Introdução

MCZA020-13 - Programação Paralela

Emilio Francesquini
e.francesquini@ufabc.edu.br

2019.Q1

Centro de Matemática, Computação e Cognição
Universidade Federal do ABC

Disclaimer

UFABC

- Estes slides foram preparados para o curso de **Programação Paralela na UFABC**.
- Este material pode ser usado livremente desde que sejam mantidos, além deste aviso, os créditos aos autores e instituições.

Programação Paralela

Qual a necessidade de Computação Paralela?

UFABC

- De 1986 até 2002 o desempenho de processadores aumentou em média **50% ao ano**
- Desde 2002 o desempenho de (um único núcleo) está por volta de **20% ao ano**
- Não parece muita diferença?

Qual a necessidade de Computação Paralela?

UFABC

- De 1986 até 2002 o desempenho de processadores aumentou em média **50% ao ano**
- Desde 2002 o desempenho de (um único núcleo) está por volta de **20% ao ano**
- Não parece muita diferença?
  - **60x** em 10 anos *vs.* **6x**
- Limites do desenvolvimento levaram aos multi-core

Três perguntas importantes

UFABC

1. E daí que agora “só” melhora 20% ao ano? Já não é rápido o suficiente?
2. Porque os projetistas não fabricam mais processadores com melhoras tão significativas de desempenho? Por que eles estão cada vez mais construindo sistemas paralelos?
3. Porque não automatizamos a transformação dos atuais programas sequenciais em programas paralelos? Por que precisamos escrever programas paralelos?

Pergunta 1: E daí que são apenas 20%?

Pergunta 1: E daí que são apenas 20%?

UFABC

Algumas áreas que se beneficiariam enormemente de um aumento considerável na capacidade de processamento:

- Modelos climáticos
- Dobramento de proteínas
- Desenvolvimento de fármacos
- Pesquisas energéticas
- Análise de dados

Exemplo: Problemas em escala da web

UFABC

- Características
  - Definitivamente *data-intensive*
  - Mas podem também ser *processing-intensive*
- Exemplos:
  - *Crawling*, indexação, busca, mineração de dados da web
  - Pesquisa em biologia computacional na era "pós-genômica"
  - Processamento de dados científicos (física, astronomia, etc.)
  - Redes de sensores
  - Aplicações Web 2.0
  - etc.

De qual volume de dados estamos falando?

UFABC

Problemas da ordem de petabytes!

$$
\begin{aligned}
1 \text{ PB} &= 1.000.000.000.000.000 \text{ B} \\
&= 1.000^5 \text{ B} \\
&= 10^{15} \text{ B} \\
&= 1 \text{ milhão de gigabytes} \\
&= 1 \text{ mil terabytes}
\end{aligned}
$$

De qual volume de dados estamos falando?

UFABC

Muitos, mas muitos dados

- O Google processa cerca de **20 petabytes** de dados por dia (2008)
- O Wayback Machine tem cerca de **3 petabytes + 100 terabytes/dia** (mar/2009)
- O Facebook tem cerca de **2,5 petabytes de dados de usuários + 15 terabytes/dia** (abr/2009)
- O site eBay tem cerca de **6,5 petabytes de dados dos usuários + 50 terabytes/dia** (mai/2009)
- O Grande Colisor de Hádrons do CERN irá gerar cerca de **15 petabytes/ano**

De qual volume de dados estamos falando?

UFABC

Muitos, mas muitos dados

- O Google processa cerca de **20 petabytes** de dados por dia (2008)
- O Wayback Machine tem cerca de **3 petabytes + 100 terabytes/dia** (mar/2009)
- O Facebook tem cerca de **2,5 petabytes de dados de usuários + 15 terabytes/dia** (abr/2009)
- O site eBay tem cerca de **6,5 petabytes de dados dos usuários + 50 terabytes/dia** (mai/2009)
- O Grande Colisor de Hádrons do CERN irá gerar cerca de **15 petabytes/ano**

De qual volume de dados estamos falando?

UFABC

Muitos, mas muitos dados

- O Google processa cerca de **20 petabytes** de dados por dia (2008)
- O Wayback Machine tem cerca de **3 petabytes + 100 terabytes/dia** (mar/2009)
- O Facebook tem cerca de **2,5 petabytes de dados de usuários + 15 terabytes/dia** (abr/2009)
- O site eBay tem cerca de **6,5 petabytes de dados dos usuários + 50 terabytes/dia** (mai/2009)
- O Grande Colisor de Hádrons do CERN irá gerar cerca de **15 petabytes/ano**

De qual volume de dados estamos falando?

UFABC

Muitos, mas muitos dados

- O Google processa cerca de **20 petabytes** de dados por dia (2008)
- O Wayback Machine tem cerca de **3 petabytes + 100 terabytes/dia** (mar/2009)
- O Facebook tem cerca de **2,5 petabytes de dados de usuários + 15 terabytes/dia** (abr/2009)
- O site eBay tem cerca de **6,5 petabytes de dados dos usuários + 50 terabytes/dia** (mai/2009)
- O Grande Colisor de Hádrons do CERN irá gerar cerca de **15 petabytes/ano**

De qual volume de dados estamos falando?

