Unidade III:
Algoritmos Paralelos para Ordenação Interna

Instituto de Ciências Exatas e Informática
Departamento de Ciência da Computação
Curso de Ciência da Computação

Agenda

- Introdução
- Conceitos Básicos
- OpenMP
- Algoritmo Odd Even Paralelo
- Algoritmo Quicksort Paralelo

Agenda

- **Introdução**
- Conceitos Básicos
- OpenMP
- Algoritmo Odd Even Paralelo
- Algoritmo Quicksort Paralelo

Motivação

- Aumento do desempenho
  - Redução do tempo de execução
- Alta disponibilidade das arquiteturas paralelas
  - Realidade atual: processadores multicore

Desafio

- Poucos desenvolvedores conhecem Computação Paralela

- Menos ainda são aqueles que aplicam a Computação Paralela

Agenda

- Introdução
- **Conceitos Básicos**
- OpenMP
- Algoritmo Odd Even Paralelo
- Algoritmo Quicksort Paralelo

Conceito Básico: Processo

- Software que executa alguma ação
- Controlado pelo usuário, sistema operacional ou aplicativo
- Constituído por uma sequência de instruções, um conjunto de dados e um registro descritor

Exercício Resolvido (1)

- Descreva o comando top do Linux e, em seguida, mostre a execução desse comando

Exercício Resolvido (1)

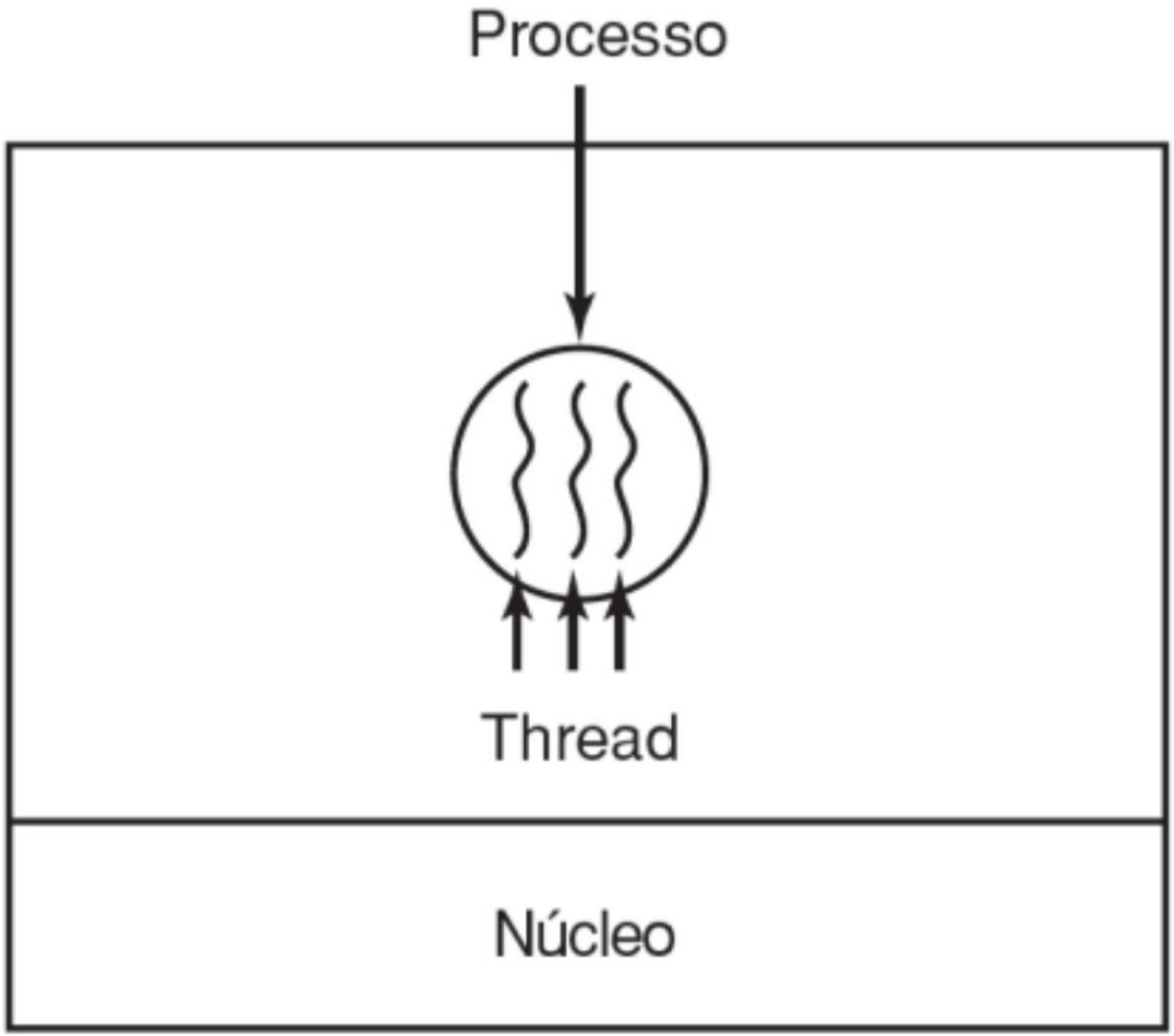
- Descreva o comando top do Linux e, em seguida, mostre a execução desse comando

```
Arquivo  Editar  Ver  Pesquisar  Terminal  Ajuda
top - 14:43:20 up  8:54,  1 user,  load average: 1,17, 1,52, 1,26
Tarefas: 270 total,   2 em exec., 216 dormindo,   0 parado,   1 zumbi
%CPU(s): 12,9 us,  2,8 sis,  0,0 ni, 84,1 oc,  0,1 ag,  0,0 ih,  0,0 is  0,0 tr
KB mem :  8045512 total,   536172 livre,  3695980 usados,  3813360 buff/cache
KB swap:  2097148 total,  2096880 livre,      268 usados,  3325736 mem dispon.

  PID USUARIO   PR  NI    VIRT    RES    SHR S  %CPU %MEM     TEMPO+ COMANDO
15739 maxm      20   0  793224 168748 112652 S  32,5  2,1   4:34.02 chrome
 2539 maxm      20   0  730680 243796 188264 S  20,9  3,0  26:57.64 chrome
 1308 maxm      20   0 1692496 124004  94260 R   8,9  1,5  14:15.61 Xorg
 1860 maxm      20   0 3692792 281024 146992 S   0,3  3,5  13:38.45 gnome-shell
 2117 maxm      20   0 1145412  23700  16212 S   0,3  0,3   1:37.60 core
 2151 maxm      20   0 1139660  69316  52484 S   0,3  0,9   0:24.91 nautilus-deskto
 2427 maxm      20   0 1423028 460144 312340 S   0,3  5,7  31:38.91 chrome
 2542 maxm      20   0  568848  98148  64236 S   0,3  1,2   3:10.29 chrome
 4452 maxm      20   0  818616  40952  30228 S   0,3  0,5   0:08.51 gnome-terminal-
16020 maxm      20   0   51460   4316   3516 R   0,3  0,1   0:00.10 top
    1 root      20   0  225632   9540   6852 S   0,0  0,1   0:17.04 systemd
    2 root      20   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.01 kthreadd
    4 root       0 -20       0      0      0 I   0,0  0,0   0:00.00 kworker/0:0H
    6 root       0 -20       0      0      0 I   0,0  0,0   0:00.00 mm_percpu_wq
    7 root      20   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.23 ksoftirqd/0
    8 root      20   0       0      0      0 I   0,0  0,0   0:49.41 rcu_sched
    9 root      20   0       0      0      0 I   0,0  0,0   0:00.00 rcu_bh
   10 root      rt   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.00 migration/0
   11 root      rt   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.12 watchdog/0
   12 root      20   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.00 cpuhp/0
   13 root      20   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.00 cpuhp/1
   14 root      rt   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.11 watchdog/1
   15 root      rt   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.00 migration/1
   16 root      20   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.24 ksoftirqd/1
   18 root       0 -20       0      0      0 I   0,0  0,0   0:00.00 kworker/1:0H
   19 root      20   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.00 cpuhp/2
   20 root      rt   0       0      0      0 S   0,0  0,0   0:00.13 watchdog/2
```

Conceito Básico: *Thread*

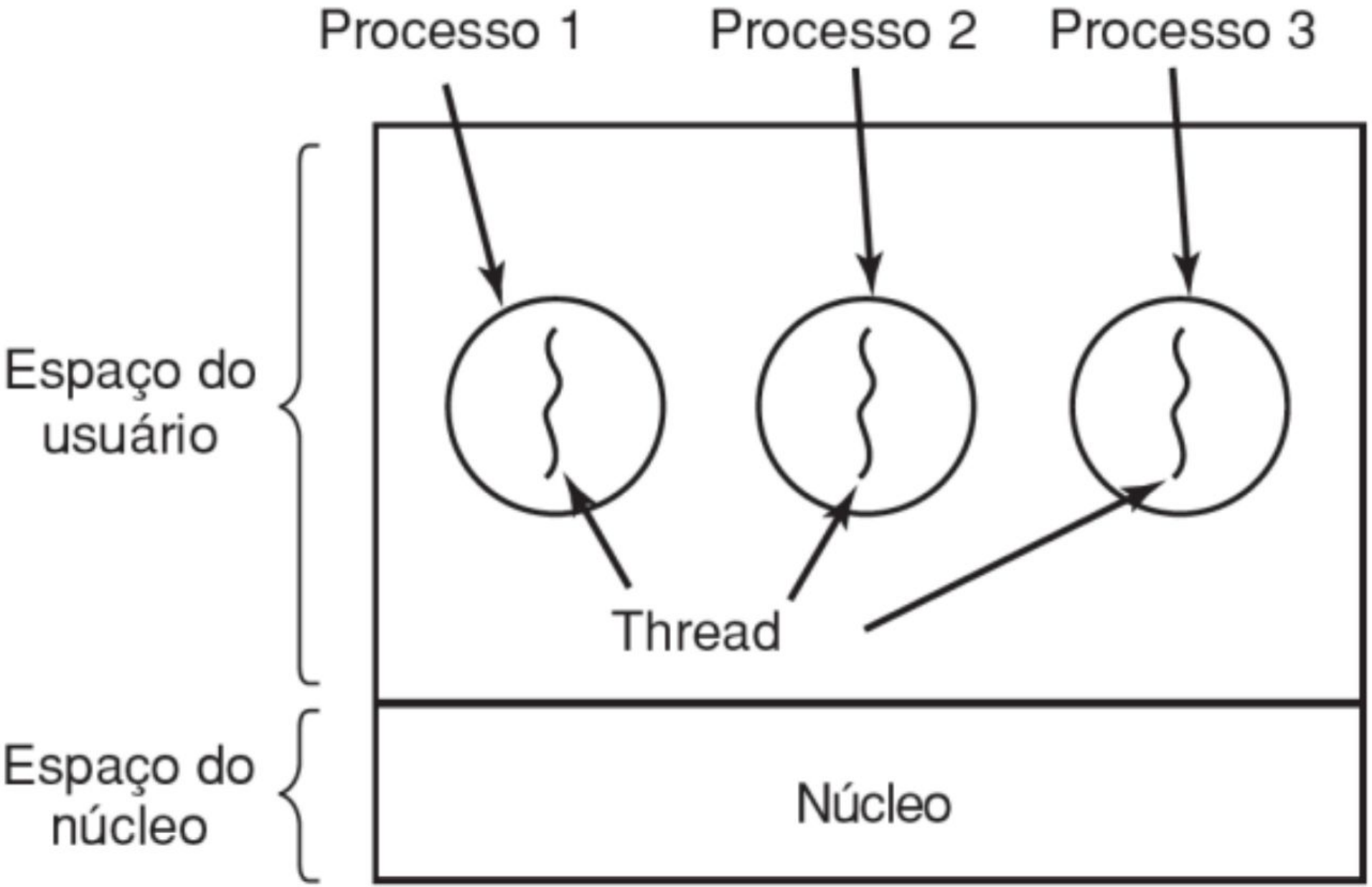
- Um fluxo de execução dentro de um processo



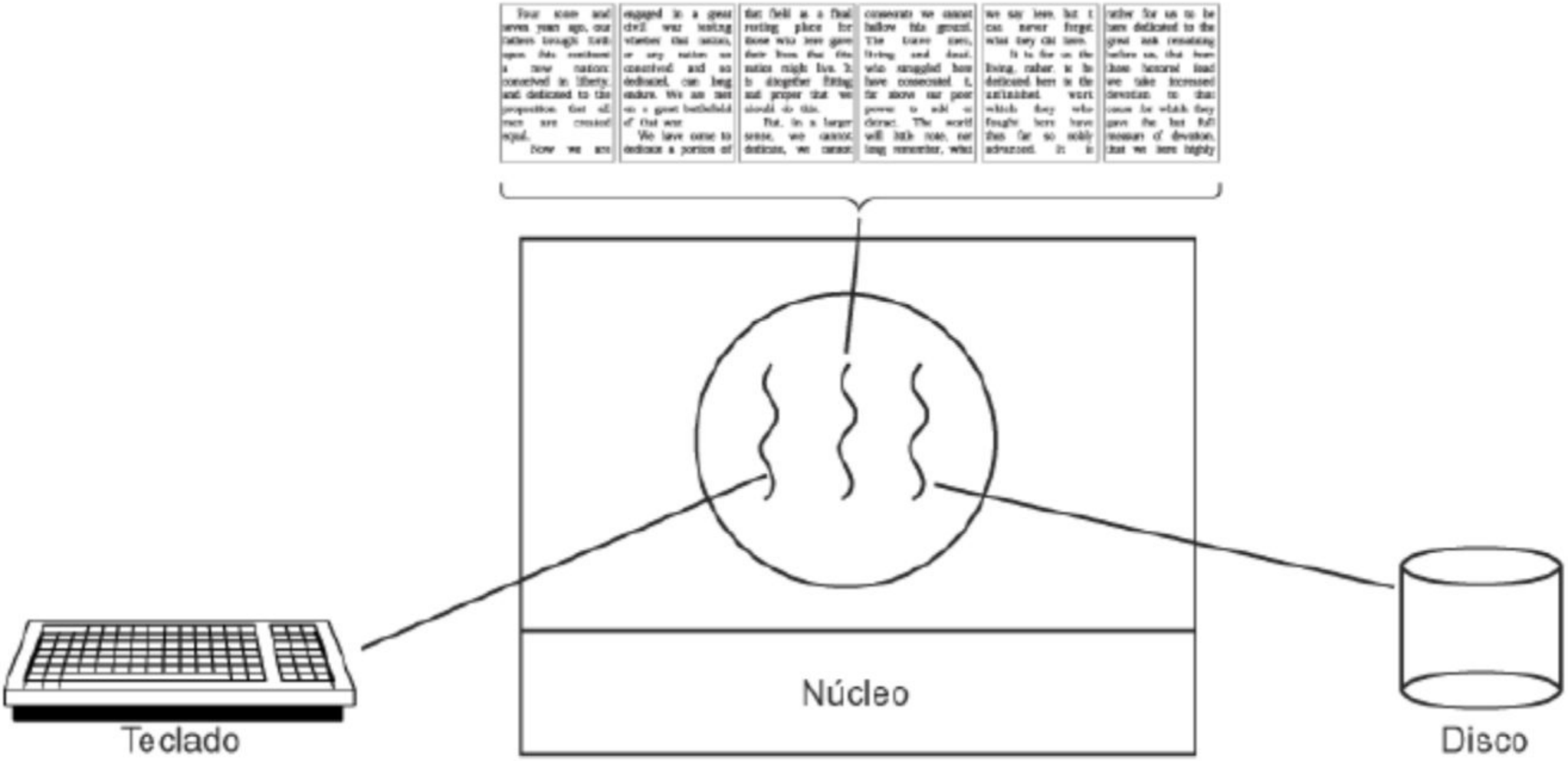
Conceito Básico: *Multithread*

- Forma de um processo dividir a si mesmo em duas ou mais tarefas que podem ser executadas concorrentemente
    - Uma *thread* compartilha recursos do processo com outras *threads*

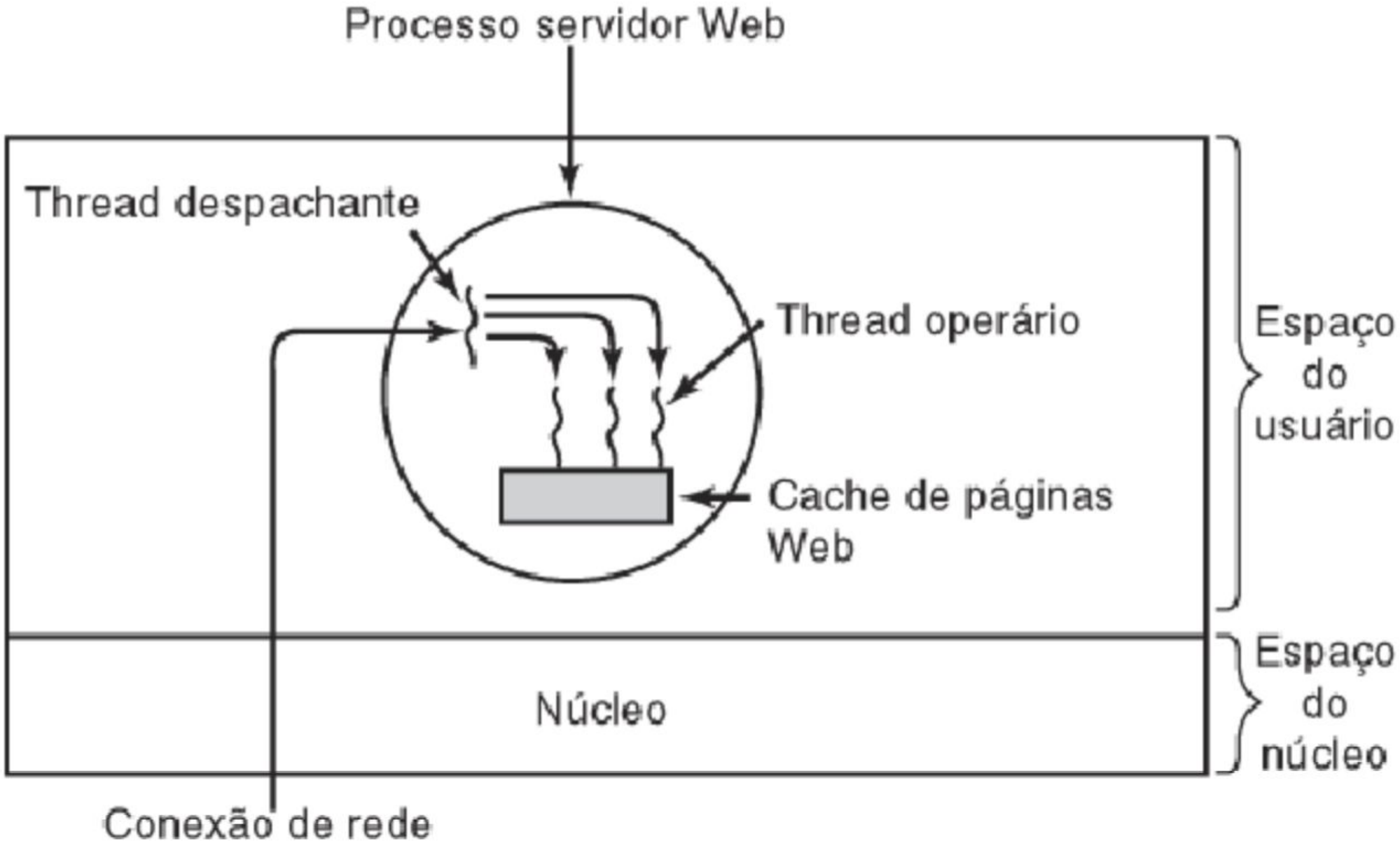
Exemplo: Três Processos com uma *Thread* cada



