2º curso / 2º cuatr.

Grado en
Ing. Informática

Arquitectura de Computadores
Tema 2

Programación paralela

Material elaborado por los profesores responsables de la asignatura:
Mancia Anguita – Julio Ortega

ugr | Universidad de Granada

ETSIIT
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación

ATC
Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores
UNIVERSIDAD DE GRANADA

Lecciones

- Lección 4. Herramientas, estilos y estructuras en programación paralela
  - Problemas que plantea la programación paralela al programador. Punto de partida
  - Herramientas para obtener código paralelo
  - Estilos/paradigmas de programación paralela
  - Estructuras típicas de códigos paralelos
- Lección 5. Proceso de paralelización
- Lección 6. Evaluación de prestaciones en procesamiento paralelo

Objetivos Lección 4

- Distinguir entre los diferentes tipos de herramientas de programación paralela: compiladores paralelos, lenguajes paralelos, API Directivas y API de funciones.
- Distinguir entre los diferentes tipos de comunicaciones colectivas.
- Diferenciar el estilo/paradigma de programación de paso de mensajes del de variables compartidas.
- Diferenciar entre OpenMP y MPI en cuanto a su estilo de programación y tipo.
- Distinguir entre las estructuras de tareas/procesos/treads de master-slave, cliente-servidor, descomposición de dominio, flujo de datos o segmentación, y divide y vencerás.

Bibliografía Lección 4

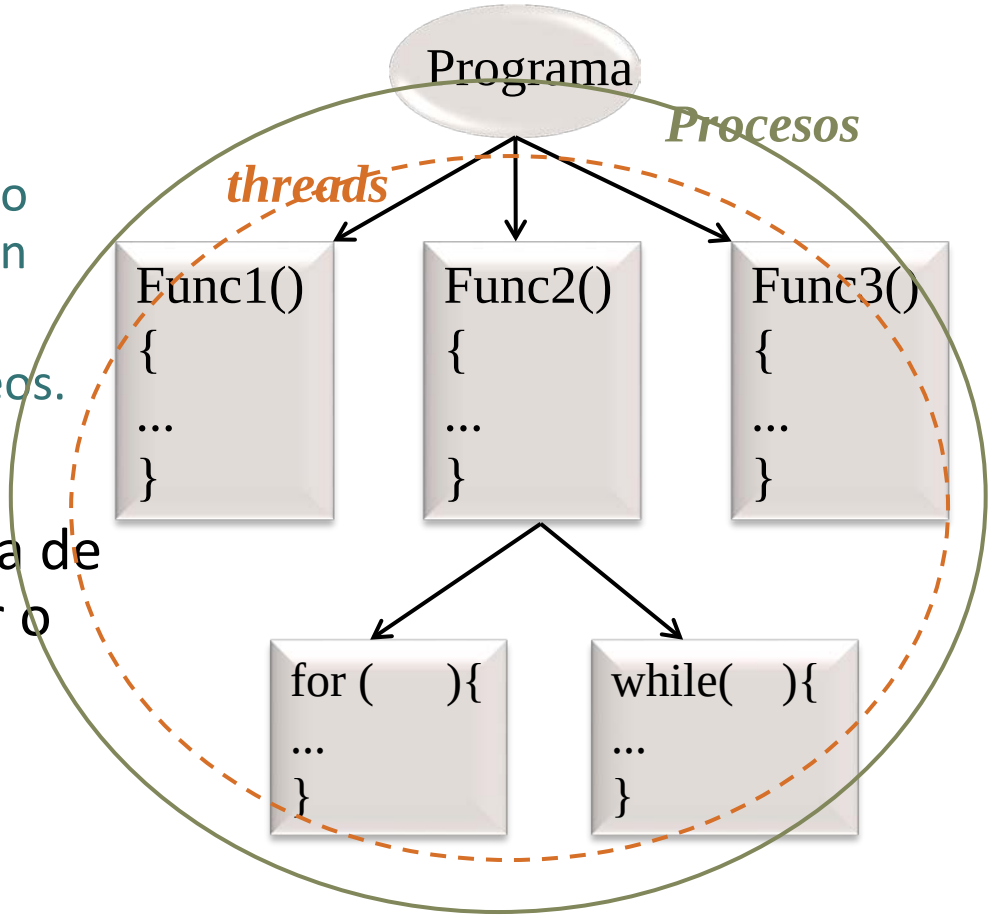
- Fundamental
  - Capítulo 7. Sección 7.4. J. Ortega, M. Anguita, A. Prieto. "Arquitectura de Computadores". ESII/C.1 ORT arq
- Complementaria
  - Thomas Rauber, Gudula Rünger. "Parallel Programming: for Multicore and Cluster Systems." Springer, 2010. Disponible en línea (biblioteca UGR): http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04818-0
  - Barry Wilkinson."Parallel programming : techniques and applications using networked workstations and parallel computer", 2005. ESIIT/D.1 WIL par

Contenido Lección 4

- Problemas que plantea la programación paralela al programador. Punto de partida
- Herramientas para obtener código paralelo
- Estilos/paradigmas de programación paralela
- Estructuras típicas de códigos paralelos

Problemas que plantea la programación paralela

- Nuevos problemas, respecto a programación secuencial:
  - División en unidades de cómputo independientes (tareas).
  - Agrupación/asignación de tareas o carga de trabajo (código, datos) en procesos/threads.
  - Asignación a procesadores/núcleos.
  - Sincronización y comunicación.
- Los debe abordar la herramienta de programación o el programador o ambos



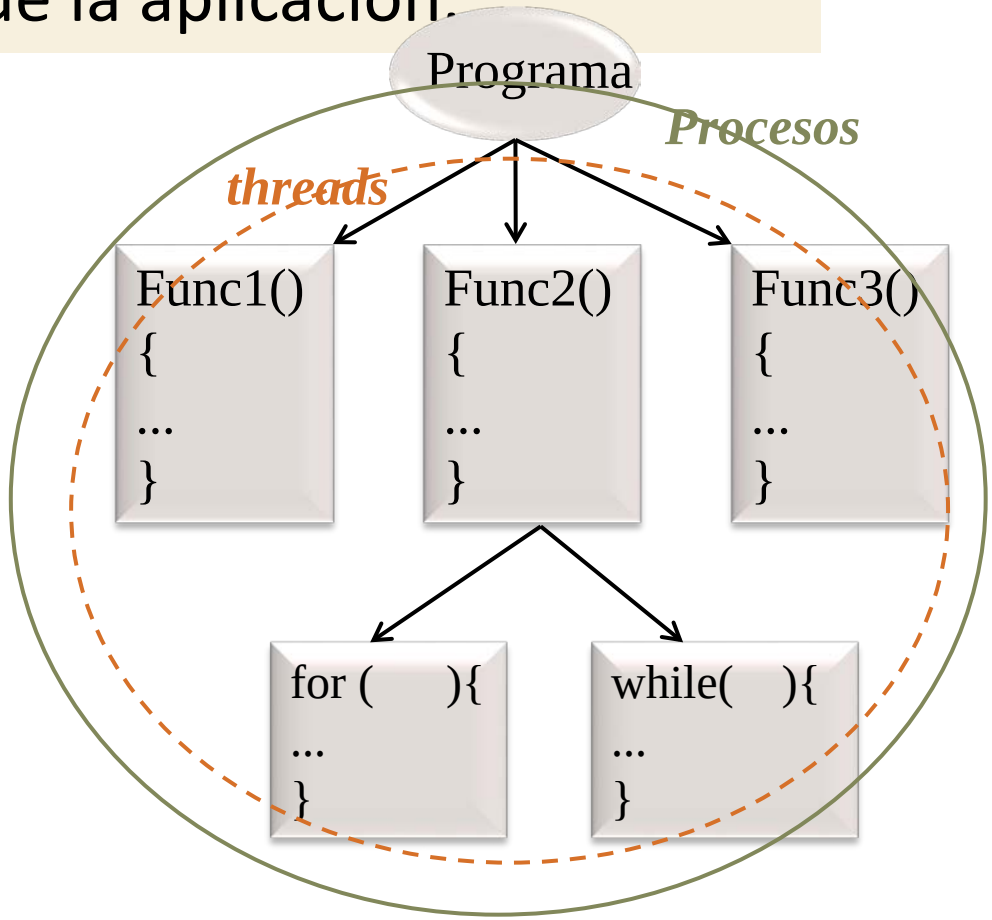
Punto de partida

- Partir de una versión secuencial.
- Descripción o definición de la aplicación.