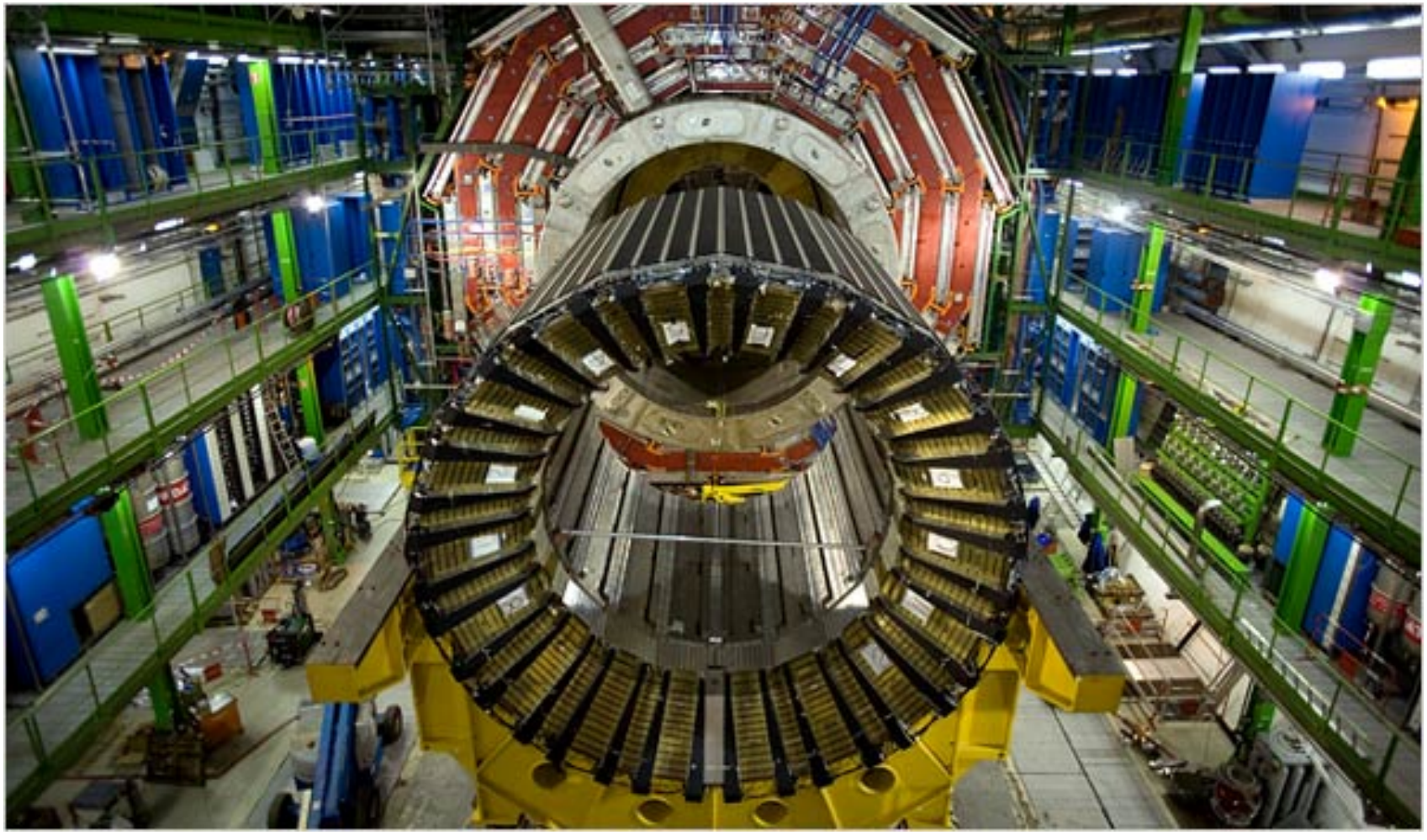
UFABC

Muitos, mas muitos dados

- O Google processa cerca de **20 petabytes** de dados por dia (2008)
- O Wayback Machine tem cerca de **3 petabytes + 100 terabytes/dia** (mar/2009)
- O Facebook tem cerca de **2,5 petabytes de dados de usuários + 15 terabytes/dia** (abr/2009)
- O site eBay tem cerca de **6,5 petabytes de dados dos usuários + 50 terabytes/dia** (mai/2009)
- O Grande Colisor de Hádrons do CERN irá gerar cerca de **15 petabytes/ano**

De qual volume de dados estamos falando?

UFABC



De qual volume de dados estamos falando?

UFABC

$$
\begin{aligned}
1 \text{ PB} &= 1.000.000.000.000.000 \text{ B} \\
&= 1.000^5 \text{ B} \\
&= 10^{15} \text{ B} \\
&= 1 \text{ milhão de gigabytes} \\
&= 1 \text{ mil terabytes}
\end{aligned}
$$

Ou seja, os 15 petabytes que o CERN irá gerar por ano equivalem a 15 milhões de gigabytes. Seriam necessários 1,7 milhão de DVDs *dual-layer* para armazenar tanta informação!

O que se faz com tantos dados?

UFABC

- Encontram informações sobre novos fatos
  - Casamento de padrões com informações da web
  - ex: quem matou John Lennon?
- Procuram por novas relações entre os dados
  - Alguns padrões levam a novas relações:
    - os fatos: "Nascimento-de(Mozart, 1756)" e "Nascimento-de(Einstein, 1879)"
    - levam aos dados: "Wolfgang Amadeus Mozart (1756–1791)" e "Einstein nasceu em 1879"
    - que levam a diferentes padrões: "PESSOA (DATA –" e "PESSOA nasceu em DATA"
    - que, por sua vez, permitem encontrar novos fatos

O que se faz com tantos dados?

UFABC

- Encontram informações sobre novos fatos
  - Casamento de padrões com informações da web
  - ex: quem matou John Lennon?
- Procuram por novas relações entre os dados
  - Alguns padrões levam a novas relações:
    - os fatos: “Nascimento-de(Mozart, 1756)” e “Nascimento-de(Einstein, 1879)”
    - levam aos dados: “Wolfgang Amadeus Mozart (1756–1791)” e “Einstein nasceu em 1879”
    - que levam a diferentes padrões: “PESSOA (DATA –” e “PESSOA nasceu em DATA”
    - que, por sua vez, permitem encontrar novos fatos

O que se faz com tantos dados?

