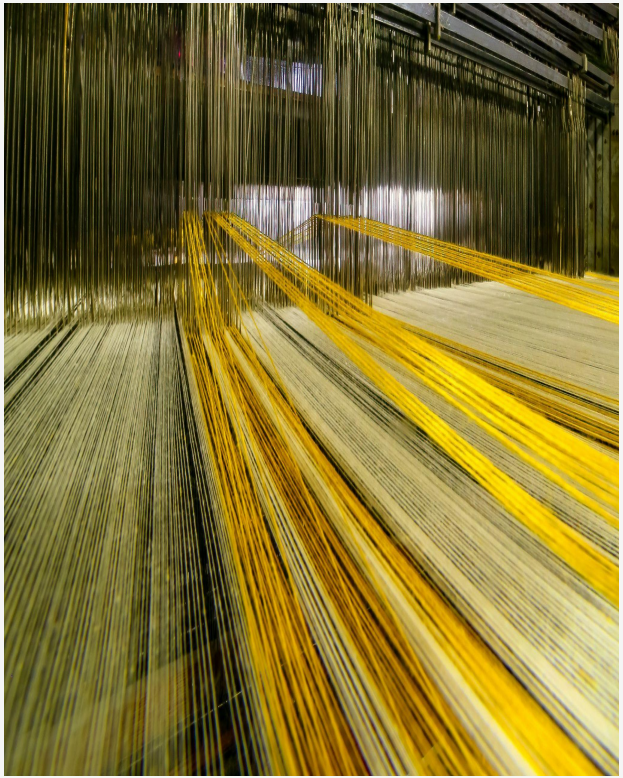


Photo by iggii on Unsplash

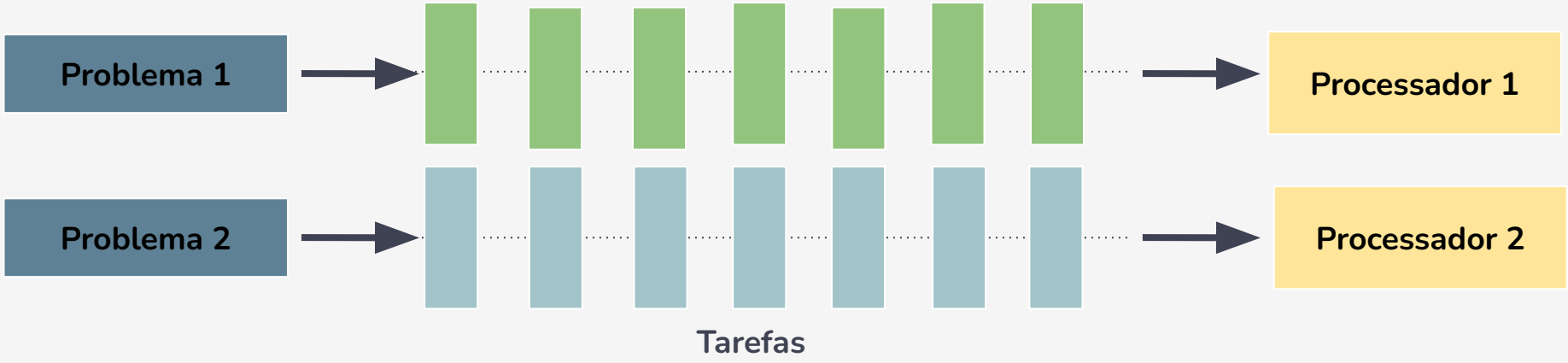
Programação concorrente e distribuída

Aula 3 - Computação paralela

Prof. João Robson

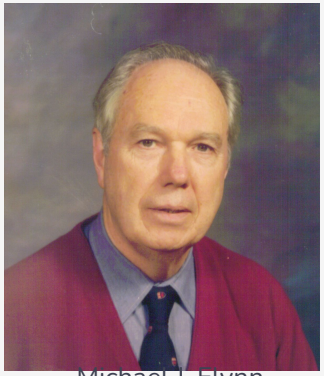
Computação paralela

- Estratégia que envolve o uso **simultâneo** de recursos computacionais com o objetivo de resolver tarefas em menor tempo;
- Recursos computacionais podem incluir:
  - Único computador com vários processadores;
  - Vários computadores conectados via rede (computação distribuída);
  - A combinação de ambos.



Taxonomia de Flynn

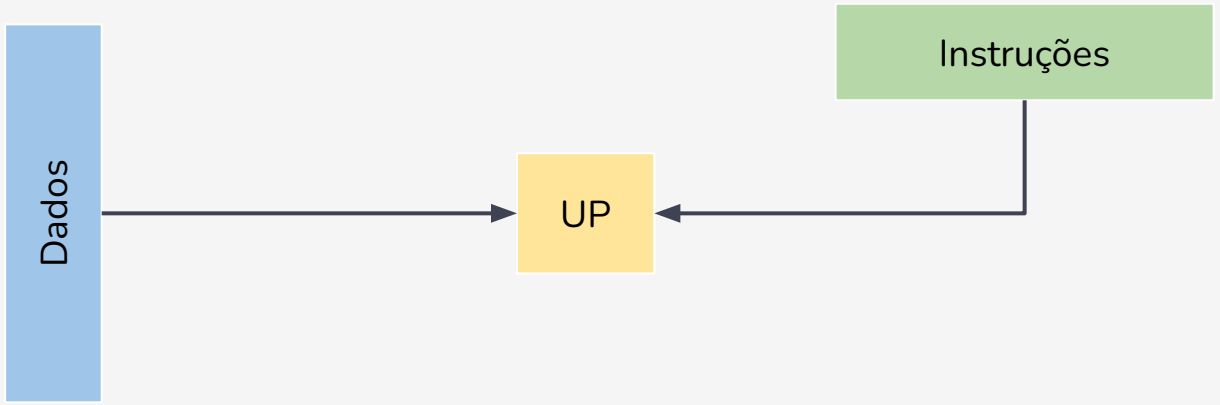
- Classificação de arquiteturas de computadores proposta por Michael J. Flynn em 1966 e expandida em 1972;
- Metodologia para categorizar formas de operação paralela disponíveis para um processador;
- Baseia-se em duas dimensões: **instruções** (*instructions*) e **dados** (*data*);
- Cada dimensão pode ter dois valores: **único** (*single*) ou **múltiplos** (*multiple*).