Apoyo:

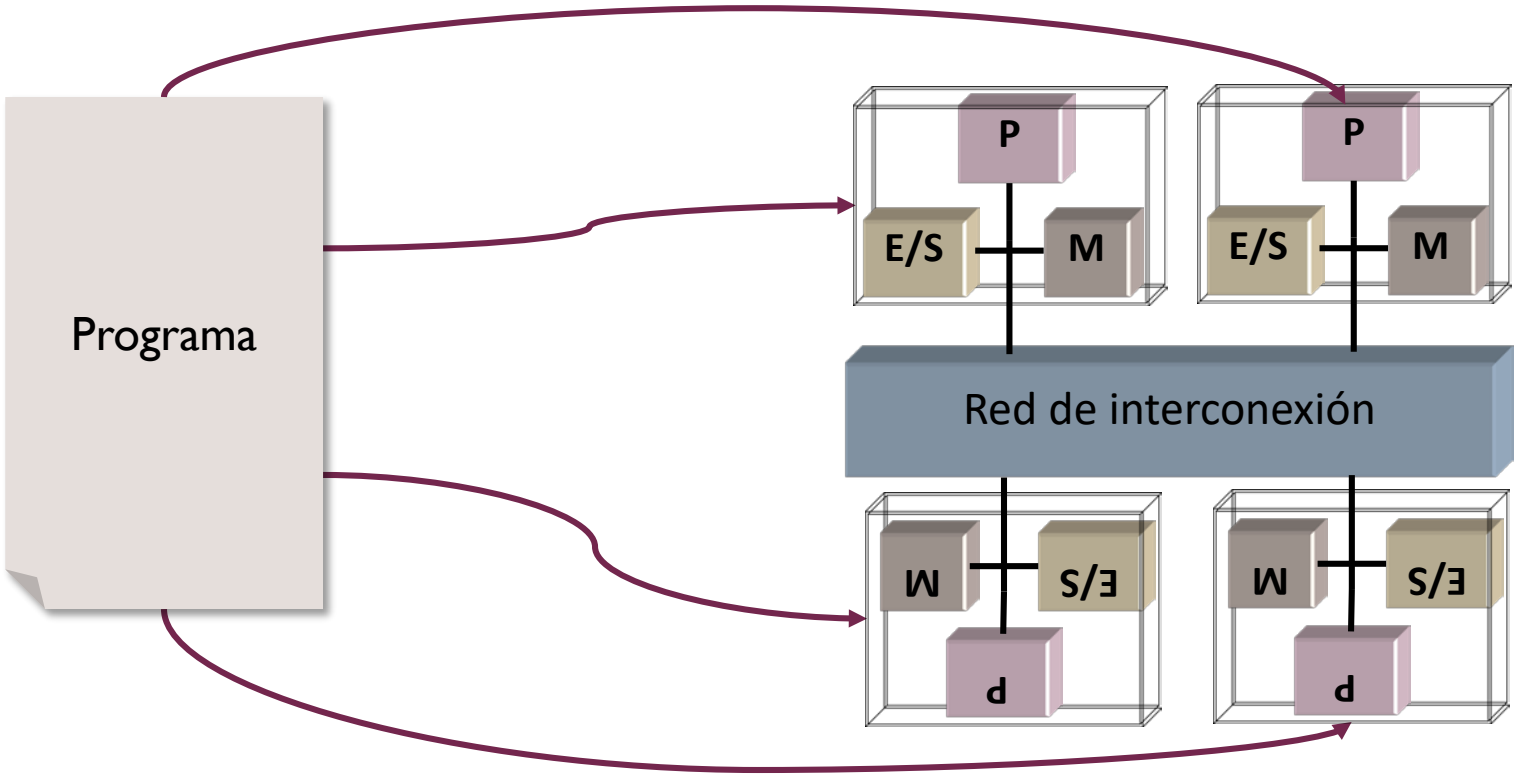
- Programa paralelo que resuelva un problema parecido.
- Versiones paralelas u optimizadas de bibliotecas de funciones:

BLAS, LAPACK, …



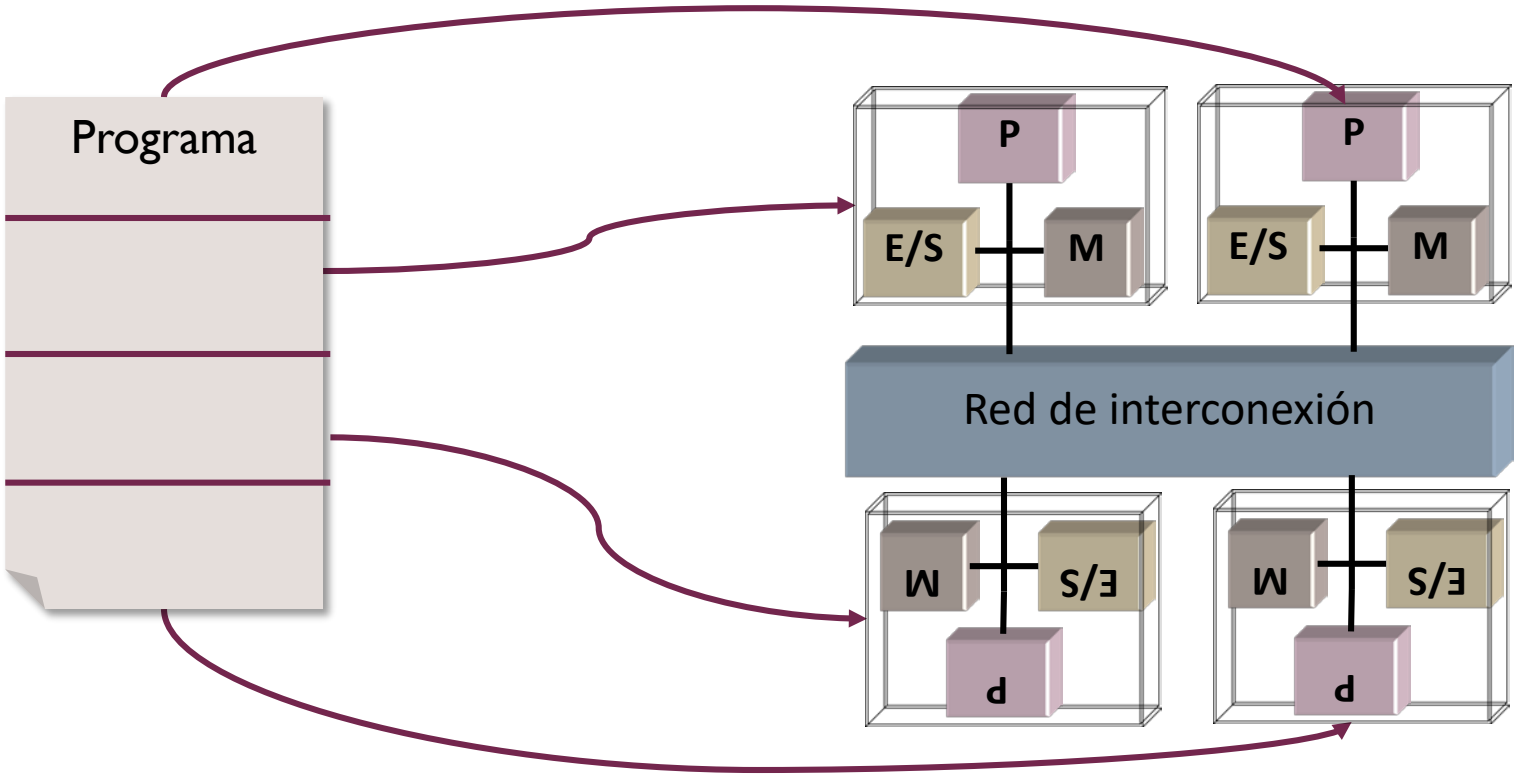
Modos de programación MIMD

- SPMD (*Single-Program Multiple Data*)



