Programação
Paralela e Distribuída

Fundamentos

Porquê Programação Paralela?

"Se um único computador (processador) consegue resolver um problema em N segundos, podem N computadores (processadores) resolver o mesmo problema em 1 segundo?"

Porquê Programação Paralela?

- Dois dos principais motivos para utilizar programação paralela são:
  - Reduzir o tempo necessário para solucionar um problema.
  - Resolver problemas mais complexos e de maior dimensão.
- Outros motivos são:
  - Tirar partido de recursos computacionais não disponíveis localmente ou subaproveitados.
  - Ultrapassar limitações de memória quando a memória disponível num único computador é insuficiente para a resolução do problema.
  - Ultrapassar os limites físicos de velocidade e de miniaturização que actualmente começam a restringir a possibilidade de construção de computadores sequenciais cada vez mais rápidos.

Porquê Programação Paralela?

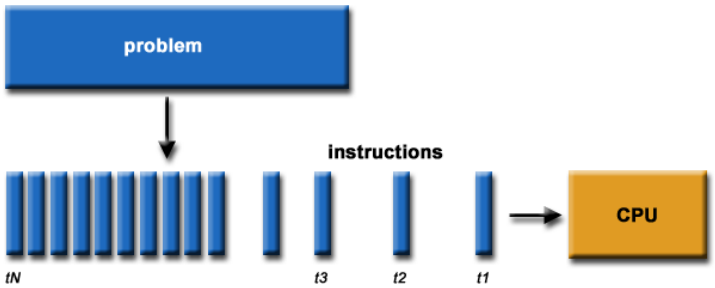
- Tradicionalmente, a programação paralela foi motivada pela resolução/simulação de problemas fundamentais da ciência/engenharia de grande relevância científica e económica, denominados como ***Grand Challenge Problems (GCPs)***.
- Tipicamente, os GCPs simulam fenómenos que não podem ser medidos por experimentação:
  - Fenómenos climáticos (e.g. movimento das placas tectónicas)
  - Fenómenos físicos (e.g. órbita dos planetas)
  - Fenómenos químicos (e.g. reacções nucleares)
  - Fenómenos biológicos (e.g. genoma humano)
  - Fenómenos geológicos (e.g. actividade sísmica)
  - Componentes mecânicos (e.g. aerodinâmica/resistência de materiais em naves espaciais)
  - Circuitos electrónicos (e.g. verificação de placas de computador)
  - ...

Porquê Programação Paralela?

- Actualmente, as aplicações que exigem o desenvolvimento de computadores cada vez mais rápidos estão por todo o lado. Estas aplicações ou requerem um **grande poder de computação** ou requerem o **processamento de grandes quantidades de informação**. Alguns exemplos são:
  - Bases de dados paralelas
  - Mineração de dados (*data mining*)
  - Serviços de procura baseados na *web*
  - Serviços associados a tecnologias multimédia e telecomunicações
  - Computação gráfica e realidade virtual
  - Diagnóstico médico assistido por computador
  - Gestão de grandes industrias/corporações
  - ...

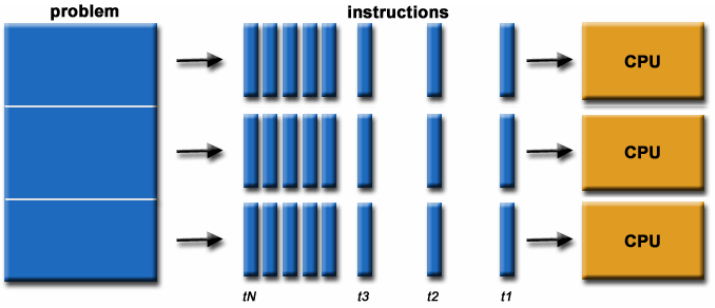
Programação Sequencial

- Um programa é considerado programação sequencial quando este é visto como uma série de instruções sequenciais que devem ser executadas num único processador.



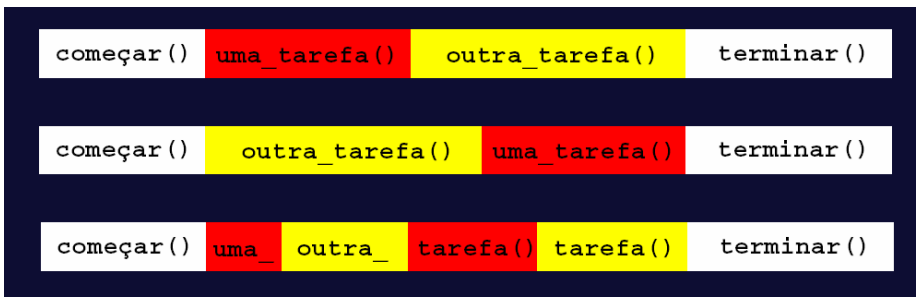
Programação Paralela

- Um programa é considerado programação paralela quando este é visto como um conjunto de partes que podem ser resolvidas **concorrentemente**. Cada parte é igualmente constituída por uma série de instruções sequenciais, mas que no seu conjunto podem ser executadas simultaneamente em vários processadores.



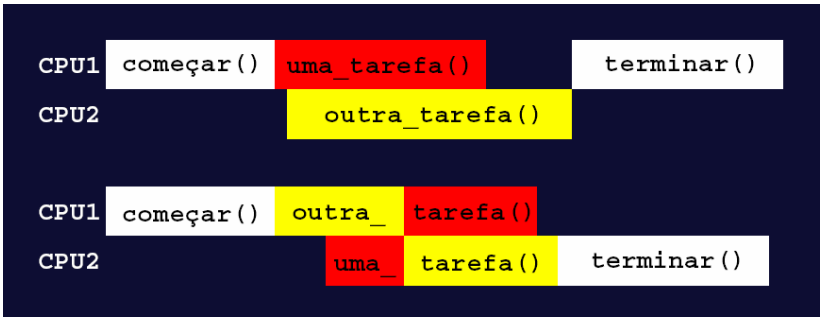
Concorrência ou Paralelismo Potencial

- Concorrência ou paralelismo potencial diz-se quando um programa possui **tarefas** (partes contíguas do programa) que podem ser executadas em qualquer ordem sem alterar o resultado final.



