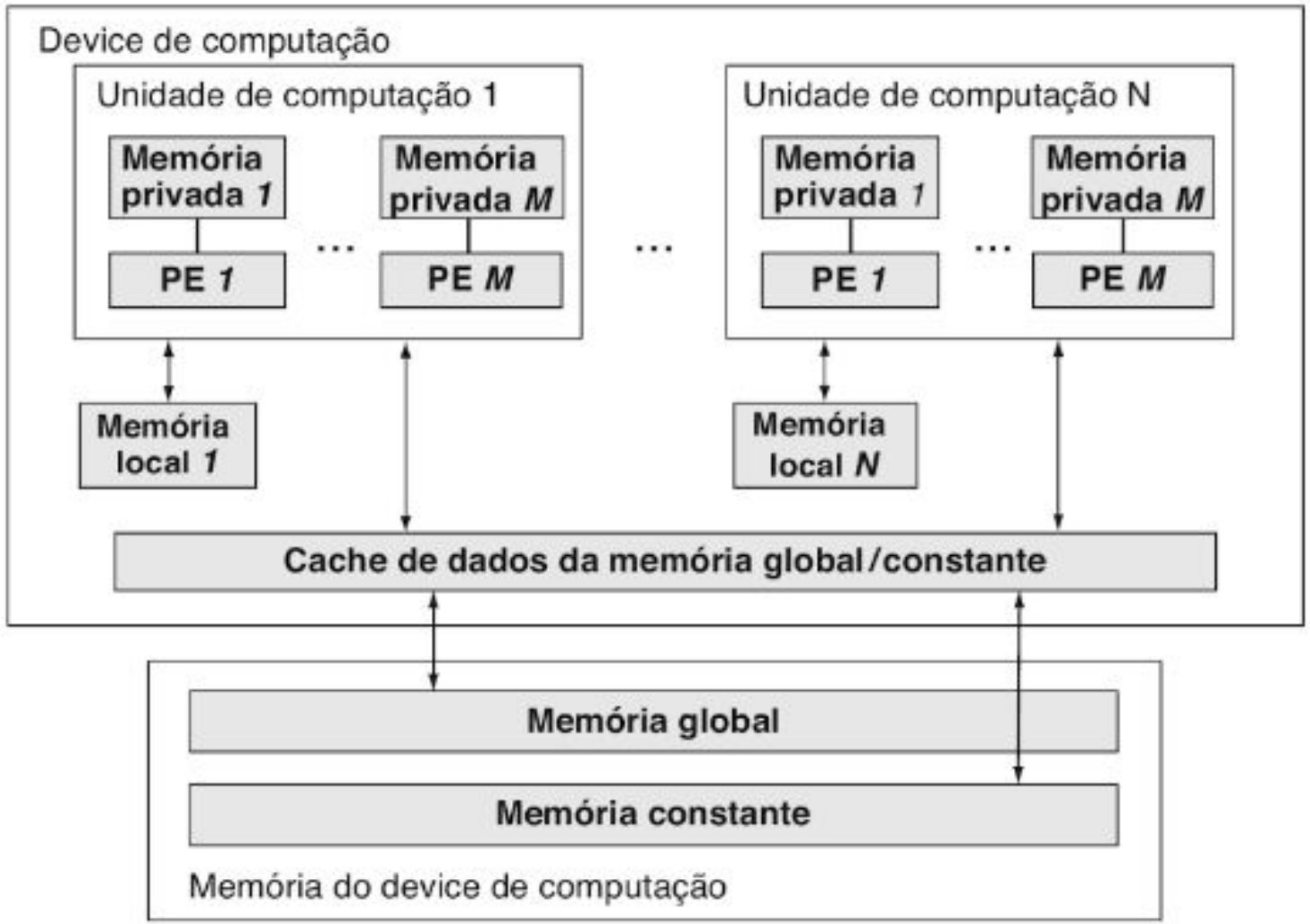
- Uma plataforma OpenCL é frequentemente descrita como uma combinação de dois elementos computacionais, o host e um ou mais dispositivos.

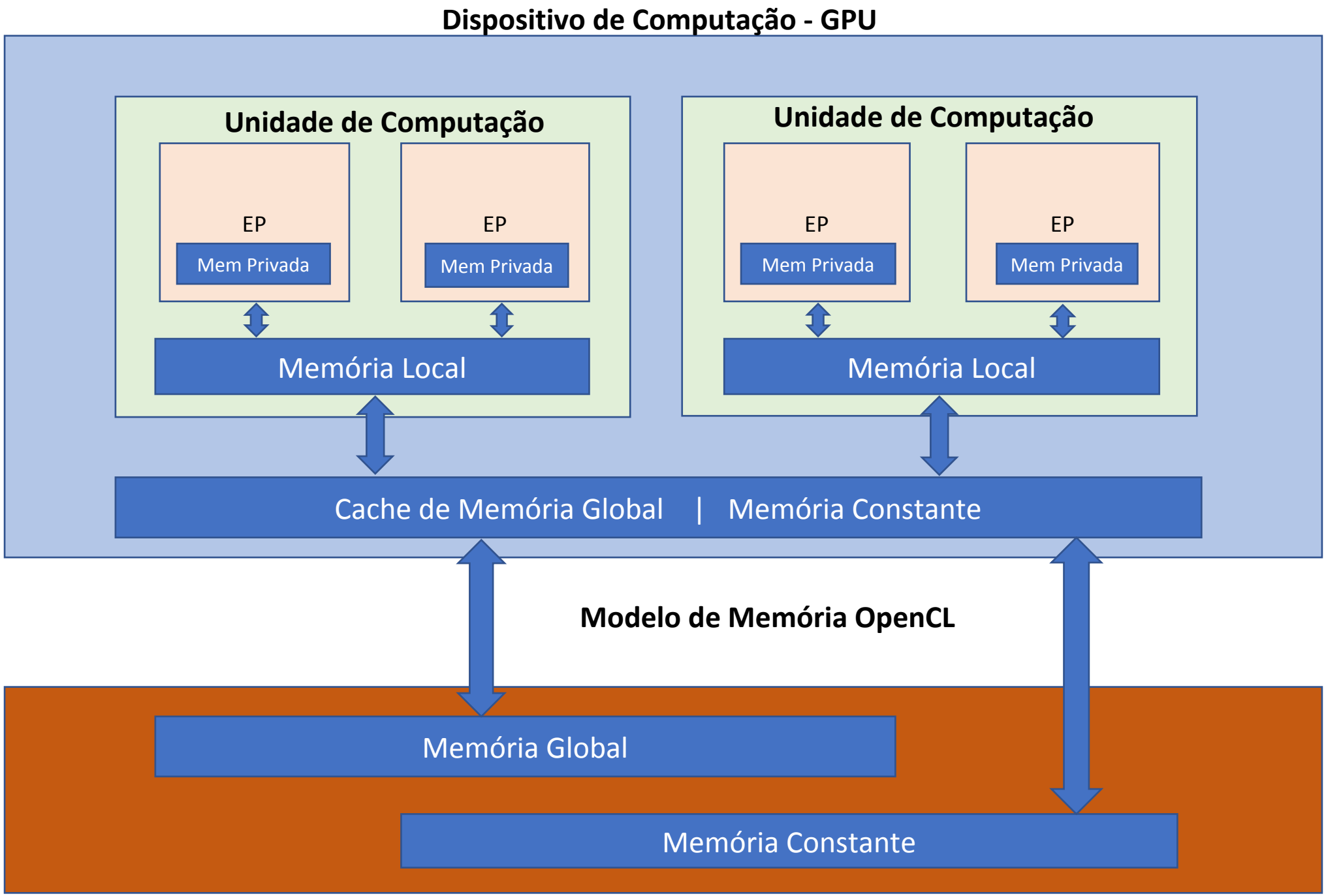
- O elemento host é responsável por administrar a execução da aplicação, enquanto os dispositivos realizam a tarefa propriamente dita.

- Um dispositivo OpenCL é composto de um ou mais unidades de computação (UC) e cada UC é composto por, um ou mais, elemento de processamento (EP).


Dispositivo de Computação - GPU
Unidade de Computação
EP
Mem Privada
EP
Mem Privada
Memória Local
Unidade de Computação
EP
Mem Privada
EP
Mem Privada
Memória Local
Memória Global e Memória Constante
Modelo de Plataforma OpenCL
HOST
Memória do Host
Processador: Cada núcleo tem sua própria memória de instruções.

Arquitetura conceitual de um device OpenCL, o host não aparece




Dispositivo de Computação - GPU
Unidade de Computação
EP
Mem Privada
EP
Mem Privada
Unidade de Computação
EP
Mem Privada
EP
Mem Privada
Memória Local
Memória Local
Cache de Memória Global | Memória Constante
Modelo de Memória OpenCL
Memória Global
Memória Constante

O dispositivo (device) OpenCL

- Deve conter várias Unidades de Computação, que é composta por vários Elementos de Processamento. Como exemplo, a GPU descrita em termos OpenCL é a seguinte.

  - Dispositivo OpenCL - GPU
  - Unidade de Computação - Vários processadores
  - Elementos de processamento – Núcleos de processadores

OpenCL dispositivo será chamado de um dispositivo (*device*) a partir deste ponto em frente.

Modelo de programação

- O modelo de programação descreve as abordagens possíveis para a execução de código OpenCL. O modelo de programação em OpenCL é semelhante ao utilizado em CUDA.

- *Kernels* podem ser executados de dois modos distintos:

  - Paralelismo de dados (Data Parallel): são instanciados múltiplos *work-items* para a execução do kernel. Este é o modo descrito até o momento, e consiste no modo principal de uso de OpenCL.

  - Paralelismo de tarefas (Task Parallel): um único *work-item* é instanciado para a execução do *kernel*. Isto permite a execução de múltiplos *kernels* diferentes sobre *um mesmo conjunto de dados*, ou sobre conjuntos de dados distintos.

Modelo de Execução

- O modelo de execução do OpenCL é definido em termos de duas unidades de execução distintas: *programa host* e *funções kernel*.

- O programa *host* usa a API OpenCL para criar e administrar uma estrutura chamada *OpenCL context* .

- As *funções kernel são* a parte paralela de uma aplicação OpenCL. É o código que é executado em um dispositivo (GPU).

- Um *kernel* em execução é referenciado como um *work-item (thread)* e um conjunto de work-*items* como um *work-group (bloco de threads)*.

- O modelo de execução descreve a instanciação de kernels e a identificação das instâncias.

- Em OpenCL, um kernel é executado em um espaço de índices de 1, 2 ou 3 dimensões.

- Cada instância do kernel é denominada item de trabalho (work-item), materializado por uma thread, sendo este identificado por uma *tupla de índices*, havendo um índice para cada dimensão do espaço de índices. Estes índices são os identificadores globais do item de trabalho.