Modos de programación MIMD

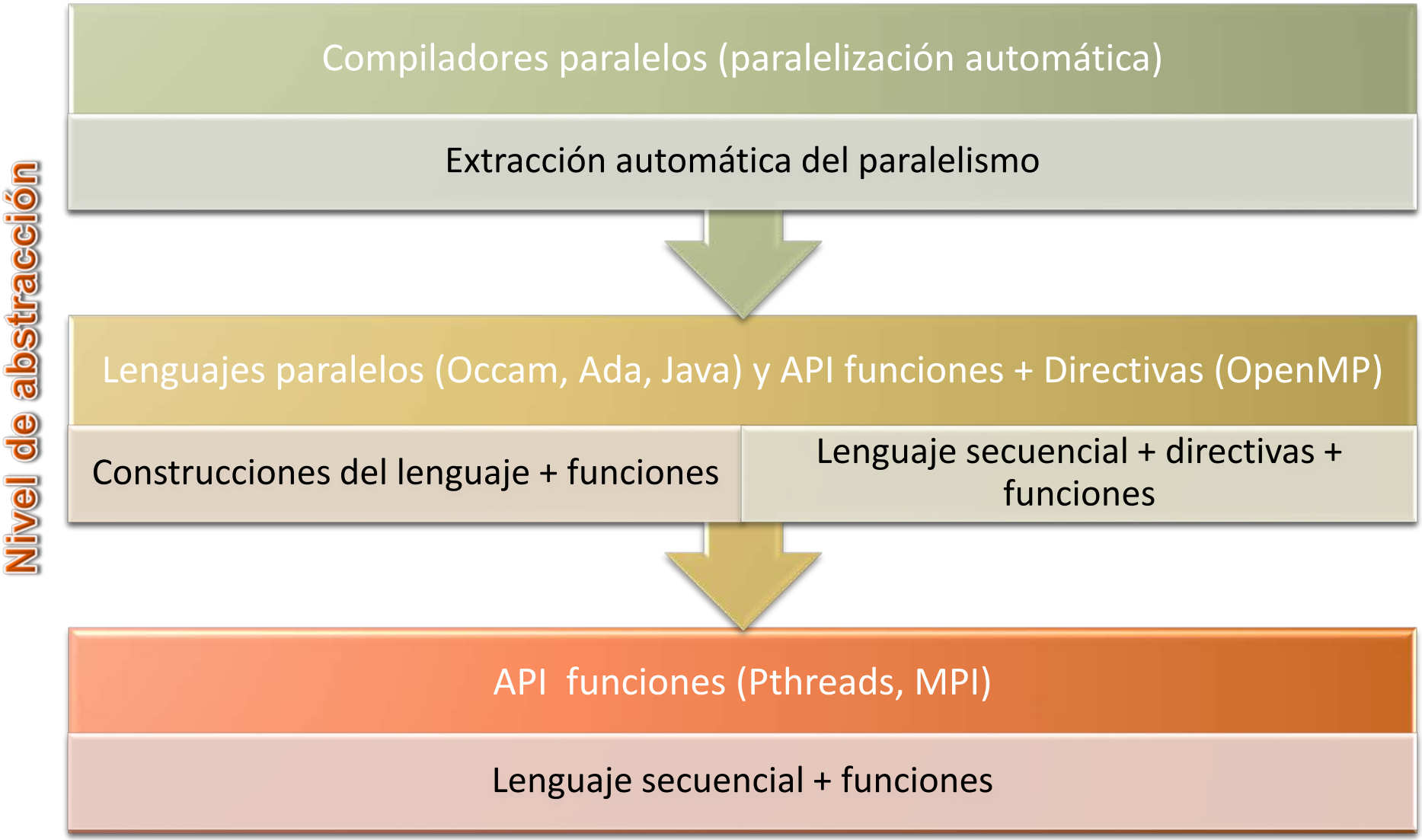
- MPMD (*Multiple-Program Multiple Data*)



Contenido Lección 4

- Problemas que plantea la programación paralela al programador. Punto de partida
- Herramientas para obtener código paralelo
- Estilos/paradigmas de programación paralela
- Estructuras típicas de códigos paralelos

Herramientas de programación paralela



Herramientas para obtener programas paralelos

- Las herramientas permiten de forma implícita o explícita (lo hace el programador):
  - Localizar paralelismo o descomponer en tareas independientes (descomposition)
  - Asignar las tareas, es decir, la carga de trabajo (código + datos), a procesos/threads (*scheduling*)
  - Crear y terminar procesos/threads (o enrolar y desenrolar en un grupo)
  - Comunicar y sincronizar procesos/threads
- El programador, la herramienta o el SO se encarga de
  - Asignar procesos/threads a unidades de procesamiento (*mapping*)

Ejemplo: cálculo de PI con OpenMP/C


```
#include <omp.h>
#define NUM_THREADS 4
main(int argc, char **argv)  {
  double ancho,x, sum=0;  int intervalos, i;
  intervalos = atoi(argv[1]);
  ancho = 1.0/(double) intervalos;
  omp_set_num_threads(NUM_THREADS);
#pragma omp parallel
{
 #pragma omp for reduction(+:sum) private(x) \
                                schedule(dynamic)
  for (i=0;i< intervalos; i++) {
      x = (i+0.5)*ancho; sum = sum + 4.0/(1.0+x*x);
  }
}
  sum* = ancho;
}
```

Crear y Terminar

Comunicar y sincronizar

Localizar

Agrupar/Asignar

Ejemplo: cálculo de PI en MPI/C


```
#include <mpi.h>
main(int argc, char **argv)  {
 double ancho,x,sum,lsum; int intervalos,i,nproc,iproc;
    if (MPI_Init(&argc, &argv) != MPI_SUCCESS) exit(1);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &nproc);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &iproc);
    intervalos=atoi(argv[1]);
    ancho=1.0/(double) intervalos;  lsum=0;
    for (i=iproc; i<intervalos; i+=nproc) {
        x = (i+0.5)*ancho;  lsum+= 4.0/(1.0+x*x);
    }
    lsum*= ancho;
    MPI_Reduce(&lsum, &sum, 1, MPI_DOUBLE,
                  MPI_SUM,0,MPI_COMM_WORLD);
    MPI_Finalize();
}
```