Paralelismo

- Paralelismo diz-se quando as tarefas de um programa são executadas em simultâneo em mais do que um processador.



Paralelismo Implícito

- O paralelismo diz-se implícito quando cabe ao **compilador** e ao **sistema de execução**:
  - Detectar o paralelismo potencial do programa.
  - Atribuir as tarefas para execução em paralelo.
  - Controlar e sincronizar toda a execução.
- Vantagens e inconvenientes:
  - **(+)** Liberta o programador dos detalhes da execução paralela.
  - **(+)** Solução mais geral e mais flexível.
  - **(–)** Difícil conseguir-se uma solução eficiente para todos os casos.

Paralelismo Explícito

- O paralelismo diz-se explícito quando cabe ao **programador**:
  - Anotar as tarefas para execução em paralelo.
  - Atribuir (possivelmente) as tarefas aos processadores.
  - Controlar a execução indicando os pontos de sincronização.
  - Conhecer a arquitectura dos computadores de forma a conseguir o máximo desempenho (aumentar localidade, diminuir comunicação, etc).
- Vantagens e inconvenientes:
  - **(+)** Programadores experientes produzem soluções muito eficientes para problemas específicos.
  - **(–)** O programador é o responsável por todos os detalhes da execução (*debugging* pode ser deveras penoso).
  - **(–)** Pouco portável entre diferentes arquitecturas.

Computação Paralela

- De uma forma simples, a computação paralela pode ser definida como o uso simultâneo de vários recursos computacionais de forma a reduzir o tempo necessário para resolver um determinado problema. Esses recursos computacionais podem incluir:
  - Um único computador com múltiplos processadores.
  - Um número arbitrário de computadores ligados por rede.
  - A combinação de ambos.

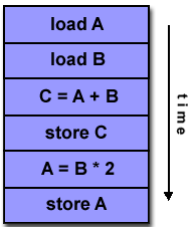
Taxonomia de Flynn

- Uma das metodologias mais conhecidas e utilizadas para classificar a arquitectura de um computador ou conjunto de computadores é a taxonomia de Flynn (1966).
  - Esta metodologia classifica a arquitectura dos computadores segundo duas dimensões independentes: **instruções** e **dados**, em que cada dimensão pode tomar apenas um de dois valores distintos: ***single*** ou ***multiple***.

	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*

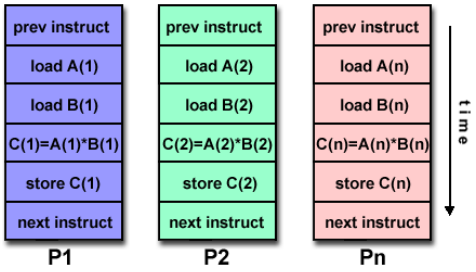
SISD – *Single Instruction Single Data*

- Corresponde à arquitectura dos computadores com um único processador.
  - Apenas uma instrução é processada a cada momento.
  - Apenas um fluxo de dados é processado a cada momento.
- Exemplos: PCs, *workstations* e servidores com um único processador.



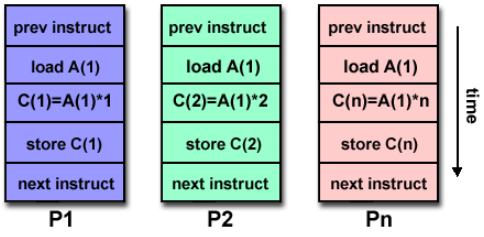
SIMD – *Single Instruction Multiple Data*

- Tipo de arquitectura paralela desenhada para problemas específicos caracterizados por um alto padrão de regularidade nos dados (e.g. processamento de imagem).
  - Todas as unidades de processamento executam a mesma instrução a cada momento.
  - Cada unidade de processamento pode operar sobre um fluxo de dados diferente.
- Exemplos: *processor arrays* e *pipelined vector processors*.



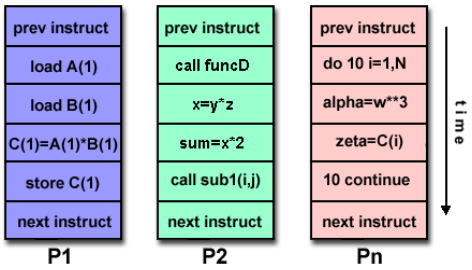
MISD – *Multiple Instruction Single Data*

- Tipo de arquitectura paralela desenhada para problemas específicos caracterizados por um alto padrão de regularidade funcional (e.g. processamento de sinal).
  - Constituída por uma *pipeline* de unidades de processamento independentes que operam sobre um mesmo fluxo de dados enviando os resultados duma unidade para a próxima.
  - Cada unidade de processamento executa instruções diferentes a cada momento.
- Exemplos: *systolic arrays*.



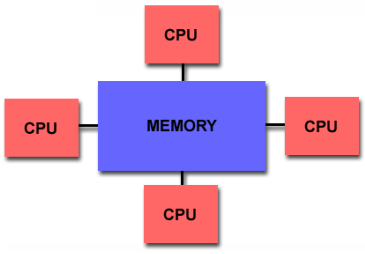
MIMD – *Multiple Instruction Multiple Data*

- Tipo de arquitectura paralela predominante actualmente.
  - Cada unidade de processamento executa instruções diferentes a cada momento.
  - Cada unidade de processamento pode operar sobre um fluxo de dados diferente.
- Exemplos: *multiprocessors* e *multicomputers*.



Multiprocessors

- Um *multiprocessor* é um computador em que todos os processadores partilham o acesso à memória física.
  - Os processadores executam de forma independente mas o espaço de endereçamento global é partilhado.
  - Qualquer alteração sobre uma posição de memória realizada por um determinado processador é igualmente visível por todos os restantes processadores.