UFABC

- Encontram informações sobre novos fatos
  - Casamento de padrões com informações da web
  - ex: quem matou John Lennon?
- Procuram por novas relações entre os dados
  - Alguns padrões levam a novas relações:
    - os fatos: “Nascimento-de(Mozart, 1756)” e “Nascimento-de(Einstein, 1879)”
    - levam aos dados: “Wolfgang Amadeus Mozart (1756–1791)” e “Einstein nasceu em 1879”
    - que levam a diferentes padrões: “PESSOA (DATA –” e “PESSOA nasceu em DATA”
    - que, por sua vez, permitem encontrar novos fatos

O que se faz com tantos dados?

UFABC

- Encontram informações sobre novos fatos
  - Casamento de padrões com informações da web
  - ex: quem matou John Lennon?
- Procuram por novas relações entre os dados
  - Alguns padrões levam a novas relações:
    - os fatos: “Nascimento-de(Mozart, 1756)” e “Nascimento-de(Einstein, 1879)”
    - levam aos dados: “Wolfgang Amadeus Mozart (1756–1791)” e “Einstein nasceu em 1879”
    - que levam a diferentes padrões: “PESSOA (DATA –” e “PESSOA nasceu em DATA”
    - que, por sua vez, permitem encontrar novos fatos

O que se faz com tantos dados?

UFABC

- Encontram informações sobre novos fatos
  - Casamento de padrões com informações da web
  - ex: quem matou John Lennon?
- Procuram por novas relações entre os dados
  - Alguns padrões levam a novas relações:
    - os fatos: “Nascimento-de(Mozart, 1756)” e “Nascimento-de(Einstein, 1879)”
    - levam aos dados: “Wolfgang Amadeus Mozart (1756–1791)” e “Einstein nasceu em 1879”
    - que levam a diferentes padrões: “PESSOA (DATA –” e “PESSOA nasceu em DATA”
    - que, por sua vez, permitem encontrar novos fatos

O que se faz com tantos dados?

UFABC

- Encontram informações sobre novos fatos
  - Casamento de padrões com informações da web
  - ex: quem matou John Lennon?
- Procuram por novas relações entre os dados
  - Alguns padrões levam a novas relações:
    - os fatos: “Nascimento-de(Mozart, 1756)” e “Nascimento-de(Einstein, 1879)”
    - levam aos dados: “Wolfgang Amadeus Mozart (1756–1791)” e “Einstein nasceu em 1879”
    - que levam a diferentes padrões: “PESSOA (DATA –” e “PESSOA nasceu em DATA”
    - que, por sua vez, permitem encontrar novos fatos