Michael J. Flynn

	Single Data	**Multiple Data**
Single Instruction	SISD (Single Instruction Single Data)	SIMD (Single Instruction Multiple Data)
Multiple Instruction	MISD (Multiple Instruction Single Data)	MIMD (Multiple Instruction Multiple Data)

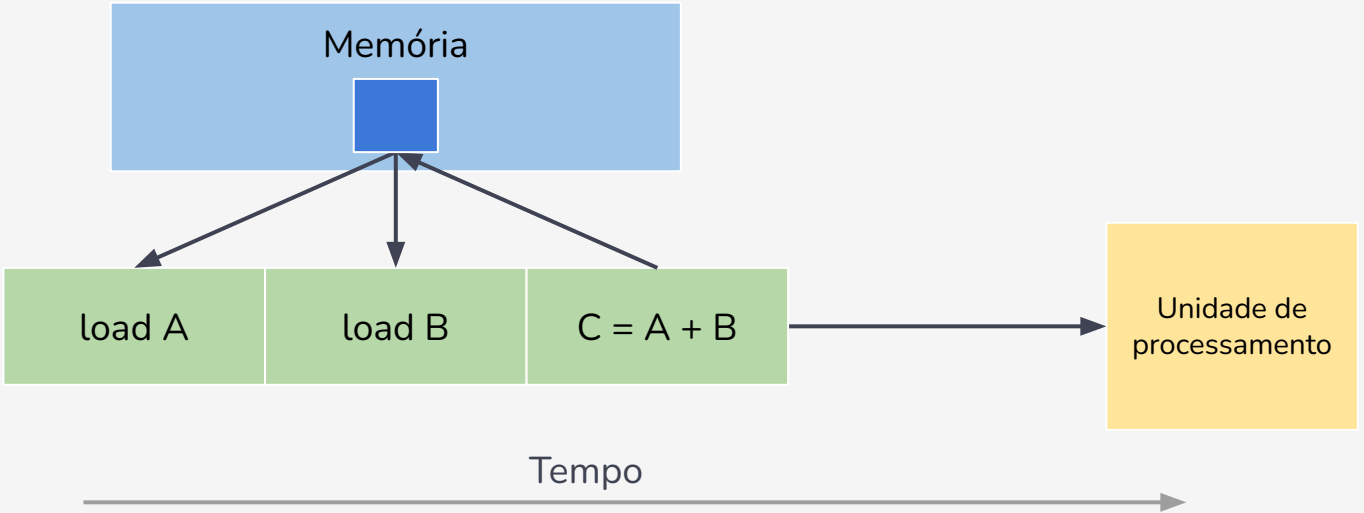
Single Instruction Single Data

- Arquitetura de computadores com uma única unidade de processamento (núcleo), abreviada como UP;
  - Apenas **uma instrução** processada a cada momento;
  - Apenas **um fluxo de dados** processado a cada momento;
- Instruções são processadas sequencialmente.



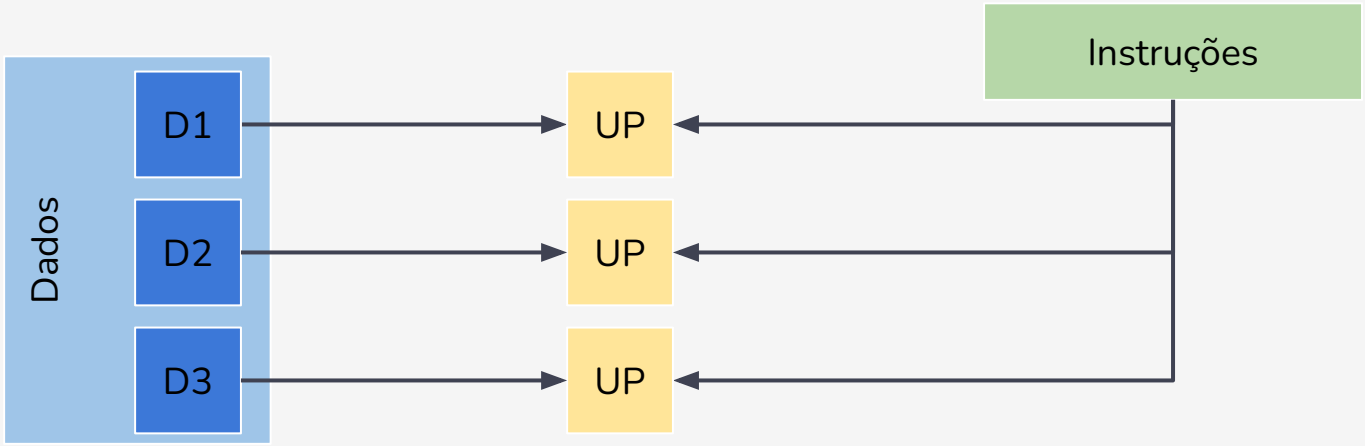
SISD - Exemplo

```
load A
load B
C = A + B
```