Exemplo: Processador com Três *Threads*



Exemplo: Servidor WEB com Três *Threads*

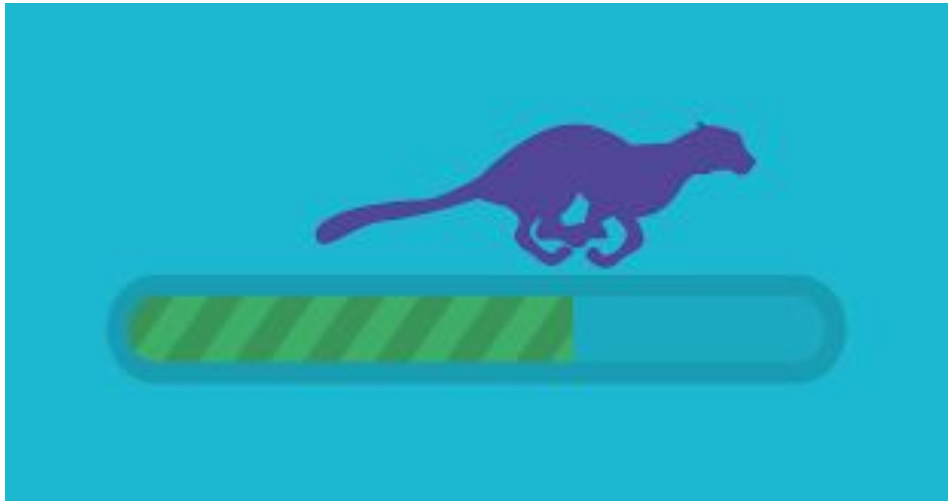


Vantagens das *Threads*

- Compartilham espaço de endereçamento e dados

Vantagens das *Threads*

- São criadas e destruídas rapidamente

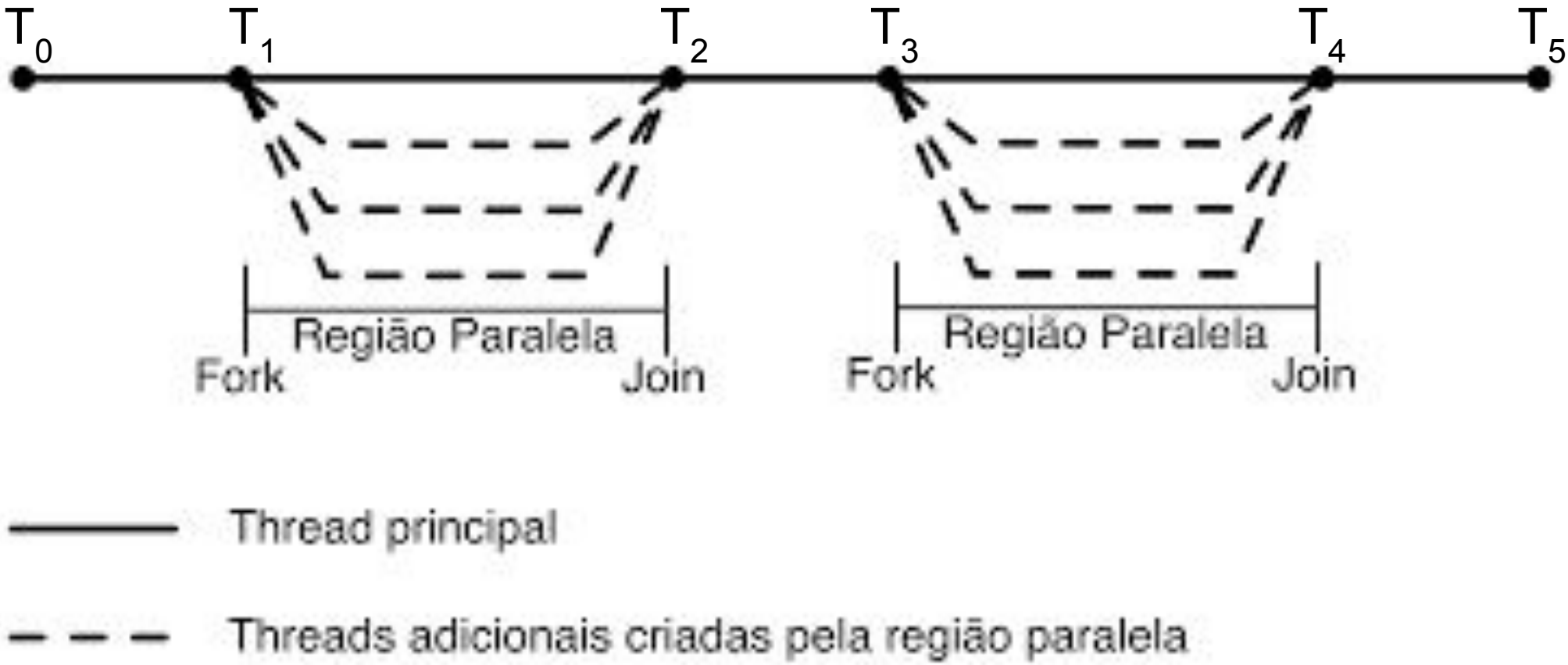


Vantagens das *Threads*

- Recurso poderoso para sistemas com múltiplas CPUs

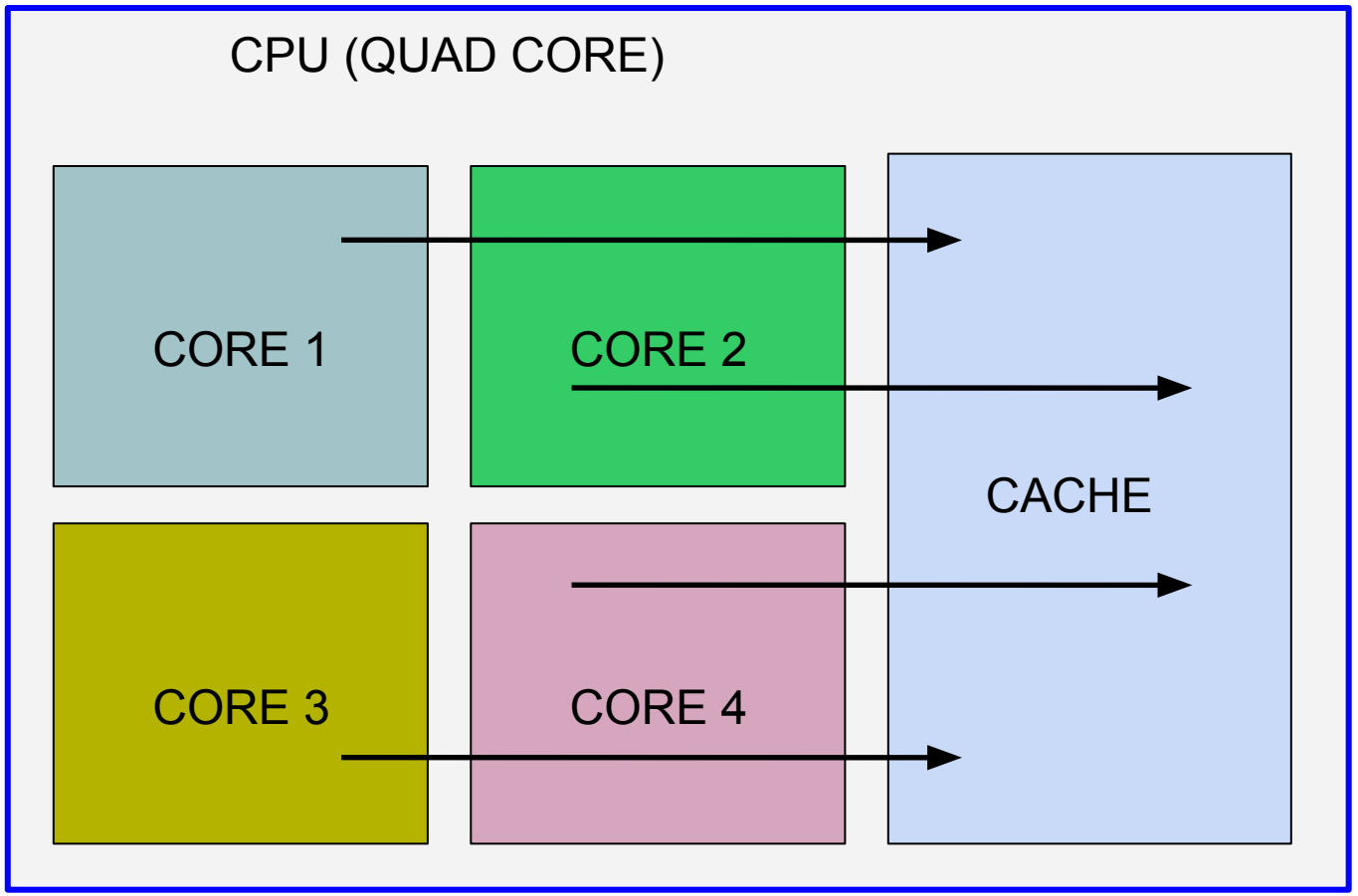
Vantagens das *Threads*

- Tornam possível manter a idéia de processos sequenciais e mesmo assim conseguem obter paralelismo



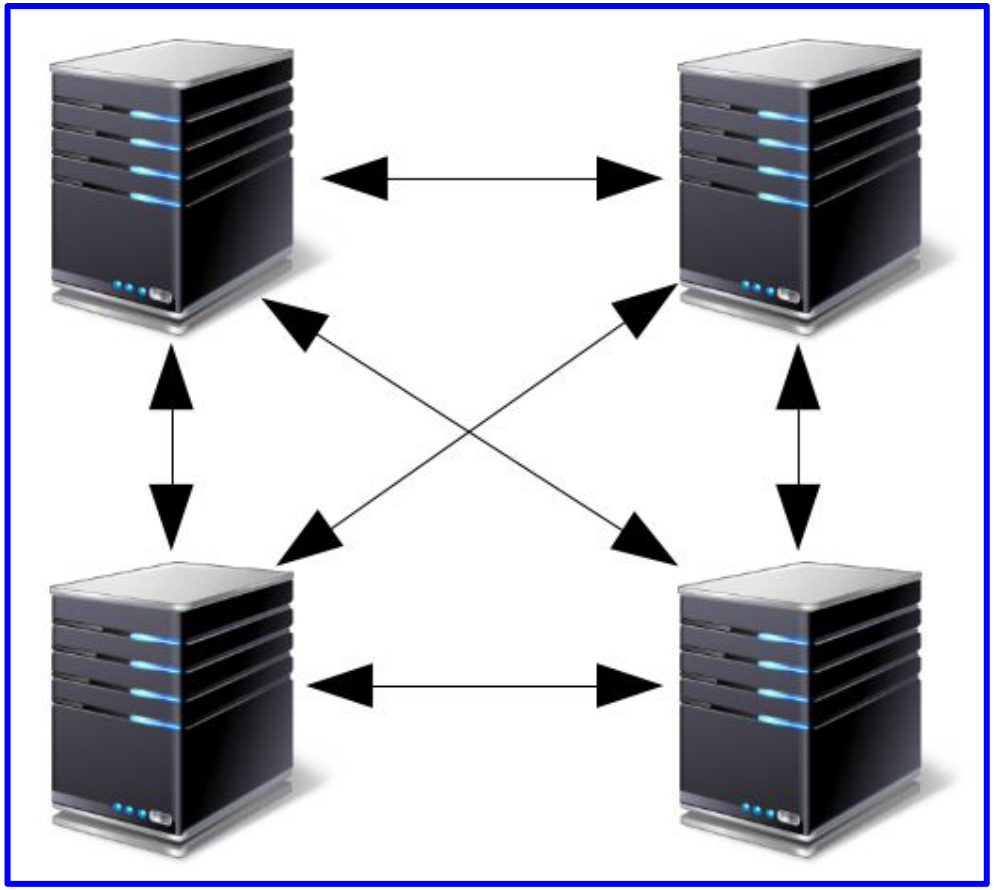
Conceito Básico: Memória Compartilhada

- Cada núcleo executa uma ou mais *threads* de um mesmo processo e elas se comunicam por variáveis compartilhadas

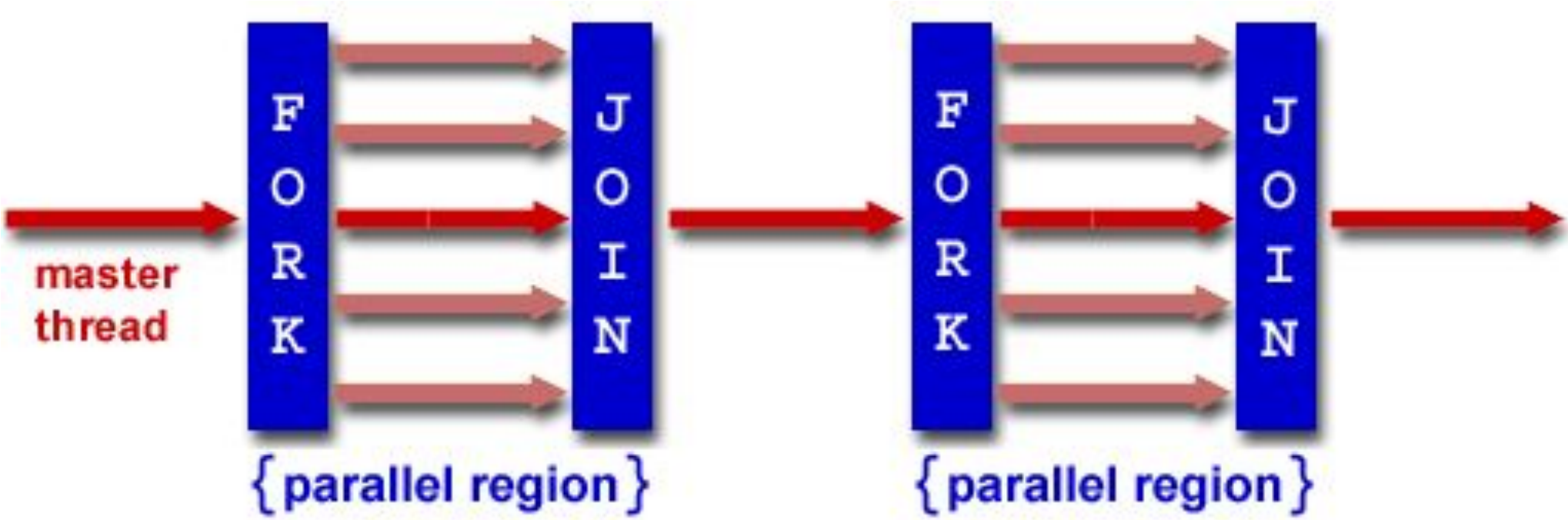


Conceito Básico: Memória Distribuída

- Cada máquina executa um processo da aplicação paralela e os processos se comunicam por troca de mensagens via rede



Conceito Básico: Modelo *Fork and Join*



Outros Conceitos Básicos Explicados à Frente

- Granularidade
- *Speedup*
- Eficiência

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - Mais conceitos básicos
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
- Algoritmo
- Algoritmo

  - **Sobre o OpenMP**
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - Mais conceitos básicos
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction

OpenMP

- API para a programação paralela de memória compartilhada
- Suportada pelas linguagens C, C++ e Fortran
- Possui um modelo *fork and join* para a execução paralela
- Constituída de:
  - diretivas de compilação
  - bibliotecas de função
  - variáveis de ambiente

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - **Compilador gcc for Linux**
  - Diretivas parallel e parallel for
  - Mais conceitos básicos
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Compilador GCC *for* Linux

```c
#include<stdio.h>

int main(){
    int recebeNumero = 10;
    printf("recebeNumero = %d\n", recebeNumero);
    return 0;
}
```

01

Compilação no Linux com GCC
gcc 01-recebenum.c -o exec

Execução no Linux
./recebenum

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - **Diretivas parallel e parallel for**
  - Mais conceitos básicos
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Diretiva *omp parallel*

- Abre uma região paralela na qual todas as *threads* executam o código

Exemplo da Diretiva *omp parallel*

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
   #pragma omp parallel
   {
      printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
   }
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

02

Compilação do GCC com OpenMP:
gcc -fopenmp 02-diretiva-op.c -o exec

Exemplo da Diretiva *omp parallel*

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

int main(){
    printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
    #pragma omp parallel
    {
        printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
    }
    printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

02

Região Paralela

Compilação do GCC com OpenMP:
gcc -fopenmp 02-diretiva-op.c -o exec

Exemplo da Diretiva *omp parallel*

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
   #pragma omp parallel
   {
      printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
   }
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

02

TELA
Sequencial 1

Thread Master

Exemplo da Diretiva *omp parallel*

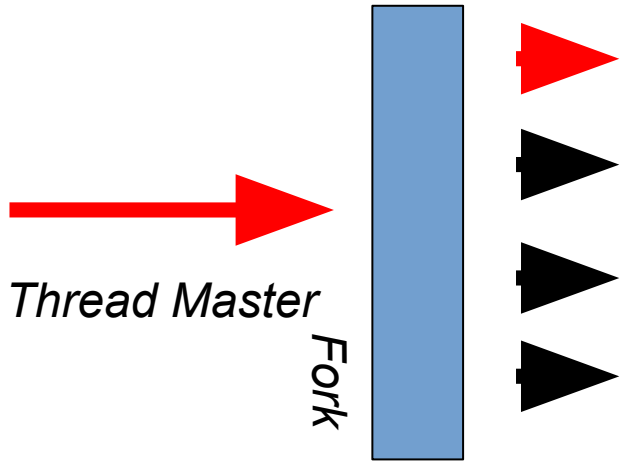
```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
   #pragma omp parallel
   {
      printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
   }
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

02

TELA

Sequencial 1



Exemplo da Diretiva *omp parallel*

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
    printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
    #pragma omp parallel
    {
        printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
    }
    printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

02

TELA

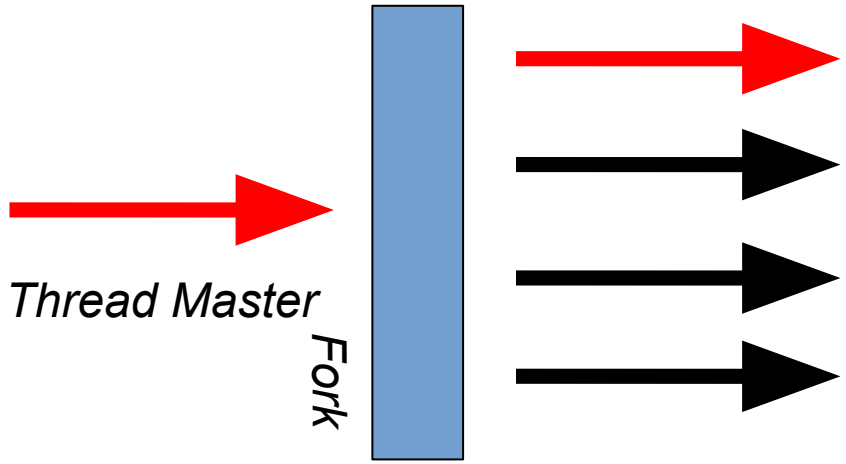
Sequencial 1

Paralela 4

Paralela 4

Paralela 4

Paralela 4



Exemplo da Diretiva *omp parallel*

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
   #pragma omp parallel
   {
      printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
   }
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

02

TELA

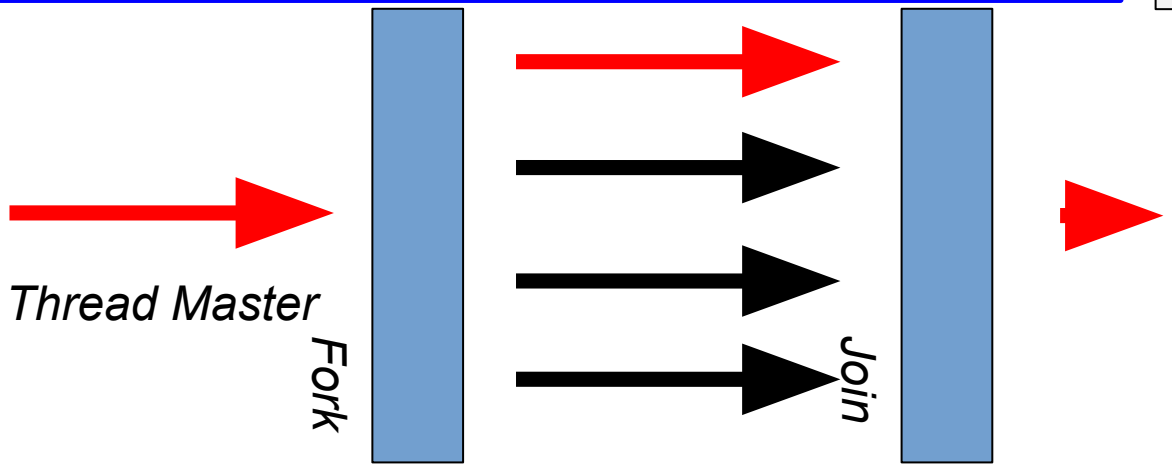
Sequencial 1

Paralela 4

Paralela 4

Paralela 4

Paralela 4



Exemplo da Diretiva *omp parallel*

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
   #pragma omp parallel
   {
      printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
   }
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

02

TELA

Sequencial 1

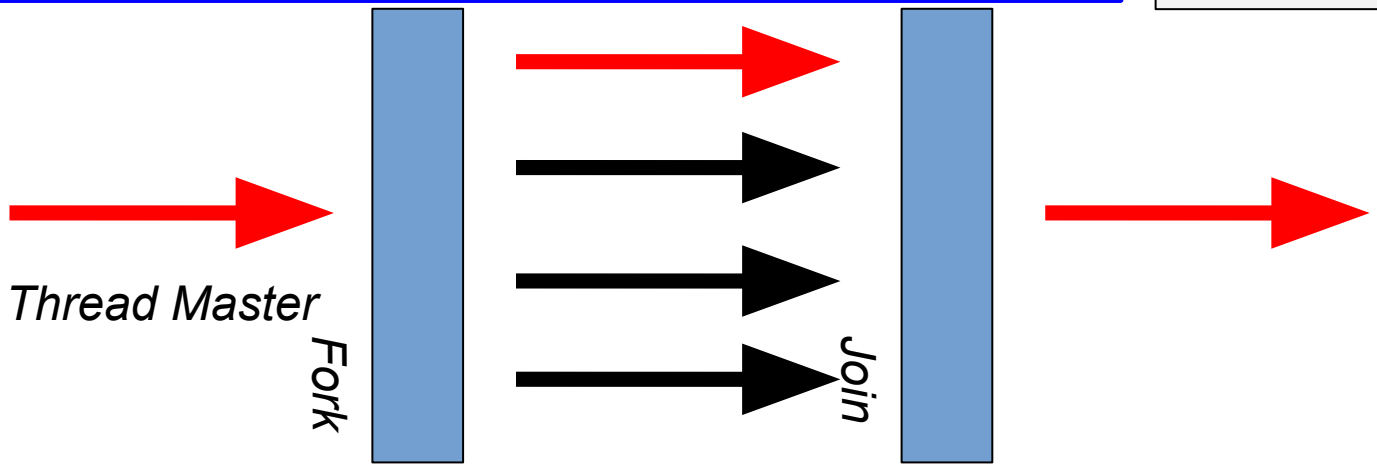
Paralela 4

Paralela 4

Paralela 4

Paralela 4

Sequencial 1



Exercício Resolvido (2)

- No código anterior, insira o comando *omp_set_num_threads(13)* antes do primeiro *printf*

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   omp_set_num_threads(13);

   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
   #pragma omp parallel
   {
      printf("Paralela %d\n", omp_get_num_threads());
   }
   printf("Sequencial %d\n", omp_get_num_threads());
}
```