Um NDRange de duas dimensões

- A Figura 3 ilustram NDRange de duas dimensões, dividido em quatro *work-groups*.
- Cada *work-group* contém quatro *work-items*.
- Observando-se os diferentes índices existentes, pode constar que um *work-item* pode ser identificado individualmente de duas maneiras:

1. Por meio de seus identificadores globais.

2. Por meio da combinação de seus identificadores locais e dos identificadores do seu *work-group*.

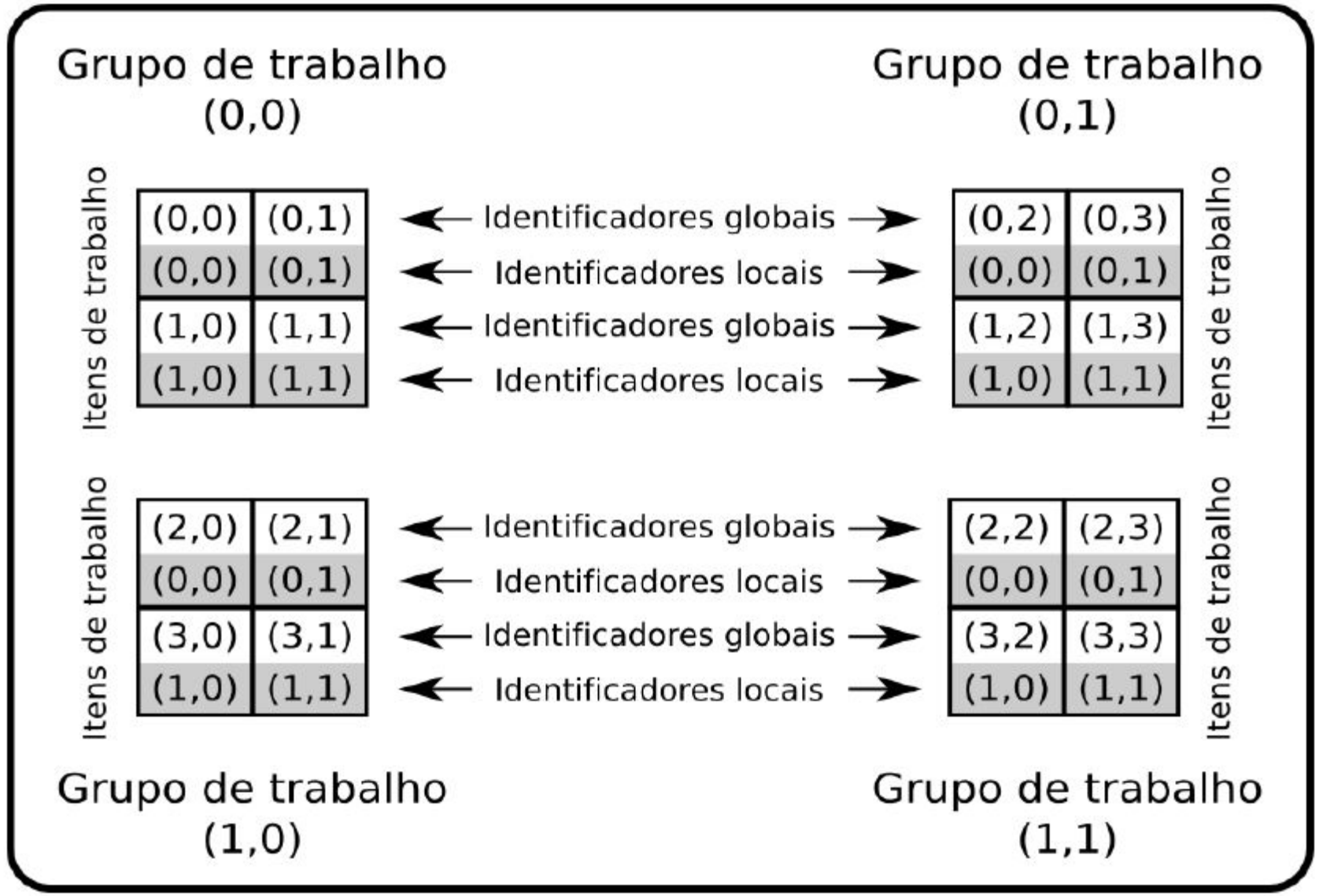
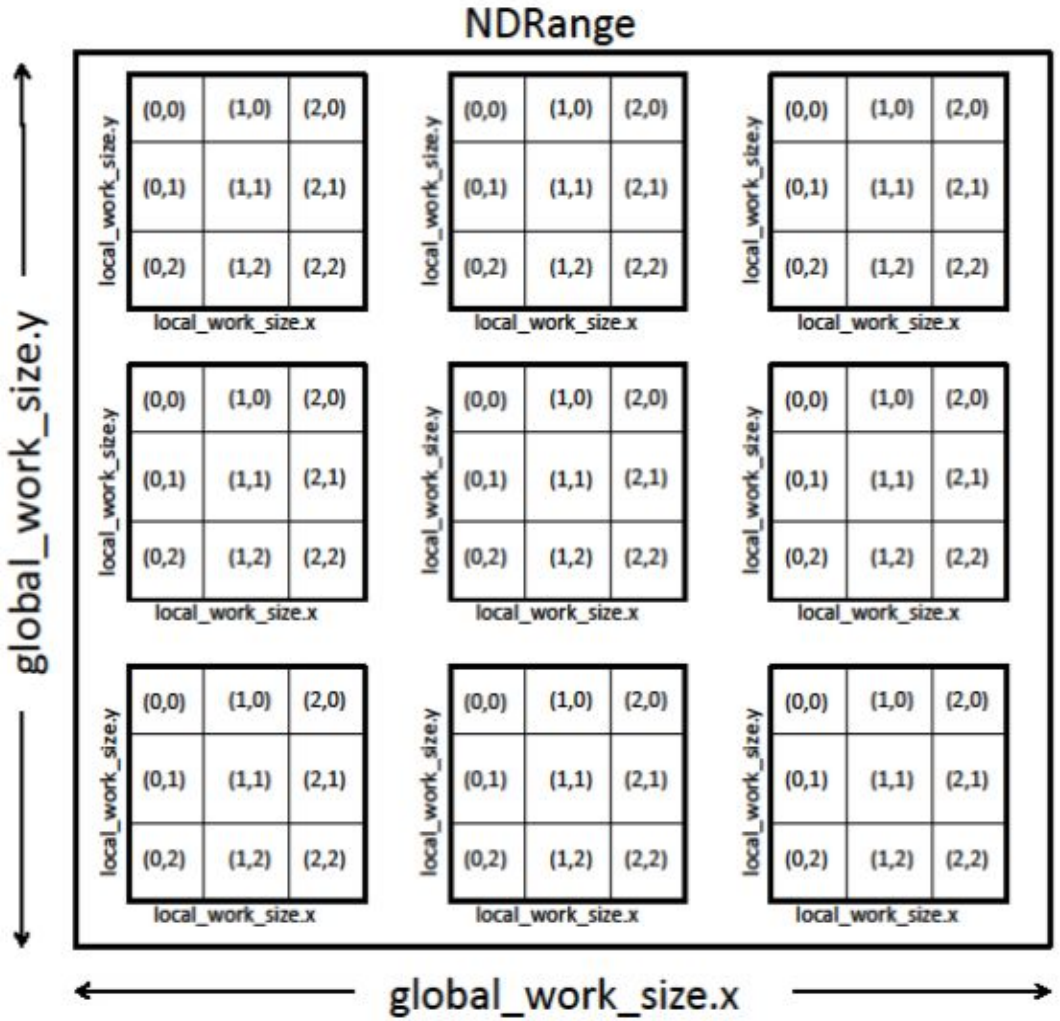


Figura 3. Exemplo de espaço de índices de duas dimensões.

Organização de Work-groups (blocos) em um NDRange (grid)



Identificando work-items

- Os identificadores de um *work-item* são, em geral, empregados para indexar estruturas que armazenam os dados de entrada e saída de um *kernel*.

- O *espaço de índices* é frequentemente dimensionado de em função do tamanho dos conjuntos de dados a serem processados.

- Assim, por meio de seus identificadores, cada *work-item* pode ser designado responsável por um ponto ou uma parte específica do resultado.

Kernels e Contexto

- A execução de *kernels* em uma aplicação OpenCL só é possível após a definição de um *contexto* (*context*).

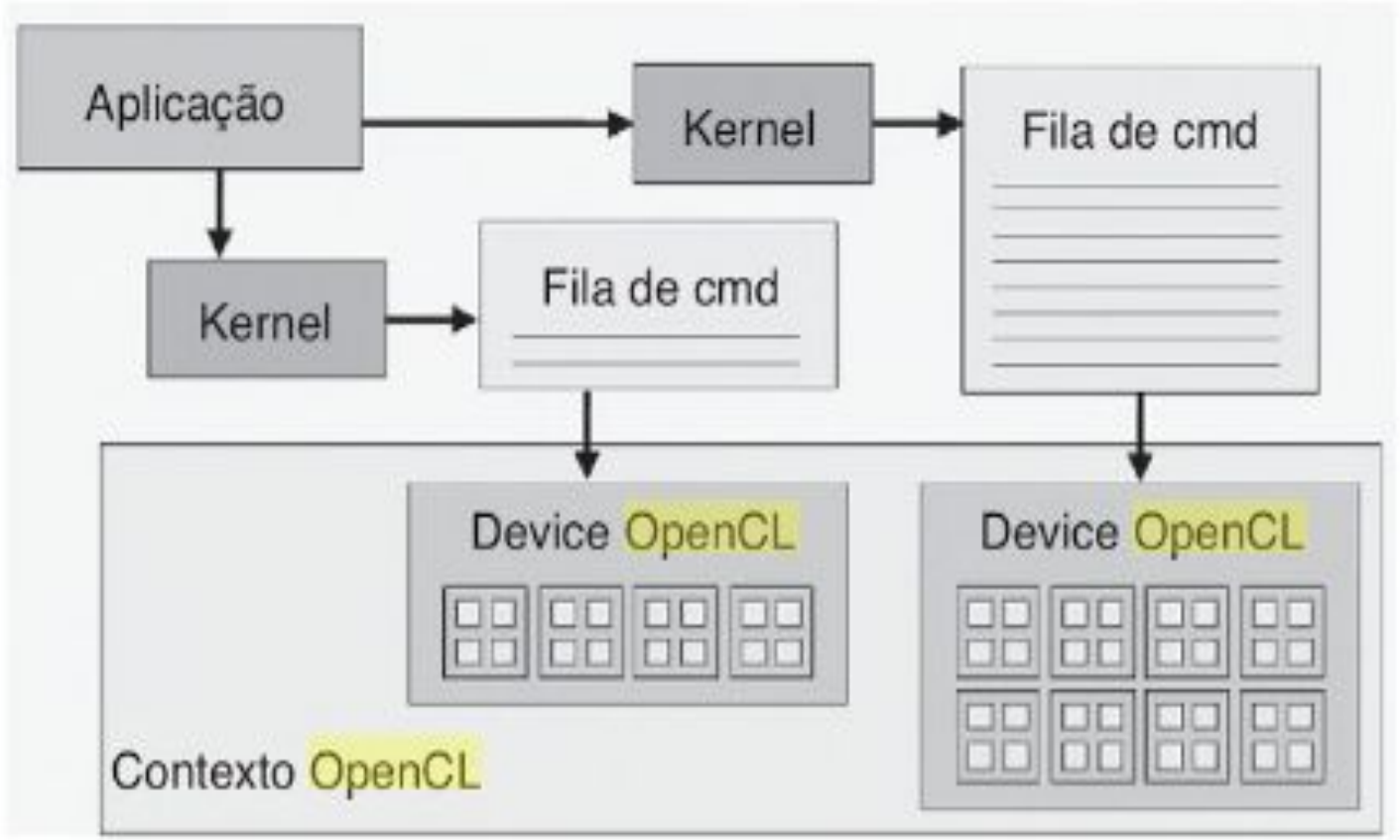
- Um contexto engloba um *conjunto de dispositivos* e *kernels*, além de outras estruturas necessárias para a operação da aplicação, como *filas de comandos*, *objetos de programa* e *objetos de memória*.

Kernels e filas de comandos

- Para serem executados, *kernels* são submetidos a *filas de comandos* (*command queues*) associadas aos dispositivos em uso.

- Cada dispositivo (GPU) possui *uma* fila de comandos associada a ela.

Contexto OpenCL para Device GPUs



Kernels

- O modelo de execução descreve a instanciação de kernels e a identificação das instâncias.