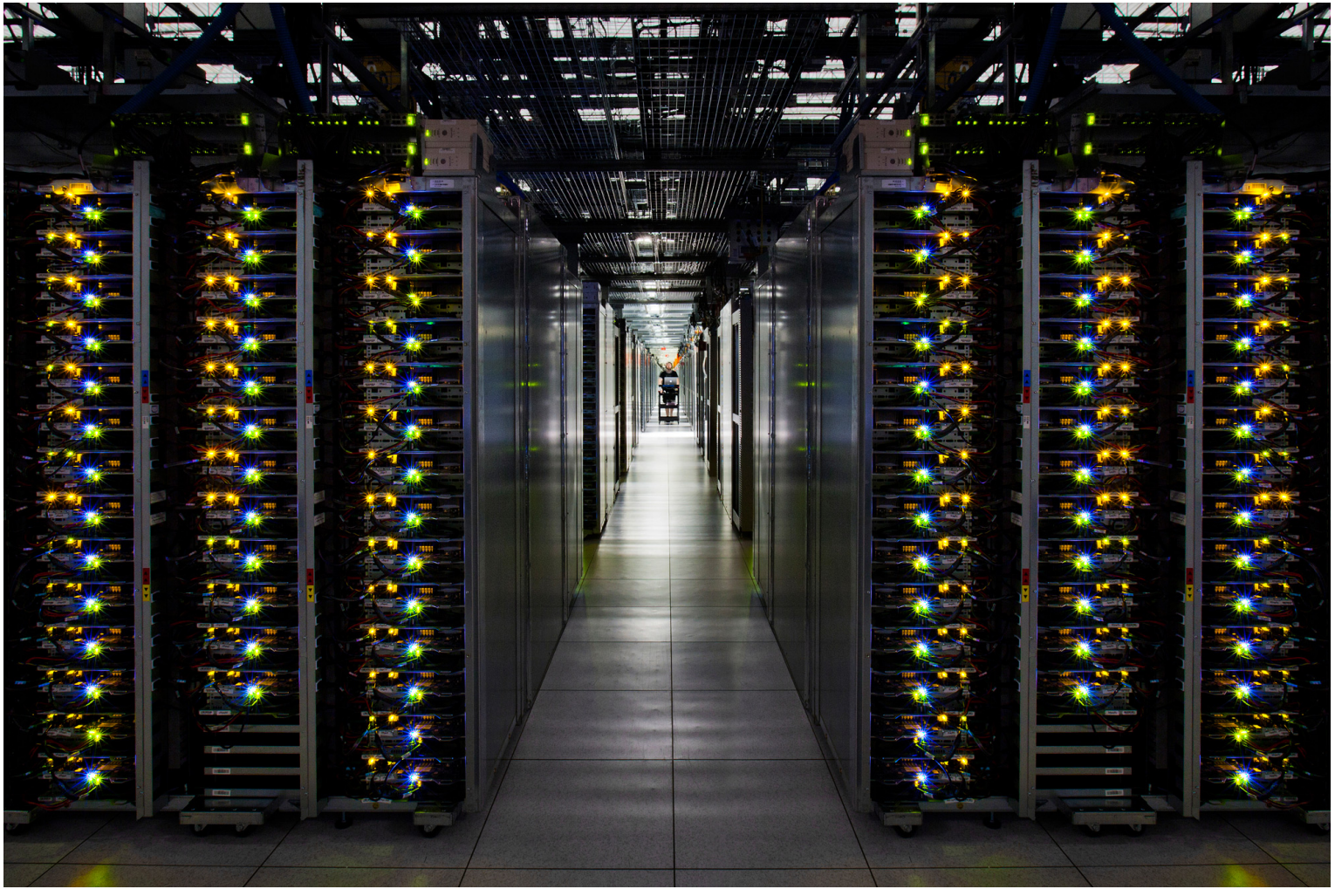
UFABC

Pergunta:

Quão grandes são os *data centers* que fazem sistemas que afetam a vida de quase todo mundo que se conecta a Internet (como os do Google, Facebook, etc.) funcionarem?