03

Exercício Resolvido (3)

- O que acontece se executarmos o código abaixo várias vezes?

```
int main(){
  #pragma omp parallel
  for(int i = 1; i <= 4; i++)
    printf("I = %d -- %d\n", i, omp_get_thread_num());
}
```

04

Exercício Resolvido (3)

- O que acontece se executarmos o código abaixo várias vezes?

```
int main(){
  #pragma omp parallel
  for(int i = 1; i <= 4; i++)
    printf("I = %d -- %d\n", i, omp_get_thread_num());
}
```

04

Resposta: O i é uma variável local e não conseguimos garantir a ordem de execução de *threads* em paralelo

Exercício Resolvido (4)

- Mostre a diferença deste código para o anterior e explique o resultado

```
int main(){
  int i;
  #pragma omp parallel
  for(i = 1; i <= 4; i++)
    printf("I = %d -- %d\n", i, omp_get_thread_num());
}
```

05

Exercício Resolvido (4)

- Mostre a diferença deste código para o anterior e explique o resultado

```
int main(){
  int i;
  #pragma omp parallel
  for(i = 1; i <= 4; i++)
    printf("I = %d -- %d\n", i, omp_get_thread_num());
}
```

05

Resposta: A variável i é compartilhada entre as *threads*. Inicialmente, todas lêem o valor inicial de i que é um, contudo, como a *thread* 0 foi mais rápida, na segunda leitura das demais *threads*, o valor de i será 5

Diretiva *omp parallel for*

- Abre uma região paralela na qual as iterações do for são igualmente distribuídas entre as *threads*

- Este padrão de programação é conhecido como MAP

Exercício Resolvido (5)

- Explique o que acontece quando executamos o código abaixo

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   int i;
   #pragma omp parallel for num_threads(3)
   for(i = 0; i < 9; i++)
      printf("ID:%d, I: %d \n", omp_get_thread_num(), i);
}
```

06

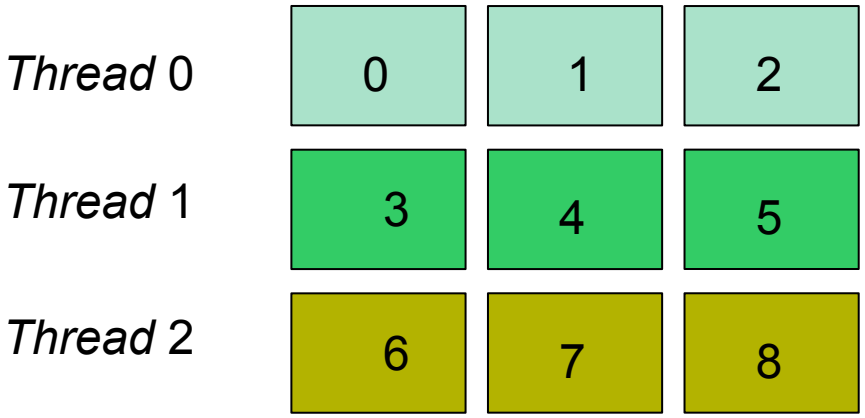
Exercício Resolvido (5)

- Explique o que acontece quando executamos o código abaixo

```c
#include<stdio.h>
#include<omp.h>

int main(){
   int i;
   #pragma omp parallel for num_threads(3)
   for(i = 0; i < 9; i++)
      printf("ID:%d, I: %d \n", omp_get_thread_num(), i);
}
```

06



ID: 0 I: 0
ID: 2 I: 6
ID: 0 I: 1
ID: 1 I: 3
ID: 1 I: 4
ID: 1 I: 5
ID: 2 I: 7
ID: 2 I: 8
ID: 0 I: 2

Exercício Resolvido (6)

- Explique o que acontece em cada código abaixo

```
for(int i = 0; i < 3; i ++)
   printf("I = %d\n", i);
```

07

```
#pragma omp parallel
for(int i = 0; i < 3; i ++)
   printf("I = %d\n", i);
```

07

```
#pragma omp parallel for
   for(int i = 0; i < 3; i ++)
      printf("I = %d\n", i);
```

07

Exercício Resolvido (6)

- Explique o que acontece em cada código abaixo

Sequencial

```
for(int i = 0; i < 3; i ++)          07
   printf("I = %d\n", i);
```

```
I = 0
I = 1
I = 2
```

Replica o código

```
#pragma omp parallel                 07
for(int i = 0; i < 3; i ++)
   printf("I = %d\n", i);
```

```
I = 0
I = 0
I = 0
I = 1
I = 1
I = 2
I = 1
I = 2
I = 2
I = 0
I = 1
I = 2
```

4 threads e a ordem da impressão pode variar

Distribui as iterações

```
#pragma omp parallel for
   for(int i = 0; i < 3; i ++)
07    printf("I = %d\n", i);
```

```
I = 2
I = 0
I = 1
```

A ordem da impressão pode variar

Exercício Resolvido (7)

- Paralelize o código abaixo usando a diretiva "*omp parallel for*"

```
void matriz(int** mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
}
```

08

Exercício Resolvido (7)

- Paralelize o código abaixo usando a diretiva "*omp parallel for*"

```
void matriz(int** mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
}
```
08

1ª Resposta

```
void matriz2(int **mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      #pragma omp parallel for
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
}
```
08

- Teremos *size fork* e *join*, um para cada i
- Em cada *fork e join*, dividimos as instruções entre as *t threads*

Exercício Resolvido (7)

- Paralelize o código abaixo usando a diretiva "*omp parallel for*"

```
void matriz(int** mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
}
```
08

2ª Resposta

```
void matriz3(int **mat, int size){
   int i, j;
   #pragma omp parallel for private(j)
   for(i = 0; i < size; i++)
      for(j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
}
```
08

Qual é a diferença nesta segunda resposta?

Exercício Resolvido (7)

- Paralelize o código abaixo usando a diretiva "*omp parallel for*"

```
void matriz(int** mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
}
```

08

2ª Resposta

```
void matriz3(int **mat, int size){
   int i, j;
   #pragma omp parallel for private(j)
   for(i = 0; i < size; i++)
      for(j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
}
```

08

- Teremos 1 *fork* e *join*, distribuindo as size^2 instruções pelas *t threads*

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - **Mais conceitos básicos**
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Agenda

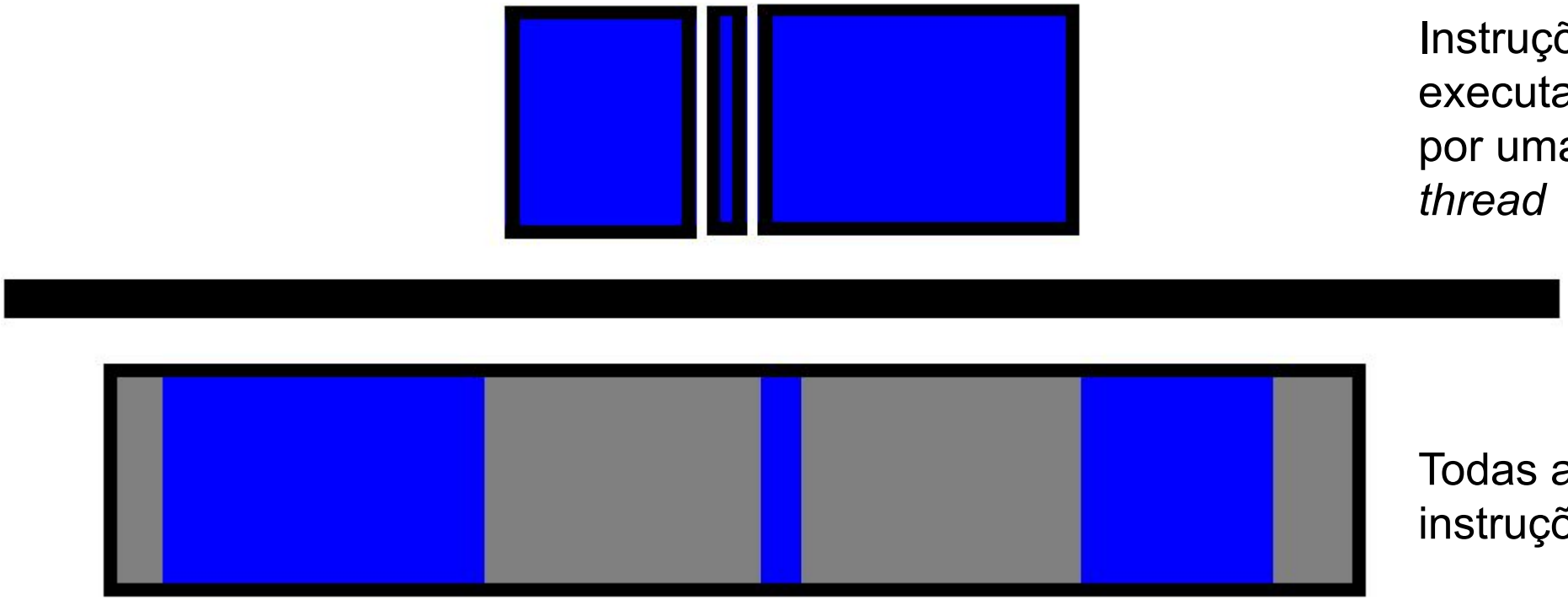
- Introdução
- Conceitos
  - Granularidade
  - *Speedup*
  - Eficiência
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - **Mais conceitos básicos**
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Agenda

- Introdução
- Conceitos
  - **Granularidade**
  - *Speedup*
  - Eficiência
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - **Mais conceitos básicos**
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Conceito Básico: Granularidade

- Porção das instruções do processo que uma mesma *thread* executa



Tipos de Granularidade

- Grossa: Quando essa proporção é “grande”

- Fina: Quando a porção é pequena

```
//grão grosso com 2 processadores
switch (procesorID) {
   case 1: compute 1 - 50; break;
   case 2: compute 50 - 100; break;
}
```

```
//grão médio com 25 processadores
switch (procesorID) {
   case 1: compute 1 - 4; break;
   case 2: compute 5 - 8; break;
   case 3: compute 9 - 12; break;
           .
           .
           .
   case 100: compute 97 - 100; break;
}
```

```
//grão fino com 100 processadores
switch (procesorID) {
   case 1: compute 1; break;
   case 2: compute 2; break;
   case 3: compute 3; break;
           .
           .
           .
   case 100: compute 100; break;
}
```

Paralelismo de Grão Fino

- Programa é dividido em várias tarefas pequenas
- Cada tarefa é atribuída a um processador
- Aumentando o número de processadores, podemos comprometer a escalabilidade da solução

Paralelismo de Grão Fino

- Reduz a quantidade de trabalho associado a uma tarefa

- Distribui uniformemente o trabalho entre os processadores, facilitando o balanceamento de carga

- Demanda mais comunicação (*overhead*) entre as *threads*

Paralelismo de Grão Grosso

- Programa é dividido em grandes tarefas

- Grande quantidade de computação ocorre em processadores causando, eventualmente, desequilíbrio de carga entre os processadores

- Demanda menos comunicação e sobrecarga de sincronização

Agenda

- Introdução
- Conceitos
  - Granularidade
  - ***Speedup***
  - Eficiência
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - **Mais conceitos básicos**
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

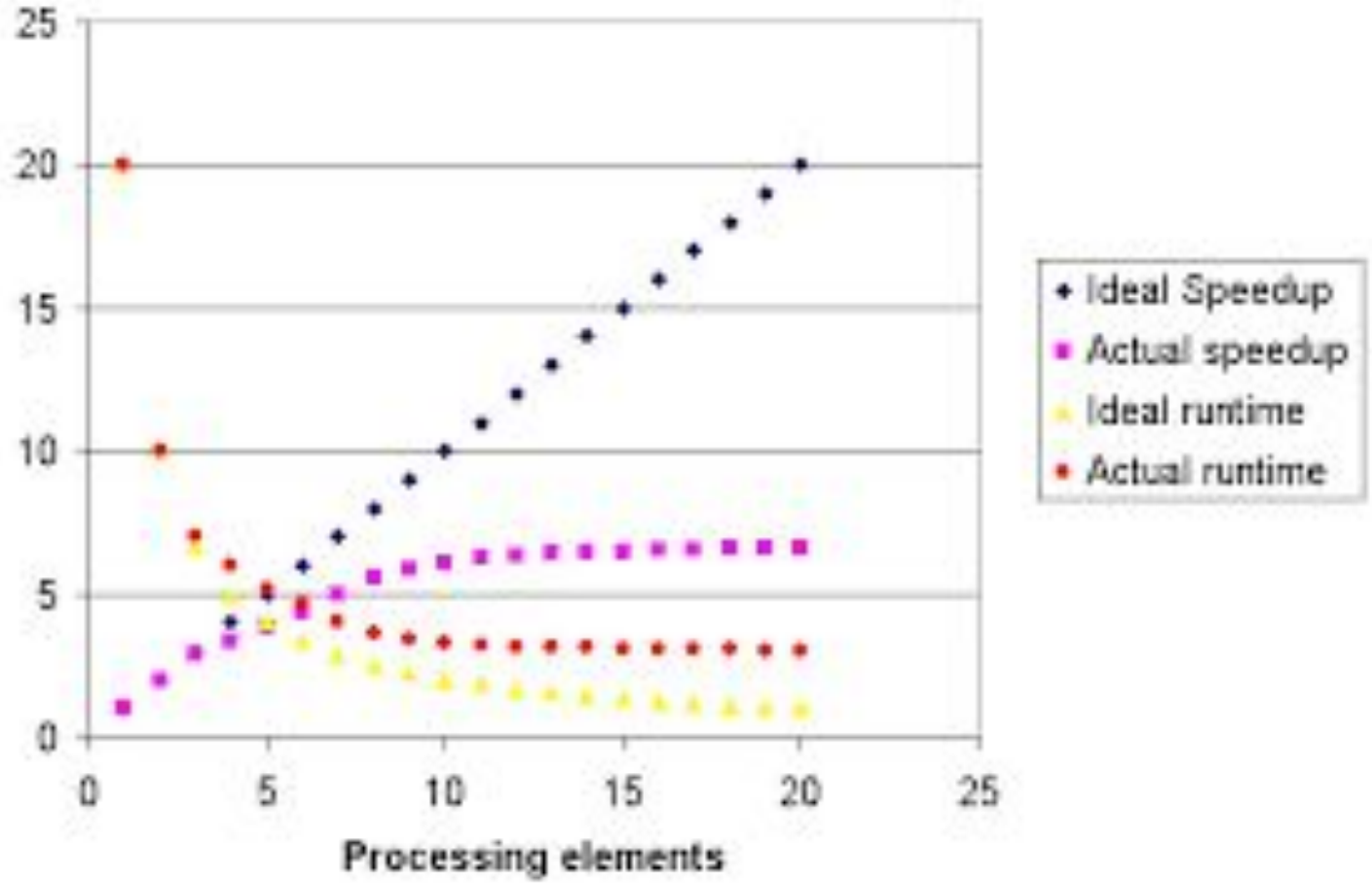
Conceito Básico: *Speedup*

- Ganho de desempenho ao paralelizar uma aplicação

$$\frac{\textbf{Tempo do Programa Sequencial}}{\textbf{Tempo do Programa Paralelo}}$$

Conceito Básico: *Speedup*

- O ideal é que o *speedup* fosse igual ao número de núcleos utilizados, contudo, na prática, é menor



Exercício Resolvido (8)

- Temos um programa sequencial que executa em 10 segundos e sua versão paralela usando quatro núcleos executa em 5 segundos

- Qual é o nosso *speedup* ideal e o real?

Exercício Resolvido (8)

- Temos um programa sequencial que executa em 10 segundos e sua versão paralela usando quatro núcleos executa em 5 segundos

- Qual é o nosso *speedup* ideal e o real?

Resposta:

Speed up ideal = 4 (quatro núcleos)

Speed up = $(T_{SEQUENCIAL} / T_{PARALELO}) = (10 / 5) = 2$

Agenda

- Introdução
- Conceitos
  - Granularidade
  - *Speedup*
  - **Eficiência**
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - **Mais conceitos básicos**
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Conceito Básico: Eficiência

- Métrica derivada do *speedup* cujo valor varia entre 0 e 1 sendo que 1 (ou 100%) acontece com o *speedup* ideal

$$\frac{\textit{Speedup}}{\text{Número de núcleos}}$$

Exercício Resolvido (9)

- Qual é a eficiência do exemplo apresentado no exercício anterior?

Exercício Resolvido (9)

- Qual é a eficiência do exemplo apresentado no exercício anterior?

Resposta:

Como temos 4 núcleos e 2 de *speed up*, a eficiência será:

2 / 4 = 0,5 (50% de aproveitamento)

Exercício Resolvido (10)

- Apresente o *speedup* e a eficiência obtidos nas paralelizações abaixo

(size = 10…)

```
void matriz(int** mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
} 09
```

```
void matriz2(int **mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      #pragma omp parallel for
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
} 09
```