- Em OpenCL, um *kernel* é executado em um espaço de índices de 1, 2 ou 3 dimensões, denominado NDRange (N-Dimensional Range).

- Cada instância do kernel é denominada *work-item*, sendo este identificado por uma *tupla de índices*, havendo um índice para cada dimensão do espaço de índices.

- Estes índices são os identificadores globais do *work-item*.

Modelo de Memória OpenCL

1. Memória Global - Memória que pode ser lida de todos os *work-items*. É fisicamente a memória principal do dispositivo (GPU).

2. Memória Constante - Também é memória que pode ser lida de todos os *work-items*.

   É fisicamente a memória principal do dispositivo, mas pode ser usada de forma mais eficiente do que a memória global, se as unidades de computação contiverem hardware para suportar *cache de memória constante*.

Memória Constante

- A memória constante não é especificamente projetada para cada tipo de dados somente leitura.
- Em vez disso, para dados em que cada elemento é acessado simultaneamente por todos os work-items.
- Valores do programa que nunca mudam (por exemplo, uma variável de dados contendo o valor de pi) também cai nesta categoria.
- A memória constante é modelada como parte da memória global.
- Os objetos de memória que são transferidos para a memória global podem ser especificados como constantes.
- Os dados são mapeados para memória constante usando a palavra-chave `__constant`

Modelo de Memória OpenCL

3. Memória local - Memória que pode ser lida por *work-items* dentro de um *work-group*. É fisicamente a memória compartilhada por cada das *unidades de computação (UC)*.

4. Memória privada - Memória que só pode ser usada dentro de cada *work-item*. É fisicamente os *registradores usados por cada elemento de processamento (EP)*.

Modelo de Memória OpenCL

- Os 4 tipos de memória mencionados existem todas no *dispositivo*.
- O lado do *host* tem sua própria memória também.
- O *host*, por outro lado, é capaz de ler e escrever para a memória global, constante e do host.
- No entanto, somente o *kernel* pode acessar a memória no próprio *dispositivo*.

Modelo de Memória para OpenCL

- O programa *host* e os *kernels* podem ler e escrever na memória global.
- A memória Local é disponível para todos os *work-items* em um determinado *work-group*.
- A memória Constante é disponível somente para leitura pelos *work-items*.
- Cada *work-item* tem sua própria memória privada, que não é visível para outros *work-items*.

Consistência de memória

- O estado visível da memória a um item de trabalho pode não ser o mesmo para outros itens de trabalho durante a execução de um kernel.

- Porém, o padrão OpenCL ordena que as seguintes garantias sejam feitas quanto à consistência do acesso à memória:

Consistência de memória

1. Para um único *work-item*, há consistência de leitura e escrita. Se um *work-item* escrever em uma região de memória e, a seguir, ler a mesma região, o valor lido será aquele que foi escrito.

2. As *memórias global e local* são consistentes entre *work-items* de um mesmo work-group em uma barreira de sincronização.

Work-Items e Work-Groups

- *Work-items* são organizados em *work-groups*.
- Cada *work-group* também é identificado por uma *tupla de índices*, sendo um índice para cada dimensão do espaço.
- Dentro de um *work-group*, um *work-item* recebe ainda outra *tupla de índices*, os quais constituem os seus identificadores locais no *work-group*.
- Memória Local é modelada como sendo compartihada por um *work-group*.

Aplicações em OpenCL: Passos

1. Levantamento dos dispositivos disponíveis , a criação do *contexto de execução*, *programas* e *kernels* utilizados pela aplicação, e a criação da *fila de comandos* do *dispositivo*.

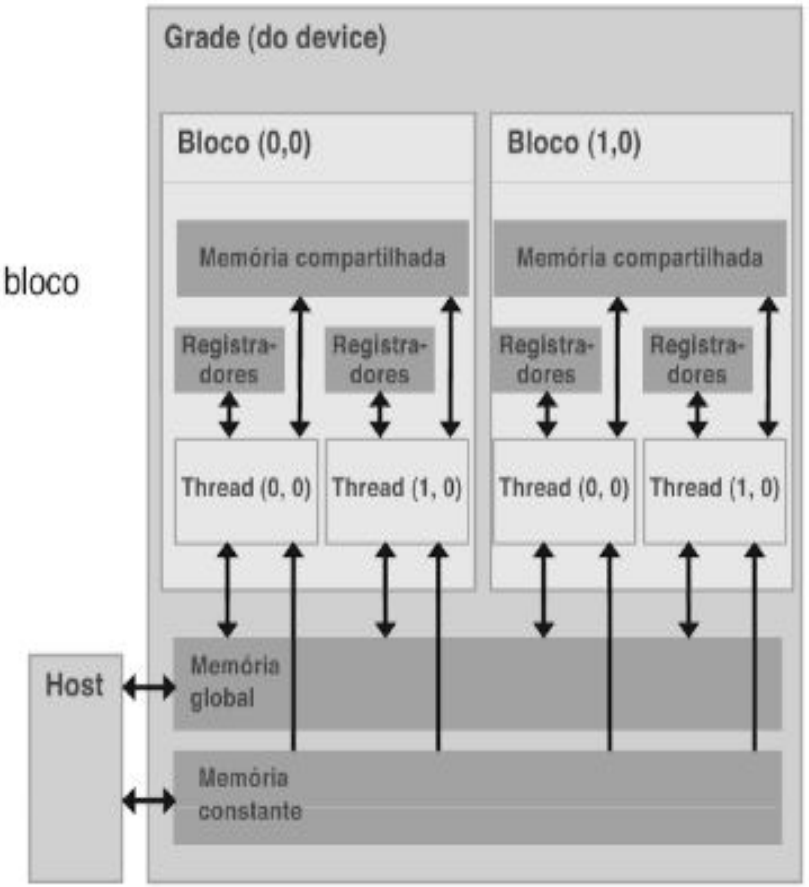
2. Envio de dados para o *dispositivo*.

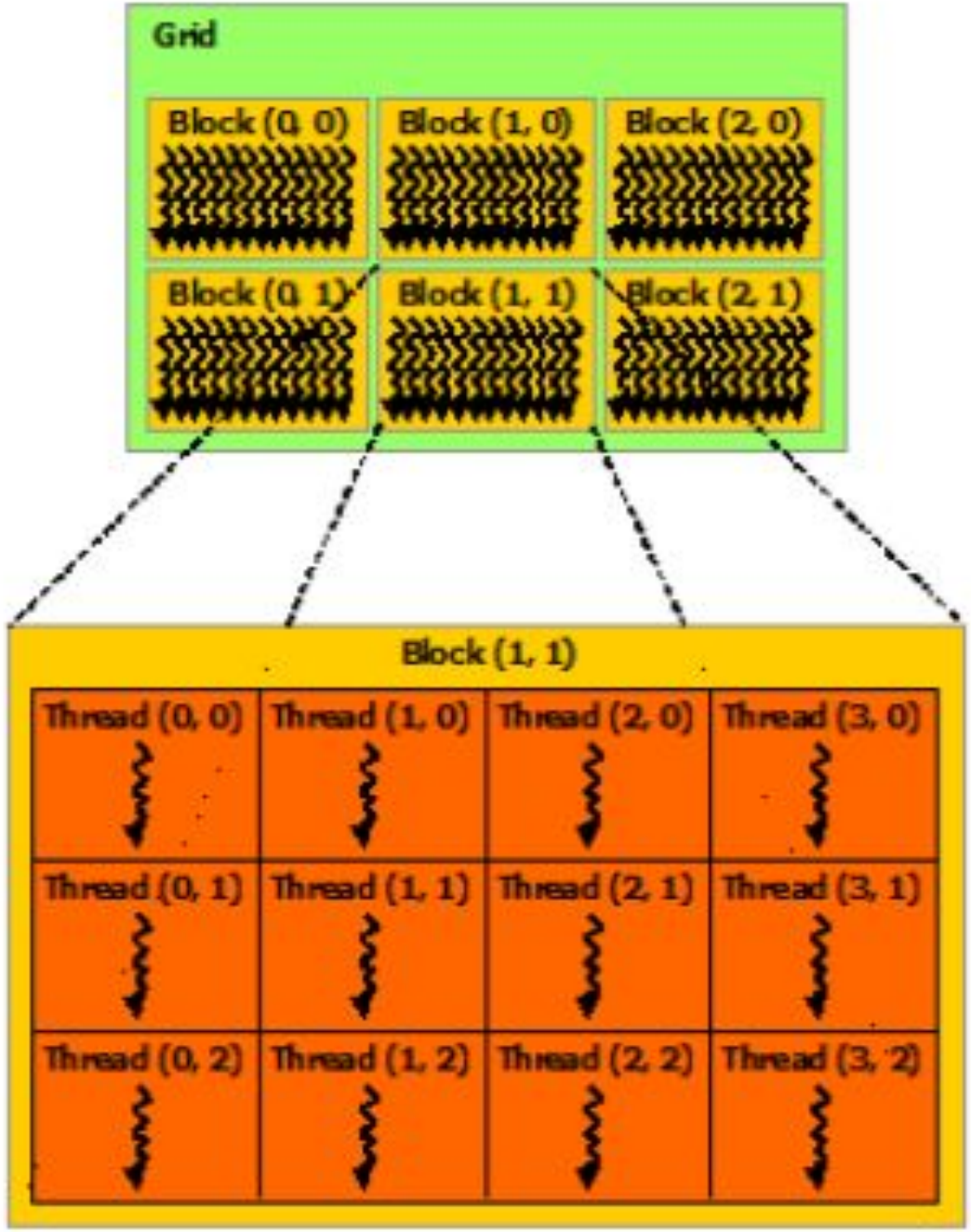
3. A execução do *kernel no dispositivo.*

4. A leitura dos resultados gerados pela execução no dispositivo .

Modelo de Memória CUDA

- O código do device pode:
  - L/E registradores por thread
  - L/E memória local por thread
  - L/E memória compartilhada por bloco
  - L/E memória global por grade
  - Apenas ler memória constante por grade
- O código do host pode:
  - Transferir dados de/para memórias global e constante por grade





Grid e Blocos de threads em CUDA

The OpenCL Programming Book

https://www.fixstars.com/en/opencl/book/OpenCLProgrammingBook/calling-the-kernel/

4.3 Calling the kernel

- *Data Parallelism and Task Parallelism*

| Data Parallelism and Task Parallelism

- O código paralelizável é implementado com:

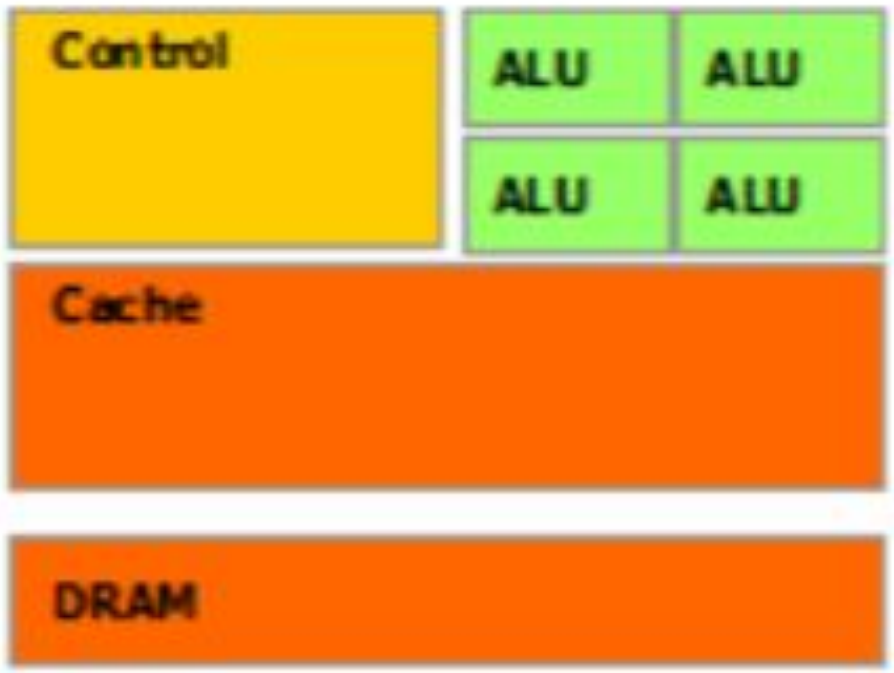
  "Paralelismo de dados" ou “Paralelismo de Tarefa".