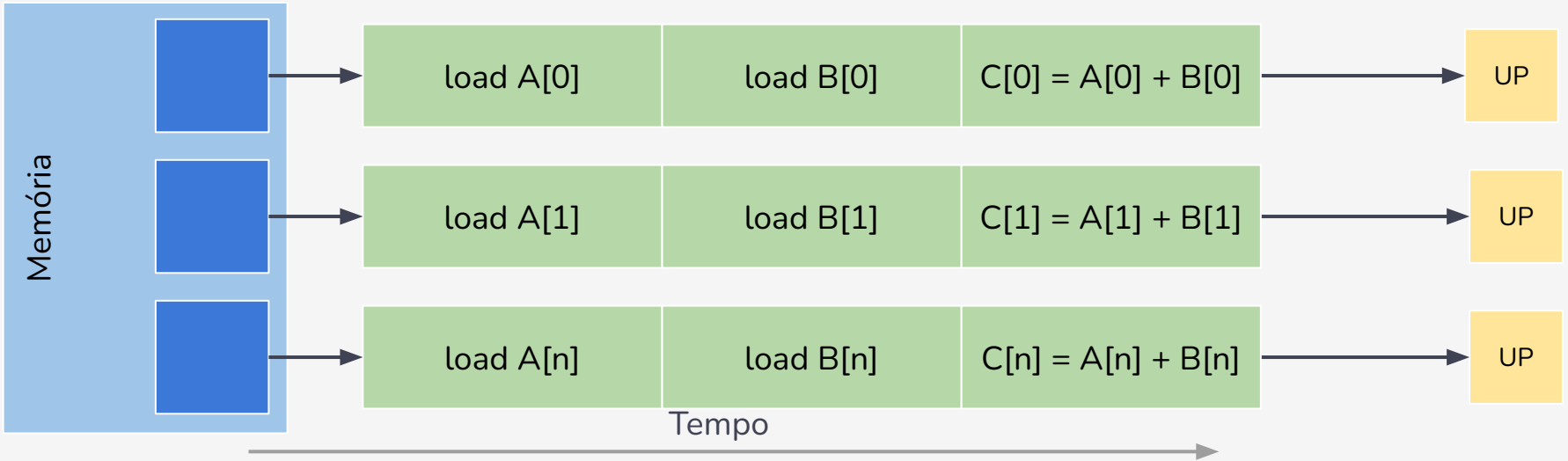
Single Instruction Multiple Data

- Arquitetura de computadores com múltiplas unidade de processamento;
- Cada UP executa a mesma instrução em um determinado momento, mas sobre dados potencialmente distintos;
- Geralmente, usada em dados com alto padrão de regularidade (ex.: processamento de imagens);
- Estratégia geralmente chamada de arquitetura vetorial ou processamento vetorial.



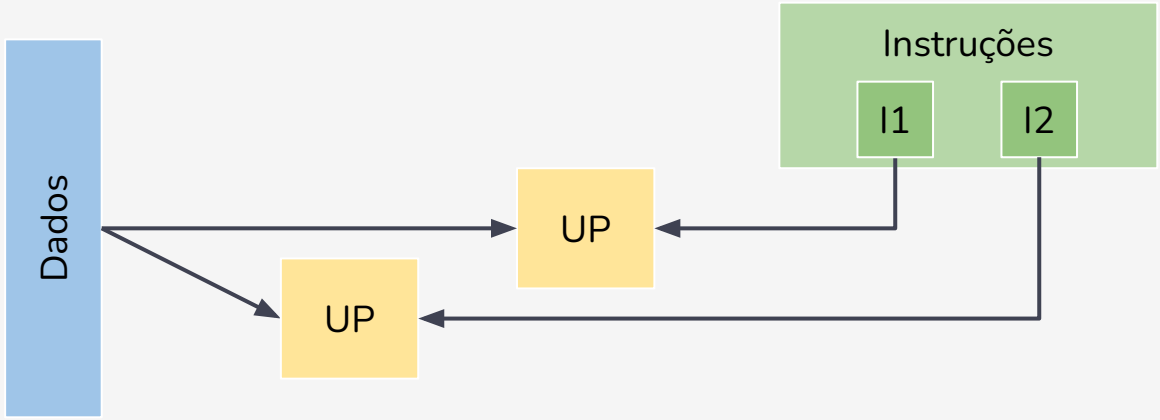
SIMD - Exemplo

```
load A[i]
load B[i]
C[i] = A[i] + B[i]
```