```
void matriz3(int **mat, int size){
   int i, j;
   #pragma omp parallel for private(j)
   for(i = 0; i < size; i++)
      for(j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
} 09
```

Exercício Resolvido (10)

- Apresente o *speedup* e a eficiência obtidos nas paralelizações abaixo

(size = 10…)

```
void matriz(int** mat, int size){
   for(int i = 0; i < size; i++)
      for(int j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
} 09
```

```
void matriz2
   for(int i
      #pragm
      for(in
         mat
} 09
```

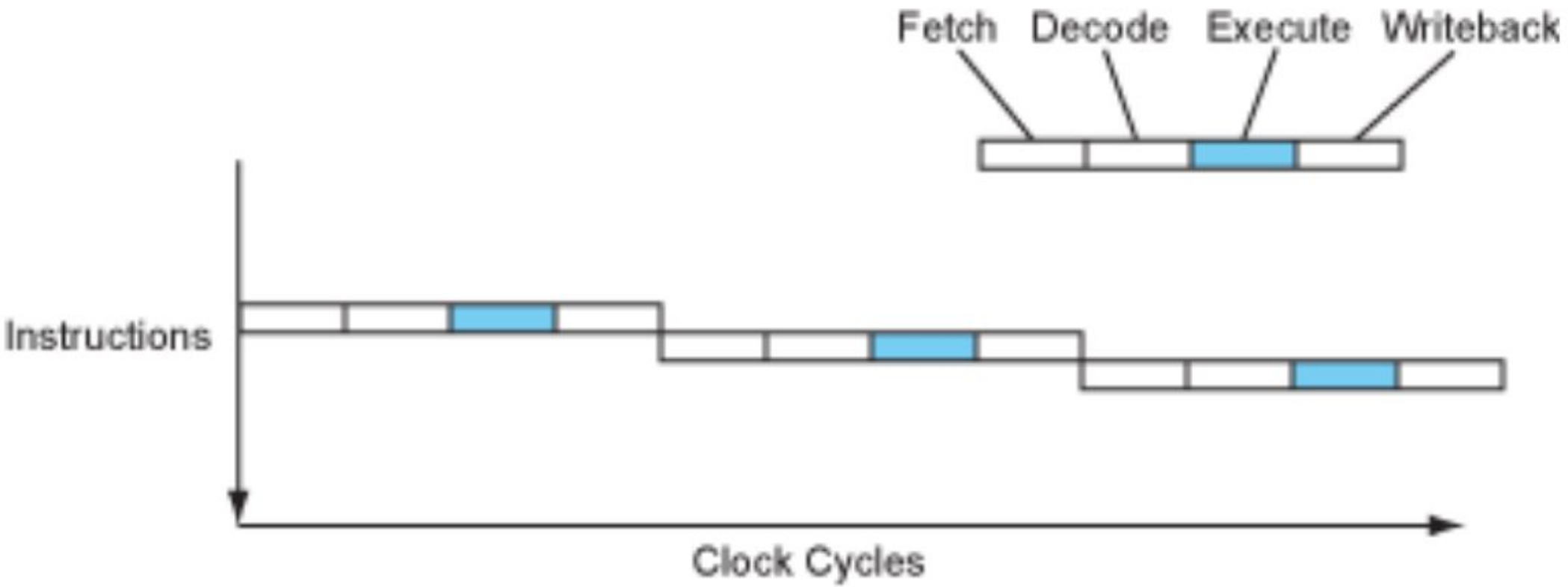
Tempo (seq): 1.2 s.
Tempo (par1): 70.9 s.
Tempo (par2): 57.1 s.

E agora José?

```
){
   #pragma omp parallel for private(j)
   for(i = 0; i < size; i++)
      for(j = 0; j < size; j++)
         mat[i][j] = rand();
} 09
```

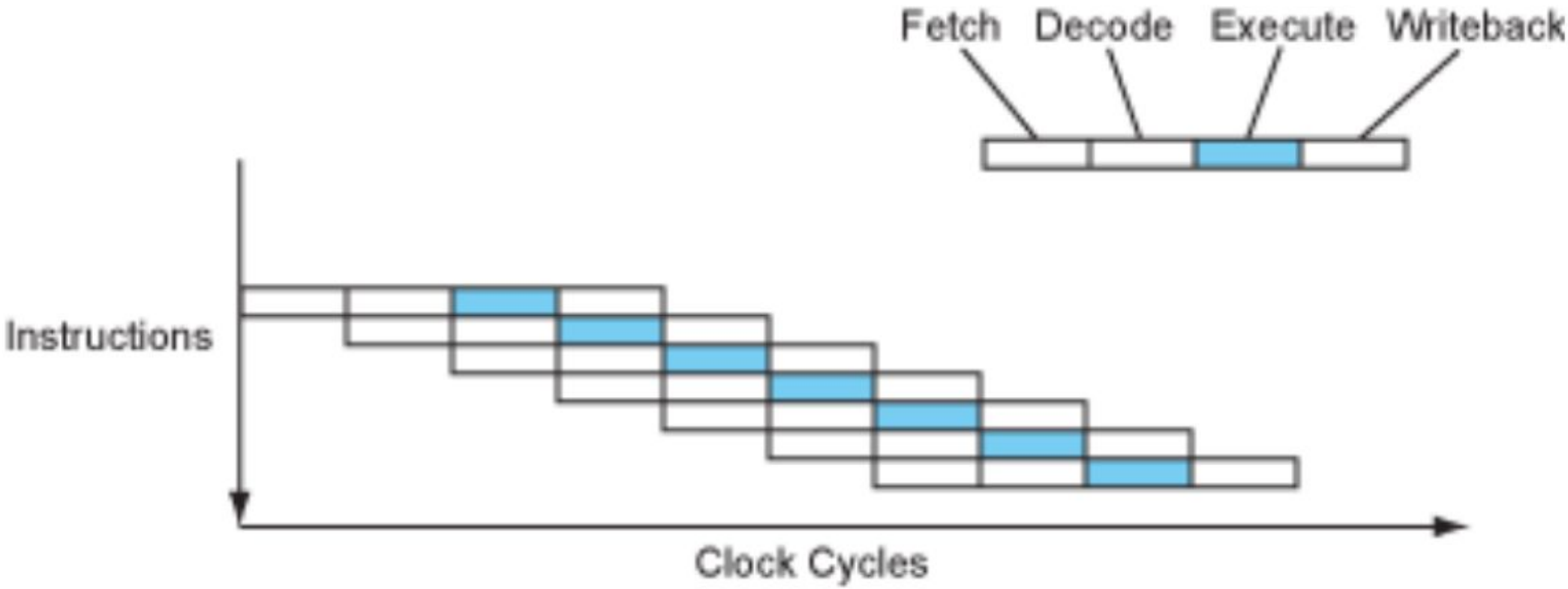
Arquiteturas Paralelas

- Por exemplo, paralelismo de instruções (e.g., pipeline)



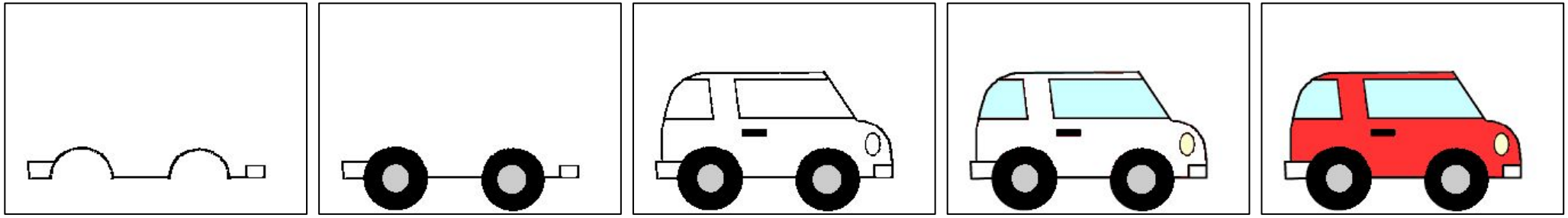
Arquiteturas Paralelas

- Por exemplo, paralelismo de instruções (e.g., pipeline)



Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

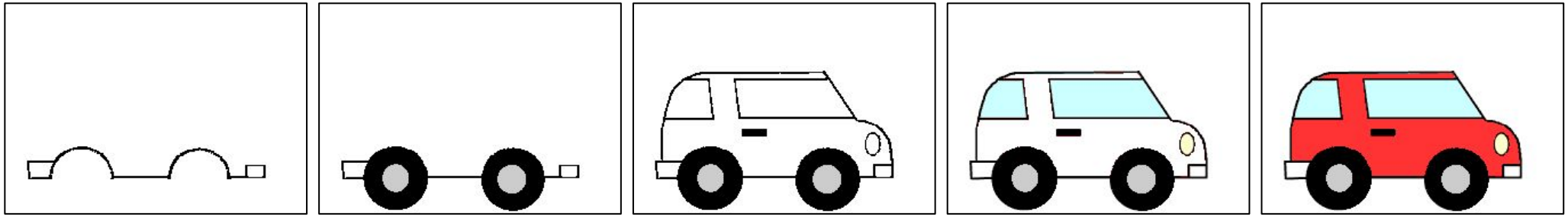
Etapa (1): Assoalho | Etapa (2): Roda | Etapa (3): Carcaça | Etapa (4): Vidros | Etapa (5): Pintura



Se cada etapa demora 1 minuto, nós produzimos um carro a cada 5 minutos. E se utilizarmos *pipeline*?

Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

Etapa (1): Assoalho | Etapa (2): Roda | Etapa (3): Carcaça | Etapa (4): Vidros | Etapa (5): Pintura

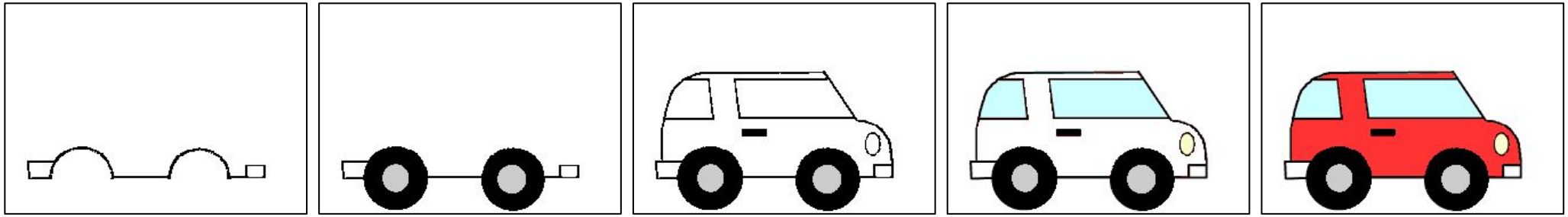


CARRO(1)

T_1

Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

Etapa (1): Assoalho | Etapa (2): Roda | Etapa (3): Carcaça | Etapa (4): Vidros | Etapa (5): Pintura

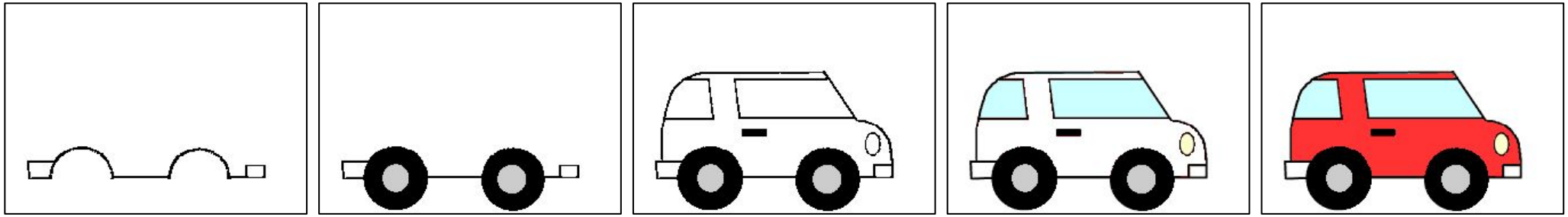


CARRO(2) CARRO(1)

T_2

Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

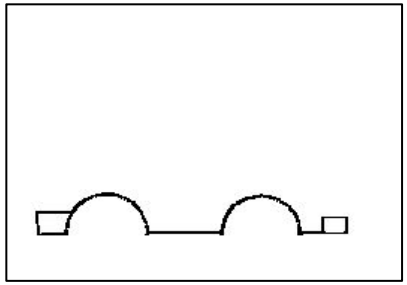
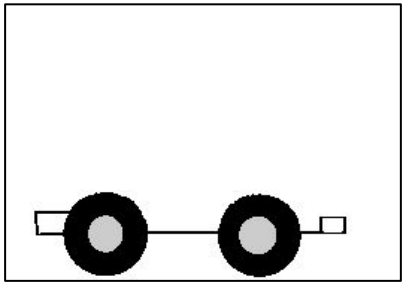
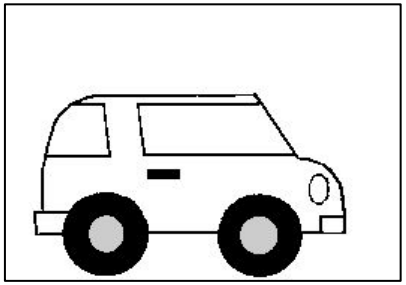
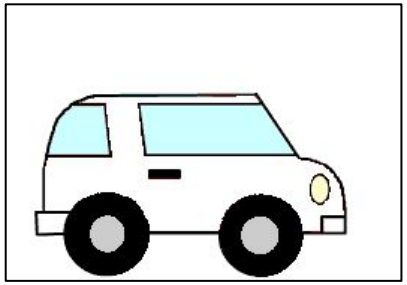
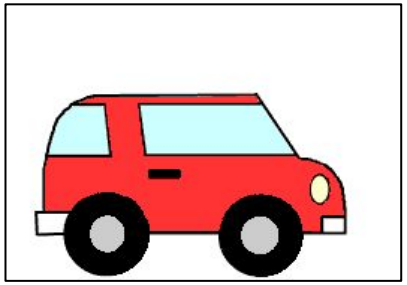
Etapa (1): Assoalho | Etapa (2): Roda | Etapa (3): Carcaça | Etapa (4): Vidros | Etapa (5): Pintura



CARRO(3) CARRO(2) CARRO(1)

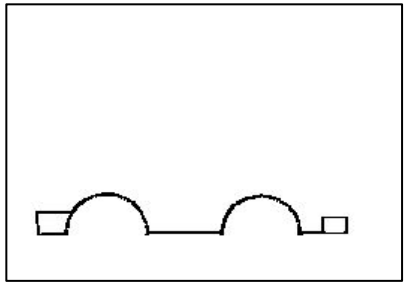
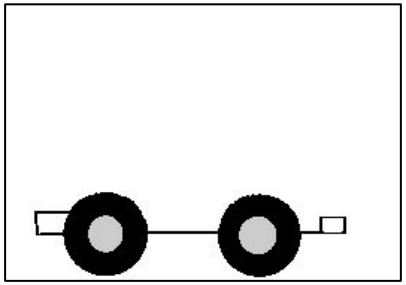
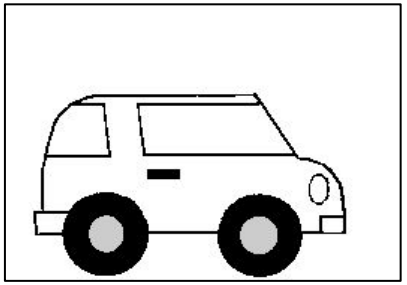
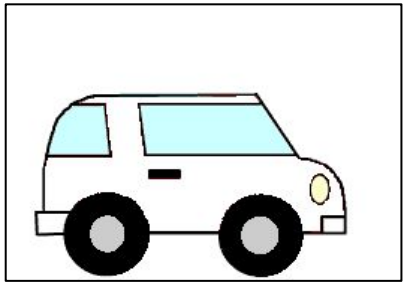
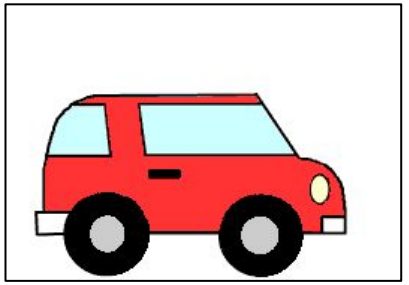
T_3

Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

Etapa (1): Assoalho	Etapa (2): Roda	Etapa (3): Carcaça	Etapa (4): Vidros	Etapa (5): Pintura
				
CARRO(4)	CARRO(3)	CARRO(2)	CARRO(1)	

T_4

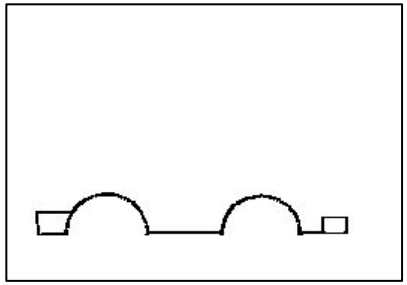
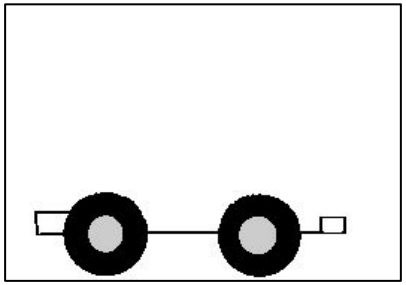
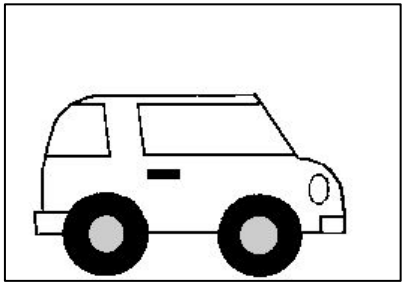
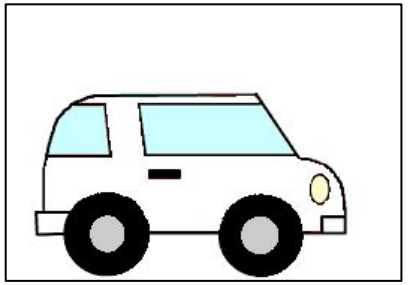
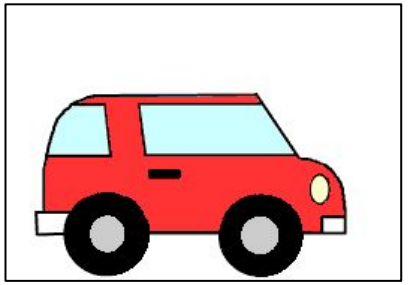
Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

Etapa (1): Assoalho	Etapa (2): Roda	Etapa (3): Carcaça	Etapa (4): Vidros	Etapa (5): Pintura
				
CARRO(5)	CARRO(4)	CARRO(3)	CARRO(2)	CARRO(1)

CARRO(1) pronto!!!!

T_5

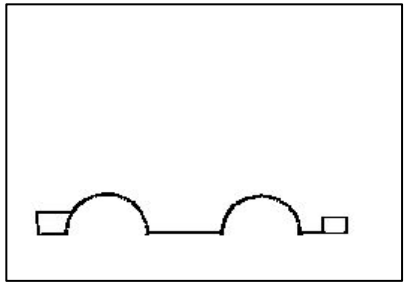
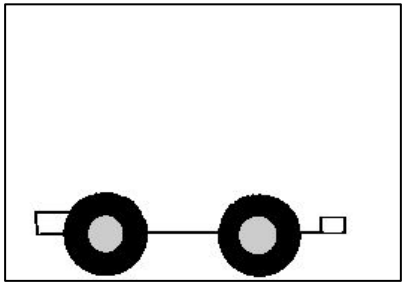
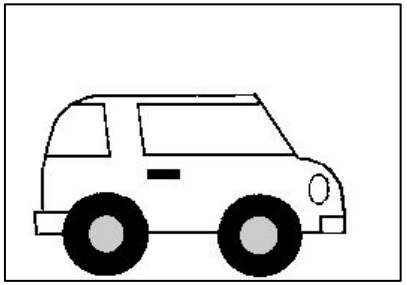
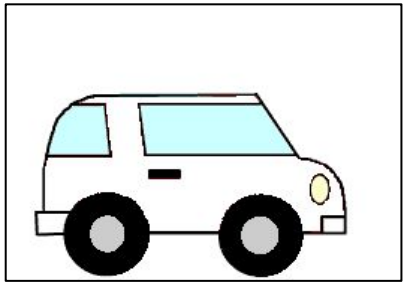
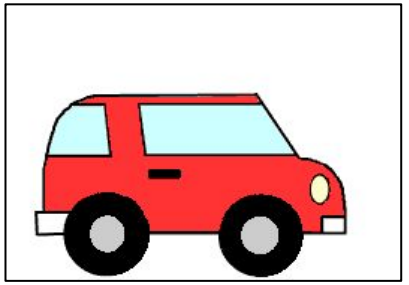
Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

Etapa (1): Assoalho	Etapa (2): Roda	Etapa (3): Carcaça	Etapa (4): Vidros	Etapa (5): Pintura
				
CARRO(6)	CARRO(5)	CARRO(4)	CARRO(3)	CARRO(2)

T_6

CARRO(2) pronto!!!!

Exemplo de Pipeline: Indústria Automobilística

Etapa (1): Assoalho	Etapa (2): Roda	Etapa (3): Carcaça	Etapa (4): Vidros	Etapa (5): Pintura
				
CARRO(7)	CARRO(6)	CARRO(5)	CARRO(4)	CARRO(3)

CARRO(3) pronto!!!!

T_7

Computação Paralela

- Problemas cuja complexidade é maior ou igual a $O(n^2)$

- Problemas com etapas independentes

Exercício Resolvido (12)

- Faça um programa (versões sequencial e paralela) que leia um texto e mostre o número de ocorrências de uma palavra no texto. Em seguida, calcule o *speedup* e eficiência

Exercício Resolvido (12)