Grandes data centers

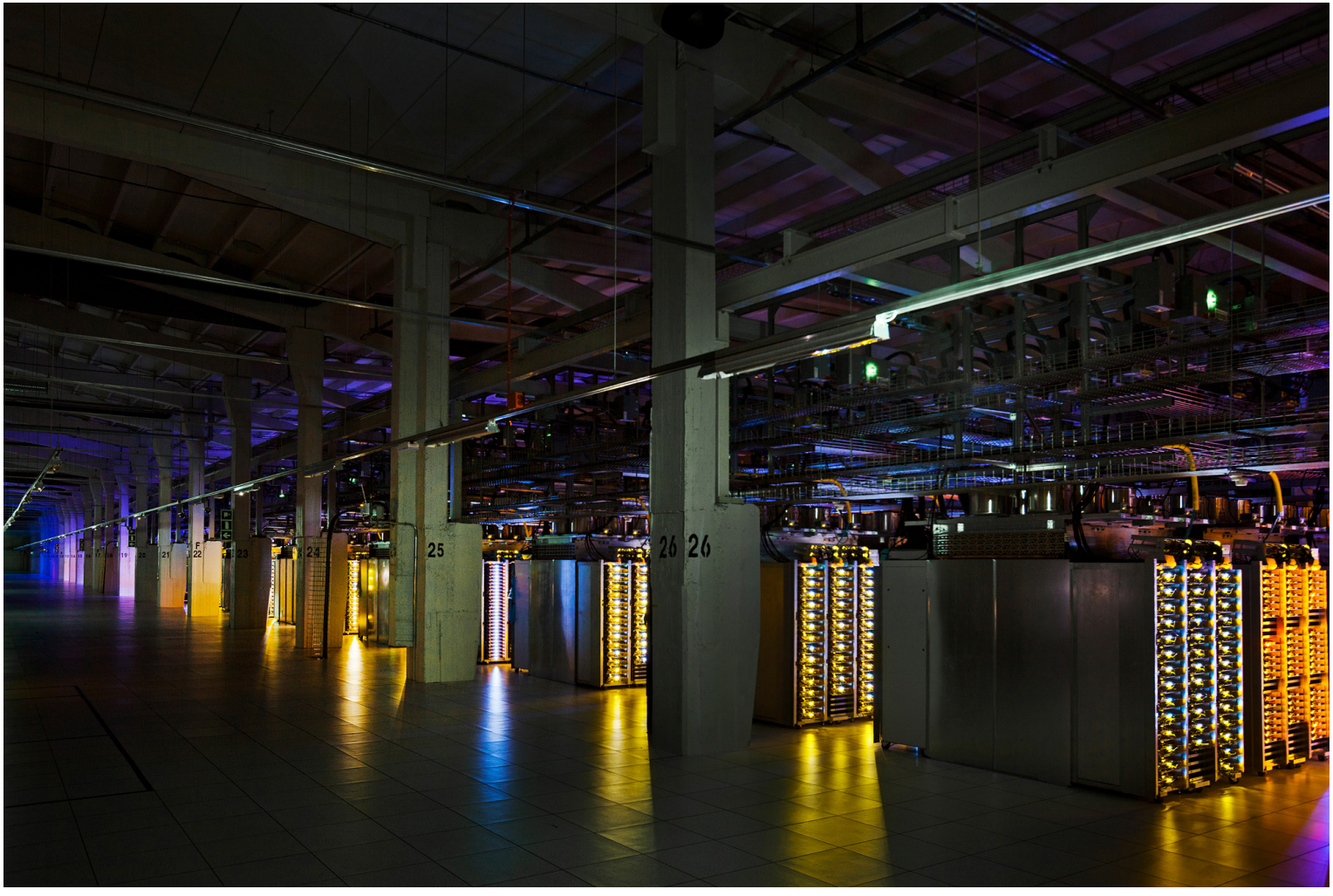
UFABC



Fonte: http://www.google.com/intl/pt-BR/about/datacenters/

Grandes data centers

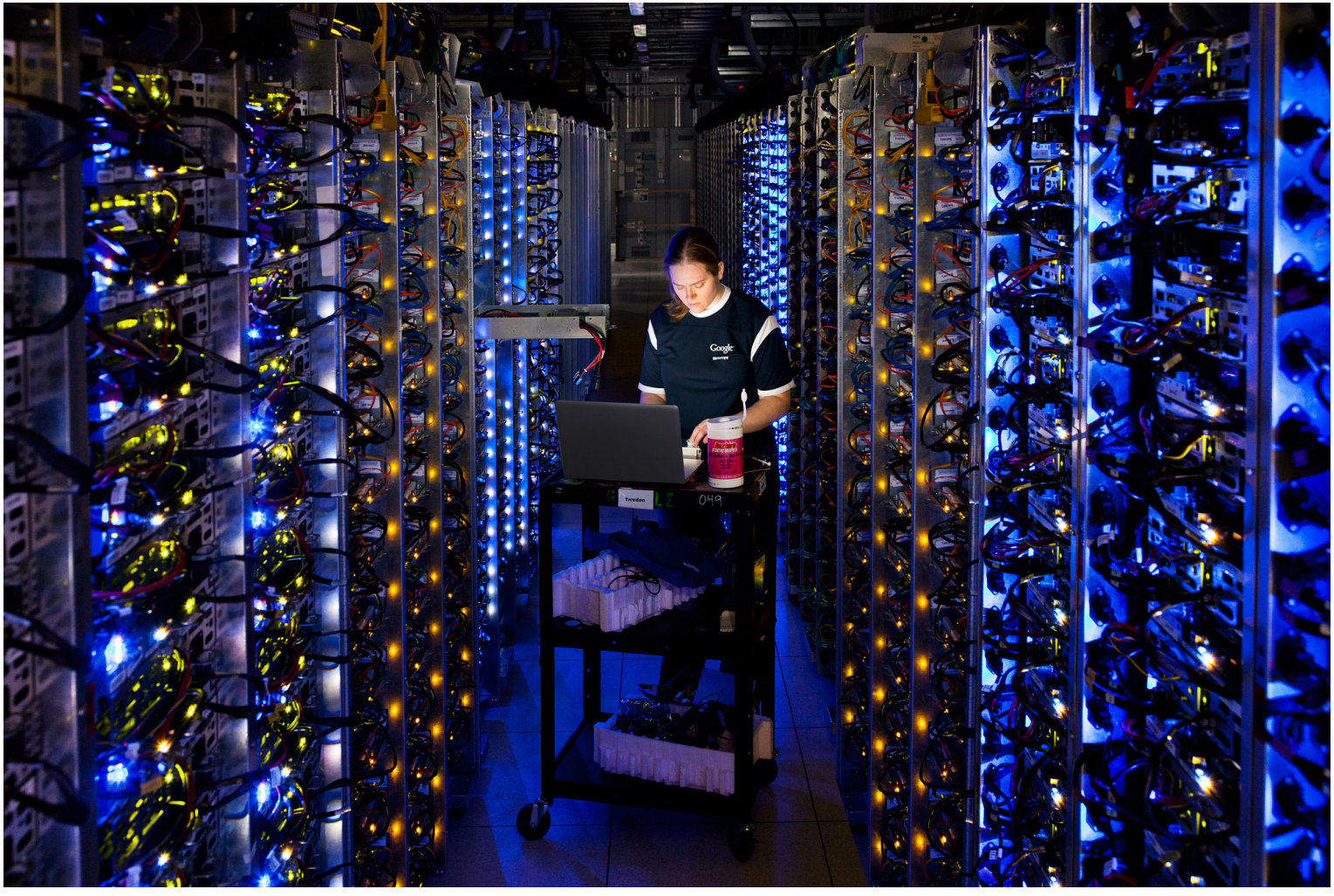
UFABC



Fonte: http://www.google.com/intl/pt-BR/about/datacenters/

Grandes data centers

UFABC



Fonte: http://www.google.com/intl/pt-BR/about/datacenters/

Grandes data centers

UFABC

Fonte: http://www.google.com/intl/pt-BR/about/datacenters/

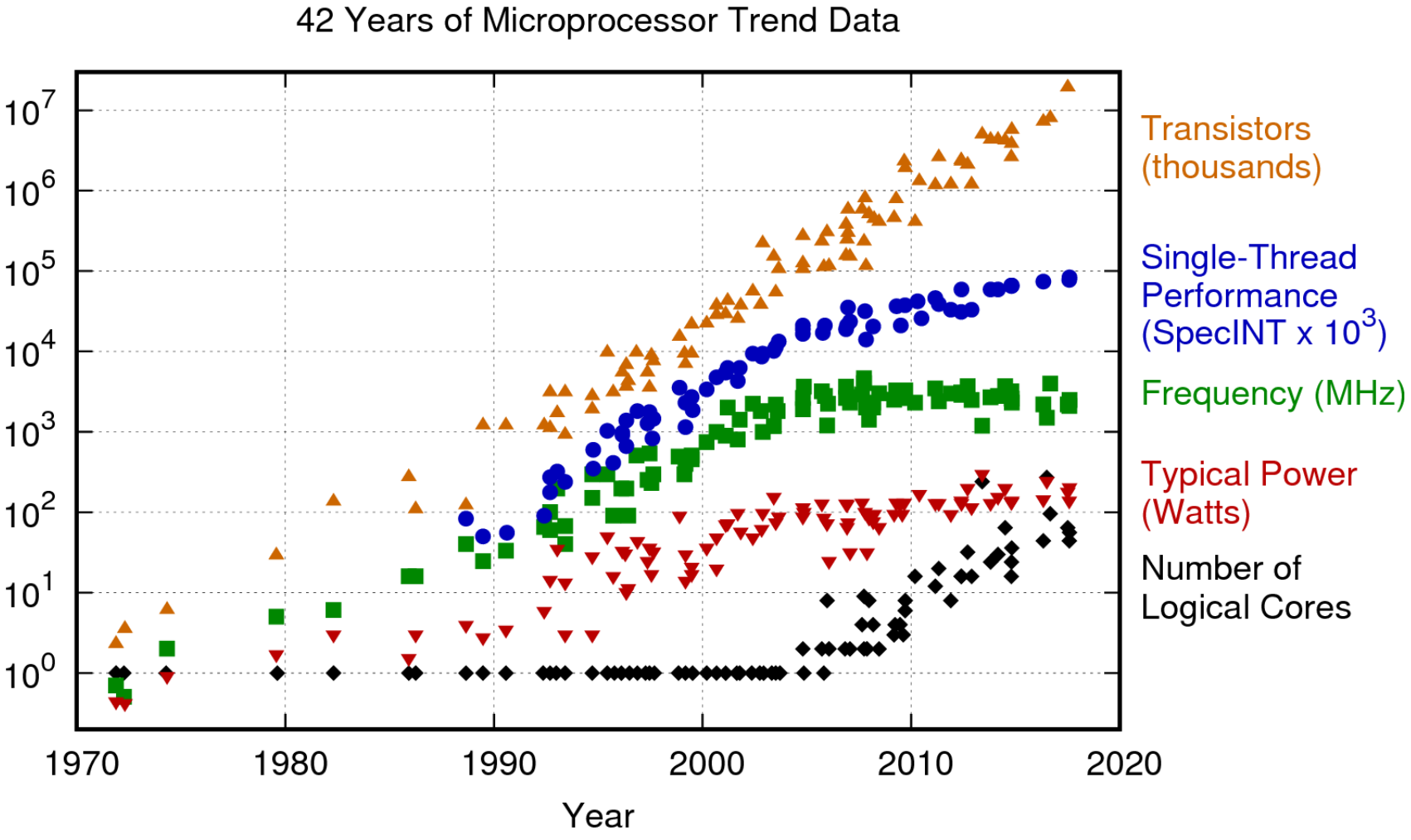
Grandes data centers

UFABC

Só o Google tem treze desses espalhados pelo mundo!

Pergunta 2: Por que os projetistas não fabricam mais processadores com melhoras tão significativas de desempenho? Por que eles estão cada vez mais construindo **sistemas paralelos**?

Evolução dos processadores



Fonte: https://www.karlrupp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/

Free Lunch is over...

UFABC

- Desde a década de 80 até o início dos anos 2000 projetistas de CPUs conseguiam melhorar o desempenho dos processadores em três principais linhas:
  - Frequência de funcionamento
  - Otimização das operações
  - Caches
- Essa época acabou. Hoje desenvolvedores precisam se preocupar com o desempenho sequencial dos seus programas.
- Programas antigos não vão mais melhorar o seu desempenho no mesmo ritmo que antes “só na banguela”

Fonte: http://www.gotw.ca/publications/concurrency-ddj.htm

Pergunta 3: Porque não automatizamos a transformação dos atuais programas sequenciais em **programas paralelos**? Por que precisamos escrever programas paralelos?

Múltiplos cores não resolvem tudo...

UFABC

- Não ajuda rodar mais de uma instância do seu jogo favorito ao mesmo tempo