Multiple Instruction Single Data

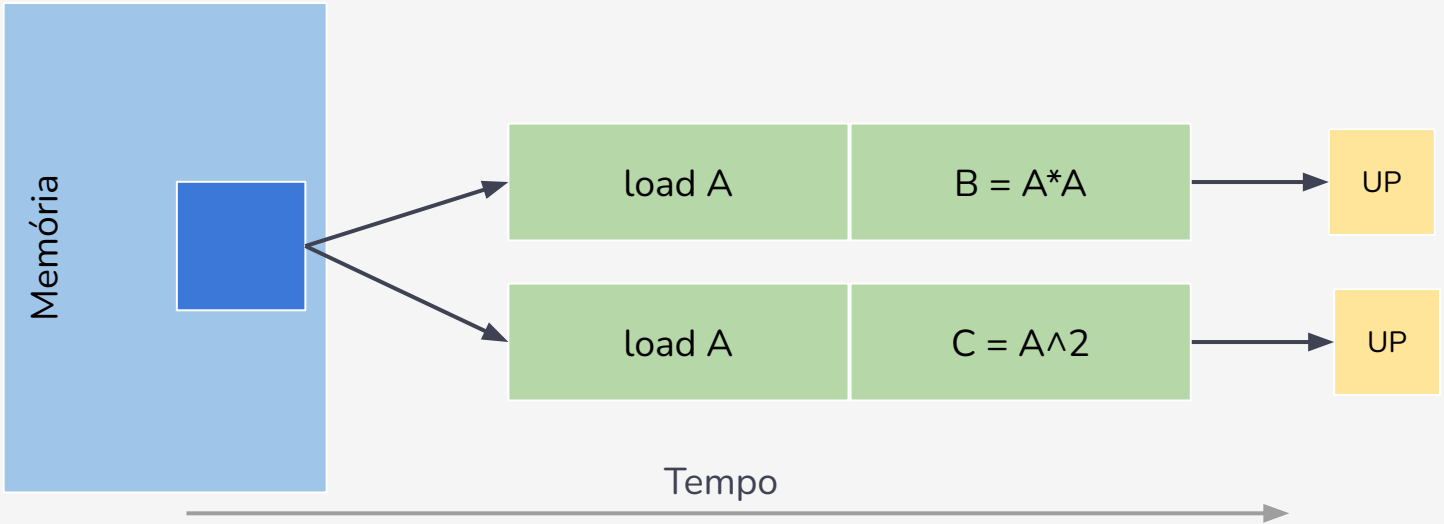
- Arquitetura incomum, usada em aplicações que requerem alta precisão e redundância;
- Instruções distintas aplicadas sobre o mesmo fluxo de dados.



MISD - Exemplo

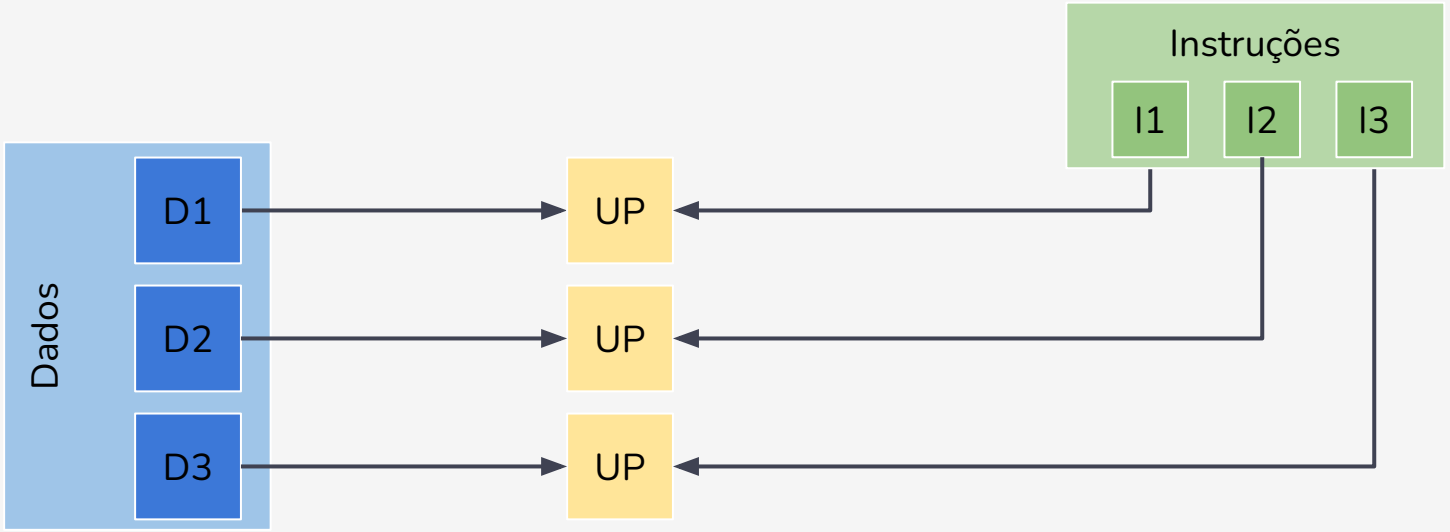
```
load A
B = A*A
```

```
load A
C = A^2
```



Multiple Instruction Multiple Data

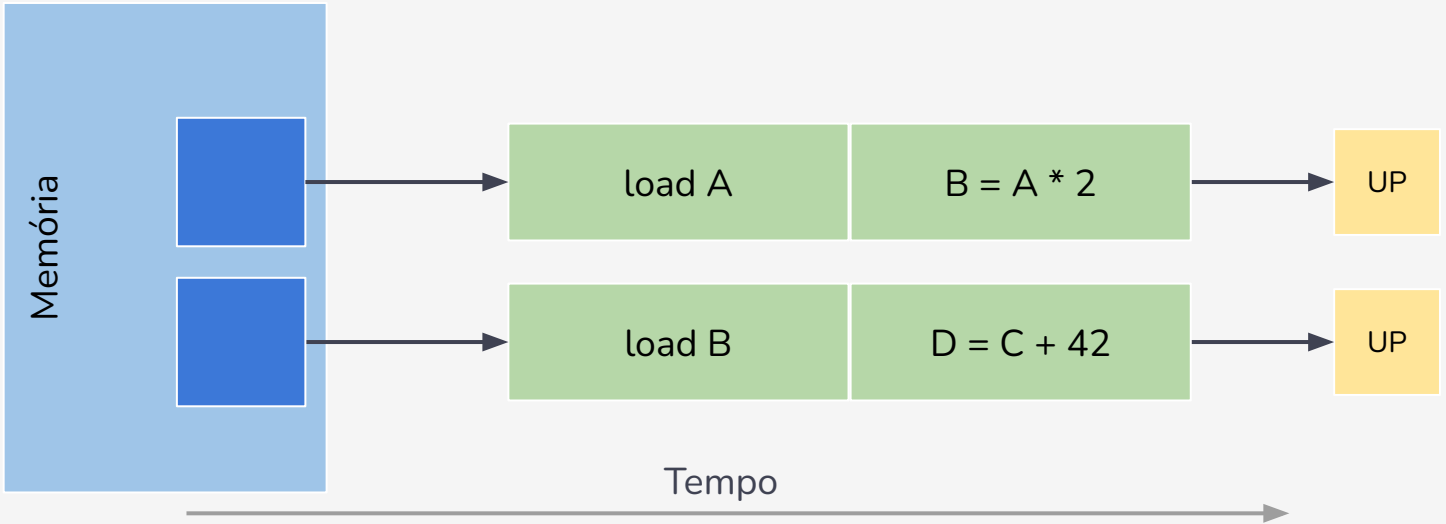
- **Arquitetura predominante nos dias atuais**;
- Cada unidade de processamento opera, no mesmo instante, sobre um fluxo de dados e um conjunto de instruções potencialmente distintos/independentes;
- Exemplos: **multiprocessadores e multicomputadores.**