```
//DECLARACAO DA STRING A SER PROCURADA ================================
char* str = (char*) malloc(100 * sizeof(char));
strcpy(str, "Página");


//DECLARACAO E ALOCACAO DO VETOR ======================================
char **palavra = malloc (SIZE * sizeof(char*));
for (int i = 0; i < SIZE; ++i){
   palavra[i] = malloc (100 * sizeof(char));
}


//LEITURA DAS FRASES ==================================================
int numPalavra = 0;
while(numPalavra < SIZE && strcmp(palavra[numPalavra++], "</html>")){
   scanf("%s", palavra[numPalavra]);
   printf("(%i): %s\n", numPalavra, palavra[numPalavra]);
}
```

10

Exercício Resolvido (12)

```
//ALGORITMO SEQUENCIAL ==========================================
int soma = 0;
for(int i = 0; i < numPalavra; i++){
   if(compareTo(palavra[i], str)){
      soma++;
   }
}
```

10

```
bool compareTo(char* s1, char* s2){
   bool resp = true, sair = false;

   for(int i = 0; sair == false; i++){
      if(s1[i] == '\0'){
         sair = true;
         resp = (s2[i] == '\0');
      } else if(s1[i] != s2[i]){
         sair = true;
         resp = false;
      }
   }

   return resp;
}
```

10

Exercício Resolvido (12)

```
//ALGORITMO PARALELO ==========================================
soma = 0;
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
   int numPalavraLocal = numPalavra / omp_get_num_threads();
   int deslocamento = omp_get_thread_num()*numPalavraLocal;
   for(int i = deslocamento; i < (deslocamento + numPalavraLocal); i++){
      if(compareTo(palavra[i], str)){
         soma++;
      }
   }
}
```

10

Por exemplo: Se tivermos 400 palavras e 4 threads:

- numPalavraLocal será 100
- Thread 0: deslocamento = (0 * 100) e término do for em [(0 * 100) + 100]
- Thread 1: deslocamento = (1 * 100) e término do for em [(1 * 100) + 100]
- Thread 2: deslocamento = (2 * 100) e término do for em [(2 * 100) + 100]
- Thread 3: deslocamento = (3 * 100) e término do for em [(3 * 100) + 100]

Exercício Resolvido (12)

- Faça um programa (versões sequencial e paralela) que leia um texto e mostre o número de ocorrências de uma palavra no texto. Em seguida, calcule o *speedup* e eficiência

Tempo (seq): 0.000641 s

Tempo (par): 0.000395 s

$speedup = (T_{SEQ} / T_{PAR})$

$= 1.62$

$eficiência = (S_{REAL} / S_{IDEAL})$

$= 40,57\%$

Exercício Resolvido (13)

- Repita o exercício de matriz seguindo a ideia do deslocamento da questão anterior. Em seguida, calcule o *speedup* e eficiência

Exercício Resolvido (13)

- Repita o exercício de matriz seguindo a ideia do deslocamento da questão anterior. Em seguida, calcule o *speedup* e eficiência

```
void matriz4(int **mat, int size){
   #pragma omp parallel
   {
      int size_local = size / omp_get_num_threads();
      int deslocamento = omp_get_thread_num()*size_local;
      int inicio = deslocamento;
      int fim = deslocamento + size_local;
      for(int i = inicio; i < fim; i++){
         for(int j=0; j < size; j++){
            mat[i][j] = rand();
         }
      }
   }
}
```

11

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - Mais conceitos básicos
  - **Diretivas sections, barrier, master e critical**
  - Escopo das Variáveis
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Diretiva "*omp parallel sections*"

- Segmenta o código em seções sendo que cada seção é executada por uma única *thread*

Exemplo da Diretiva "*omp parallel sections*"

```
int main(){
   omp_set_num_threads(3);
   #pragma omp parallel sections
   {
      #pragma omp section
         for(int i = 1; i < 10; i++)
            printf("Thread(%d): %d\n", omp_get_thread_num(), i);

      #pragma omp section
         for(int i = 1; i < 10; i++)
            printf("Thread(%d): %d\n", omp_get_thread_num(), (i*10));

      #pragma omp section
         for(int i = 1; i < 10; i++)
            printf("Thread(%d): %d\n", omp_get_thread_num(), (i*100));
   }
}
```

12

Exemplo da Diretiva "*omp parallel sections*"

```
int main(){
   omp_set_num_threads(3);
   #pragma omp parallel sections
   {
      #pragma omp section
```

Observação (1): Se tivemos 6 núcleos disponíveis, apenas 3 deles serão utilizados; um para cada seção

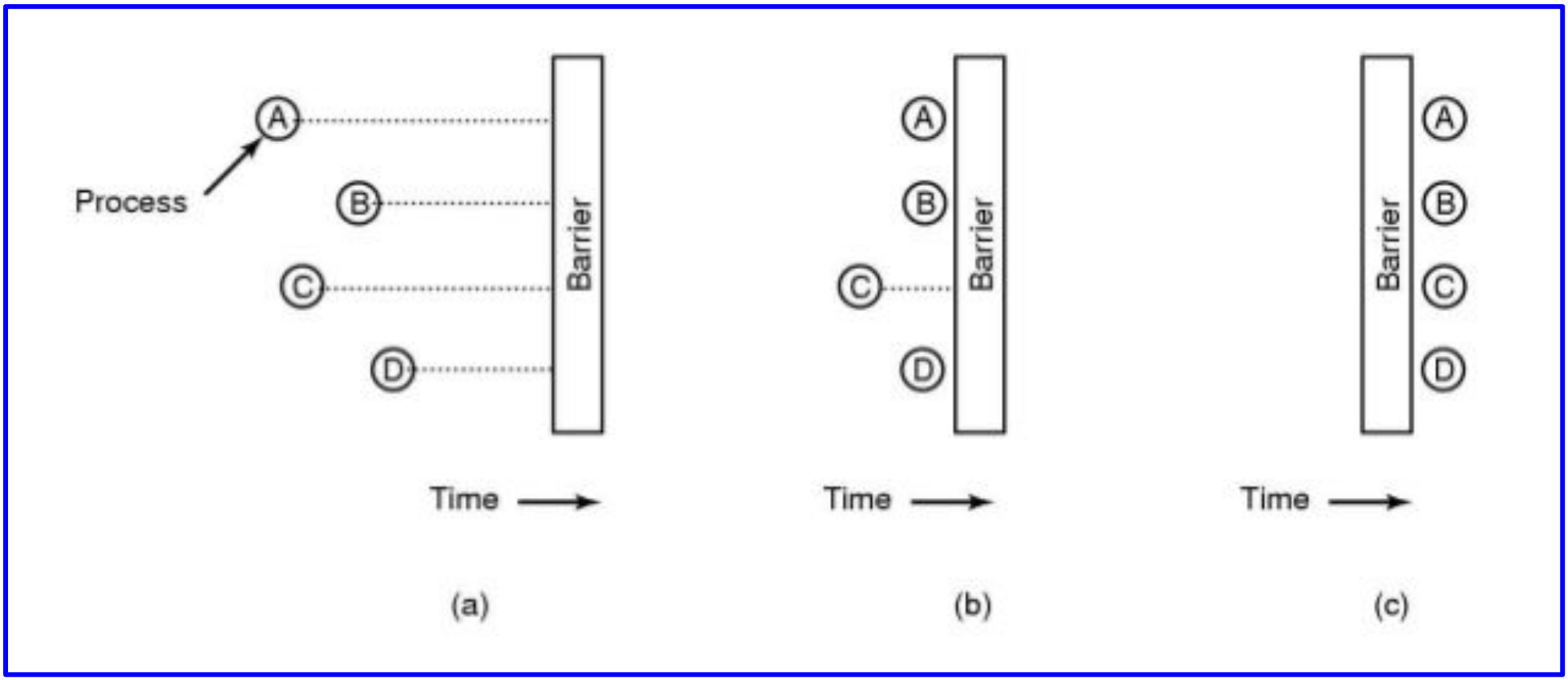
Observação (2): Se tivermos apenas 2, um deles executará a terceira seção

```
      #pragma omp section
         for(int i = 1; i < 10; i++)
            printf("Thread(%d): %d\n", omp_get_thread_num(), (i*100));
   }
}
```

12

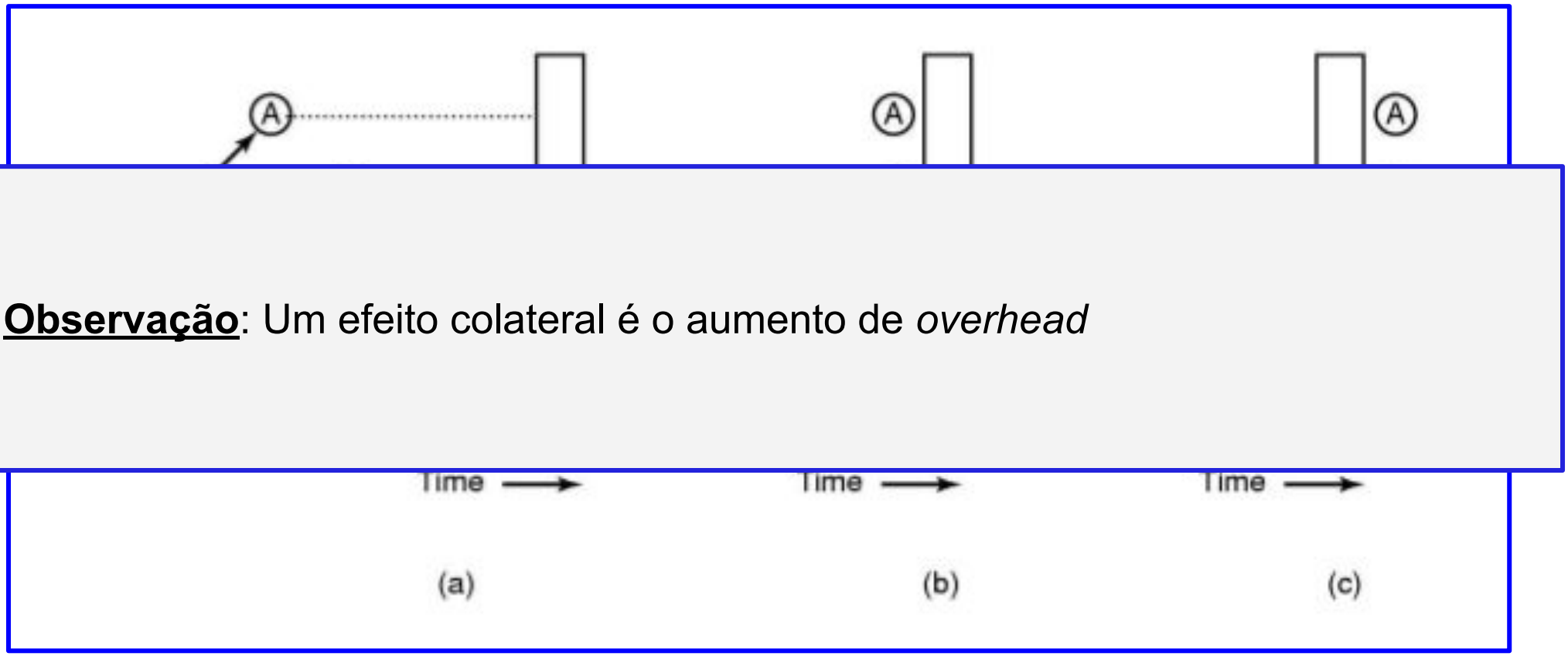
Diretiva "*omp barrier*"

- Impõe um ponto de sincronização no qual qualquer *thread* só pode ultrapassá-lo quando todas as demais atingirem esse ponto



Diretiva "*omp barrier*"

- Impõe um ponto de sincronização no qual qualquer *thread* só pode ultrapassá-lo quando todas as demais atingirem esse ponto



Observação: Um efeito colateral é o aumento de *overhead*

Exemplo da Diretiva "*omp barrier*"

```
omp_set_num_threads(3);
#pragma omp parallel
{
    printf("Fase 1\n");
    printf("Fase 2\n");
}

printf("\n\n============================\n\n");

#pragma omp parallel
{
    printf("Fase 1\n");
    #pragma omp barrier
    printf("Fase 2\n");
}
```

Fase 1
Fase 2
Fase 1
Fase 2
Fase 1
Fase 2

Fase 1
Fase 1
Fase 1
Fase 2
Fase 2
Fase 2

Diretiva "*omp master*"

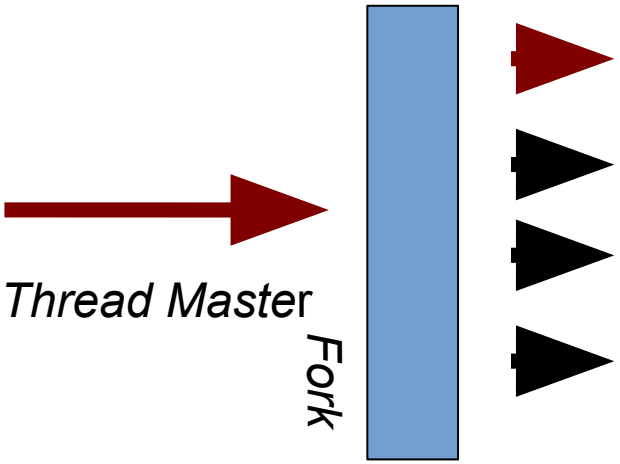
- Abre uma seção que será executada somente pela *thread master* (ID 0)

Exemplo da Diretiva "*omp master*"

```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
    printf("Thread %d\n", omp_get_thread_num());
    #pragma omp barrier
    #pragma omp master
    {
        printf("Master %d\n", omp_get_thread_num());
    }
}
```

Exemplo da Diretiva "*omp master*"

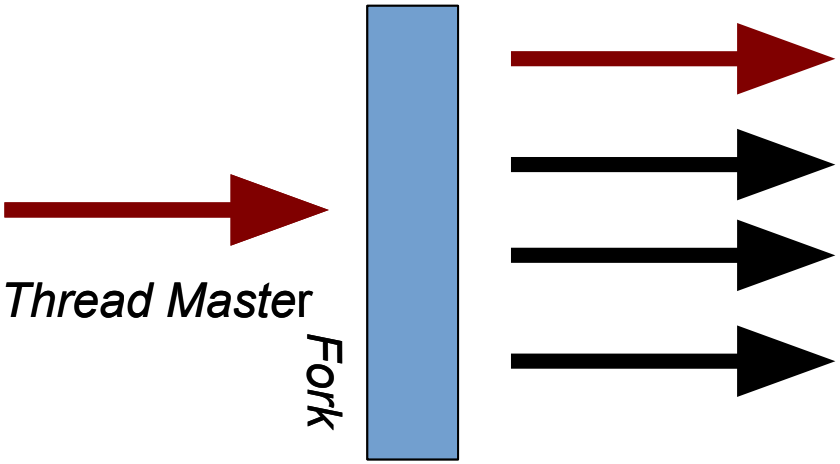
```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
    printf("Thread %d\n", omp_get_thread_num());
    #pragma omp barrier
    #pragma omp master
    {
        printf("Master %d\n", omp_get_thread_num());
    }
}
```



Exemplo da Diretiva "*omp master*"

```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
    printf("Thread %d\n", omp_get_thread_num());
    #pragma omp barrier
    #pragma omp master
    {
        printf("Master %d\n", omp_get_thread_num());
    }
}
```

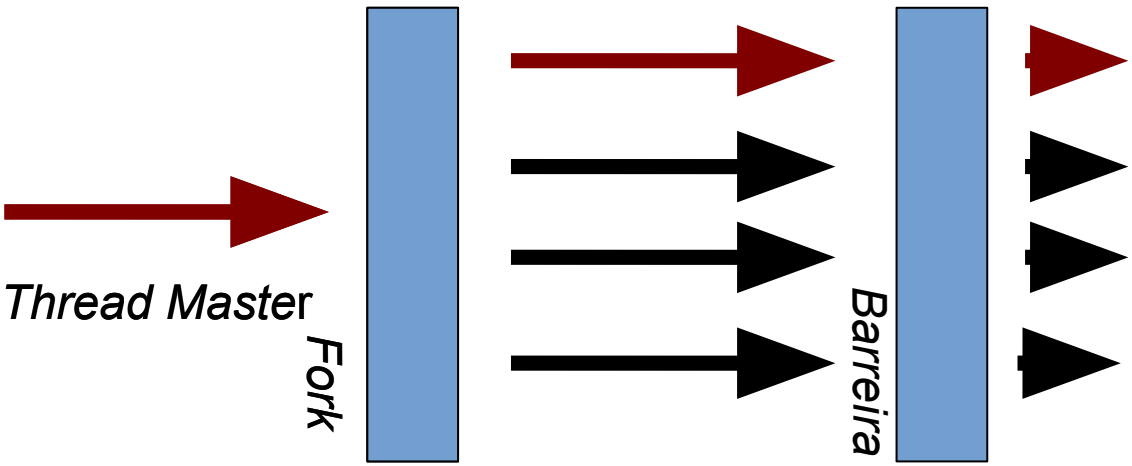
```
Thread 1
Thread 0
Thread 3
Thread 2
```



Exemplo da Diretiva "*omp master*"

```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
    printf("Thread %d\n", omp_get_thread_num());
    #pragma omp barrier
    #pragma omp master
    {
        printf("Master %d\n", omp_get_thread_num());
    }
}
```

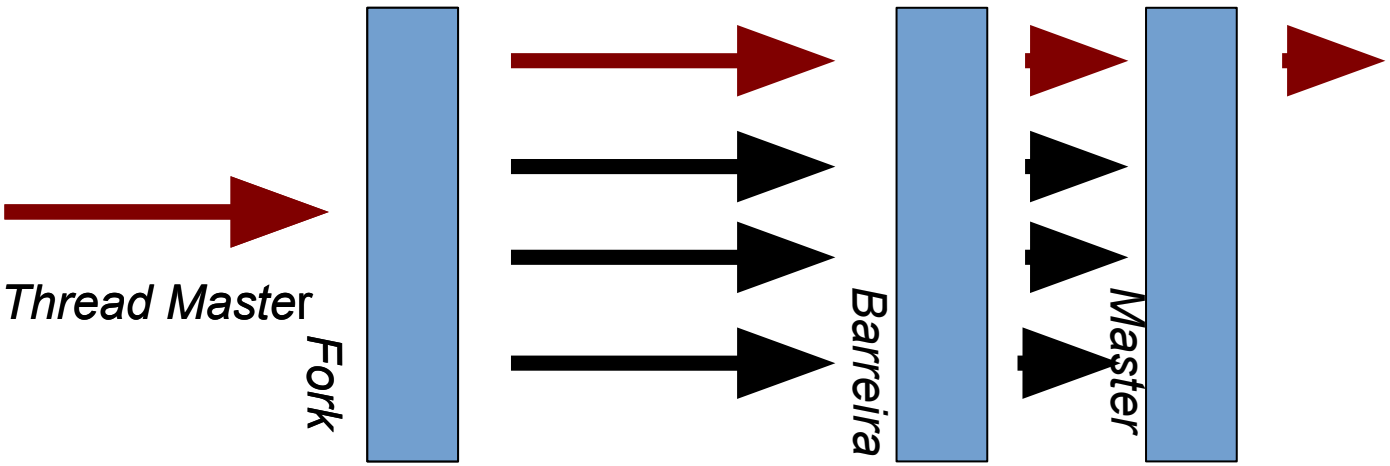
Thread 1
Thread 0
Thread 3
Thread 2



Exemplo da Diretiva "*omp master*"