  - É preciso escrever códigos que se utilizem do hardware adicional
  - É preciso escrever códigos capazes de rodar em paralelo
- Não é fácil encontrar (automaticamente) uma maneira de paralelizar um código.
  - Na verdade **quase sempre** fazer um programa paralelo...
    - eficiente
    - correto
    - simples
  - ...é **muito mais difícil** do que escrever uma versão sequencial com essas mesmas características
  - Se alguém te falar o contrário esta pessoa está muito provavelmente sofrendo do Efeito Dunning-Kruger (`https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Dunning-Kruger`)

Exemplo: Soma de uma lista de números

UFABC

Programa sequencial:

```
sum = 0;
for (i = 0; i < n; i++) {
    x = Compute_next_value(...);
    sum += x;
}
```

UFABC

```
my_sum = 0;
my_first i = ...;
my_last i = ...;
for (my_i = my_first i; my_i < my_last i; my_i++)
    my_x = Compute_next_value(...);
    my_sum += my x;
}
```

Se tivermos, por exemplo, **8 processadores**, $n = 24$, e as chamadas para `Compute_next_value(...)` devolverem:

`1,4,3 9,2,8 5,1,1 6,2,7 2,5,0 4,1,8 6,5,1 2,3,9`

Então os valores armazenados na variável `my_sum` serão:

Core	0	1	2	3	4	5	6	7
my_sum	8	19	7	15	7	13	12	14

UFABC

```
if (I 'm the master core) {
    sum = my x;
    for each core other than myself {
        receive value from core;
        sum += value;
    }
} else {
    send my x to the master;
}
```

No nosso exemplo, se o *core* mestre for o 0, então ele somaria os valores $8 + 19 + 7 + 15 + 7 + 13 + 12 + 14 = 95$.

Pergunta 1:

Quantas somas o core mestre faz no caso geral? É possível melhorar?