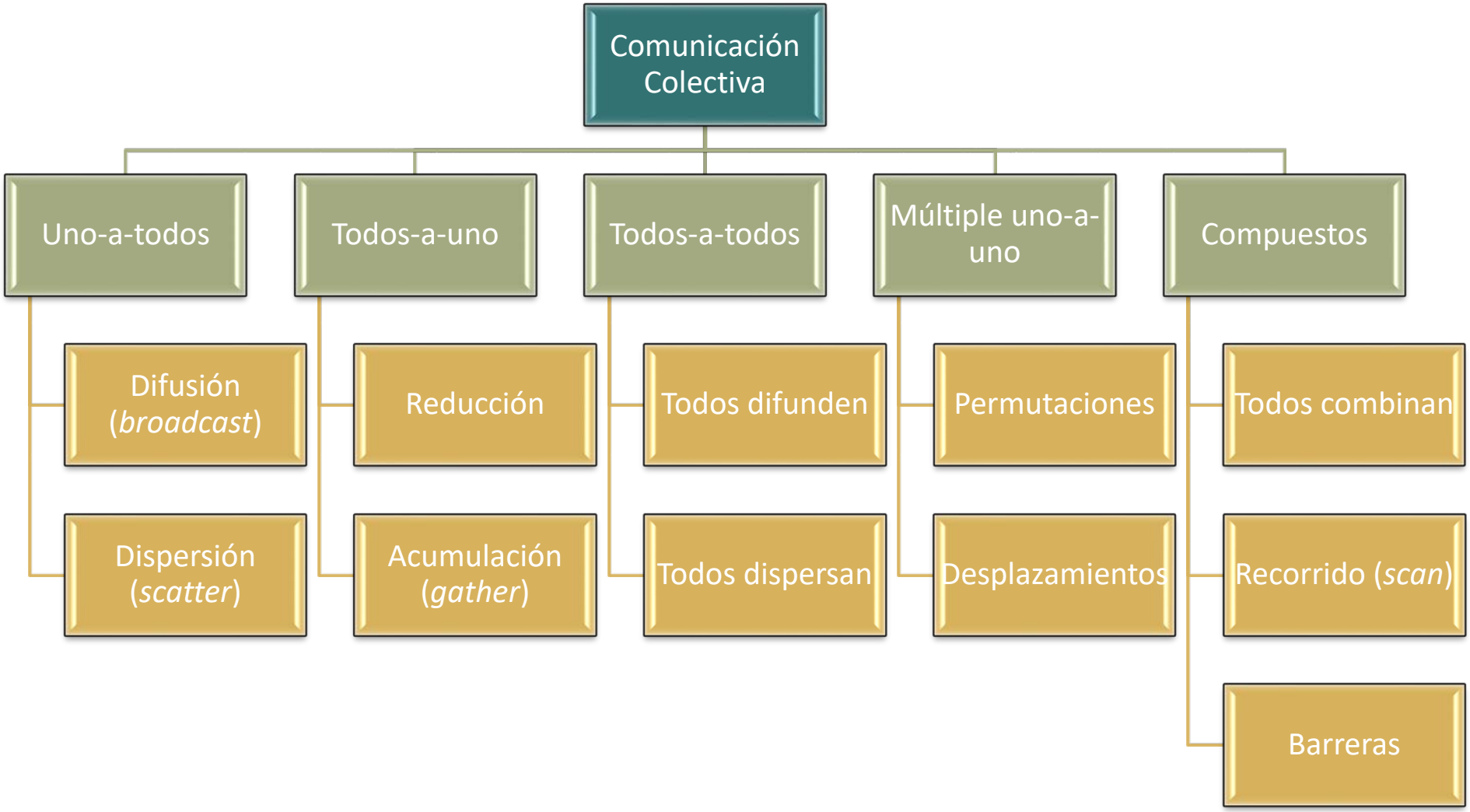
Enrolar

Localizar y Asignar

Comunicar/sincronizar

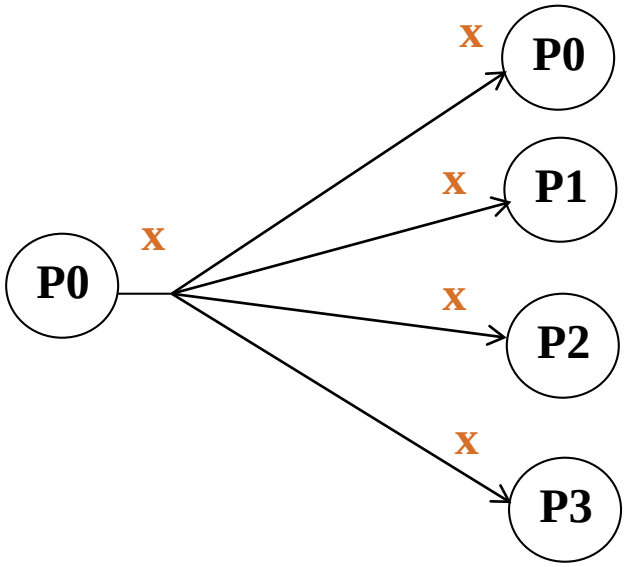
Desenrolar

Comunicaciones colectivas

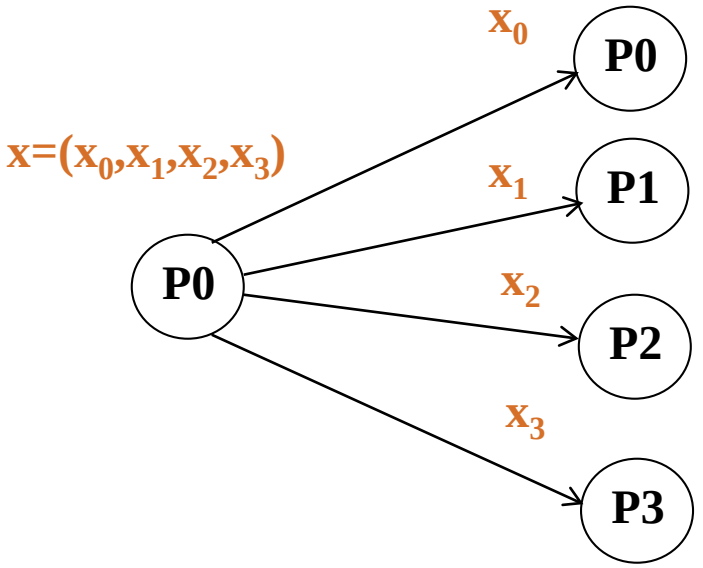


Comunicación uno-a-todos

Difusión (*broadcast*)

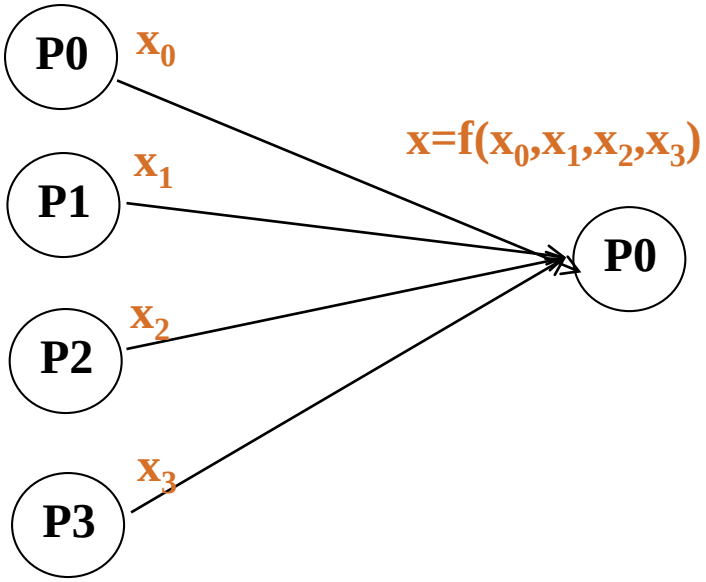


Dispersión (*scatter*)

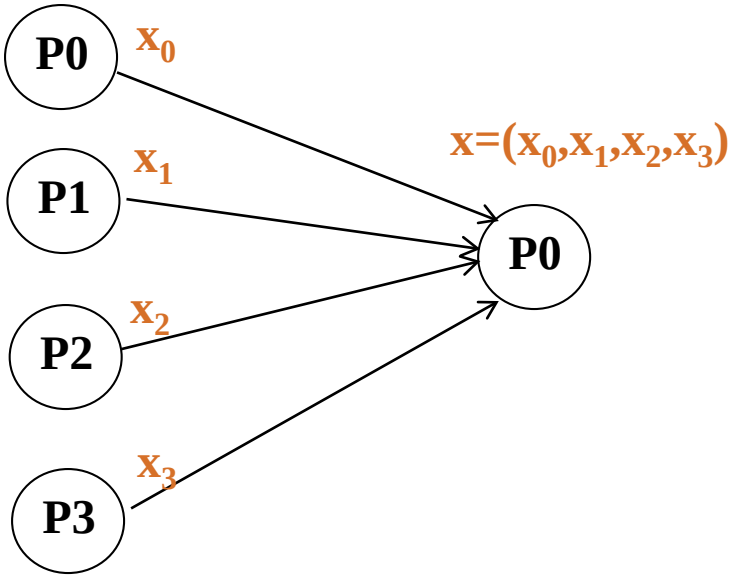


Comunicación todos-a-uno

Reducción

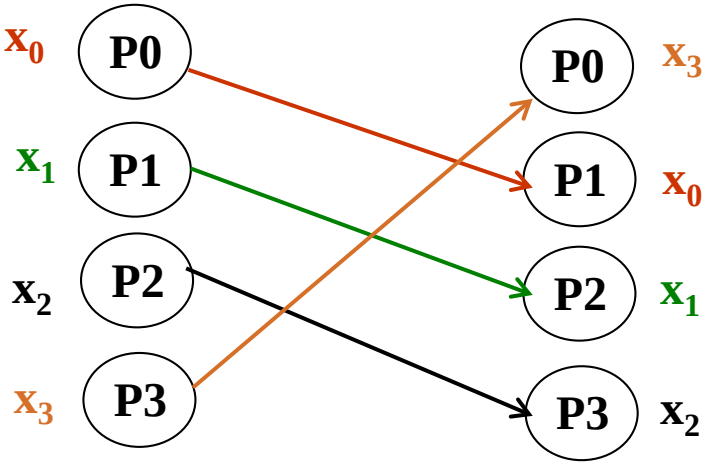


Acumulación (*gather*)

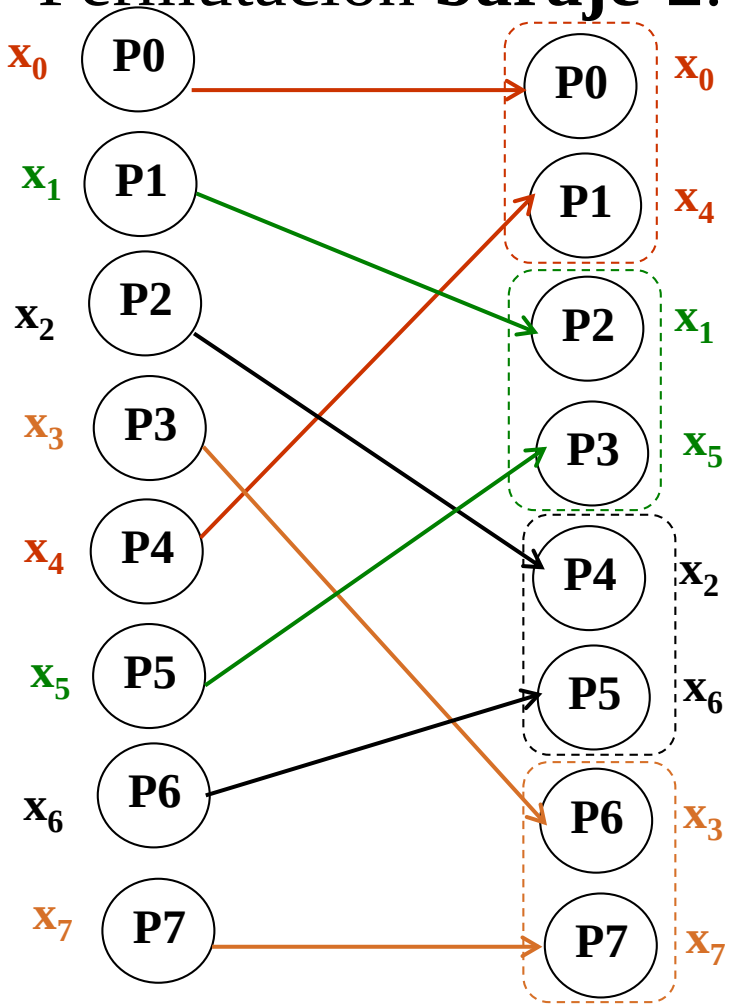


Comunicación múltiple uno-a-uno

Permutación **rotación**:

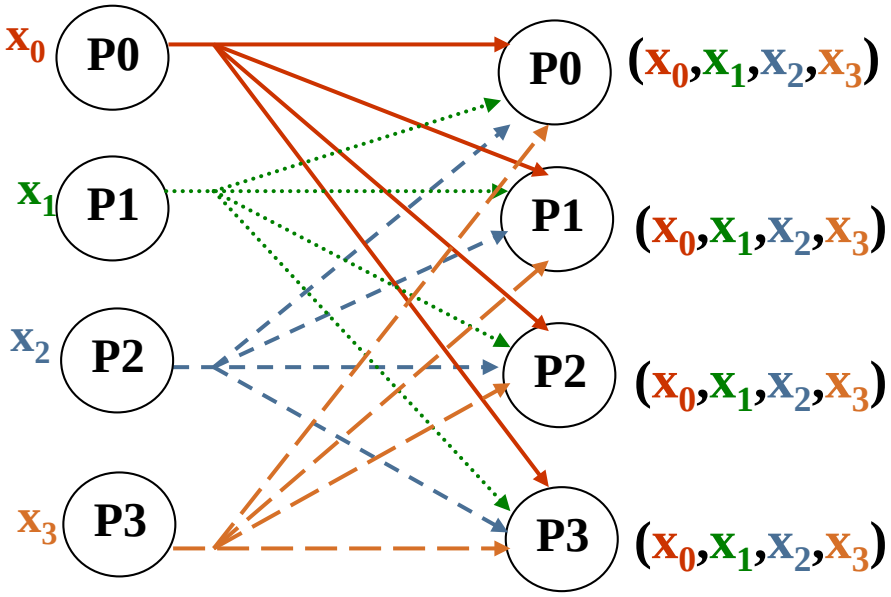


Permutación **baraje-2**:

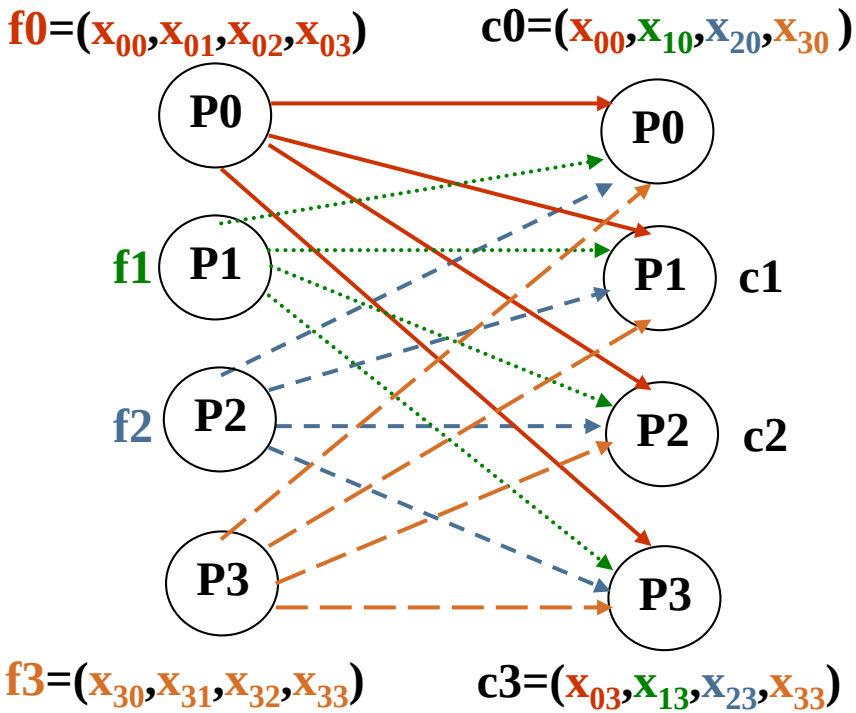


Comunicación todos-a-todos

Todos Difunden (*all-broadcast*) o chismorreo (*gossiping*)



Todos Dispersan (*all-scatter*)