```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
    printf("Thread %d\n", omp_get_thread_num());
    #pragma omp barrier
    #pragma omp master
    {
        printf("Master %d\n", omp_get_thread_num());
    }
}
```

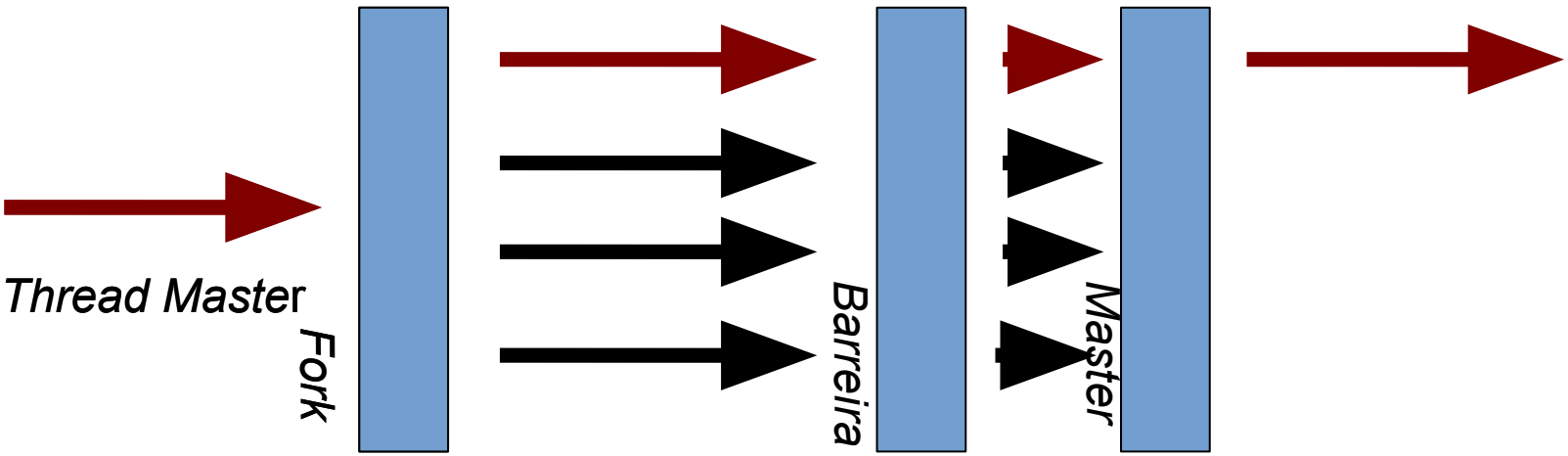
```
Thread 1
Thread 0
Thread 3
Thread 2
```



Exemplo da Diretiva "*omp master*"

```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
    printf("Thread %d\n", omp_get_thread_num());
    #pragma omp barrier
    #pragma omp master
    {
        printf("Master %d\n", omp_get_thread_num());
    }
}
```

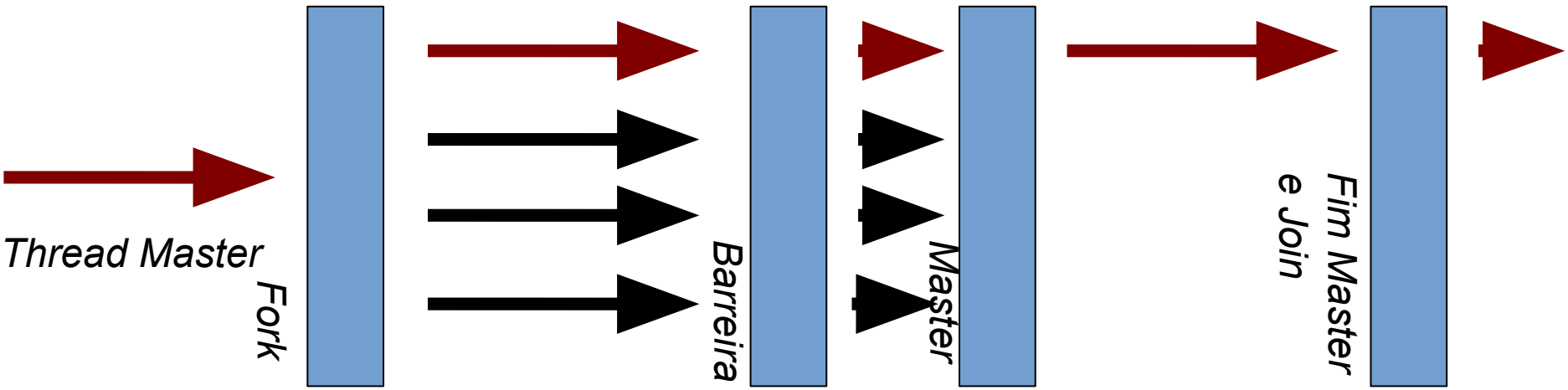
Thread 1
Thread 0
Thread 3
Thread 2
Master 0



Exemplo da Diretiva "*omp master*"

```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{
    printf("Thread %d\n", omp_get_thread_num());
    #pragma omp barrier
    #pragma omp master
    {
        printf("Master %d\n", omp_get_thread_num());
    }
}
```

```
Thread 1
Thread 0
Thread 3
Thread 2
Master 0
```



Diretiva "*omp critical*"

- Cria uma região crítica na qual **não** é permitido o acesso simultâneo de duas *threads*. Quando uma *thread* deseja acessar tal região e essa está ocupada por outra *thread*, a primeira *thread* aguarda a segunda

Diretiva “omp critical”

```
int main() {
	int max = 0;
	#pragma omp parallel
	{
		int local = rand();
		#pragma omp barrier
		if(max < local)
			max = local;
	}
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
N/A	N/A	N/A	N/A

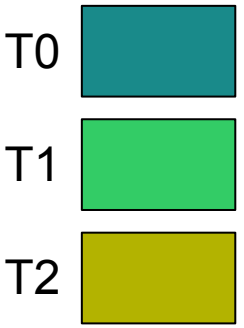
Geramos aleatoriamente um número inteiro para cada *thread* e o maior valor gerado entre as *threads* é armazenado na variável compartilhada ***max***

Condição de corrida: *threads* escrevem na variável compartilhada

Diretiva “omp critical”

```
int main() {
        int max = 0;
        #pragma omp parallel
        {
                int local = rand();
                #pragma omp barrier
                if(max < local)
                        max = local;
        }
}
```

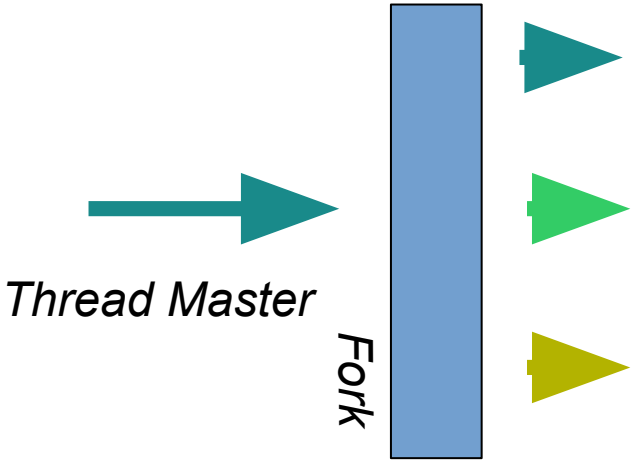
max	local - T0	local - T1	local - T2
0	N/A	N/A	N/A



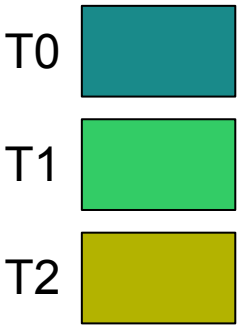
Thread Master

Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```



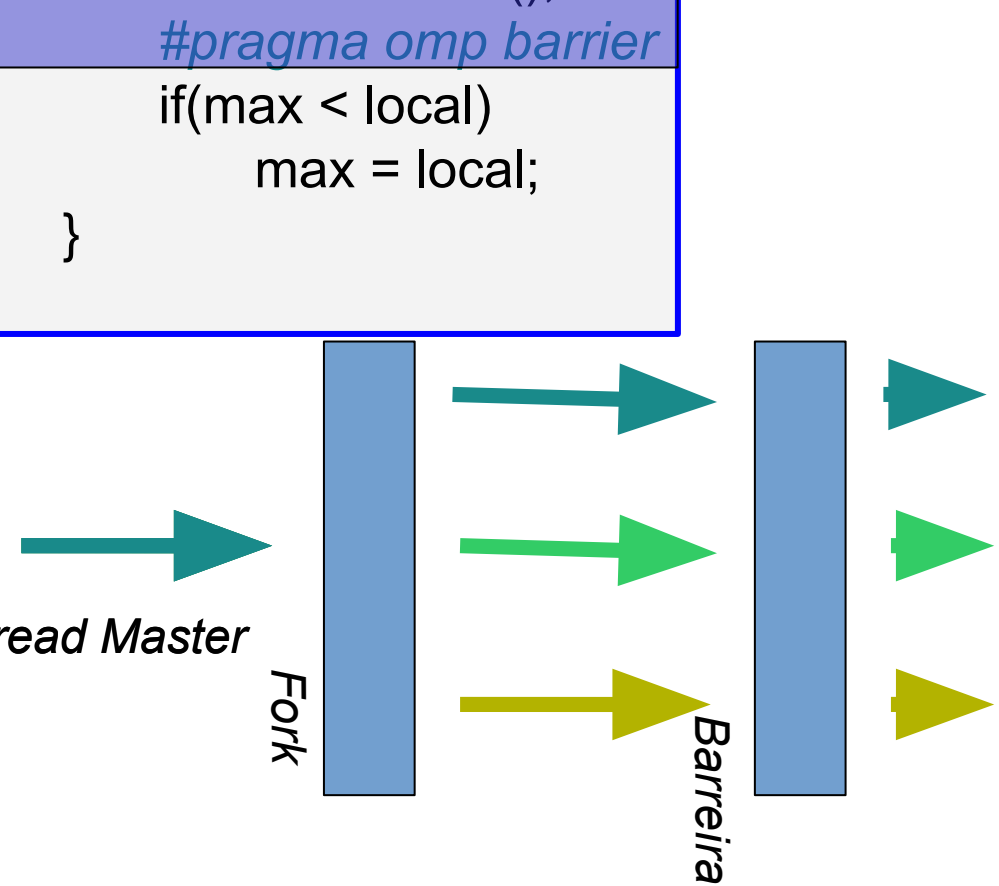
max	local - T0	local - T1	local - T2
0	N/A	N/A	N/A



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```

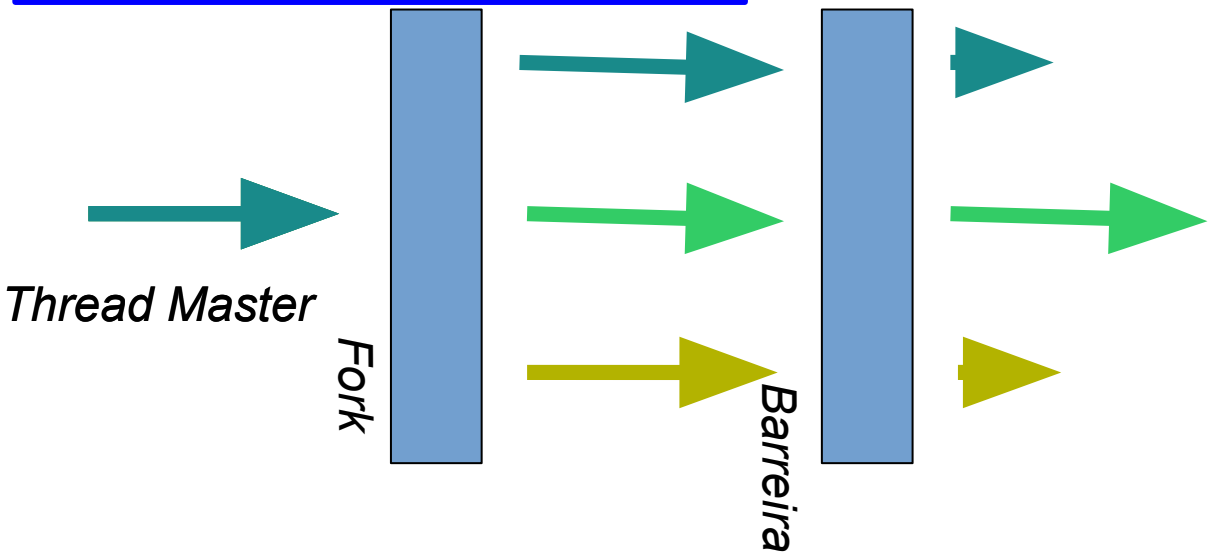
max	local - T0	local - T1	local - T2
0	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```

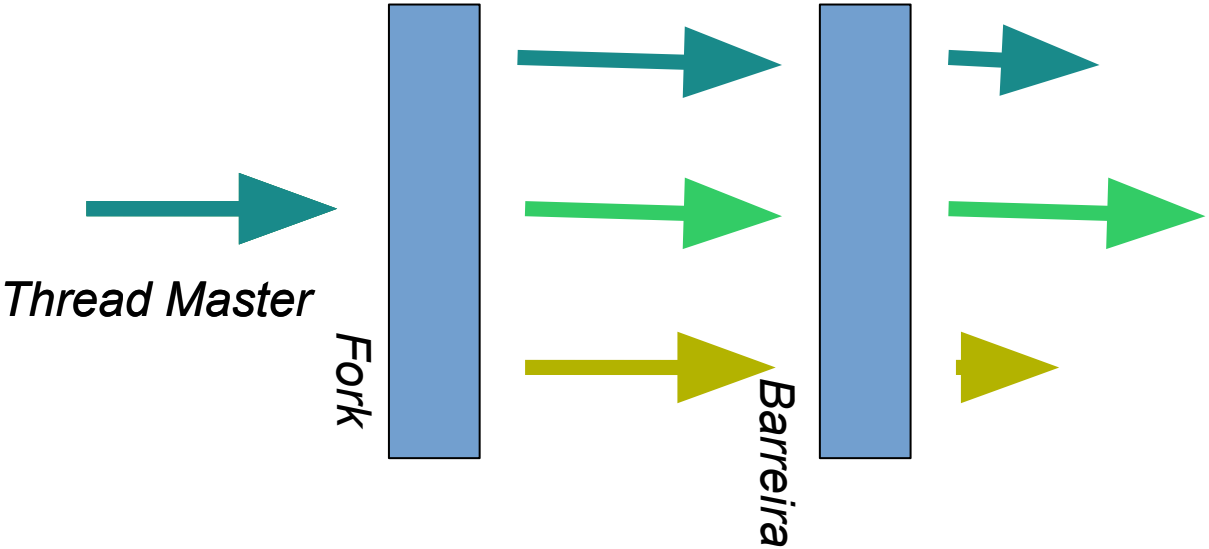
max	local - T0	local - T1	local - T2
3	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
3	5	3	7