- No OpenCL, a diferença entre os dois é, se o mesmo kernel ou kernels diferentes são executados em paralelo.

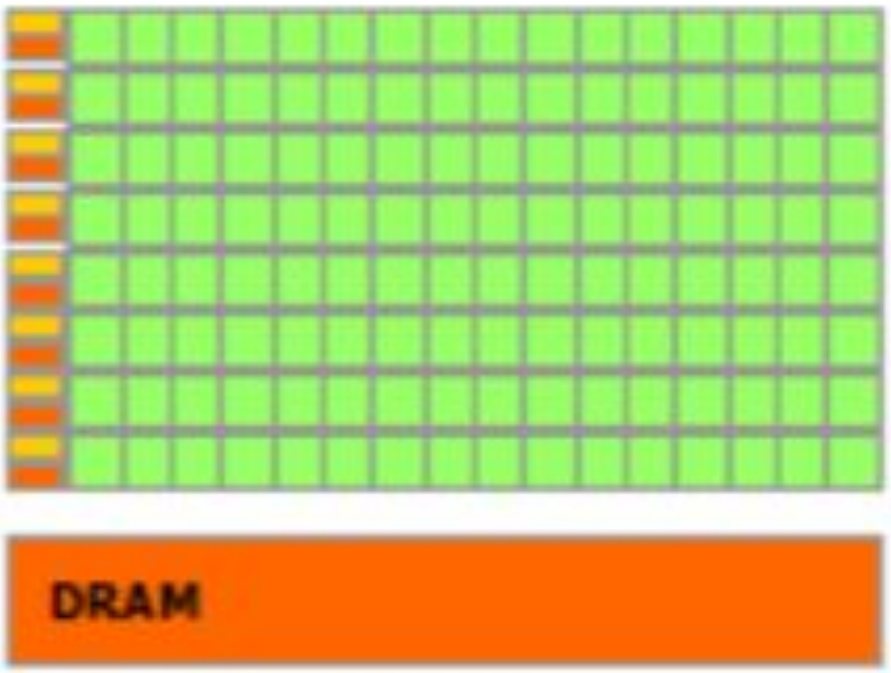
| Data Parallelism and Task Parallelism

- Atualmente, a maioria das GPUs contém centenas de processadores.

Uma comparação entre a arquitetura de uma CPU com apenas quatro unidades lógica e aritmética (ULAs) e uma GPU com 128 ULAs.



CPU



GPU

Hardware da GPU

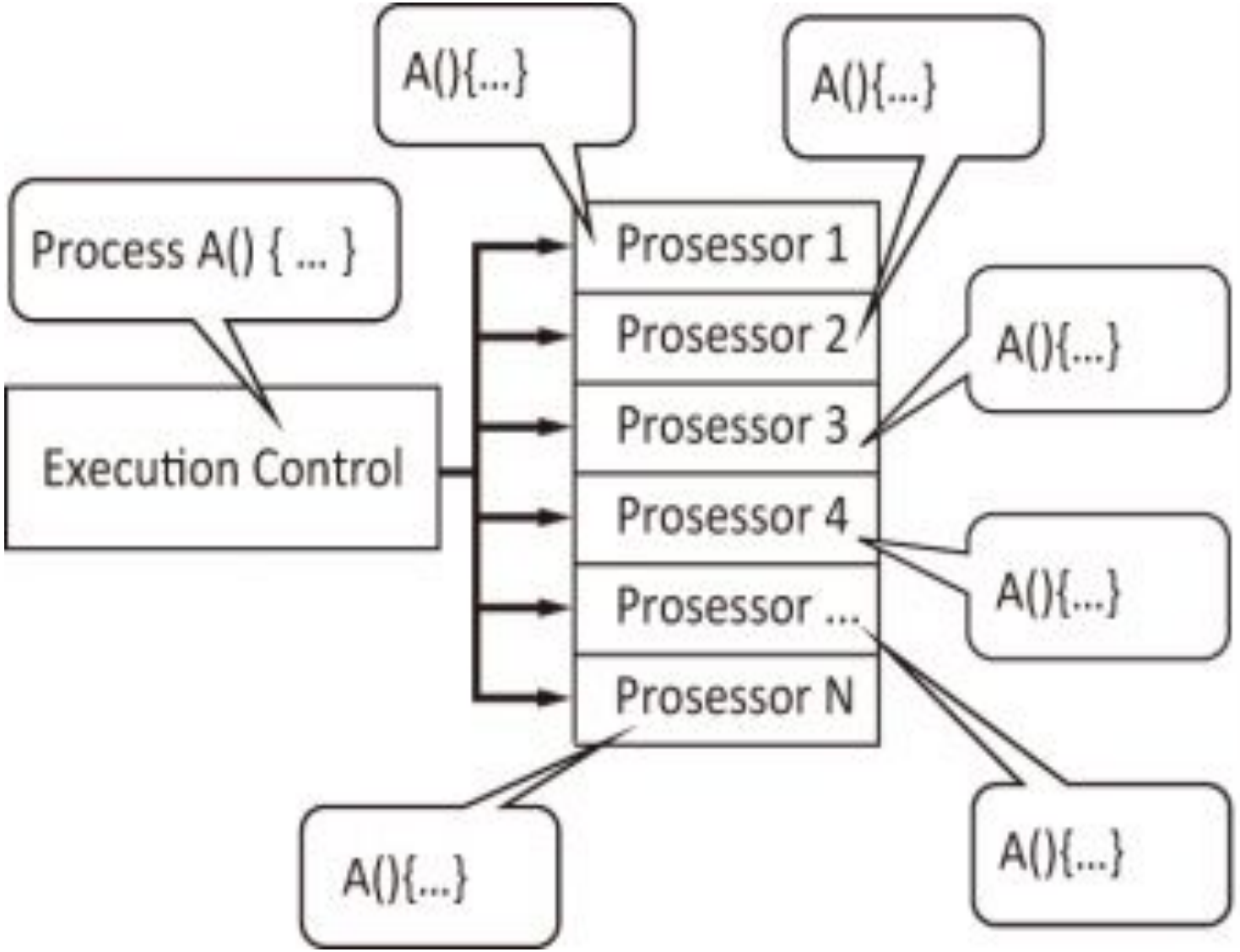
- Em hardware, como a busca de instruções e os contadores de programas, são compartilhados entre os processadores.

- Por esta razão, as GPUs funcionam muito bem para paralelismo de dados (códigos iguais) e são incapazes de executar tarefas de códigos diferentes em paralelo, ao mesmo tempo.

- Ver Figura 4.2 e Figura 4.3

Figure 4.2: **Efficient** use of the GPU

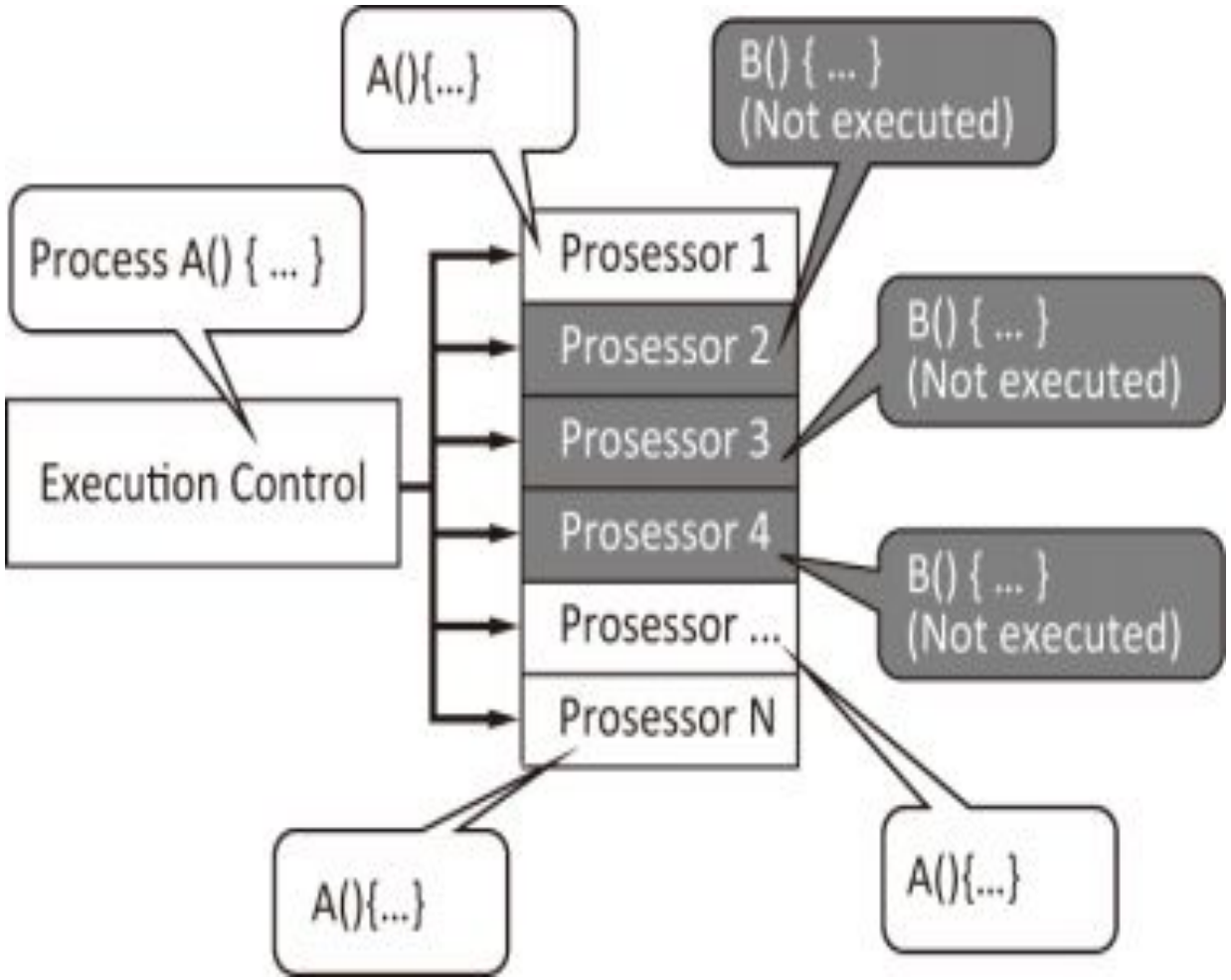
Paralelismo de Dados



Processadores executam a mesma tarefa

- Conforme mostrado na Figura 4.2, quando vários processadores executam a mesma tarefa, o número de tarefas, igual ao número de processadores, pode ser executado ao mesmo tempo, de uma vez.

Figure 4.3:
Inefficient use of the GPU Paraleismo de Dados



GPU - Tarefas estão programadas para serem executadas em paralelo

- A Figura 4.3 mostra o caso em que tarefas A e B estão programadas para serem executadas em paralelo na GPU.

- Como processadores só podem processar o mesmo conjunto de instruções nos núcleos (códigos iguais), os processadores agendados para processar a Tarefa B (códigos diferentes de A) devem estar no modo inativo até que a Tarefa A esteja concluída.