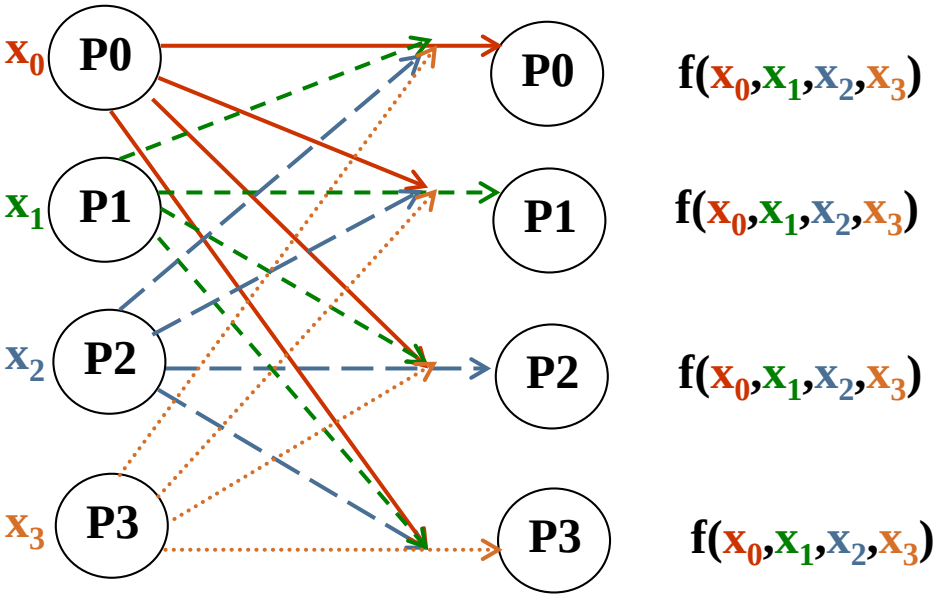


c= columna matriz

f= fila matriz

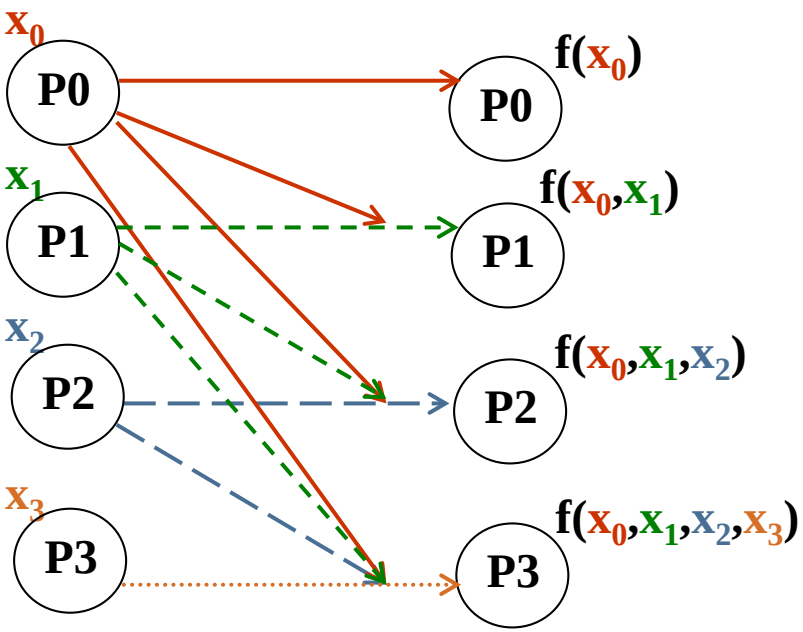
Servicios compuestos

Todos combinan

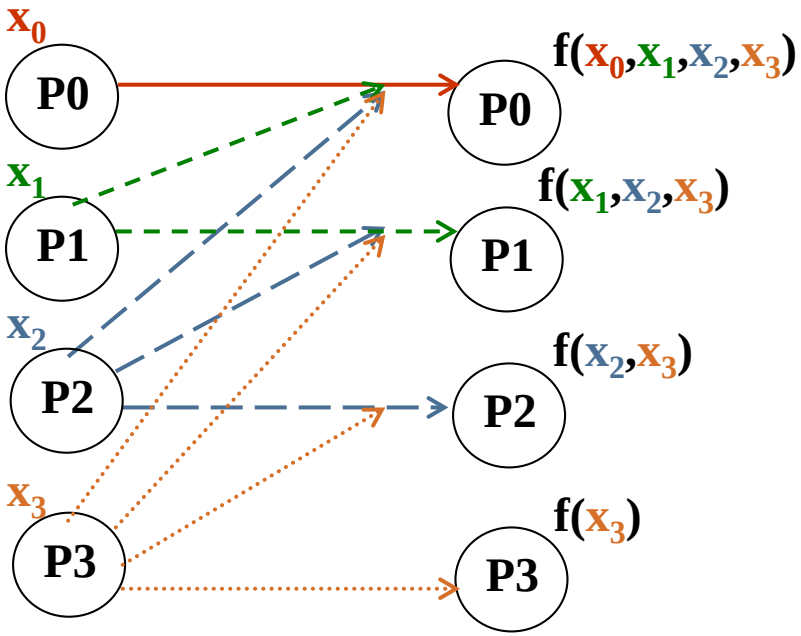


Servicios compuestos

Recorrido (scan) prefijo paralelo



Recorrido sufijo paralelo



Ejemplo: comunicación colectiva en OpenMP

Uno-a-todos	Difusión (Seminario pract. 2)	✓ Cláusula `firstprivate` (desde thread 0) ✓ Directiva `single` con cláusula `copyprivate` ✓ Directiva `threadprivate` y uso de cláusula `copyin` en directiva `parallel` (desde thread 0)
Todos-a-uno	Reducción (Seminario pract. 2)	✓ Cláusula `reduction`
Servicios compuestos	Barreras (Seminario pract. 1)	✓ Directiva `barrier`

Ejemplo: comunicación en MPI

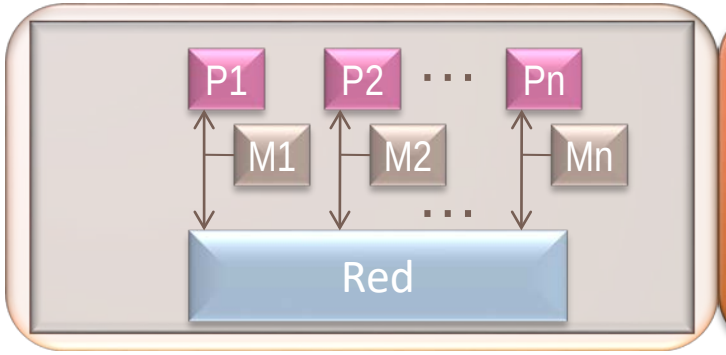
Uno-a-uno	Asíncrona	`MPI_Send()/MPI_Receive()`
Uno-a-todos	Difusión	`MPI_Bcast()`
	Dispersión	`MPI_Scatter()`
Todos-a-uno	Reducción	`MPI_Reduce()`
	Acumulación	`MPI_Gather()`
Todos-a-todos	Todos difunden	`MPI_Allgather()`
Servicios compuestos	Todos combinan	`MPI_Allreduce()`
	Barreras	`MPI_Barrier()`
	Scan	`MPI_Scan`

Detalles de la programación con MPI en la asignatura: **A**rquitecturas y **C**omputación de **A**ltas **P**restaciones (IC.SCAP.ACAP – Especialidad (IC), Materia (SCAP), Asignatura (ACAP))

Contenido Lección 4

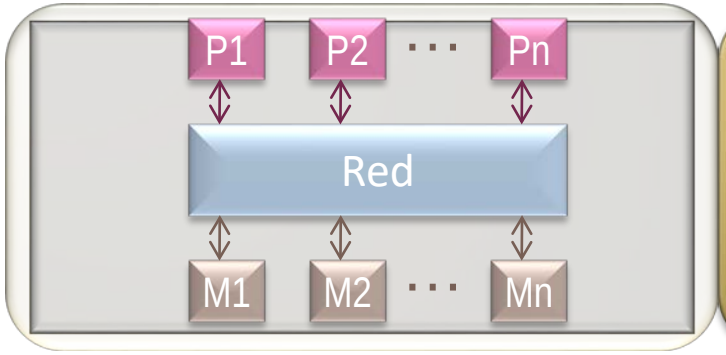
- Problemas que plantea la programación paralela al programador. Punto de partida
- Herramientas para obtener código paralelo
- Estilos/paradigmas de programación paralela
- Estructuras típicas de códigos paralelos

Estilos de programación y arquitecturas paralelas



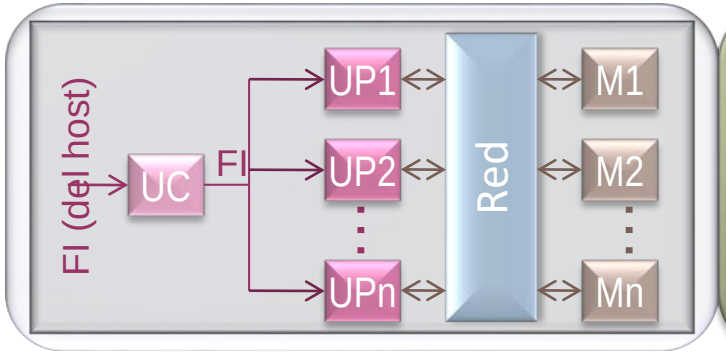
Paso de mensajes

- Multicomputadores



Variables compartidas

- Multiprocesadores



Paralelismo de datos

- Procesadores matriciales, GPU (*stream processing*)

Estilos de programación y herramientas de programación

- Paso de mensajes (*message passing*)
  - Lenguajes de programación: Ada, Occam
  - API (Bibliotecas de funciones): MPI, PVM
- Variables compartidas (*shared memory*, *shared variables*)
  - Lenguajes de programación: Ada, Java
  - API (directivas del compilador + funciones): **OpenMP**
  - API (Bibliotecas de funciones): POSIX Threads, shmem, Intel TBB (*Threading Building Blocks*)
- Paralelismo de datos (*data parallelism*)
  - Lenguajes de programación: HPF (*High Performance Fortran*), Fortran 95 (`forall`, operaciones con matrices/vectores)
  - API (funciones - *stream processing*): Nvidia CUDA

Contenido Lección 4

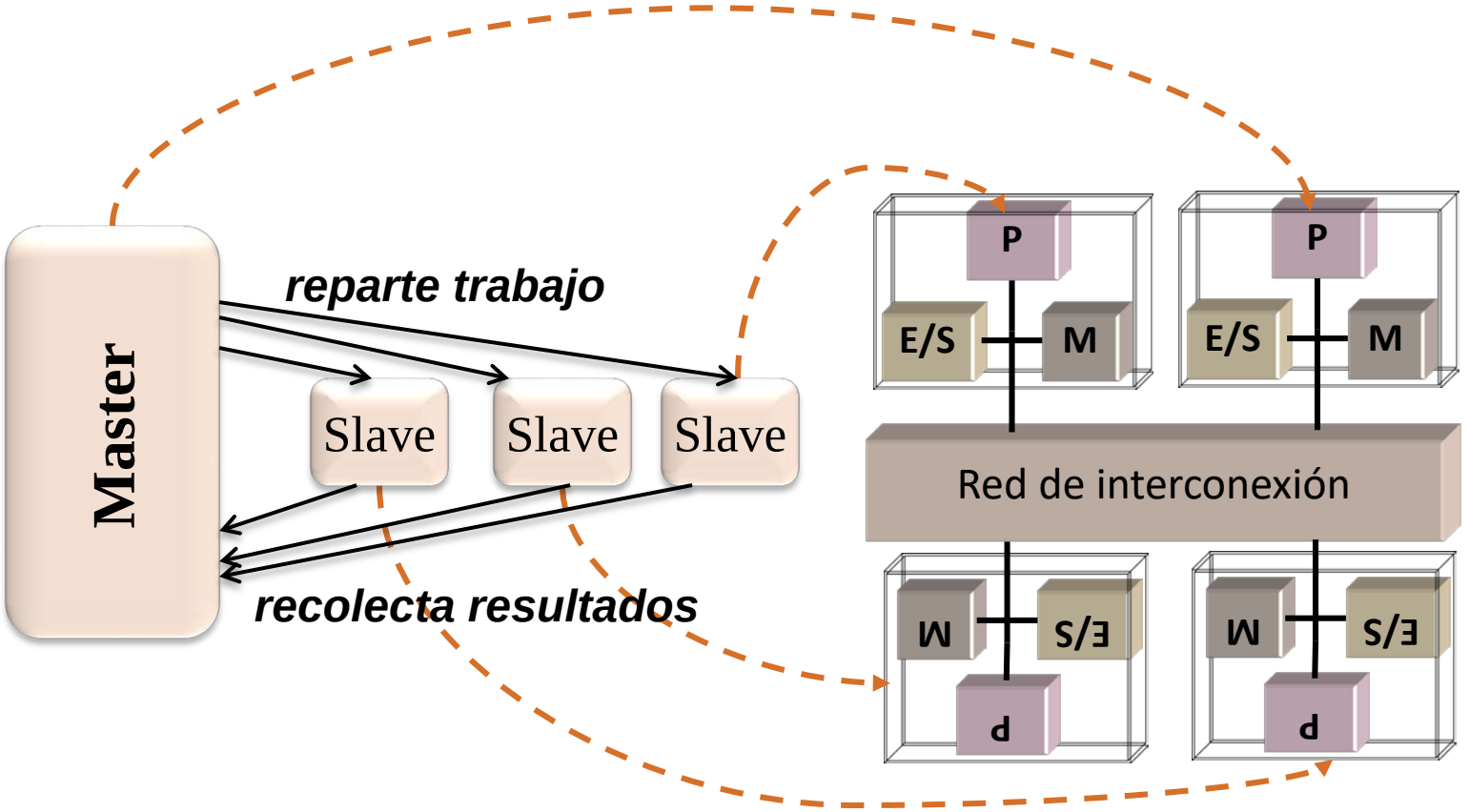
- Problemas que plantea la programación paralela al programador. Punto de partida
- Herramientas para obtener código paralelo
- Estilos/paradigmas de programación paralela
- Estructuras típicas de códigos paralelos