MIMD - Exemplo

```
load A
B = A * 2
```

```
load C
D = C + 42
```

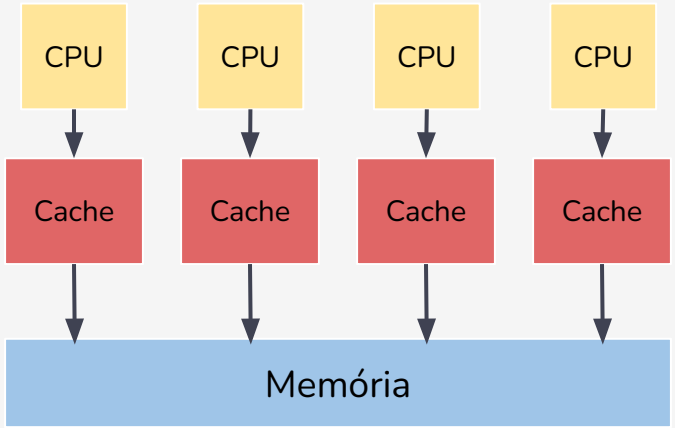


Multiprocessadores

- Baseado em arquitetura MIMD;
- Todos processadores compartilham acesso à memória física;
- Processadores executam instruções de forma independente, mas espaço de endereçamento é compartilhado;
  - Qualquer alteração em determinada posição da memória por determinado processador é acessível para os demais.
- Duas categorias:
  - Uniform Memory Access (UMA);
  - Non-uniform Memory Access (NUMA).

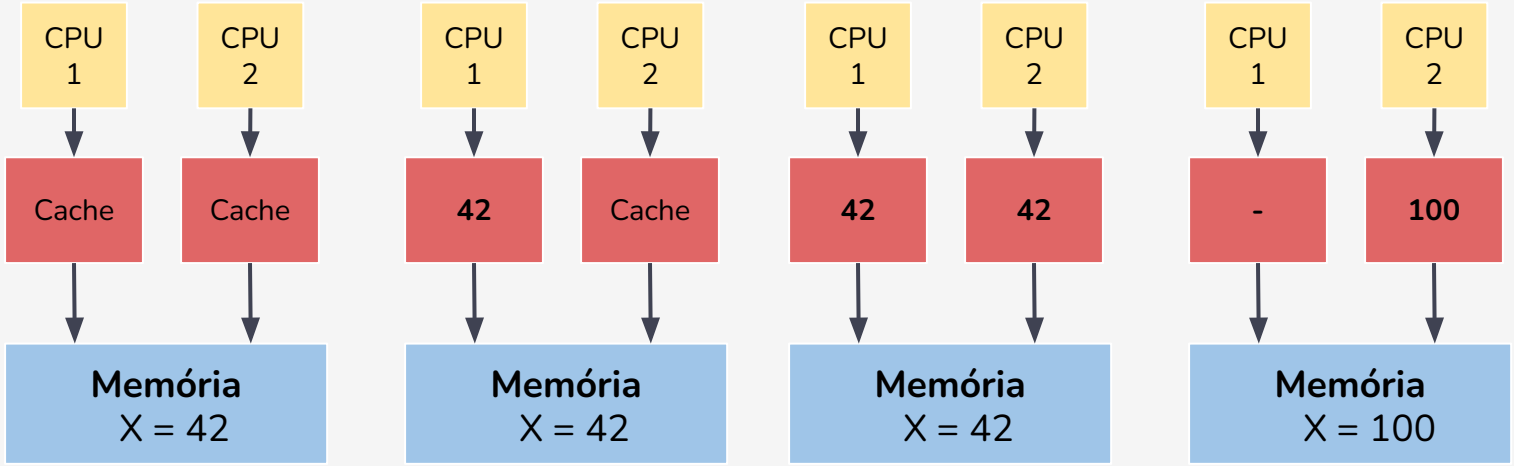
Multiprocessadores - UMA

- Processadores com acesso idêntico/igualitário à memória;
- Coerência entre caches implementada por meio do *write invalidate protocol*.