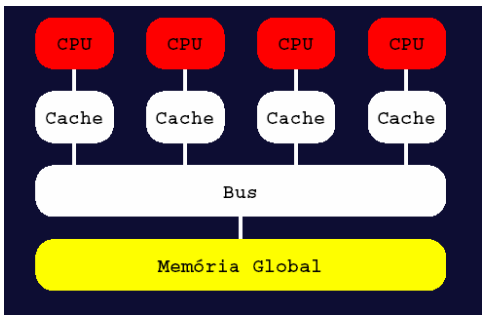


Multiprocessors

- Existem duas grandes classes de *multiprocessors*:
  - *Uniform Memory Access Multiprocessor (UMA)*
    ou *Cache Coherent Uniform Memory Access Multiprocessor (CC-UMA)*
    ou *Symmetrical Multiprocessor (SMP)*
    ou *Centralized Multiprocessor*
  - *Non-Uniform Memory Access Multiprocessor (NUMA)*
    ou *Distributed Multiprocessor*

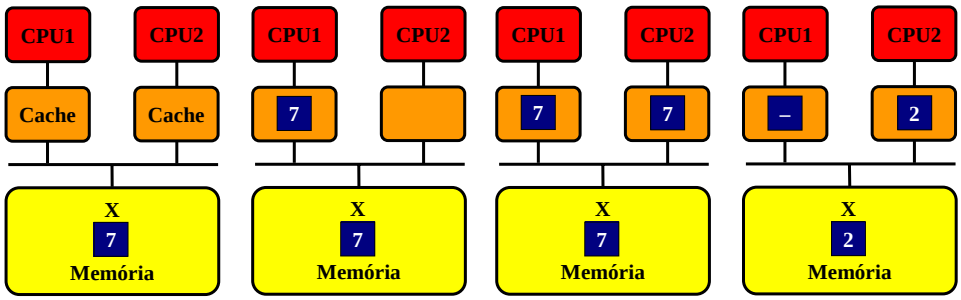
Multiprocessors

- ***Uniform Memory Access Multiprocessor (UMA)***
  - Todos os processadores têm tempos de acesso idênticos a toda a memória.
  - A coerência das *caches* é implementada pelo *hardware* (*write invalidate protocol*).



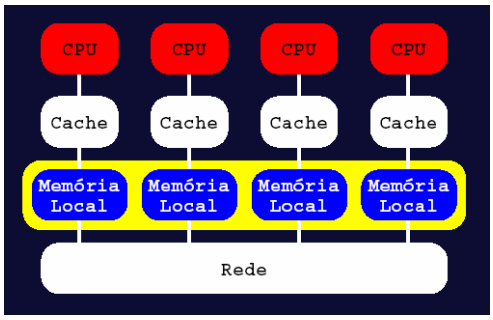
Write Invalidate Protocol

- Antes de se escrever um valor em memória, todas as cópias existentes nas *caches* dos outros processadores são invalidadas. Quando mais tarde, esses outros processadores tentam ler o valor invalidado, acontece um *cache miss* o que os obriga a actualizar o valor a partir da memória.



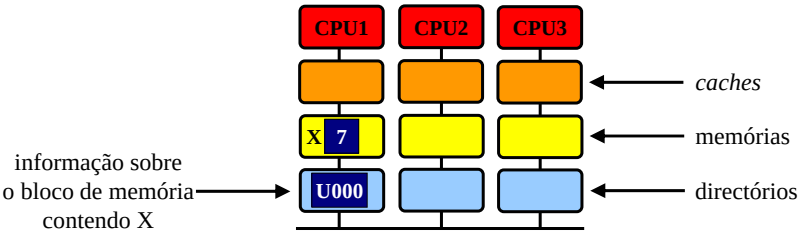
Multiprocessors

- *Non-Uniform Memory Access Multiprocessor (NUMA)*
  - Os processadores têm tempos de acesso diferentes a diferentes áreas da memória.
  - Se a coerência das *caches* for implementada pelo *hardware* (*directory-based protocol*) são também designados por *Cache Coherent NUMA (CC-NUMA)*.



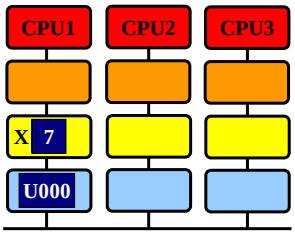
Directory-Based Protocol

- Associado a cada processador existe um directório com informação sobre o estado dos seus blocos de memória. Cada bloco pode estar num dos seguintes estados:
  - ***Uncached***: não está na *cache* de nenhum processador.
  - ***Shared***: encontra-se na *cache* de um ou mais processadores e a cópia em memória está correcta.
  - ***Exclusive***: encontra-se apenas na *cache* de um processador e a cópia em memória está obsoleta.



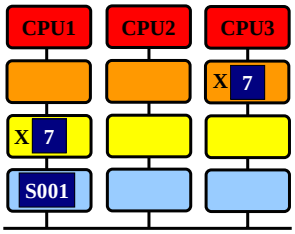
Directory-Based Protocol

X possui o valor 7



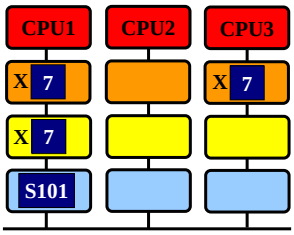
A informação representada no directório mostra que X não está na *cache* de nenhum processador (U000).

CPU3 lê o valor de X



CPU3 envia um *read miss* para CPU1, este actualiza o directório para *shared* e envia o bloco de dados contendo X para CPU3.

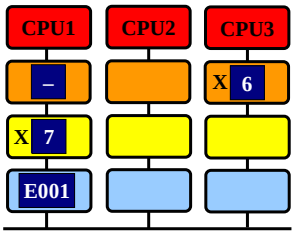
CPU1 lê o valor de X



CPU1 não possui X em *cache*, o *bit* do CPU1 no directório é actualizado e o bloco de dados contendo X é lido por CPU1.

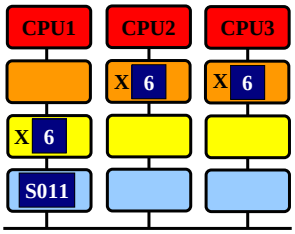
Directory-Based Protocol

CPU3 esreve 6 em X



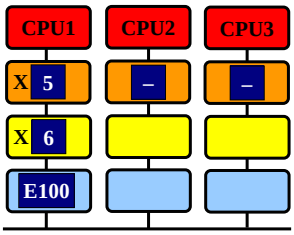
CPU3 envia um *write miss* para CPU1, este invalida a sua cópia em *cache* e actualiza o directório para *exclusive*.