Cuidar ...

- Ao se desenvolver uma aplicação, *o tipo de paralelismo e o hardware precisam ser considerados*, e usar a API apropriada.

Data Parallelism and Task Parallelism

- Para tarefas paralelas de dados adequadas para um dispositivo como o GPU, o OpenCL fornece uma API para executar um mesmo kernel em vários processadores.

Data Parallelism and Task Parallelism

- Esta seção usará a operação aritmética vectorizada para explicar o método básico de implementações para comandos paralelos de dados e comandos paralelos de tarefas.

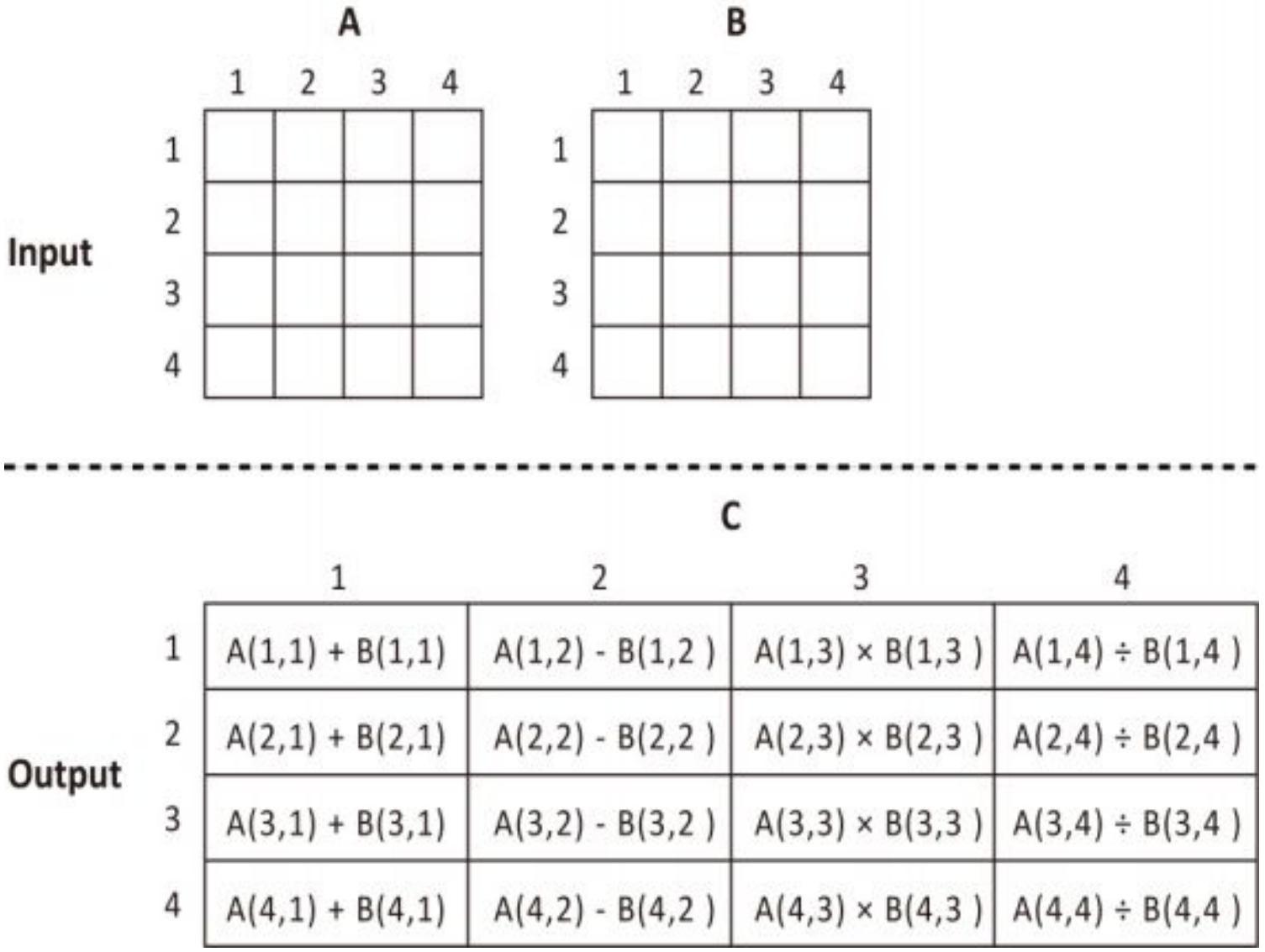
- O código de exemplo fornecido destina-se a ilustrar os conceitos de paralelização.

Exemplo

- O código de exemplo executa as operações aritméticas básicas, que são adição, subtração, multiplicação e divisão, entre valores de flutuação (ponto flutuante).

- A visão geral é mostrada na Figura 4.4.

Figure 4.4:
Basic arithmetic operations between floats



	1	2	3	4
1	A(1,1) + B(1,1)	A(1,2) - B(1,2)	A(1,3) × B(1,3)	A(1,4) ÷ B(1,4)
2	A(2,1) + B(2,1)	A(2,2) - B(2,2)	A(2,3) × B(2,3)	A(2,4) ÷ B(2,4)
3	A(3,1) + B(3,1)	A(3,2) - B(3,2)	A(3,3) × B(3,3)	A(3,4) ÷ B(3,4)
4	A(4,1) + B(4,1)	A(4,2) - B(4,2)	A(4,3) × B(4,3)	A(4,4) ÷ B(4,4)

Na Figura 4.4

- Como mostra a Figura 4.4, os dados de entrada consistem em 2 conjuntos de matrizes 4x4, A e B. Os dados de saída são uma matriz 4x4, C.

- Veja primeiro a implementação paralela de dados (Lista 4.8, Lista 4.9).

- Este programa trata cada linha de dados como um *work-group* para executar a computação.

List 4.8 e List 4.9 – Implementações Kernel e Host

- ***List 4.8***

  Data parallel model - **kernel** dataParallel.cl

- ***List 4.9***

  Data parallel model - **host** dataParallel.c

- **Exemplo – Modelo Paralelo de Dados** *Código Kernel e Código Host*

Versão paralela da tarefa

- Em seguida, você pode ver a versão paralela da tarefa para o mesmo problema (Lista 4.10, Lista 4.11).

- Neste exemplo, as tarefas são agrupadas de acordo com o tipo de operação aritmética que está sendo executada.

- **Exemplo – Modelo Paralelo de Tarefas**

  Código Kernel e Código Host

Comentando ... Modelo Paralelo de Dados

- Como você pode ver, os códigos-fonte são muito semelhantes.
- As únicas diferenças estão nos próprios *kernels*, e na *maneira de executar esses kernels*.
- No modelo de dados em paralelo, as 4 operações aritméticas são agrupadas como um conjunto de comandos em um *kernel*.
- Enquanto que no modelo paralelo de tarefas, 4 kernels diferentes são implementados para cada tipo de operação aritmética.

Modelo Paralelo de Dados x Modelo Paralelo de Tarefas

- Pode parecer que, uma vez o modelo paralelo de tarefas requer mais código, ele também deve executar mais operações.

- No entanto, independentemente do modelo que seja utilizado para este problema, o número de operações efetuadas pelo dispositivo é realmente o mesmo.

- Apesar desse fato, o desempenho pode variar, escolhendo um ou outro modelo, de modo que o modelo de paralelização deve ser considerado com sabedoria na fase de planejamento do aplicativo.

Modelo de Execução

Work-Items

List 4.8:
Data parallel model - kernel *dataParallel.cl*

```
1.  __kernel void dataParallel(__global float* A, __global float* B,
                               __global float* C)
2.{
3.      int base = 4*get_global_id(0);
4.      C[base+0] = A[base+0] + B[base+0];
5.      C[base+1] = A[base+1] - B[base+1];
6.      C[base+2] = A[base+2] * B[base+2];
7.      C[base+3] = A[base+3] / B[base+3];
8.}
```

Passeando no código-fonte do Modelo Paralelo de dados

1. __kernel void dataParallel(__global float * A, __global float * B,
   __global float * C)

- Quando o paralelismo de dados é enfileirada, os *work-items* são criados.

- Cada um desses *work-items* executa o mesmo kernel em paralelo.

Obtendo ID de item de trabalho

3. int base = 4*get_global_id(0);

- A instrução OpenCL, get_global_id (0) obtém o *ID do work-item global*, que é usado para decidir quais os dados a processar, de modo que cada *work-item* possa processar diferentes conjuntos de dados em paralelo.

Etapas do processamento paralelo de dados

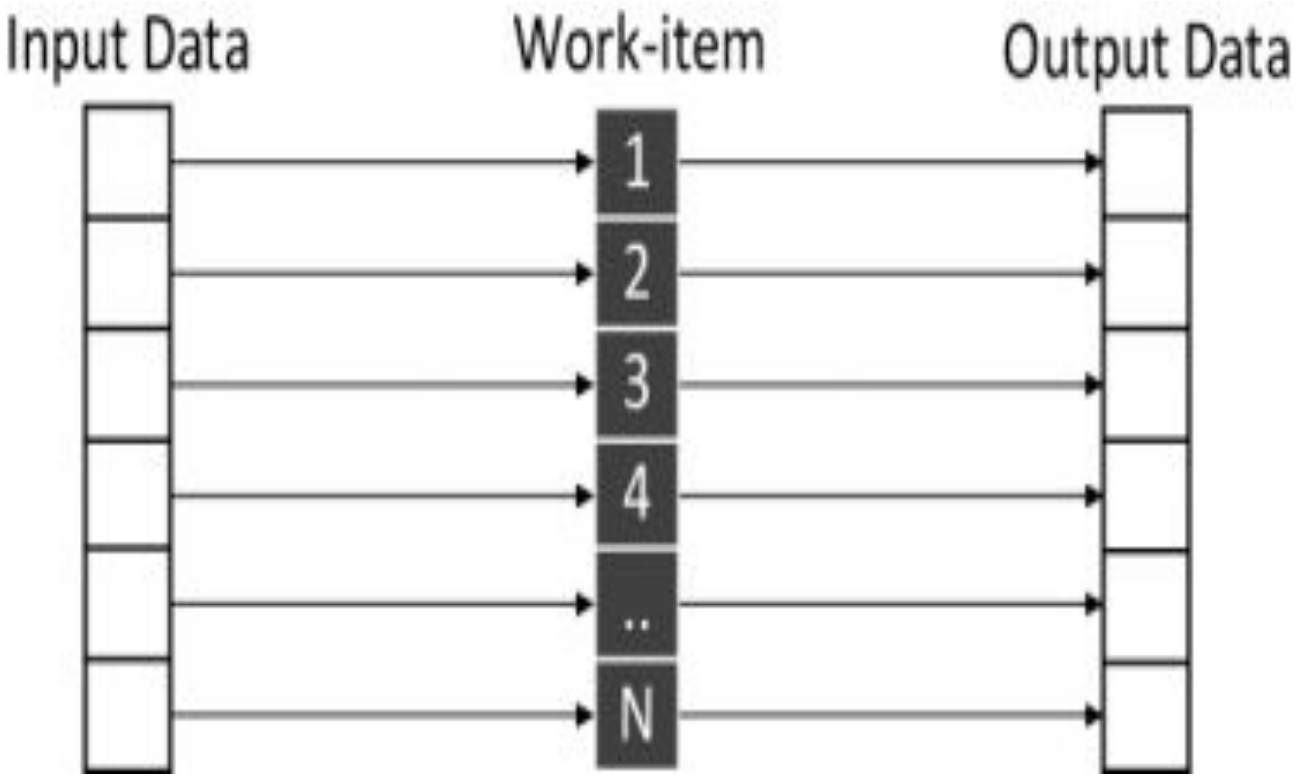
Em geral, o processamento paralelo de dados é feito usando as seguintes etapas.