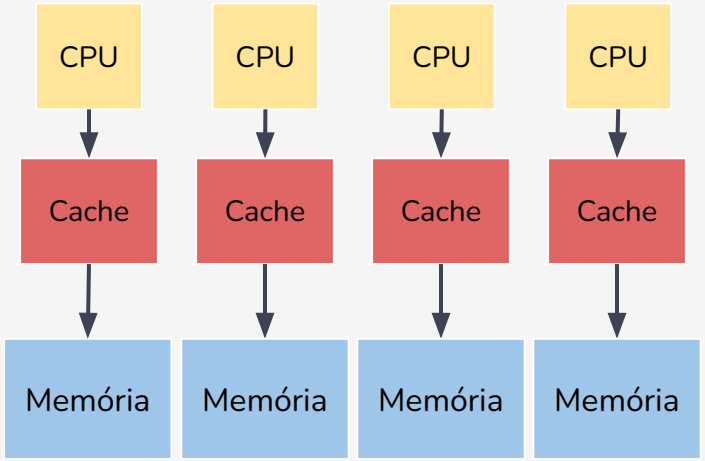
Write Invalidate Protocol

- Antes da escrita na memória, cópias nas caches de outras CPUs são invalidadas;
- Leitura futura desse bloco na memória cache:
  - *Cache miss* -> buscar dado na memória principal;
  - Buscar nos outros caches.



Multiprocessadores - NUMA

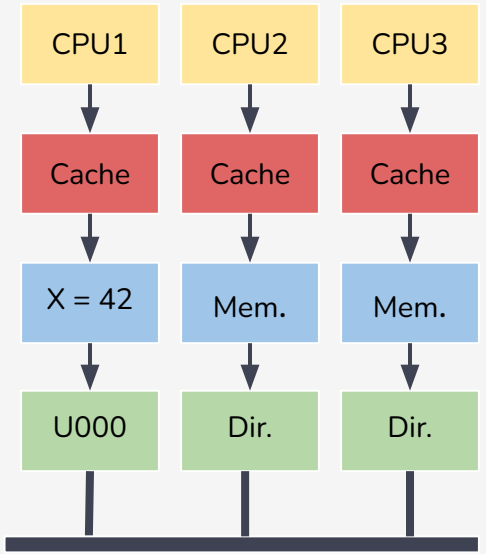
- Cada processador tem sua própria memória local;
- Tempo de acesso à memória pode variar entre CPUs diferentes;
- Coerência entre caches implementada por meio do *directory-based protocol*.



Directory-based Protocol

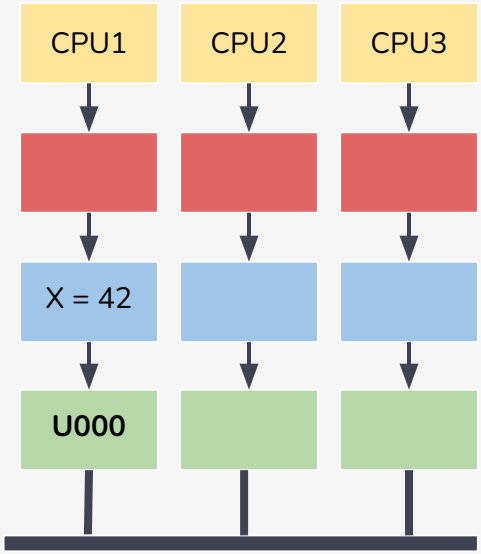
- Cada processador possui um diretório com informações sobre o estados dos seus blocos de memória:
  - *Uncached*: não está em nenhum cache;
  - *Shared*: está na cache de um ou mais processadores e a cópia na memória está correta;
  - *Exclusive*: está na cache de um processador e cópia na memória está incorreta.

Quais caches contém o valor de X?



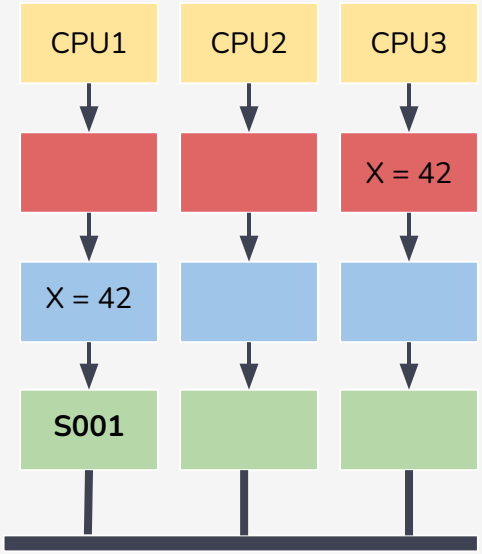
Directory-based Protocol

X possui valor 42



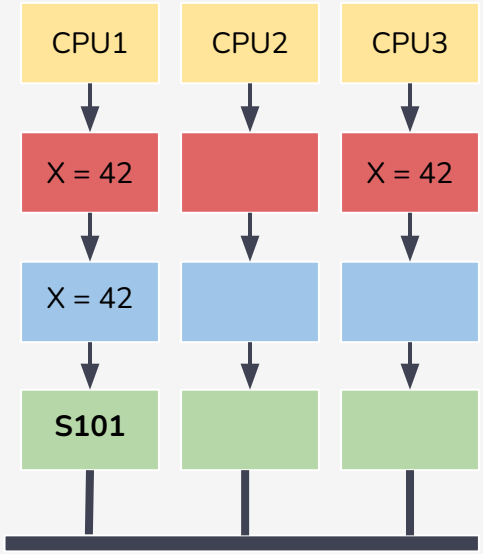
Diretório mostra que X não está em nenhuma cache

CPU3 lê valor de X



CPU3 envia *read miss* para CPU1, que por sua vez atualiza o diretório para *shared* e envia o bloco de dados com X para CPU3