CPU2 lê o valor de X



CPU2 envia um *read miss* para CPU1, CPU1 pede a CPU3 o bloco de dados contendo X, actualiza a memória e o directório e envia o bloco para CPU2.

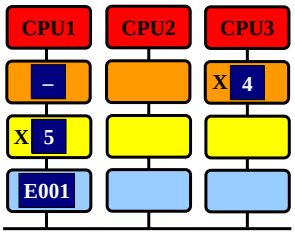
CPU1 escreve 5 em X



CPU1 gera um *write miss* de modo a invalidar as cópias de X em CPU2 e CP3 e actualiza o directório para *exclusive*.

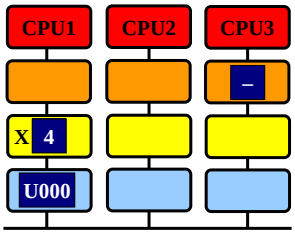
Directory-Based Protocol

CPU3 escreve 4 em X



CPU3 envia um *write miss* para CPU1, este actualiza a memória com o seu bloco em *cache* contendo X e envia-o para CPU3 onde o valor de X é escrito.

CPU3 remove o bloco de *cache* contendo X



CPU3 envia o bloco de dados contendo X para CPU1 e este actualiza a memória e o directório.

Multiprocessors

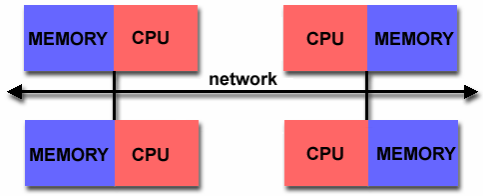
- Vantagens e inconvenientes:
  - (+) Partilha de dados entre tarefas é conseguida de forma simples, uniforme e rápida.
  - (–) Necessita de mecanismos de sincronização para obter um correcto manuseamento dos dados.
  - (–) Pouco escalável. O aumento do número de processadores aumenta a contenção no acesso à memória e torna inviável qualquer mecanismo de coerência das *caches*.
  - (–) Custo elevado. É difícil e bastante caro desenhar e produzir computadores cada vez com um maior número de processadores.

Multicomputers

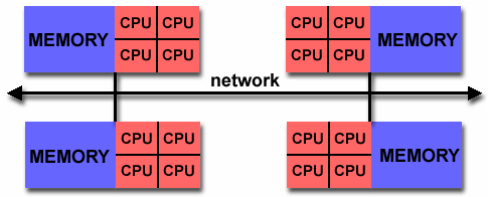
- Um *multicomputer* é um conjunto de computadores ligados por rede em que cada computador tem acesso exclusivo à sua memória física.
  - O espaço de endereçamento de cada computador não é partilhado pelos restantes computadores, ou seja, não existe o conceito de espaço de endereçamento global.
  - As alterações sobre uma posição de memória realizada por um determinado processador não são visíveis pelos processadores dos restantes computadores, ou seja, não existe o conceito de coerência das *caches*.
- Existem duas grandes classes de *multicomputers*:
  - *Distributed Multicomputer*
  - *Distributed-Shared Multicomputer*

Multicomputers

- *Distributed Multicomputer*



- *Distributed-Shared Multicomputer*



Multicomputers

- Vantagens e inconvenientes:
  - (+) O aumento do número de computadores aumenta proporcionalmente a memória disponível sem necessitar de mecanismos de coerência das *caches*.
  - (+) Fácil escalabilidade a baixo custo. O aumento do poder de computação pode ser conseguido à custa de computadores de uso doméstico.
  - (–) Necessita de mecanismos de comunicação para partilha de dados entre tarefas de diferentes computadores.
  - (–) O tempo de acesso aos dados entre diferentes computadores não é uniforme e é por natureza mais lento.
  - (–) Pode ser difícil converter estruturas de dados previamente existentes para memória partilhada em estruturas de dados para memória distribuída.

Arquitecturas MIMD

	Multiprocessor		*Multicomputer*	
	CC-UMA	*CC-NUMA*	*Distributed*	*Distributed-Shared*
Escalabilidade	10s de CPUs	100s de CPUs	1000s de CPUs	
Comunicação	Segmentos memória partilhada *Threads* *OpenMP* (*MPI*)		*MPI*	*MPI/Threads* *MPI/OpenMP*

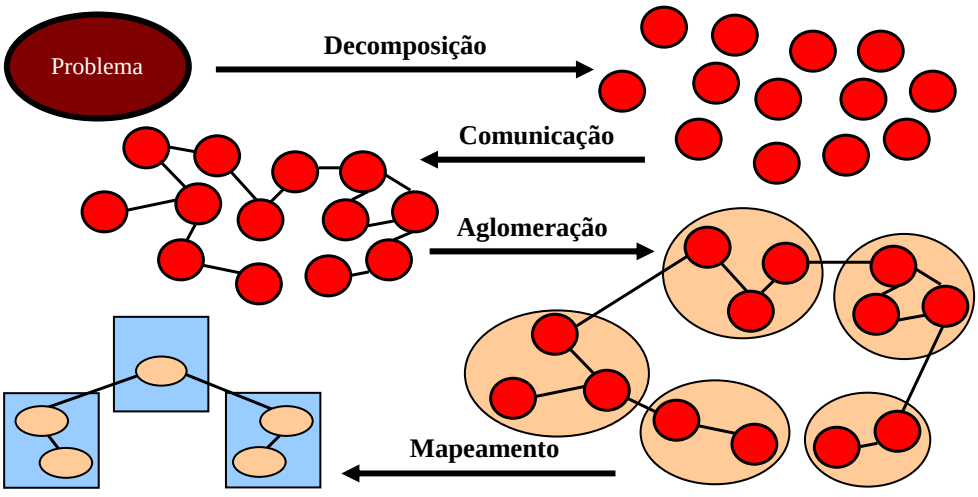
Programação Paralela

- Apesar das arquitecturas paralelas serem actualmente uma realidade, a programação paralela continua a ser uma tarefa complexa. Para além de depender da disponibilidade de ferramentas/ambientes de programação adequados para memória partilhada/distribuída, debate-se com uma série de problemas não existentes em programação sequencial:
  - **Concorrência**: identificar as partes da computação que podem ser executadas em simultâneo.
  - **Comunicação e Sincronização**: desenhar o fluxo de informação de modo a que a computação possa ser executada em simultâneo pelos diversos processadores evitando situações de *deadlock* e *race conditions*.
  - **Balanceamento de Carga e Escalonamento**: distribuir de forma equilibrada e eficiente as diferentes partes da computação pelos diversos processadores de modo a ter os processadores maioritariamente ocupados durante toda a execução.