1. Get *work-item ID*

2. Processa o subconjunto de dados correspondendo ao *work-item ID*.

Um diagrama de bloco do processo é mostrado em Figura 4.5.

Figure 4.5:
Block diagram of the data-parallel model in relation to work-items



Exemplo – Figura 4.5

- Neste exemplo, o *work-item global* é multiplicado por 4 e armazenado na variável "base".

- Esse valor é usado para decidir qual elemento da matriz A e B é processado.

```
1. C[base+0] = A[base+0] + B[base+0];
2. C[base+1] = A[base+1] - B[base+1];
3. C[base+2] = A[base+2] * B[base+2];
4. C[base+3] = A[base+3] / B[base+3];
```

Exemplo – Figura 4.5

- Como cada *work-item* tem IDs diferentes, a variável "base" também tem um valor diferente para cada *work-item*, o que impede que os *work-items* processem os mesmos dados.

- Desta forma, grande quantidade de dados podem ser processados simultaneamente.

Exemplo – Figura 4.5

- Discutimos que muitos *work-items* são criados, mas não abordamos como decidir o número de *work-items* a serem criados.

- Isso é feito no segmento de código a seguir do código do host.

Exemplo – Figura 4.5

```
1.  size_t global_item_size = 4;
2.  size_t local_item_size = 1;
3.
4.  /* Execute OpenCL kernel as data parallel */
5.  ret = clEnqueueNDRangeKernel(command_queue, kernel, 1,
    NULL,
6.          &global_item_size, &local_item_size, 0, NULL, NULL);
```

Exemplo – Figura 4.5

- O clEnqueueNDRangeKernel () é um comando OpenCL API usado para enfileirar tarefas paralelas de dados.

- Os argumentos 5 e 6 determinam o tamanho do *work-item*. Nesse caso, o global_item_size é definido como 4 e o local_item_size é definido como 1.

- As etapas gerais são resumidas da seguinte maneira.

1. Criar itens de trabalho no host

2. Processar dados correspondentes a ID do item de trabalho global no kernel

The source code for the task parallel model

- Neste modelo, diferentes kernels podem ser executados em paralelo.

- Note que diferentes kernels são implementados para cada uma das 4 operações aritméticas.

```
1.   /* Execute OpenCL kernel as task parallel */
2.   for (i=0; i < 4; i++)  {
3.       ret = clEnqueueTask(command_queue, kernel[i], 0, NULL, NULL);
4.   }
```

- O segmento de código acima enfileira os 4 kernels.

OpenCL - Processo paralelo de tarefas

- Em OpenCL, para executar um processo paralelo de tarefas, o modo fora de ordem deve ser ativado quando a fila de comandos é criada.

- Usando esse modo, a tarefa enfileirada não aguarda até que a tarefa anterior seja concluída, se houver unidades de computação inativas disponíveis que possam estar executando essa tarefa.

Criando fila de comandos e execução paralela

```
1.  /* Create command queue */
2.  command_queue = clCreateCommandQueue(context,
device_id,

CL_QUEUE_OUT_OF_ORDER_EXEC_MODE_ENABLE, &ret);
```

- O diagrama de blocos da natureza das filas de comandos e execução paralela são mostrados na Figura 4.6.

Figure 4.6: Command queues and parallel execution

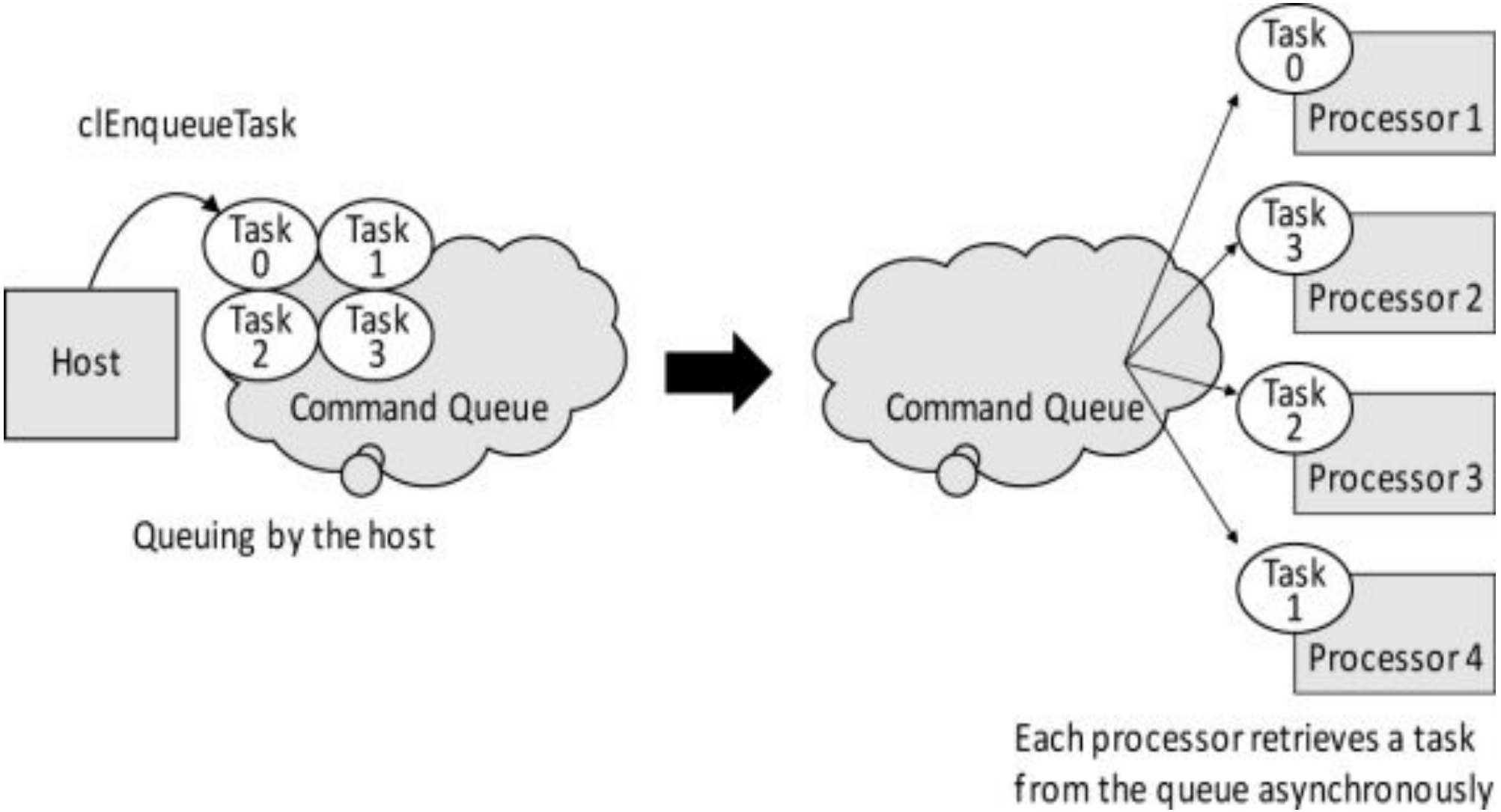


Figure 4.6: Command queues and parallel execution

- O clEnqueueTask () é usado como um exemplo na Figura 4.6, mas um processamento paralelo similar poderia ocorrer para outras combinações de enqueue-funções, como clEnqueueNDRangeKernel (), clEnqueueReadBuffer () e clEnqueueWriteBuffer ().

Figure 4.6:
Command queues and parallel execution

- Por exemplo, uma vez que o PCI Express suporta transferências simultâneas de memória bidirecional, enfileirar os comandos

  clEnqueueReadBuffer () e clEnqueueWriteBuffer ()

  podem executar comandos de leitura e gravação simultaneamente, visto que os comandos estão sendo executados por diferentes processadores.

Figure 4.6:
Command queues and parallel execution

- No diagrama acima da Figura 4.6, podemos esperar que as 4 tarefas sejam executadas em paralelo, uma vez que elas estão sendo enfileiradas em uma fila de comandos que tem o parâmetro *out-of-execution* habilitado.

|Modelo de Execução

Work

Group

Work-group

- *Work-items* (thread) são organizados em *work-groups* (bloco de theads).

- Cada *work-group* também é identificado por uma tupla de índices, com um índice para cada dimensão do espaço.

- Dentro de um *work-group*, um *work-item* recebe ainda outra tupla de índices, os quais constituem os seus identificadores locais no grupo de trabalho.