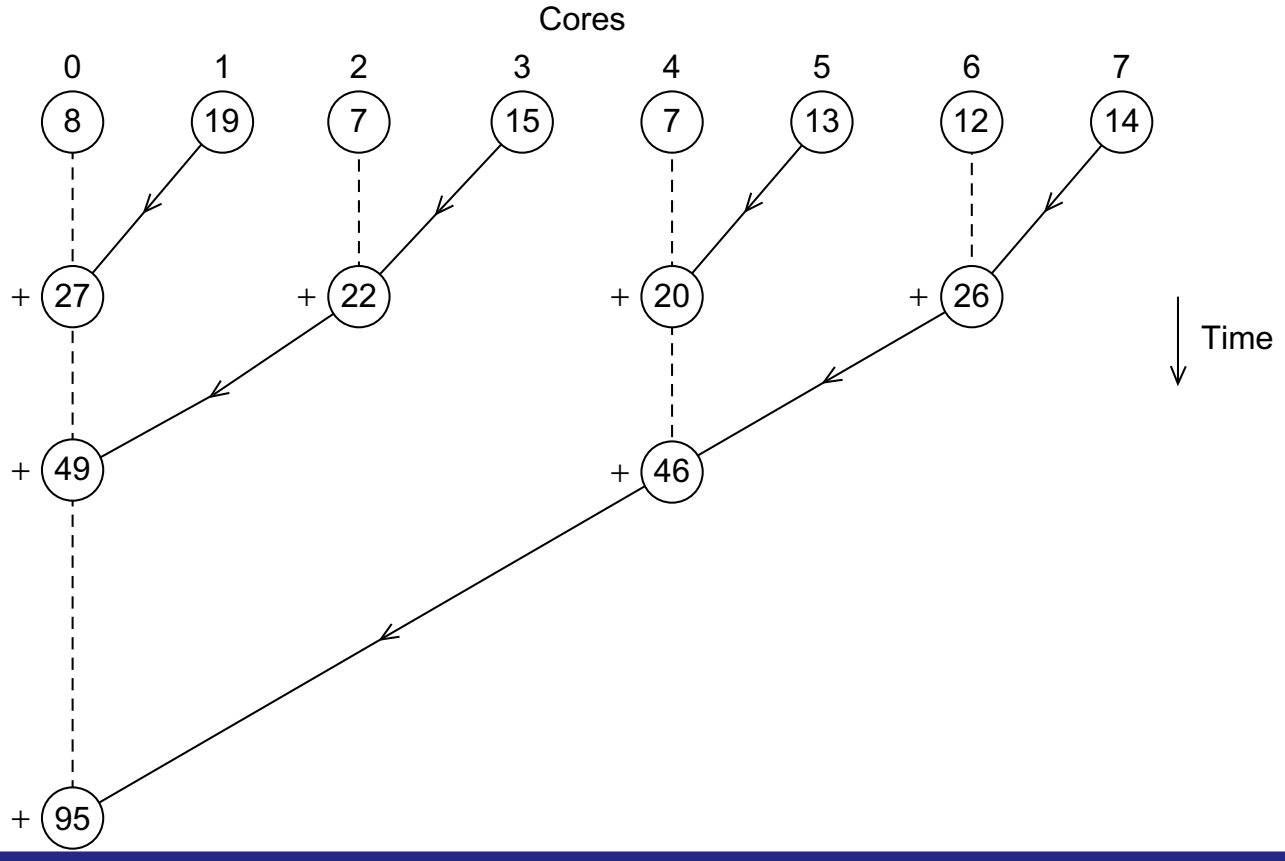
Soma Paralela - Versão 1

```
if (I 'm the master core) {
    sum = my x;
    for each core other than myself {
        receive value from core;
        sum += value;
    }
} else {
    send my x to the master;
}
```

Pergunta 2:

Quantas comunicações cada um dos processos faz no caso geral? É possível melhorar?

Soma Paralela - Versão 2



Fonte: [PP]

Pergunta:

Quantas somas e quantas comunicações cada um dos *cores* faz neste caso?

Como escrever programas paralelos

Abordagens mais comuns

UFABC

- Paralelismo de tarefas (*task parallelism*)
  - Divisão das tarefas a serem feitas entre os cores
- Paralelismo de dados (*data parallelism*)
  - Divisão dos dados a serem processados entre os cores

Exercício:

O Professor Espertalhão tem 100 alunos que acabaram de fazer uma prova com 4 questões. Ele também possui 4 monitores que podem ajudá-lo a corrigir a prova. Sugira maneiras que o Prof. Espertalhão pode usar para paralelizar a correção.

Exercício:

Classifique as características das implementações de soma que acabamos de discutir em paralelismo de dados e de tarefas.

Problemas Vergonhosamente Paralelos

UFABC

- Alguns problemas são classificados como vergonhosamente paralelos (*embarassingly parallel*)
  - Você também vai ver por ai “embaraçosamente paralelos”
- Isto significa que nenhuma (ou praticamente nenhuma) coordenação entre os processos que estão executando é necessária.
- Exemplos:
  - Converter todos os arquivos em um diretório de JPEG para PNG
  - Mandar e-mails (enviar Spam :p) para todos os e-mails listados em um arquivo
  - Converter uma imagem colorida para preto-e-branco
  - Quebra de senhas
  - Mineração de Bitcoins
  - Procurar ETs!

UFABC

Pergunta:

Nosso exemplo de soma (versão 1 e 2) **não é** vergonhosamente paralelo. Por quê?

UFABC

Nosso exemplo da soma emprega diversos mecanismos de coordenação:

- Comunicação – um ou mais cores enviam suas somas parciais para outros cores
- Balanceamento de carga (*load balancing*) – Apesar de termos fórmulas fechadas para o trabalho a ser desempenhado por cada core, queremos que o trabalho seja bem distribuído.
  - Minimização do caminho crítico (*critical path*)
- Sincronização – suponha que em vez de calcular os próximos valores a serem somados, estes valores fossem lidos da `stdin` pelo core mestre
  - Os demais cores **precisam esperar o core mestre acabar a leitura** (pelo menos da parte que lhes diz respeito) antes de começar a trabalhar!