Metodologia de Programação de Foster

- Um dos métodos mais conhecidos para desenhar algoritmos paralelos é a metodologia de Ian Foster (1996). Esta metodologia permite que o programador se concentre inicialmente nos aspectos não-dependentes da arquitectura, como sejam a concorrência e a escalabilidade, e só depois considere os aspectos dependentes da arquitectura, como sejam aumentar a localidade e diminuir a comunicação da computação.
- A metodologia de programação de Foster divide-se em 4 etapas:
  - Decomposição
  - Comunicação
  - Aglomeração
  - Mapeamento

Metodologia de Programação de Foster

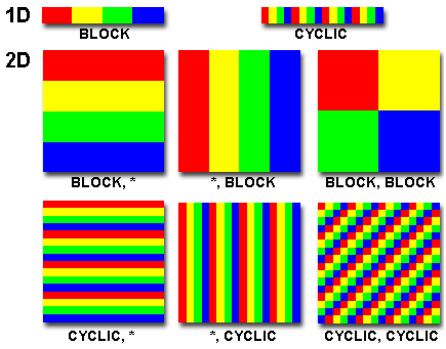


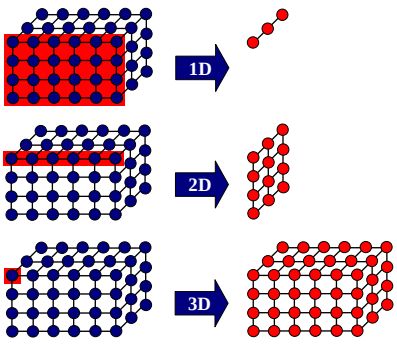
Decomposição

- Uma forma de diminuir a complexidade de um problema é conseguir dividi-lo em tarefas mais pequenas de modo a aumentar a concorrência e a localidade de referência de cada tarefa.
- Existem duas estratégias principais de decompor um problema:
  - **Decomposição do Domínio**: decompor o problema em função dos dados.
  - **Decomposição Funcional**: decompor o problema em função da computação.
- Um boa decomposição tanto divide os dados como a computação em múltiplas tarefas mais pequenas.

Decomposição do Domínio

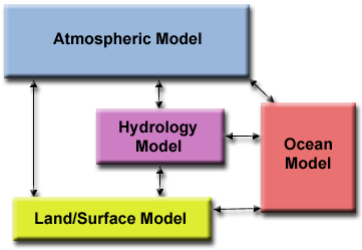
- Tipo de decomposição em que primeiro se dividem os dados em partições e só depois se determina o processo de associar a computação com as partições.
- Todas as tarefas executam as mesmas operações.



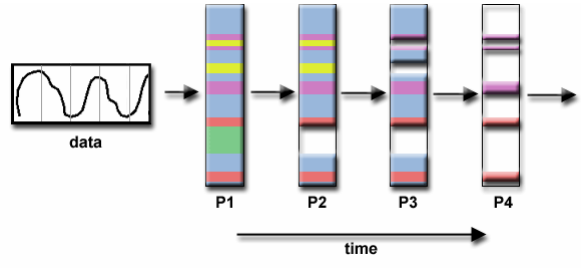


Decomposição Funcional

- Tipo de decomposição em que primeiro se divide a computação em partições e só depois se determina o processo de associar os dados com cada partição.
- Diferentes tarefas executam diferentes operações.



Modelação climática



Processamento de sinal

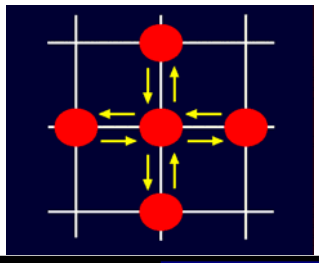
Comunicação

- A natureza do problema e o tipo de decomposição determinam o padrão de comunicação entre as diferentes tarefas. A execução de uma tarefa pode envolver a sincronização/acesso a dados pertencentes/calculados por outras tarefas.
- Para haver cooperação entre as tarefas é necessário definir algoritmos e estruturas de dados que permitam uma eficiente troca de informação. Alguns dos principais factores que limitam essa eficiência são:
  - **Custo da Comunicação**: existe sempre um custo associado à troca de informação e enquanto as tarefas processam essa informação não contribuem para a computação.
  - **Necessidade de Sincronização**: enquanto as tarefas ficam à espera de sincronizar não contribuem para a computação.
  - **Latência** (tempo mínimo de comunicação entre dois pontos) **e Largura de Banda** (quantidade de informação comunicada por unidade de tempo): é boa prática enviar poucas mensagens grandes do que muitas mensagens pequenas.