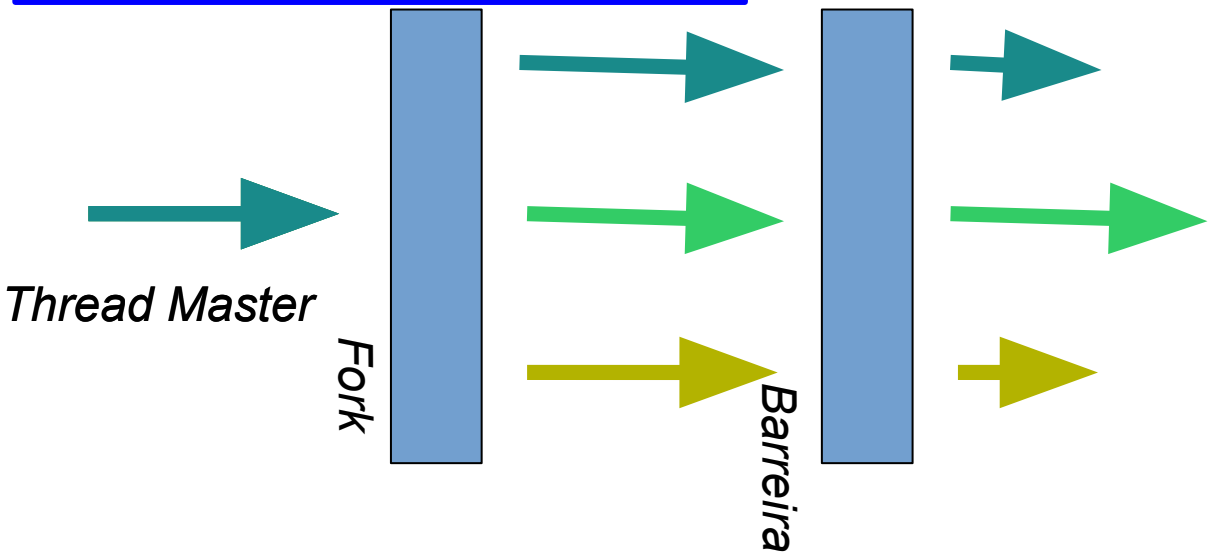


Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
3	5	3	7

T0
T1
T2

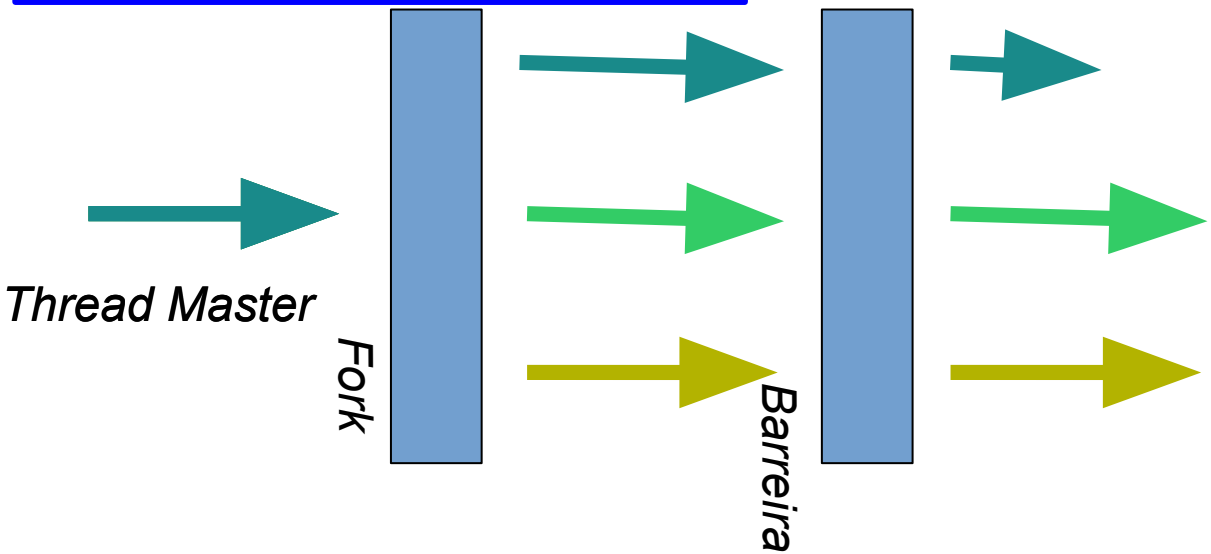


Diretiva “omp critical”

```
int main() {
        int max = 0;
        #pragma omp parallel
        {
                int local = rand();
                #pragma omp barrier
                if(max < local)
                        max = local;
        }
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
7	5	3	7

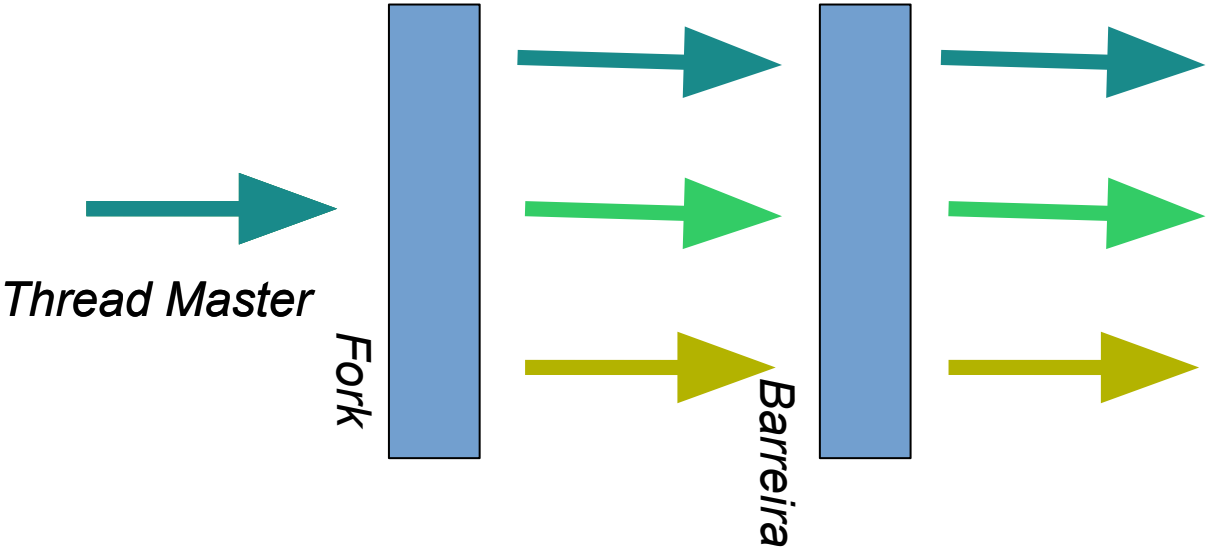
T0
T1
T2



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```

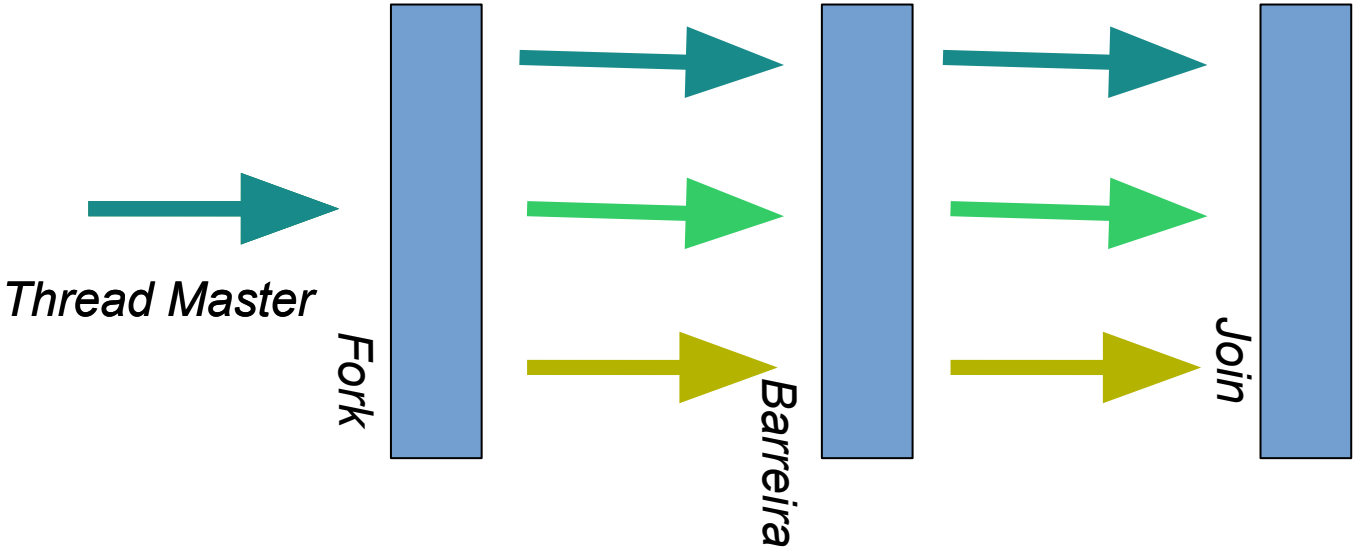
max	local - T0	local - T1	local - T2
5	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
5	5	3	7

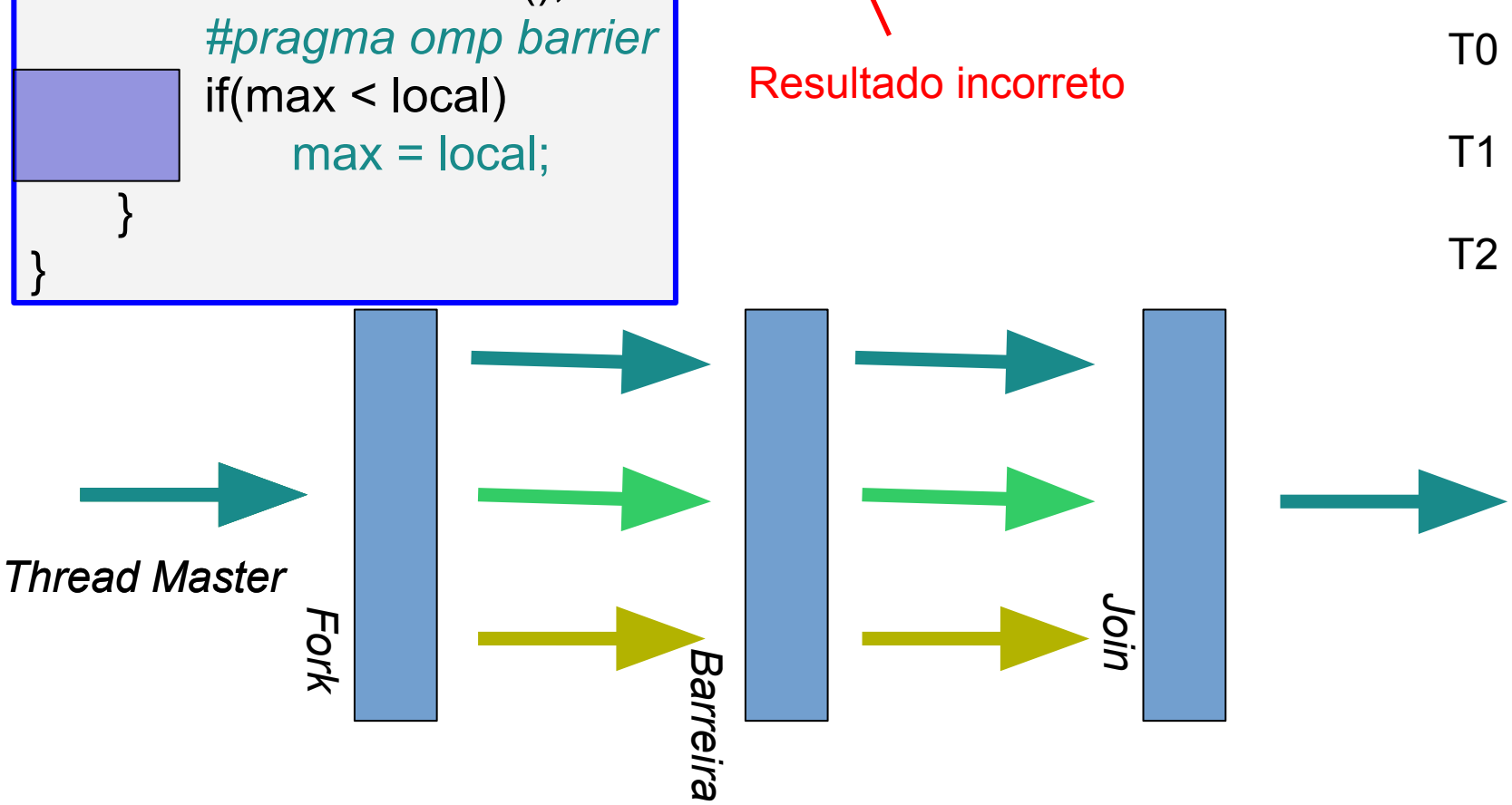


Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        if(max < local)
            max = local;
    }
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
5	5	3	7

Resultado incorreto



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
	int max = 0;
	#pragma omp parallel
	{
		int local = rand();
		#pragma omp barrier
		#pragma omp critical
		{
			if(max < local)
				max = local;
		}
	}
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
N/A	N/A	N/A	N/A

Diretiva “omp critical”

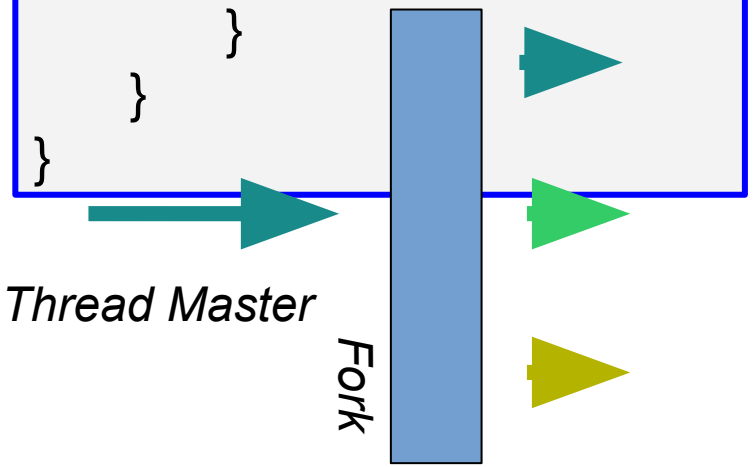
```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```

Thread Master

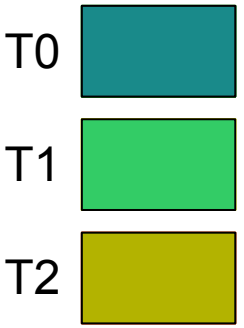
max	local - T0	local - T1	local - T2
0	N/A	N/A	N/A

Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```



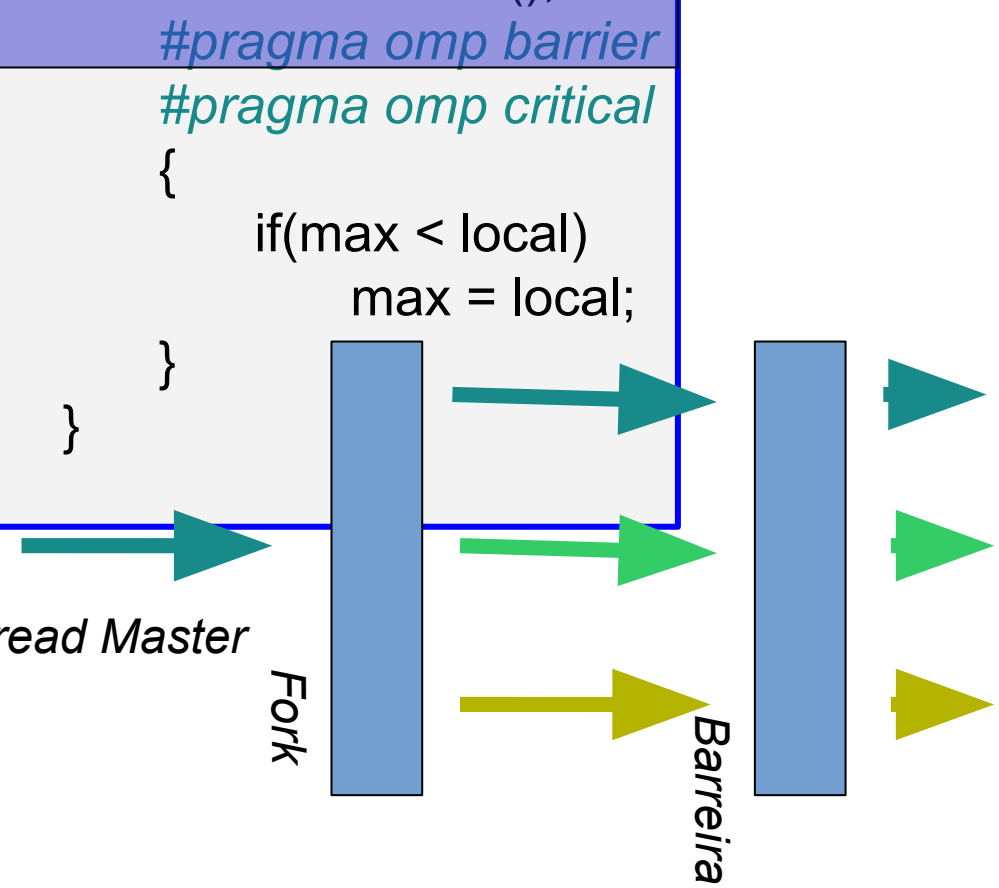
max	local - T0	local - T1	local - T2
0	N/A	N/A	N/A



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```

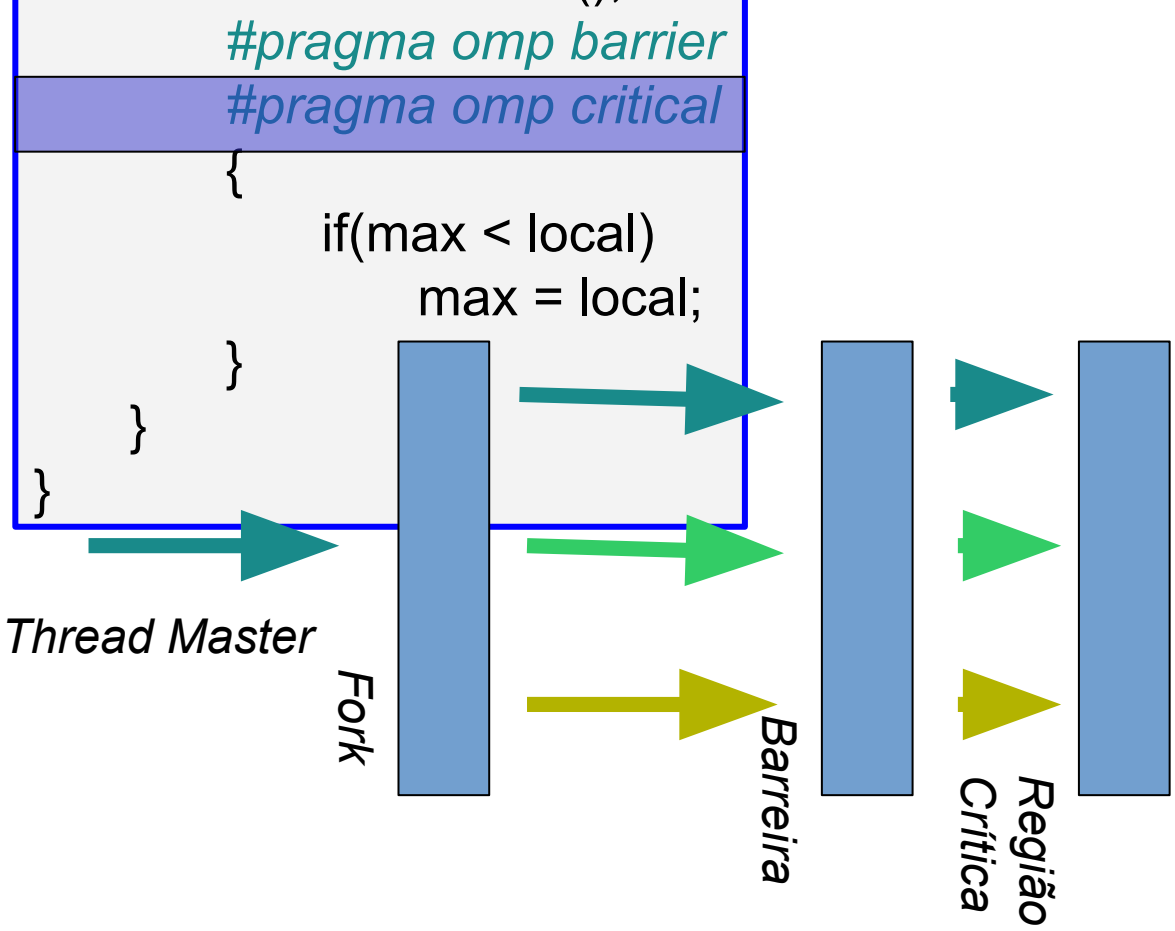
max	local - T0	local - T1	local - T2
0	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```

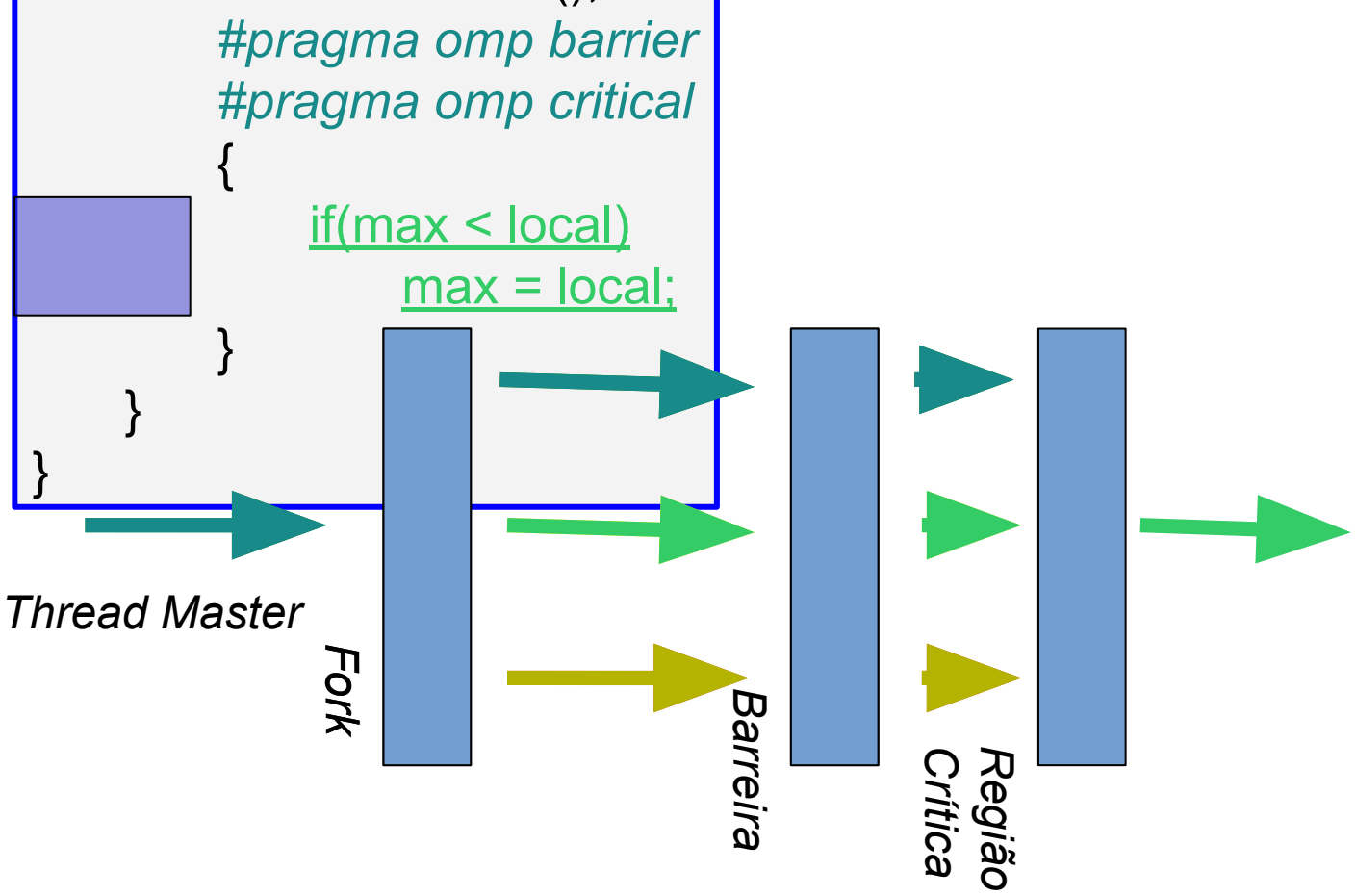
max	local - T0	local - T1	local - T2
0	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```