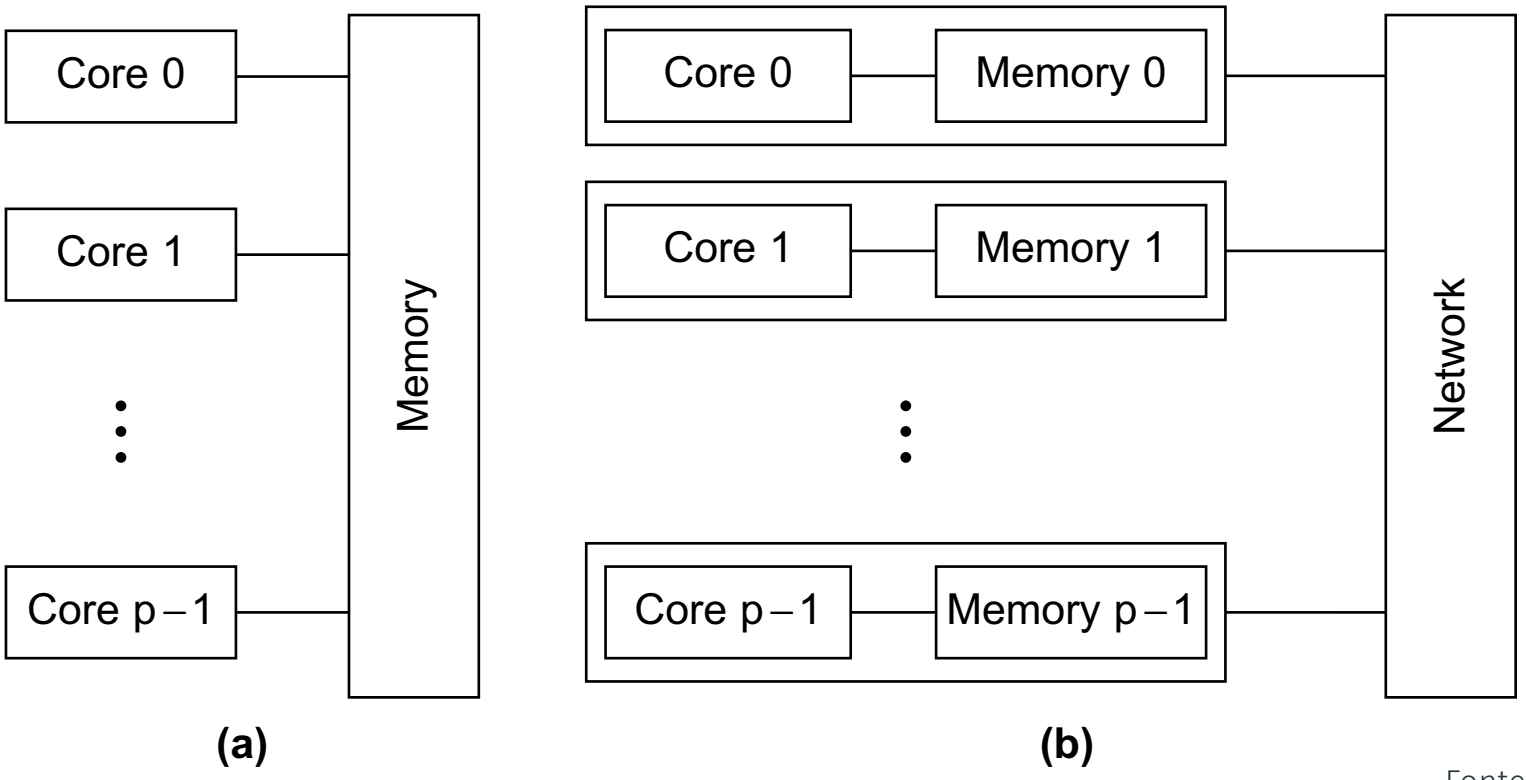
Daqui até o fim do quadrimestre...

O que veremos neste curso?

UFABC

- Algumas linguagens e bibliotecas fornecem mecanismos que são capazes de (em alguns casos) fazer a paralelização automática de código.
  - Trocam desempenho por facilidade
  - Vamos comentar um pouco sobre elas neste curso
- Neste curso, contudo, não estamos interessados nessas ferramentas. Nós veremos como fazer paralelismo explícito.
- Utilizaremos a linguagem de programação C.

Com quais tipos de máquinas trabalharemos?



Fonte: [PP]

(a) memória compartilhada (b) memória distribuída

Pergunta:

Em qual delas roda o seu APP Angry Birds? Em qual delas roda sua busca na Web?

Quais ferramentas utilizaremos?

UFABC

- Aprenderemos as seguintes ferramentas
  - Message Passing Interface - MPI
  - POSIX Threads - Pthreads
  - OpenMP
- Por que essas três?
  - Utilizaremos MPI para programação de arquiteturas com memória distribuída (*distributed memory*)
  - Utilizaremos Pthreads e OpenMP para programação de arquiteturas com memória compartilhada (*shared memory*)
    - OpenMP é de nível mais alto enquanto Pthread te dá controle fino de tudo o que está ocorrendo.

Mas espera aí!!!

Programação/Computação Concorrente, Paralela e Distribuída são todas a mesma coisa?

- Na computação concorrente diversas tarefas podem estar **em progresso no mesmo momento**
- Na computação paralela um programa é composto de diversas tarefas **cooperam entre si** para resolver um problema
- Na computação distribuída um programa precisa colaborar com outros programas para resolver um problema

Mas espera aí!!!

Neste curso veremos um pouco de cada mas daremos especial atenção à programação paralela e concorrente.

Atenção:

As definições acima estão longe de ser unanimidade entre os especialistas!

Resumo da ópera

UFABC

- Se você acha que vai conseguir escrever na gambiarra um programa paralelo eficiente pode tirar o cavalinho da chuva
- Se para programas sequenciais programar seguindo boas práticas é importante, para programas paralelos é essencial!
- Nosso trabalho vai ser casar o software com o hardware e para isto precisaremos de um elevado conhecimento de ambos.
- Utilizaremos ferramentas avançadas de programação. Para isto é esperado que você saiba:
  - C (avançado)
  - Linux (intermediário)