Padrões de Comunicação

- **Comunicação Global**
  - Todas as tarefas podem comunicar entre si.
- **Comunicação Local**
  - A comunicação é restrita a tarefas vizinhas (e.g. método de Jacobi de diferenças finitas).

$$X_{i,j}^{t+1} = \frac{4X_{i,j}^{t} + X_{i-1,j}^{t} + X_{i+1,j}^{t} + X_{i,j-1}^{t} + X_{i,j+1}^{t}}{8}$$

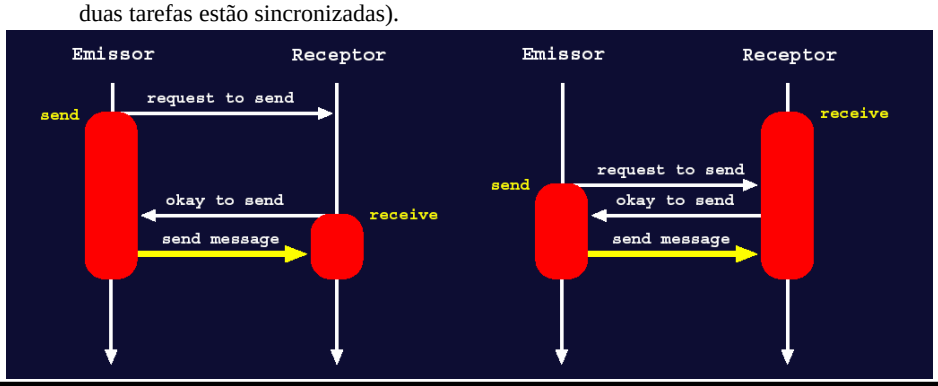


Padrões de Comunicação

- **Comunicação Estruturada**
  - Tarefas vizinhas constituem uma estrutura regular (e.g. árvore ou rede).
- **Comunicação Não-Estruturada**
  - Comunicação entre tarefas constituí um grafo arbitrário.
- **Comunicação Estática**
  - Os parceiros de comunicação não variam durante toda a execução.
- **Comunicação Dinâmica**
  - A comunicação é determinada pela execução e pode ser muito variável.

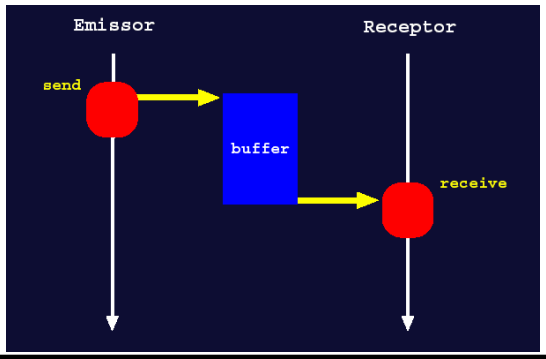
Padrões de Comunicação

- **Comunicação Síncrona**
  - As tarefas executam de forma coordenada e sincronizam na transferência de dados (e.g. protocolo das 3-fases ou *rendez-vous*: a comunicação apenas se concretiza quando as duas tarefas estão sincronizadas).



Padrões de Comunicação

- **Comunicação Assíncrona**
  - As tarefas executam de forma independente não necessitando de sincronizar para transferir dados (e.g. *buffering* de mensagens: o envio de mensagens não interfere com a execução do emissor).

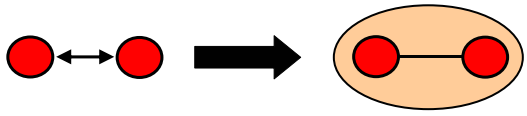


Aglomeração

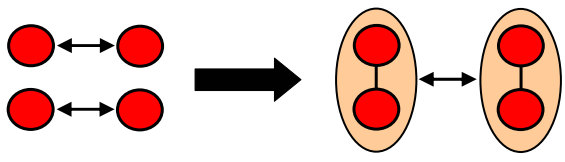
- Aglomeração é o processo de agrupar tarefas em tarefas maiores de modo a diminuir os custos de implementação do algoritmo paralelo e os custos de comunicação entre as tarefas.
- Custos de implementação do algoritmo paralelo:
  - O agrupamento em tarefas maiores permite uma maior reutilização do código do algoritmo sequencial na implementação do algoritmo paralelo.
  - No entanto, o agrupamento em tarefas maiores deve garantir a escalabilidade do algoritmo paralelo de modo a evitar posteriores alterações (e.g. optar por aglomerar as duas últimas dimensões duma matriz de dimensão 8×128×256 restringe a escalabilidade a um máximo de 8 processadores).

Aglomeração

- Custos de comunicação entre as tarefas:
  - O agrupamento de tarefas elimina os custos de comunicação entre essas tarefas e aumenta a **granularidade da computação**.



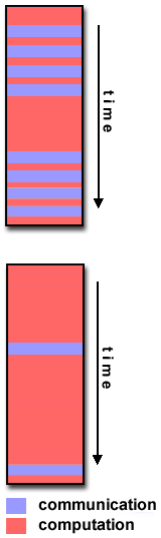
  - O agrupamento de tarefas com pequenas comunicações individuais em tarefas com comunicações maiores permite aumentar a **granularidade das comunicações** e reduzir o número total de comunicações.



Granularidade

- Períodos de computação são tipicamente separados por períodos de comunicação entre as tarefas. A granularidade é a medida qualitativa do rácio entre computação e comunicação.
- O número e o tamanho das tarefas em que a computação é agrupada determina a sua granularidade. A granularidade pode ser fina, média ou grossa.

"Como agrupar a computação de modo a obter o máximo desempenho?"



Granularidade

- **Granularidade Fina**
  - A computação é agrupada num grande número de pequenas tarefas.
  - O rácio entre computação e comunicação é baixo.
  - **(+)** Fácil de conseguir um balanceamento de carga eficiente.
  - **(–)** O tempo de computação de uma tarefa nem sempre compensa os custos de criação, comunicação e sincronização.
  - **(–)** Difícil de se conseguir melhorar o desempenho.
- **Granularidade Grossa**
  - A computação é agrupada num pequeno número de grandes tarefas.
  - O rácio entre computação e comunicação é grande.
  - **(–)** Difícil de conseguir um balanceamento de carga eficiente.
  - **(+)** O tempo de computação compensa os custos de criação, comunicação e sincronização.
  - **(+)** Oportunidades para se conseguir melhorar o desempenho.