Estructuras típicas de procesos/threads/tareas

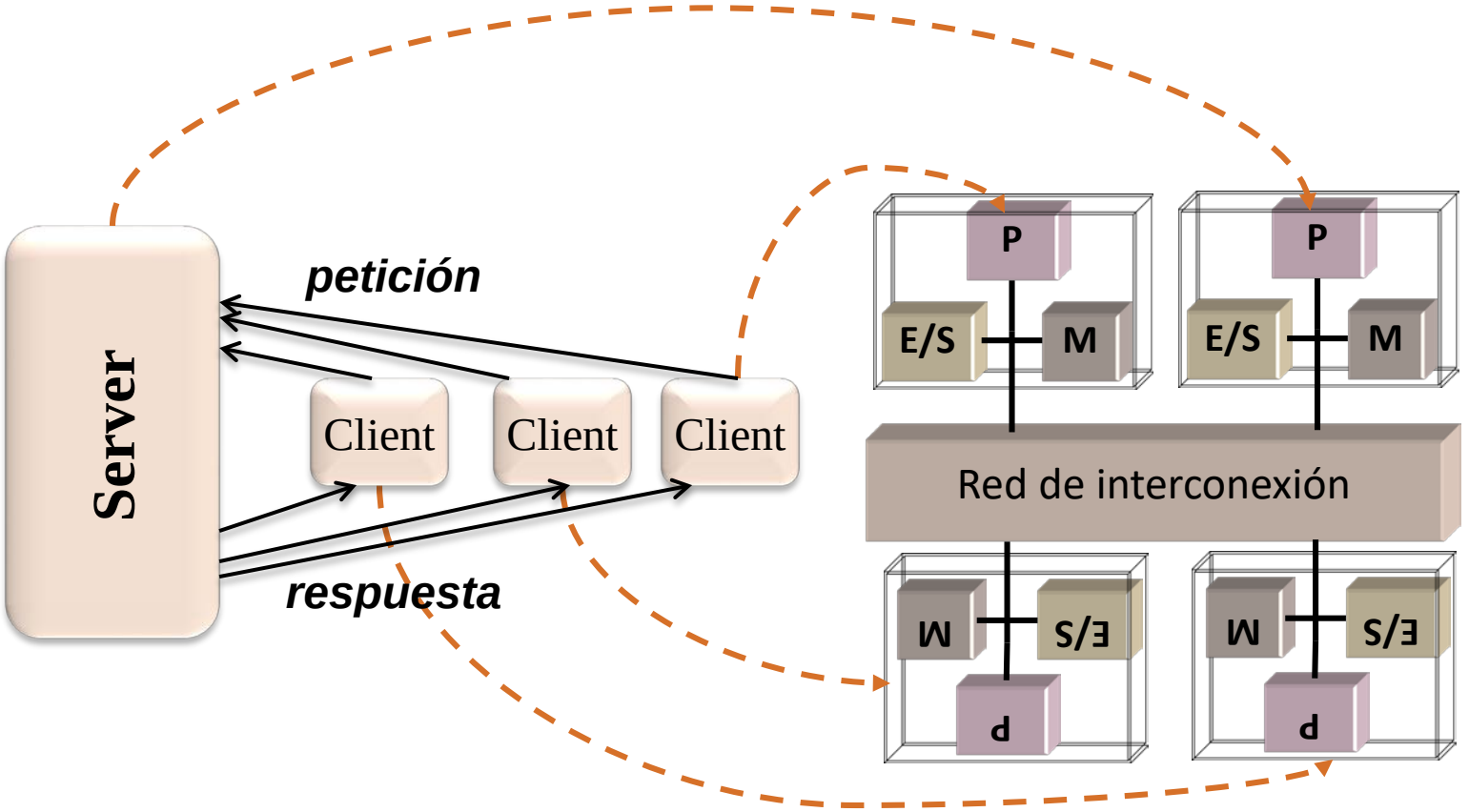
Estructuras típicas de procesos/ threads/tareas en código paralelo

- Descomposición de dominio o descomposición de datos
- cliente/servidor
- Divide y vencerás o descomposición recursiva
- Segmentación o flujo de datos
- *Master-Slave*, o granja de tareas