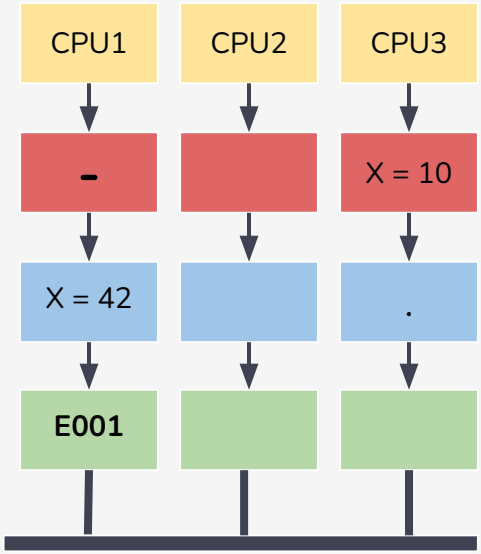
CPU1 lê valor de X



CPU1 não possui X em cache, o bit da CPU1 é atualizado no diretório e o bloco de dados com X é lido pela CPU1

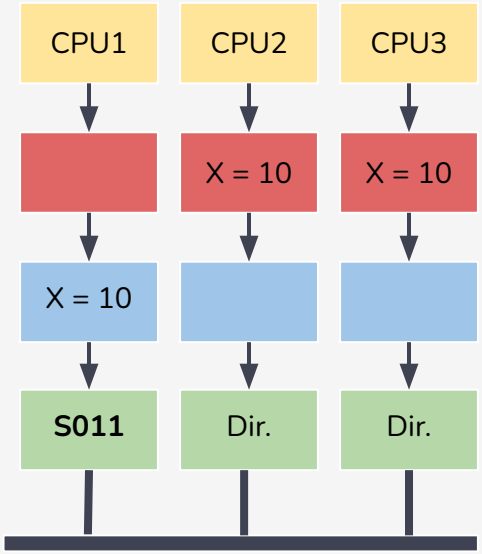
Directory-based Protocol

CPU3 escreve 10 em X



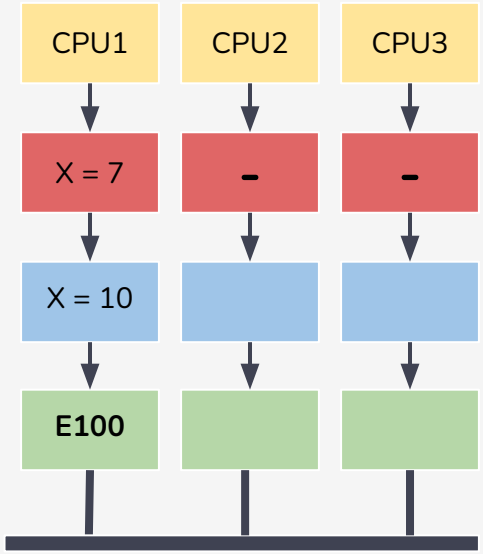
CPU3 envia um *write miss* para CPU1, que invalida sua cópia de X na cache e atualiza diretório para *exclusive*

CPU2 lê valor de X



CPU2 envia *read miss* para CPU1, CPU1 pede para CPU3 bloco de dados com X, atualiza memória e o diretório e envia o X para CPU3

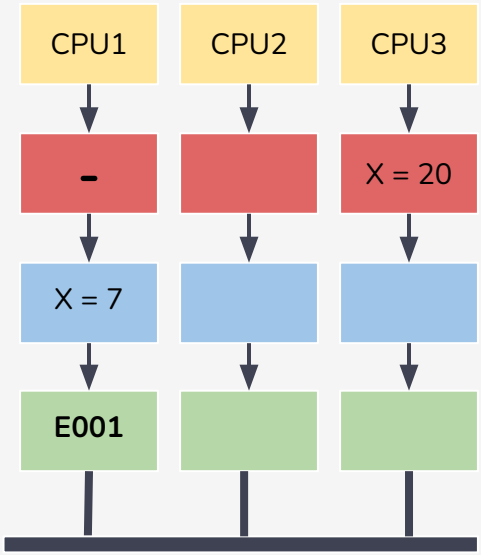
CPU1 escreve 7 em X



CPU1 gera um *write miss* de modo a invalidar as cópias de X em CPU2 e CPU3 e atualiza o diretório para *exclusive*

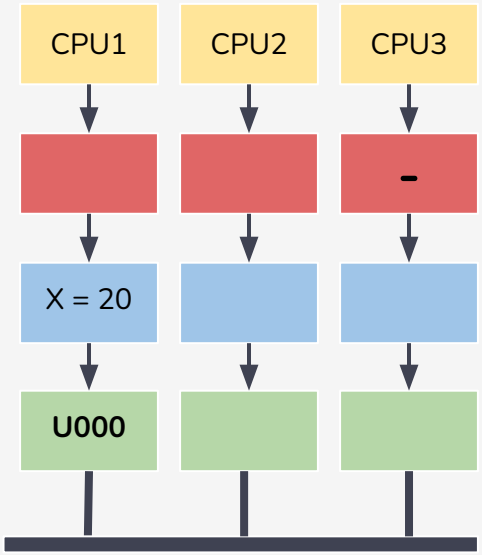
Directory-based Protocol

CPU3 escreve 20 em X



CPU3 envia um *write miss* para CPU1, que atualiza a memória com seu bloco em cache contendo X e envia-o para CPU3 onde X é escrito

CPU3 remove o bloco de cache com X



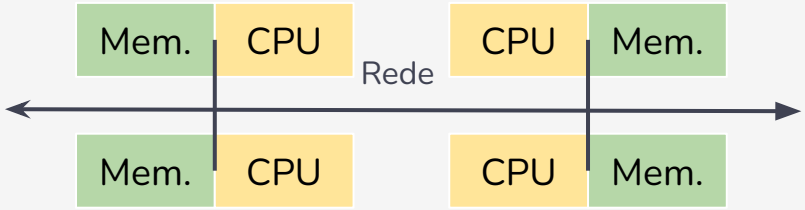
CPU3 envia o bloco de dados contendo X para CPU1, que atualiza a memória e o diretório