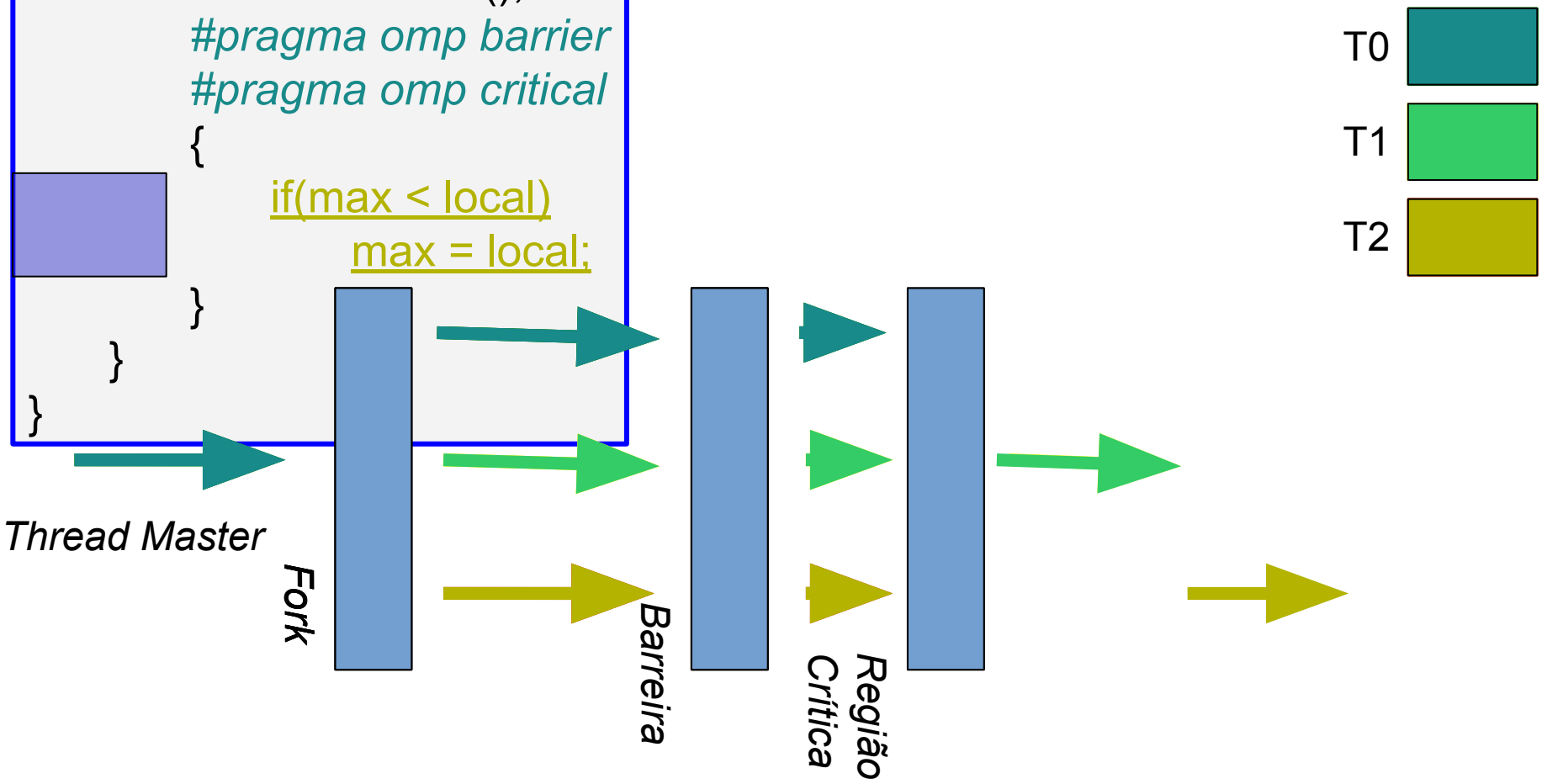
max	local - T0	local - T1	local - T2
3	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```

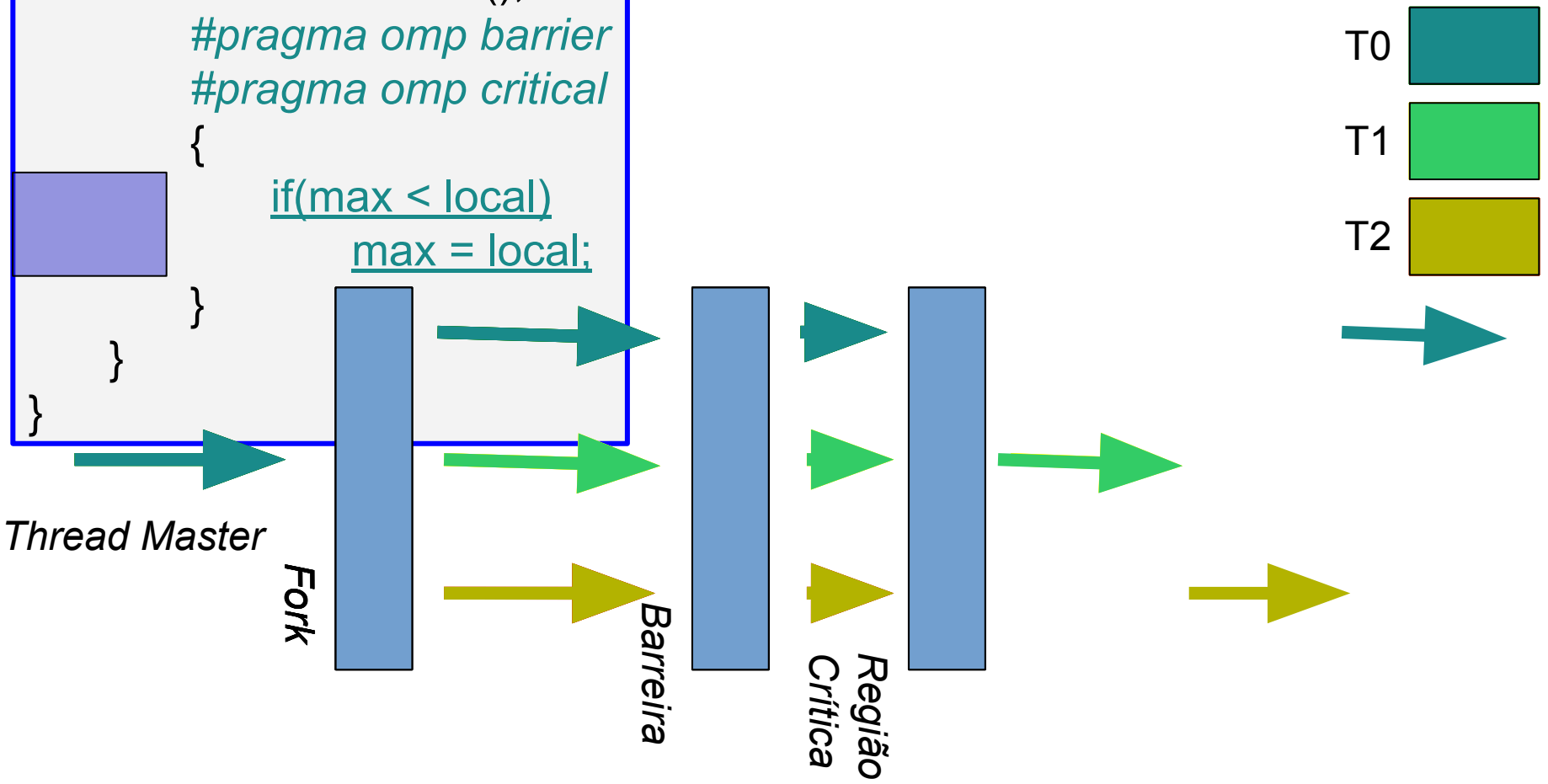
max	local - T0	local - T1	local - T2
7	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```

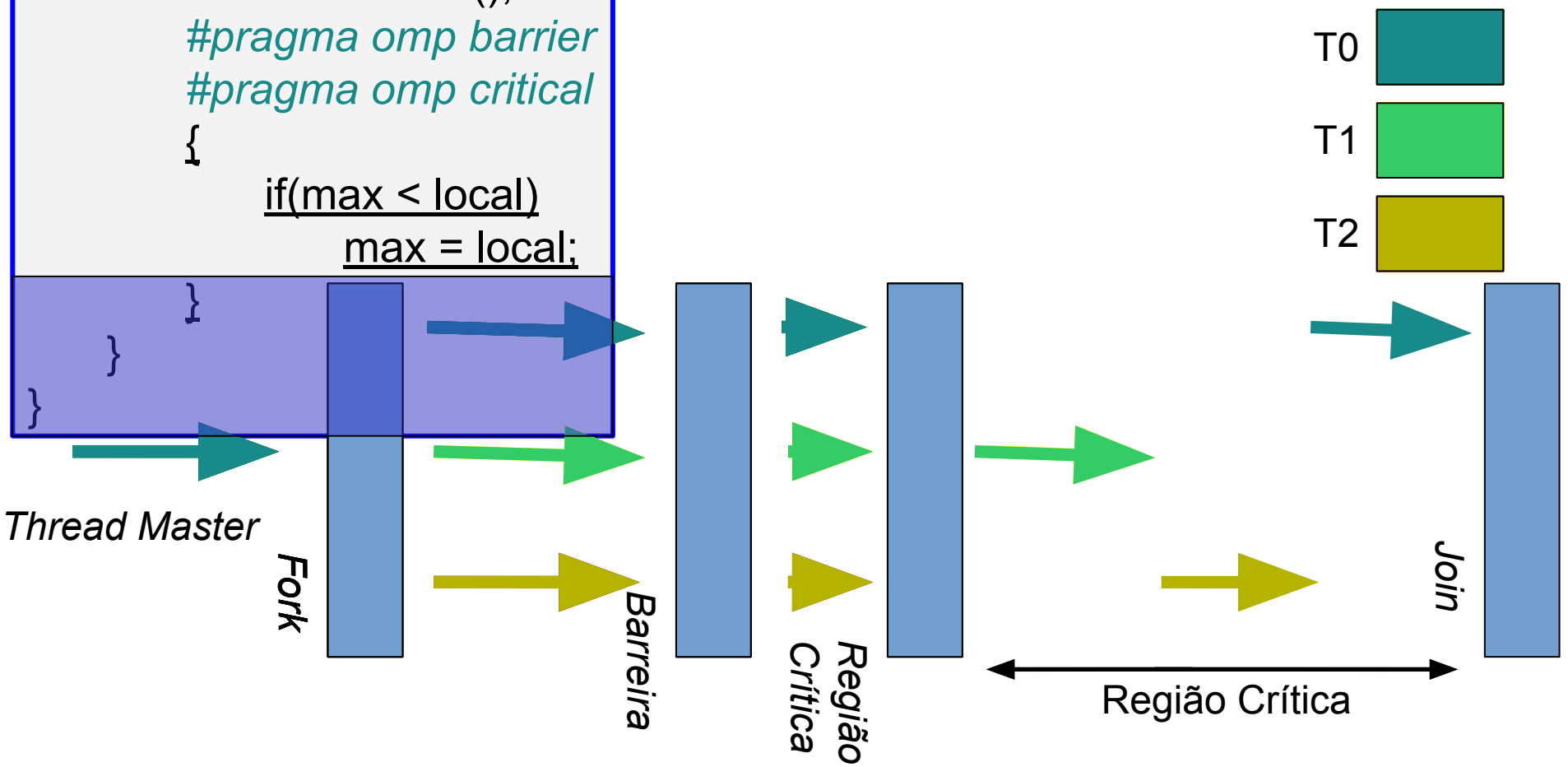
max	local - T0	local - T1	local - T2
7	5	3	7



Diretiva “omp critical”

```
int main() {
    int max = 0;
    #pragma omp parallel
    {
        int local = rand();
        #pragma omp barrier
        #pragma omp critical
        {
            if(max < local)
                max = local;
        }
    }
}
```

max	local - T0	local - T1	local - T2
7	5	3	7



Exercício Resolvido (14)

- Paralelize o código abaixo usando a diretiva "*omp critical*". Em seguida, apresente o *speedup* e a eficiência obtidos com a paralelização

```
int atividade(int **mat, int SIZE, int x){
      int i, j, cont;
      for(i = 0; i < SIZE; i++)
            for(j=0; j < SIZE; j++)
                  if (mat[i][j] == x)
                        cont++;
      return cont;
}
```

Exercício Resolvido (15)

- Repita o Exercício Resolvido (12), resolvendo o problema existente no mesmo usando a diretiva "*omp critical*". Em seguida, apresente o *speedup* e a eficiência obtidos com a paralelização

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - Mais conceitos básicos
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - **Escopo das Variáveis**
  - Cláusula Reduction
- Algoritmo
- Algoritmo

Escopo das Variáveis

```
int main() {
        int x, y;
        #pragma omp parallel
        {
                int z;
        }
}
```
x: compartilhada
y: compartilhada
z: privada

```
int main() {
        int x, y;
        #pragma omp parallel private (x)
        {
                int z;
        }
}
```
x: privada
y: compartilhada
z: privada

```
int main() {
        int x, y;
        #pragma omp parallel for
        for(y=0; y < 5; y++)
        {
                int z;
        }
}
```
x: compartilhada
y: privada
z: privada

Agenda

- Introdução
- Conceitos
- **OpenMP**
  - Sobre o OpenMP
  - Compilador gcc for Linux
  - Diretivas parallel e parallel for
  - Mais conceitos básicos
  - Diretivas sections, barrier, master e critical
  - Escopo das Variáveis
  - **Cláusula Reduction**
- Algoritmo
- Algoritmo

Cláusula Reduction

- Aplicada em operações do tipo "*all-to-one*"

- Por exemplo, quando temos uma soma compartilhada, podemos usar a redução na variável soma, permitindo em cada *thread* tenha uma cópia local da variável e quando saímos da seção paralela, as somas locais serão automaticamente adicionadas na variável

Cláusula Reduction

Versão Serial

```
int i, sum = 0;
for(i = 0; i < N; i++){
        sum+= rand();
}
```

Versão Paralela

```
int i, sum = 0;
#pragma omp parallel for
for(i = 0; i < N; i++){
        sum+= rand();
}
```

Versão Paralela Usando Reduction

```
int i, sum = 0;
#pragma omp parallel for reduction (+:sum)
for(i = 0; i < N; i++){
        sum+= rand();
}
```

Exercício Resolvido (16)

- Repita o Exercício Resolvido (12), resolvendo o problema existente no mesmo usando uma *cláusula reduction*. Em seguida, apresente o *speedup* e a eficiência obtidos com a paralelização

Agenda

- Introdução
- Conceitos Básicos
- OpenMP
- **Algoritmo Odd Even Paralelo**
- Algoritmo Quicksort Paralelo

Algoritmo *Odd Even* Sequencial

- Derivado do *Bubble sort*

- Dividido por duas fases: *odd* (ímpar) e *even* (par)

- O **laço externo** executa *n* vezes e quando i é ímpar, estamos na fase *odd*, caso contrário, na fase *even*

- Dentro do laço externo há dois internos. Para cada fase é executado apenas um dos laços internos e todas as comparações dentro desses laço é executado com diferentes elementos

Algoritmo *Odd Even* Sequencial

```
void oddEvenSort(int a[], int size){
    for(int i = 0; i < size; i++) {
        if(i%2 == 1)
            for(int j = 1; j < size-1; j += 2){
                if(a[j] > a[j+1]){
                    swap(j, j+1);
                }
            }
        else
            for(int j = 0; j < size-1; j += 2){
                if(a[j] > a[j+1]){
                    swap(j, j+1);
                }
            }
    }
}
```

Exercício Resolvido (17)

- Paralelize o *Odd Even*. Em seguida, apresente o *speedup* e a eficiência obtidos com a paralelização

Dica: Comparações da mesma fase, são concorrentes

Agenda

- Introdução
- Conceitos Básicos
- OpenMP
- Algoritmo Odd Even Paralelo
- **Algoritmo Quicksort Paralelo**

Quicksort Sequencial

- Tem um elemento chamado pivô, gerado pela função **particao**()

- Após a partição, à esquerda do pivô teremos elementos menores ou iguais a ele e, à direita, maiores ou iguais ao mesmo

- O algoritmo tem duas chamadas recursivas sendo que a primeira recebe os elementos da esquerda e a outra os da direita

Quicksort Sequencial

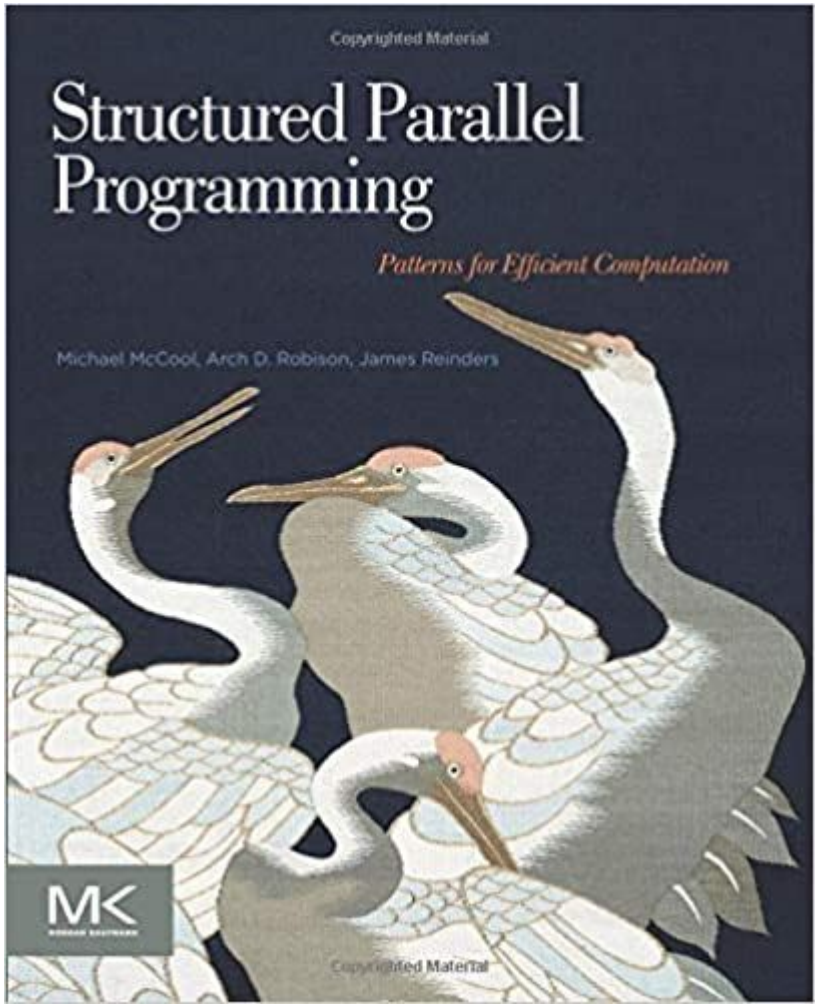
```
void quicksort(int vet[], int esq, int dir) {
      int r;
      if (dir > esq) {
            pivo = particao(vet, esq, dir);
            quicksort(vet, esq, pivo - 1);
            quicksort(vet, pivo + 1, dir);
      }
}
```

Exercício Resolvido (18)

- Paralelize o *Quicksort*. Em seguida, apresente o *speedup* e a eficiência obtidos com a paralelização

Referências

- Michael McCool, James Reinders, Arch Robison, Structured parallel programming: patterns for efficient computation, Elsevier, 2012



Referências

- Andrew S. Tanenbaum, Herbert Bos, Sistemas Operacionais Modernos, Pearson, 4ª edição, 2015