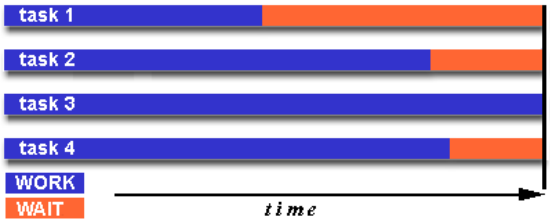
Mapeamento

- Mapeamento é o processo de atribuir tarefas a processadores de modo a maximizar a percentagem de ocupação e minimizar a comunicação entre processadores.
  - A percentagem de ocupação é óptima quando a computação é balanceada de forma igual pelos processadores, permitindo que todos começam e terminem as suas tarefas em simultâneo. A percentagem de ocupação decresce quando um ou mais processadores ficam suspensos enquanto os restantes continuam ocupados.
  - A comunicação entre processadores é menor quando tarefas que comunicam entre si são atribuídas ao mesmo processador. No entanto, este mapeamento nem sempre é compatível com o objectivo de maximizar a percentagem de ocupação.

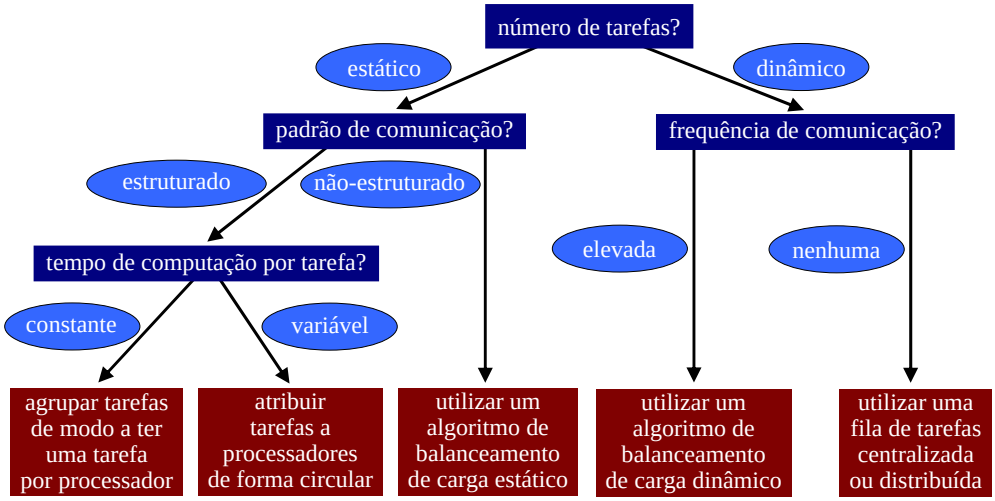
"Como conseguir o melhor compromisso entre maximizar ocupação e minimizar comunicação?"

Balanceamento de Carga

- O balanceamento de carga refere-se à capacidade de distribuir tarefas pelos processadores de modo a que todos os processadores estejam ocupados todo o tempo. O balanceamento de carga pode ser visto como uma função de minimização do tempo em que os processadores não estão ocupados.
- O balanceamento de carga pode ser estático (em tempo de compilação) ou dinâmico (em tempo de execução).



Balanceamento de Carga



Factores Limitativos do Desempenho

- **Código Sequencial**: existem partes do código que são inerentemente sequenciais (e.g. iniciar/terminar a computação).
- **Concorrência**: o número de tarefas pode ser escasso e/ou de difícil definição.
- **Comunicação**: existe sempre um custo associado à troca de informação e enquanto as tarefas processam essa informação não contribuem para a computação.
- **Sincronização**: a partilha de dados entre as várias tarefas pode levar a problemas de contenção no acesso à memória e enquanto as tarefas ficam à espera de sincronizar não contribuem para a computação.
- **Granularidade**: o número e o tamanho das tarefas é importante porque o tempo que demoram a ser executadas tem de compensar os custos da execução em paralelo (e.g. custos de criação, comunicação e sincronização).
- **Balanceamento de Carga**: ter os processadores maioritariamente ocupados durante toda a execução é decisivo para o desempenho global do sistema.

Principais Modelos de Programação Paralela

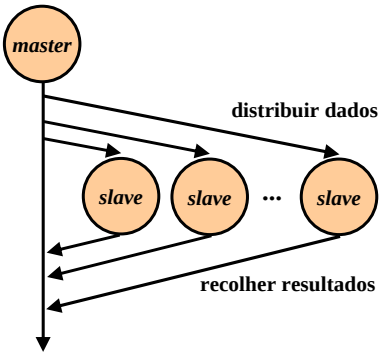
- **Programação em Memória Partilhada**
  - Programação usando processos ou *threads*.
  - Decomposição do domínio ou funcional com granularidade fina, média ou grossa.
  - Comunicação através de memória partilhada.
  - Sincronização através de mecanismos de exclusão mútua.
- **Programação em Memória Distribuída**
  - Programação usando troca de mensagens.
  - Decomposição do domínio com granularidade grossa.
  - Comunicação e sincronização por troca de mensagens.

Principais Paradigmas de Programação Paralela

- Apesar da diversidade de problemas aos quais podemos aplicar a programação paralela, o desenvolvimento de algoritmos paralelos pode ser classificado num conjunto relativamente pequeno de diferentes paradigmas, em que cada paradigma representa uma classe de algoritmos que possuem o mesmo tipo de controle:
  - *Master/Slave*
  - *Single Program Multiple Data (SPMD)*
  - *Data Pipelining*
  - *Divide and Conquer*
  - *Speculative Parallelism*
- A escolha do paradigma a aplicar a um dado problema é determinado pelo:
  - Tipo de paralelismo inerente ao problema: decomposição do domínio ou funcional.
  - Tipo de recursos computacionais disponíveis: nível de granularidade que pode ser eficientemente suportada pelo sistema.

Master/Slave

- Este paradigma divide a computação em duas entidades distintas: o processo *master* e o conjunto dos processos *slaves*:
  - O *master* é o responsável por decompor o problema em tarefas, distribuir as tarefas pelos *slaves* e recolher os resultados parciais dos *slaves* de modo a calcular o resultado final.
  - O ciclo de execução dos *slaves* é muito simples: obter uma tarefa do *master*, processar a tarefa e enviar o resultado de volta para o *master*.