Multiprocessadores - Vantagens e desvantagens

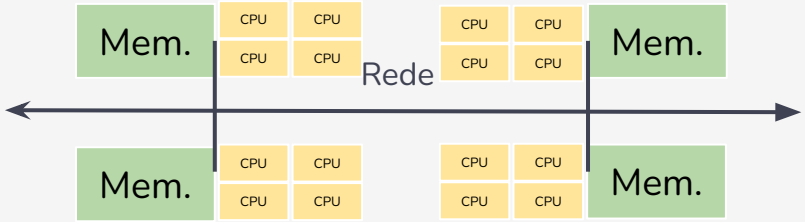
- **Vantagens:**
  - Compartilhamento de dados entre processos é alcançado de forma simples e rápida;
- **Desvantagens:**
  - Necessidade de mecanismos de sincronização;
  - Pouco escalável -> quanto mais processadores, maior a contenção de acesso à memória (múltiplos processos ou *threads* acessando mesmo local na memória) -> mais difícil manter coerência entre caches;
  - Custo elevado -> quanto mais processadores -> mais caro para produzir computador

Multicomputadores

- Computadores ligados em rede com memórias físicas independentes;
- Não há coerência entre caches -> alterações em posições memória por um processador não é visível por processadores de outros computadores;
- Duas categorias:
  - ***Distributed Multicomputer***



  - ***Distributed-shared Multicomputer***



Multicomputadores - vantagens e desvantagens

- **Vantagens:**
  - Mais computadores -> mais memória disponível sem preocupação com coerência de caches;
  - Escala de forma mais simples com um custo baixo;
- **Desvantagens:**
  - Necessidade de mecanismos de comunicação entre computadores;
  - Tempo de acesso computadores diferentes não é uniforme;
  - Dificuldade em converter estruturas de dados locais para modelo distribuído.

Limitações

- Computação paralela ainda tem limitações:
  - Nem todo trecho de código é paralelizável;
  - Maior parte dos problemas computacionais reais não pode ser paralelizado efetivamente sem aumentar custos de comunicação e coordenação entre processadores.
- Exemplo: colocação de piso por **5 pessoas** em uma casa com **5 quartos**:
  - Quartos de tamanho igual:
    - 1 quarto por pessoa
    - 1 / 5 do tempo para realizar a pintura;
  - 1 quarto com o dobro do tamanho dos quartos restantes:
    - Como dividir?
    - Quarto maior ocupará maior tempo para ter a colocação finalizada.

Limitações - Lei de Amdahl

- Para avaliar se paralelização de uma tarefa causa alguma melhora e de quanto é esse ganho, podemos usar a **Lei de Amdahl**;
- Ela mede o ***speedup* (melhora)** máximo alcançado por n processos colaborando na execução de uma tarefa;
- **Considera apenas tempo de execução**;

$$S = \frac{1}{1 - p + \frac{p}{n}}$$

Onde:

S = *speedup* ou melhora
n = número de unidade de processamento
p = porcentagem da tarefa que pode ser paralelizada

Lei de Amdahl - Exemplo

- Exemplo da casa:
  - 5 pessoas;
  - 5 quartos, sendo que 4 tem 10 m^2 e 1 tem 20 m^2;
  - Atribuindo 1 pessoa por quarto:
    - 50 m^2 dos 60 m^2 serão preenchidos em paralelo (5/6 da tarefa)
    - p = 5/6;
    - 1 - p = 1/6;
    - S = 1 / (1/6 + (5/6)/5) = 1 / (1/6 + 1/6) = 3

$$S = \frac{1}{1 - p + \frac{p}{n}}$$

Onde:

S = *speedup* ou melhora
n = número de unidade de processamento
p = porcentagem da tarefa que pode ser paralelizada

Lei de Amdahl - Exemplo

- Exemplo da casa:
  - 10 pessoas;
  - 10 quartos, sendo que 9 tem 10 m^2 e 1 tem 20 m^2;
  - Atribuindo 1 pessoas por quarto:
    - $S = 1 / (1/11 + 1/11) = 5.5$
- Mesmo com pequeno desequilíbrio (1 quarto com o dobro do tamanho), 10 pessoas só conseguem cerca de metade do ganho que se esperaria de forma ingênua (10 vezes);
- O que isso representa em um contexto de multiprocessadores?
  - Em um contexto onde há 10 unidades de processamento e conseguimos paralelizar somente 90% do problema, conseguimos um ganho de 5 vezes e não de 10;
  - 10% não paralelizável -> corta uso da máquina pela metade;
  - Aplicar paralelismo nos 10% restante pode ser bastante complicado:
    - **Envolve coordenação e sincronia.**

Threads - Exercícios

- Avalie o ganho dos exercícios abaixo usando *threads*:
  - Calcule as 4 operações aritméticas básicas com 2 números;
  - Identifique o maior valor de uma lista;
  - Calcule a soma dos números primos dentro de um intervalo determinado.

Referências

- Tanenbaum, Andrew S. Sistemas operacionais modernos / Andrew S. Tanenbaum, Herbert Bos; tradução Jorge Ritter; revisão técnica Raphael Y. de Camargo. – 4. ed. – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- SILVA, Cleomar Pereira da. Computação de Alto Desempenho com Placas Gráficas para Acelerar o Processamento da Teoria do Funcional da Densidade. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=16578@1&msg=28#
- MENOTTI, Ricardo; DIAS, Maurício Acconcia; GUARDIA, Helio Crestana. Programação paralela: das threads aos FPGAs. Disponível em: https://github.com/menotti/pp
- BALANIUK, Remis. Computação paralela.