Figure 4.7
Work-group ID and Work-item ID

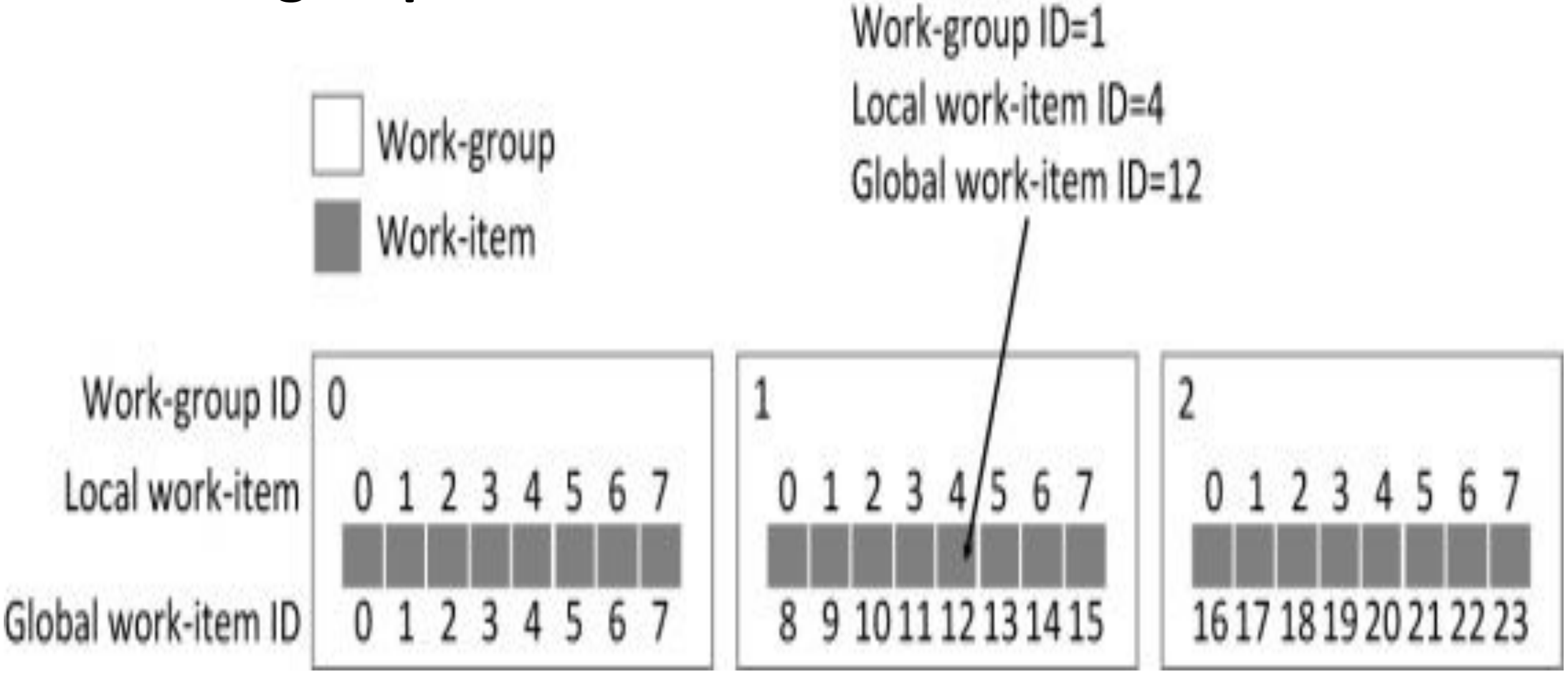


Figure 4.8
Work-group and work-item defined in 2-D

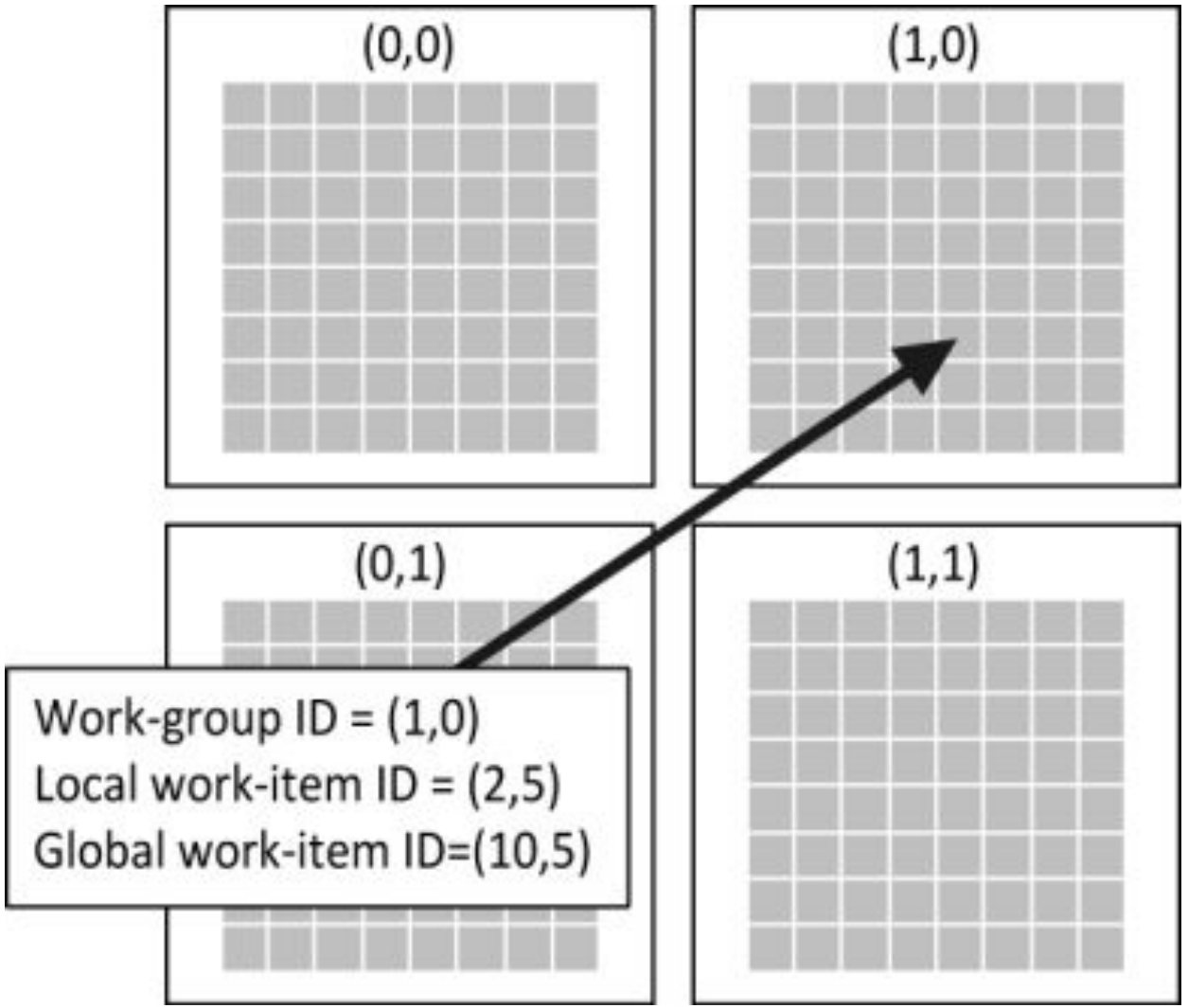


Table 4.1
Functions used to retrieve the ID's

Function	Retrieved value
get_group_id	Work-group ID
get_global_id	Global work-item ID
get_local_id	Local work-item ID

The ID's of the work-item in Figure 4.8

Call	Retrieved ID
get_group_id(0)	1
get_group_id(1)	0
get_global_id(0)	10
get_global_id(1)	5
get_local_id(0)	2
get_local_id(1)	5

Table 3.1: Include header location (as of March 2010)

OpenCL implementation	Include Header
AMD	CL/cl.h
Apple	OpenCL/opencl.h
FOXC	CL/cl.h
NVIDIA	CL/cl.h

The sample code defines the following macro so that the header is correctly included in any environment.

List 3.1: Include Header Location (As of March, 2010)

```
1. #ifdef __APPLE__
2. #include <OpenCL/opencl.h>
3. #else
4. #include <cl.h>
5. #endif
```

Objetos de Memória (Memory Objects)

- Buffers

- Objetos de memória possuem associados a si um tamanho, além de um conjunto de parâmetros que definem se a região de memória associada ao objeto é, por exemplo, somente leitura, ou se encontra mapeada em uma região de memória do hospedeiro.

Objetos de programa (program objects)

- *Kernels* são gerados a partir de objetos de programa (program objects).

- Um objeto de programa encapsula o *código-fonte de um kernel*, sendo este identificados no código-fonte por meio da palavra-chave `__kernel`.

Comandos OpenCL

Algumas funções da API OpenCL para o hospedeiro (host)

As funções estão agrupadas de acordo com os objetos OpenCL aos quais se referem.

Comandos de cabeçalho

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#ifdef __APPLE__
#include <OpenCL/opencl.h>
#else
#include <CL/opencl.h>
#endif
#define ARRAY_LENGTH 1000
```

Programa principal

```
int main(int argc, char** argv)
{
   ........

   ........

   ........

   return 0
}
```

Variáveis para armazenamento de referências a objetos OpenCL

```
cl_platform_id platformId;
cl_device_id deviceId;
cl_context context;
cl_command_queue queue;
cl_program program;
cl_kernel kernel;
cl_mem bufA;
cl_mem bufB;
cl_mem bufC;
```

/* Variáveis diversas da aplicação */

```
/* ponteiros para inteiros */
int* hostA;
int* hostB;
int* hostC;
```

/* The dimensions of the NDRange are specified as an N-element array of type `size_t`, where N represents the number of dimensions used to describe the *work-item* being created. */

/* In the vector addition example, our data will be one-dimensional and assuming that there are 1024 elements, the size can be specified as a one-, two-, or three-dimensional vector. The host code to specify an ND Range for 1024 elements is as follows:

```
size_t  indexSpaceSize[3] = {1024, 1, 1}; */
```

```
size_t globalSize[1] = { ARRAY_LENGTH };
int i;
```

/* Código-fonte do kernel */

```
const char* source =
"__kernel void ArrayDiff( \
      __global const int* a, \
      __global const int* b, \
      __global int* c) \
{ \
     int id = get_global_id(0); \
     c[id] = a[id] - b[id]; \
}";
```

Obtenção de identificador de plataforma

Argumentos:

```
cl_int clGetPlatformIDs(cl_uint  num_entries,
                        cl_platform_id*  platforms,
                        cl_uint*  num_platforms)
```

1. **num_entries**: número de plataformas desejadas.
2. **platforms:** local onde os identificadores das plataformas encontradas devem ser escritos.
3. **num_platforms:** número de plataformas encontradas.

Obtenção de identificador de plataforma

```
/* Será solicitada uma GPU. */

clGetPlatformIDs (1, &platformId, NULL);
```

Caso seja NULL, o argumento será ignorado.

Descoberta de dispositivos
Obtenção de identificador de dispositivo GPU

```
cl_int clGetDeviceIDs (cl_platform_id platform,
                       cl_device_type device_type,
                       cl_uint num_entries,
                       cl_device_id* devices,
                       cl_uint* num_devices)
```

1. **`platform:`** identificador de plataforma.

2. **`device_type:`** tipo de dispositivo. Os seguintes valores são válidos:

   CL_DEVICE_TYPE_CPU: processador do hospedeiro.
   CL_DEVICE_TYPE_GPU: dispositivo gráfico.
   CL_DEVICE_TYPE_ACCELERATOR: processador OpenCL dedicado.
   CL_DEVICE_TYPE_DEFAULT: dispositivo OpenCL padrão do sistema.
   CL_DEVICE_TYPE_ALL: todos os dispositivos OpenCL do sistema.

3. **`num_entries`**: número de dispositivos desejados.

4. **`devices:`** array onde serão armazenados os identificadores dos dispositivos encontrados.

5. **`num_devices:`** número de dispositivos encontrados que correspondem aos tipos indicados em device_type.

   Caso seja NULL, o argumento será ignorado.

Descoberta de dispositivos
Obtenção de identificador de dispositivo GPU

```
clGetDeviceIDs (platformId, CL_DEVICE_TYPE_GPU, 1,
                &deviceId, NULL);
```

O segundo argumento pode ser CL_DEVICE_TYPE_CPU, caso só se tenha uma CPU.

O quinto argumento é NULL, portanto, ignorado.

Criação de Contexto

```
cl_context clCreateContext(
        const cl_context_properties* properties,
        cl_uint num_devices,
        const cl_device_id* devices,
        NULL, NULL, NULL )
```

Criação de Contexto

- **`properties`**: lista de propriedades para o contexto.
- **`num_devices`**: número de dispositivos para o contexto.
- **`devices`**: lista de identificadores de devices. Deve possuir tantos identificadores quantos indicados em `num_devices`.

Criação de Contexto

- Para tornar possível o acesso a dispositivos OpenCL, é necessário que o hospedeiro primeiro inicialize e configure um contexto.

```
context = clCreateContext(0, 1, &deviceId,
                          NULL, NULL, NULL);
```

- Caso seja NULL, o argumento será ignorado.

Criação da fila de comandos para o dispositivo encontrado

```
cl_command_queue clCreateCommandQueue(
        cl_context context,
        cl_device_id device,
        cl_command_queue_properties properties,
        cl_int* errcode_ret)
```

- A função `clCreateCommandQueue()` cria uma fila de comandos para um dispositivo específico.

Criação da fila de comandos para o dispositivo encontrado

1. **`context:`** contexto OpenCL.
2. **`device:`** identificador do dispositivo que será associado à fila.
3. **`properties:`** propriedades da fila de comandos.
4. **`errcode_ret:`** local para armazentamento do código de erro da chamada. Pode ser NULL.

Criação da fila de comandos para o dispositivo encontrado

```
queue = clCreateCommandQueue(
            context,
            deviceId,
            0,
            NULL);
```

Compilação de kernels

- São necessário três passos para a compilação de um ou mais kernels em uma aplicação OpenCL:

1. Criação de um objeto de programa.
2. Compilação do programa para um ou mais dispositivos.
3. Criação de um ou mais kernels a partir do programa compilado.

Criação de um objeto de programa a partir do código-fonte armazenado na string

```
cl_program clCreateProgramWithSource(
                cl_context context,
                cl_uint count,
                const char** strings,
                const size_t* lengths,
                cl_int* errcode_ret)
```

Criação de um objeto de programa a partir do código-fonte armazenado na string

`context:` contexto OpenCL.

`count:` número de *strings* no *array*.

`strings:` *array* de *strings* do código-fonte.

`lengths:` *array* contendo os tamanhos das *strings* do *array*.
Pode ser NULL caso as *strings* sejam terminadas em \0.

`errcode_ret:` local para armazentamento do código de erro da chamada.
Pode ser NULL.

Criação do objeto de programa a partir do código-fonte armazenado na string