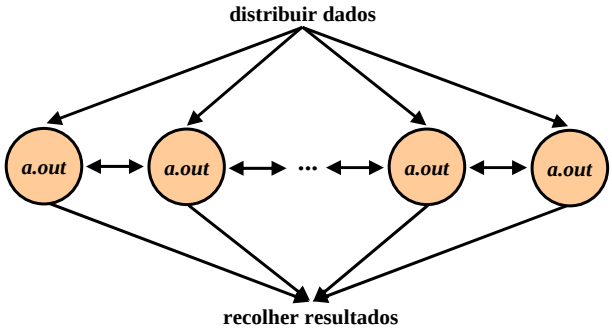


Master/Slave

- O balanceamento de carga pode ser estático ou dinâmico:
  - É estático quando a divisão de tarefas é feita no início da computação. O balanceamento estático permite que o *master* também participe na computação.
  - É dinâmico quando o número de tarefas excede o número de processadores ou quando o número de tarefas ou o tempo de execução das tarefas é desconhecido no início da computação.
- Como só existe comunicação entre o *master* e os *slaves*, este paradigma consegue bons desempenhos e um elevado grau de escalabilidade.
  - No entanto, o controle centralizado no *master* pode ser um problema quando o número de *slaves* é elevado. Nesses casos é possível aumentar a escalabilidade do paradigma considerando vários *masters* em que cada um controla um grupo diferente de *slaves*.

Single Program Multiple Data (SPMD)

- Neste paradigma todos os processos executam o mesmo programa (executável) mas sobre diferentes partes dos dados. Este paradigma é também conhecido como:
  - *Geometric Parallelism*
  - *Data Parallelism*

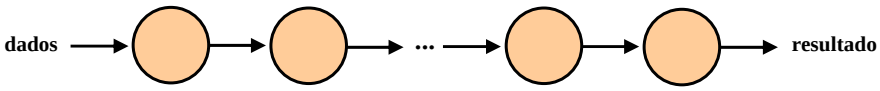


Single Program Multiple Data (SPMD)

- Tipicamente, os dados são bem distribuídos (mesma quantidade e regularidade) e o padrão de comunicação é bem definido (estruturado, estático e local):
  - Os dados ou são lidos individualmente por cada processo ou um dos processos é o responsável por ler todos os dados e depois distribui-los pelos restantes processos.
  - Os processos comunicam quase sempre com processos vizinhos e apenas esporadicamente existem pontos de sincronização global.
- Como os dados são bem distribuídos e o padrão de comunicação é bem definido, este paradigma consegue bons desempenhos e um elevado grau de escalabilidade.
  - No entanto, este paradigma é muito sensível a falhas. A perca de um processador causa necessariamente o encravamento da computação no próximo ponto de sincronização global.

Data Pipelining

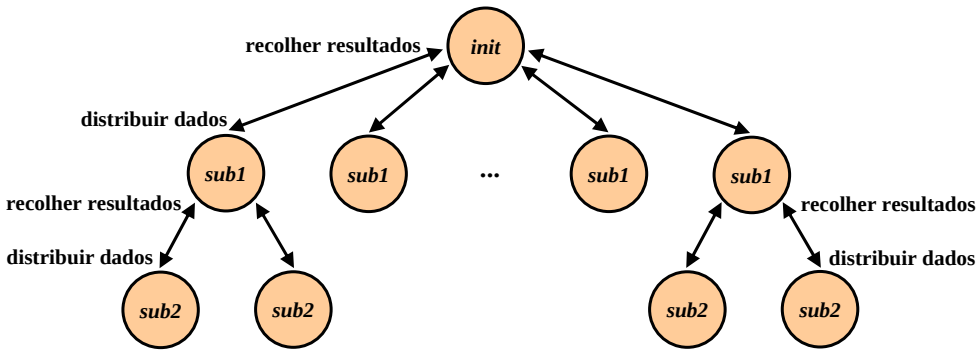
- Este paradigma utiliza uma decomposição funcional do problema em que cada processo executa apenas uma parte do algoritmo total. Este paradigma é também conhecido como:
  - *Data Flow Parallelism*



- O padrão de comunicação é bem definido e bastante simples:
  - Os processos são organizados em sequência (*pipeline*) e cada processo só troca informação com o processo seguinte.
  - Toda a comunicação pode ser completamente assíncrona.
- O bom desempenho deste paradigma é directamente dependente da capacidade de balancear a carga entre as diferentes etapas da *pipeline*.

Divide and Conquer

- Este paradigma utiliza uma divisão recursiva do problema inicial em sub-problemas independentes (instâncias mais pequenas do problema inicial) cujos resultados são depois combinados para obter o resultado final.



Divide and Conquer

- A computação fica organizada numa espécie de árvore virtual:
  - Os processos nos nós folha processam as subtarefas.
  - Os restantes processos são responsáveis por criar as subtarefas e por agregar os seus resultados parciais.
- O padrão de comunicação é bem definido e bastante simples:
  - Como as subtarefas são totalmente independentes não é necessário qualquer tipo de comunicação durante o processamento das mesmas.
  - Apenas existe comunicação entre o processo que cria as subtarefas e os processos que as processam.
- No entanto, o processo de divisão em tarefas e de agregação de resultados também pode ser realizado em paralelo, o que requer comunicação entre os processos:
  - As tarefas podem ser colocadas numa fila de tarefas única e centralizada ou podem ser distribuídas por diferentes filas de tarefas associadas à resolução de cada sub-problema.

Speculative Parallelism

- É utilizado quando as dependências entre os dados são tão complexas que tornam difícil explorar paralelismo usando os paradigmas anteriores.
- Este paradigma introduz paralelismo nos problemas através da execução de computações especulativas:
  - A ideia é antecipar a execução de computações relacionadas com a computação corrente na assumpção optimista de que essas computações serão necessariamente realizadas posteriormente.
  - Quando isso não acontece, pode ser necessário repor partes do estado da computação de modo a não violar a consistência do problema em resolução.
- Uma outra aplicação deste paradigma é quando se utiliza simultaneamente diversos algoritmos para resolver um determinado problema e se escolhe aquele que primeiro obtiver uma solução.

Principais Paradigmas de Programação Paralela

	Decomposição	Distribuição
Master/Slave	estática	dinâmica
Single Program Multiple Data (SPMD)	estática	estática/dinâmica
Data Pipelining	estática	estática
Divide and Conquer	dinâmica	dinâmica
Speculative Parallelism	dinâmica	dinâmica