```
program = clCreateProgramWithSource(context, 1,
                                    &source, NULL, NULL);
```

Compilação do programa para todos os dispositivos do contexto

```
cl_int clBuildProgram(cl_program  program,
                      cl_uint  num_devices,
                      const cl_device_id* device_list,
                      NULL,
                      NULL,
                      NULL)
```

Compilação do programa para todos os dispositivos do contexto

1. **`program`**: objeto de programa.

2. **`num_devices`**: número de dispositivos para o qual o programa deve ser compilado. O valor 0 causa a compilação para todos os dispositivos presentes no contexto.

3. **`device_list`**: lista de dispositivos para os quais o programa deve ser compilado. NULL indica que o programa deve ser compilado para todos os dispositivos presentes no contexto.

Compilação do programa para todos os dispositivos do contexto

```
clBuildProgram(program, 0, NULL, NULL, NULL, NULL);
```

Obtenção de um kernel a partir do programa compilado

```
cl_kernel clCreateKernel(cl_program program, const
                         char* kernel_name,
                         cl_int* errcode_ret)
```

Obtenção de um kernel a partir do programa compilado

1. **`program`**: objeto de programa.

2. **`kernel_name`**: nome de função **`__kernel`** definida no código-fonte.

3. **`errcode_ret`**: local para armazentamento do código de erro da chamada.
   Pode ser **NULL**.

Obtenção de um kernel a partir do programa compilado

```
kernel = clCreateKernel(program, "ArrayDiff", NULL);
```

Alocação dos arrays no host

```
hostA = (int*) malloc(ARRAY_LENGTH * sizeof(int));

hostB = (int*) malloc(ARRAY_LENGTH * sizeof(int));

hostC = (int*) malloc(ARRAY_LENGTH * sizeof(int));
```

Inicialização dos arrays no host

```
for (i = 0; i < ARRAY_LENGTH; ++i)
{
    hostA[i] = rand() % 101 - 50;
    hostB[i] = rand() % 101 - 50;
}
```

Manipulação de buffers OpenCL

- A comunicação do **host** com a **memória global** de dispositivos OpenCL é realizada por meio de **objetos de memória**.

- Um dos tipos de objetos de memória é o **`buffer`**, que corresponde a uma região contígua de memória, com tamanho fixo.

Manipulação de buffers OpenCL

```
cl_mem clCreateBuffer(cl_context  context,
                      cl_memflags  flags,
                      size_t  size,
                      void* host_ptr,
                      cl_int* errcode_ret)
```

Manipulação de buffers OpenCL

1. **`context`**: contexto OpenCL.
2. **flags**: especificação de informações sobre a alocação e o uso da região de memória associada ao buffer.
   A flag CL_MEM_READ_ONLY cria um buffer somente-leitura.
   A flag CL_MEM_READ_WRITE especifica a criação de um buffer para operações de leitura e escrita de dados. Ver especificação para demais flags permitidas.
3. **`size`**: tamanho, em bytes, do buffer a ser alocado.
4. **`host_ptr`**: ponteiro para dados de inicialização do buffer.
5. **`errcode_ret:`** local para armazentamento do código de erro da chamada. Pode ser **NULL**.

Criação dos objetos de memória para comunicação com a memória global do dispositivo encontrado

```
bufA = clCreateBuffer(context, CL_MEM_READ_ONLY,
ARRAY_LENGTH * sizeof(int), NULL, NULL);

bufB = clCreateBuffer(context, CL_MEM_READ_ONLY,
ARRAY_LENGTH * sizeof(int), NULL, NULL);

bufC = clCreateBuffer(context, CL_MEM_READ_WRITE,
ARRAY_LENGTH * sizeof(int), NULL, NULL);
```

Transferência dos arrays de entrada para a memória do dispositivo

```
cl_int clEnqueueWriteBuffer( cl_queue queue,
                             cl_mem buffer,
                             cl_bool blocking_write,
                             size_t offset,
                             size_t cb,
                             void* ptr,
                             cl_uint events_in_wait_list,
                             NULL,
                             NULL )
```

Transferência dos arrays de entrada para a memória do dispositivo

1. **`queue`**: fila de comandos.
2. **`buffer`**: objeto de memória do tipo *buffer*.
3. **`blocking_write`**: caso CL_TRUE, a chamada é bloqueante e o hospedeiro suspende a execução até que os dados tenham sido completamente transferidos para o dispositivo. Caso CL_FALSE, a chamada é não-bloqueante e a execução prossegue assim que o comando é enfileirado.
4. **`offset`**: *offset* a partir do qual os dados devem ser transferidos.
5. **`cb`**: comprimento, em bytes, dos dados a serem transferidos.
6. **`ptr`**: ponteiro para a região de memória do host onde os dados a serem transferidos estão localizados.
7. **`events_in_wait_list`**: número de eventos na lista de eventos que devem ser aguardados antes do início da transferência dos dados. 8. **NULL** 9. **NULL**

Transferência dos arrays de entrada para a memória do dispositivo

```
clEnqueueWriteBuffer(queue, bufA, CL_TRUE, 0,
   ARRAY_LENGTH * sizeof(int), hostA, 0, NULL, NULL);

clEnqueueWriteBuffer(queue, bufB, CL_TRUE, 0,
   ARRAY_LENGTH * sizeof(int), hostB, 0, NULL, NULL);
```

Configuração dos argumentos do kernel

```
cl_int clSetKernelArg(cl_kernel kernel,
          cl_uint arg_index,
          size_t arg_size,
          const void* arg_value)
```

Configuração dos argumentos do kernel

1. **kernel:** kernel cujo argumento deve ser configurado.

2. **arg_index:** posição do argumento, de acordo com a ordem em que os argumentos foram definidos no código-fonte, iniciando em 0.

3. **arg_size:** comprimento dos dados do argumento.

4. **arg_value:** ponteiro para dados do argumento.

Configuração dos argumentos do kernel

```
clSetKernelArg(kernel, 0, sizeof(cl_mem), &bufA);

clSetKernelArg(kernel, 1, sizeof(cl_mem), &bufB);

clSetKernelArg(kernel, 2, sizeof(cl_mem), &bufC);
```

Envio do kernel para execução

```
cl_int clEnqueueNDRangeKernel(cl_command_queue
  command_queue,
  cl_kernel kernel,
  cl_uint work_dim,
  const size_t* global_work_offset,
  const size_t* global_work_size,
  const size_t* local_work_size,
  cl_uint events_in_wait_list,
  const cl_event* event_wait_list,
  cl_event* event)
```

Envio do kernel para execução

1. **`command_queue`**: fila de comandos.
2. **`kernel`**: kernel a ser executado.
3. **`work_dim`**: número de dimensões do espaço de índices. São permitidos os valores 1, 2 e 3.
4. **`global_work_offset`**: array de deslocamentos para valores dos índices em cada dimensão. Por exemplo, um deslocamento de 10 na dimensão 0 fará com que os índices naquela dimensão iniciem em 10.
5. **`global_work_size`**: array contendo os tamanhos para cada dimensão do espaço de índices.
6. **`local_work_size:`** array de tamanhos dos grupos de trabalho em cada dimensão.

Envio do kernel para execução

Caso NULL, o runtime determina os tamanhos automaticamente. Caso os valores sejam informados explicitamente, é mandatório que a divisão dos tamanhos das dimensões do espaço de índices por estes valores seja inteira.

7. **`events_in_wait_list`**: número de eventos na lista de eventos que devem ser aguardados antes do início da execução do kernel.

8. **`event_wait_list`**: lista de eventos que devem ser aguardados antes do início da execução do kernel.

9. **`event`**: local para retorno do objeto de evento para o comando.

Envio do kernel para execução no dispositivo

```
clEnqueueNDRangeKernel(queue,
                       kernel,
                       1,
                       NULL,
                       globalSize,
                       NULL,
                       0,
                       NULL,
                       NULL);
```

Sincronização
(bloqueia host até término da execução do kernel)

```
cl_int clFinish(cl_command_queue command_queue)
```

- A função **`clFinish()`** bloqueia a execução no hospedeiro até que todos os comandos na fila informada tenham sido completados.

No programa: **`clFinish(queue)`**

Transferência dos resultados da computação na GPU para a memória do host

```
cl_int clEnqueueReadBuffer(cl_queue queue,
        cl_mem buffer,
        cl_bool blocking_read,
        size_t offset,
        size_t cb,
        const void* ptr,
        cl_uint events_in_wait_list,
        const cl_event* event_wait_list,
        cl_event* event )
```

Transferência dos resultados da computação na GPU para a memória do host

1. **`queue:`** fila de comandos.

2. **`buffer:`** objeto de memória do tipo buffer.

3. **`blocking_read:`** caso CL_TRUE, a chamada é bloqueante e o hospedeiro suspende a execução até que os dados tenham sido completamente transferidos do dispositivo. Caso CL_FALSE, a chamada é não-bloqueante e a execução prossegue assim que o comando é enfileirado.

4. **`offset:`** *offset* (deslocamento) a partir do qual os dados devem ser transferidos.

Transferência dos resultados da computação na GPU para a memória do host

5. **`cb:`** comprimento dos dados, em bytes, a serem transferidos.
6. **`ptr:`** ponteiro para a região de memória do host onde os dados transferidos devem ser escritos.
7. **`events_in_wait_list`**: número de eventos na lista de eventos que devem ser aguardados antes do início da transferência dos dados.
8. **`event_wait_list:`** lista de eventos que devem ser aguardados antes do início da transferência dos dados.
9. **`event:`** local para retorno do objeto de evento (*event object*) para o comando. Objetos de evento permitem o aguardo do término de comandos inseridos em uma fila de comandos. Este objeto é útil para a garantia da consistência dos dados quando a escrita é realizada de forma não-bloqueante.

Transferência dos resultados da computação na GPU para a memória do host

```
lEnqueueReadBuffer( queue,
                    bufC,
                    CL_TRUE,
                    0,
                    ARRAY_LENGTH * sizeof(int),
                    hostC,
                    0,
                    NULL,
                    NULL );
```

Impressão dos resultados na saída padrão

```
for (i = 0; i < ARRAY_LENGTH; ++i)
   printf("%d - %d = %d\n", hostA[i], hostB[i],
          hostC[i]);
```

Liberação de recursos e encerramento da aplicação

- Existe uma função de liberação para cada tipo de objeto OpenCL:

- Contextos: `clReleaseContext(cl_context context)`

- Filas de comandos: `clReleaseCommandQueue(cl_command_queue command_queue)`

- Objetos de programa: `clReleaseProgram(cl_program program)`

- Kernels: `clReleaseKernel(cl_kernel kernel)`

- Objetos de memória: `clReleaseMemObject(cl_mem buffer)`

Liberação de recursos e encerramento da aplicação

```
clReleaseMemObject(bufA);
clReleaseMemObject(bufB);
clReleaseMemObject(bufC);
clReleaseKernel(kernel);
clReleaseProgram(program);
clReleaseCommandQueue(queue);
clReleaseContext(context);
free(hostA);
free(hostB);
free(hostC);
```

Compilação e Execução

```
> gcc -I/usr/local/cuda/include ArrayDiff.c
      -o ArrayDiff -lOpenCL
```

Este comando realiza a compilação e ligação da aplicação com o *runtime OpenCL*.

Como pode ser observado, assume-se que o código tenha sido armazenado em um arquivo chamado **`ArrayDiff.c`**, porém este nome não é obrigatório, nem mesmo o nome dado ao executável (**`ArrayDiff`**).

Após a compilação, a execução se dá como a de qualquer outro executável em Linux: **`> ./ArrayDiff`**