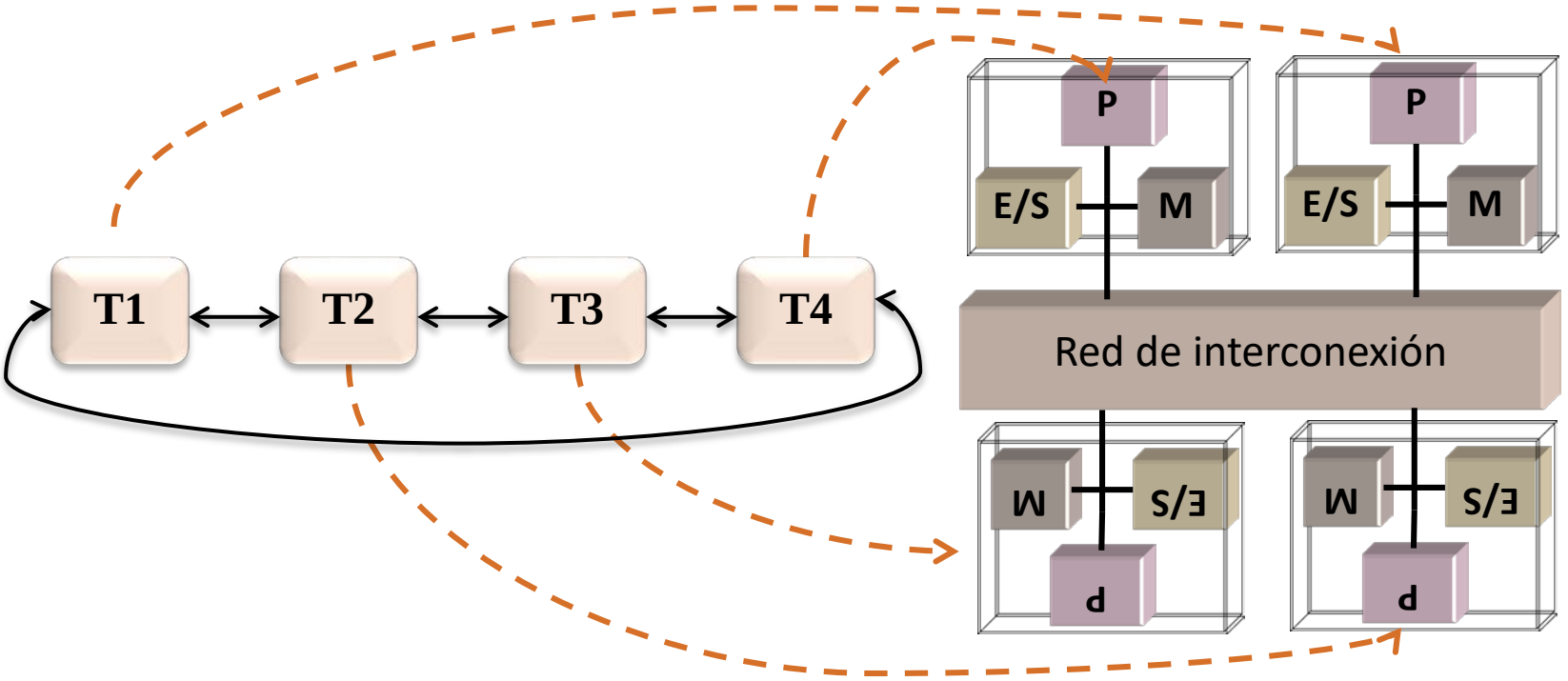
Master-Slave o granja de tareas



Cliente-Servidor

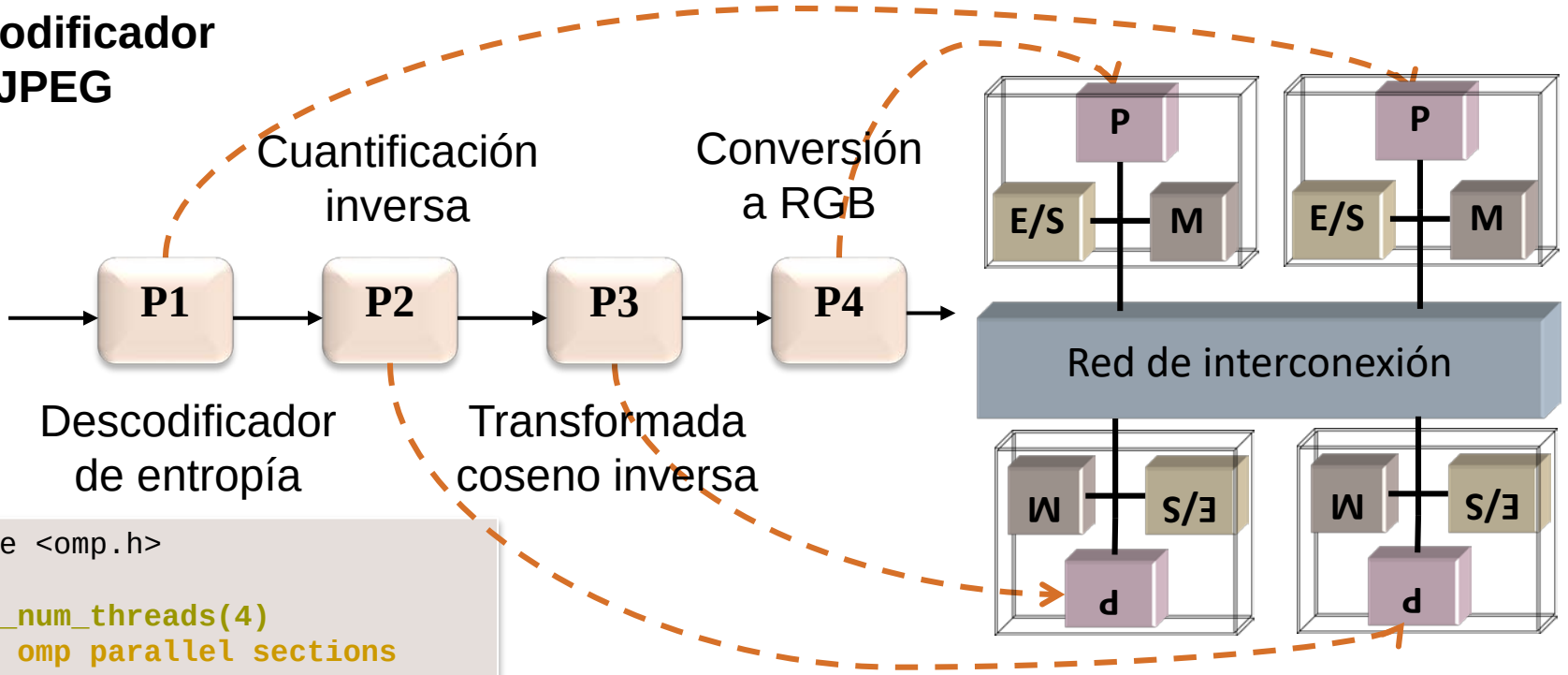


Descomposición de dominio o descomposición de datos I



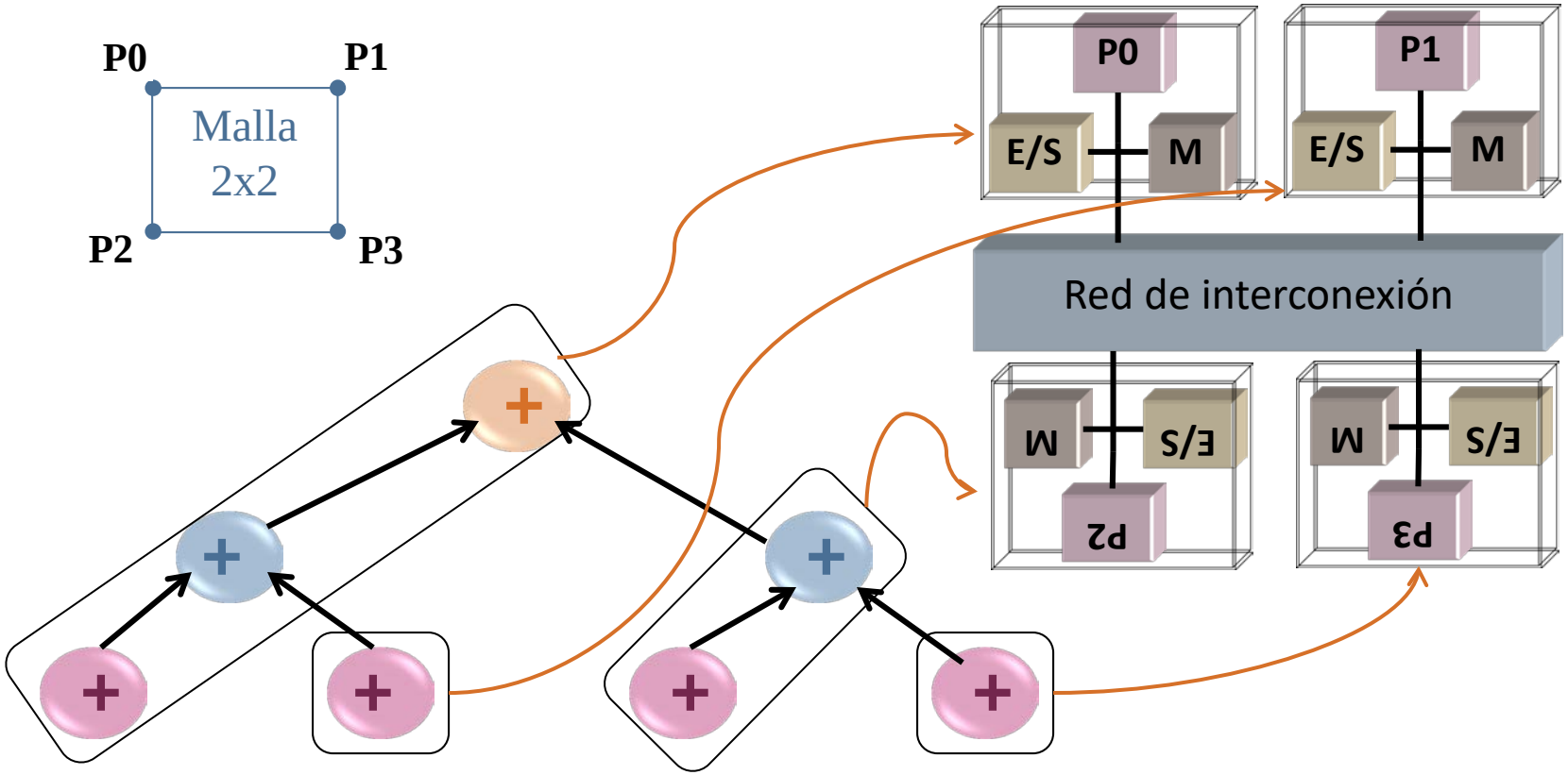
Estructura segmentada o de flujo de datos

Descodificador JPEG




```
#include <omp.h>
...
omp_set_num_threads(4)
#pragma omp parallel sections
{
  #pragma omp section
    P1();
  #pragma omp section
    P2();
  #pragma omp section
    P3();
  #pragma omp section
    P4();
}
```

Divide y vencerás o descomposición recursiva



(((a0+a1) + (a2+a3)) + ((a4+a5) + (a6+a7)))

2º curso / 2º cuatr.

Grado en
Ing. Informática

Arquitectura de Computadores
Tema 2

Programación paralela

Material elaborado por los profesores responsables de la asignatura:
Mancia Anguita – Julio Ortega

ugr | Universidad de Granada

ETSIIT
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación

ATC
Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores
UNIVERSIDAD DE GRANADA

Lecciones

- Lección 4. Herramientas, estilos y estructuras en programación paralela
- Lección 5. Proceso de paralelización
- Lección 6. Evaluación de prestaciones en procesamiento paralelo

Objetivos Lección 5

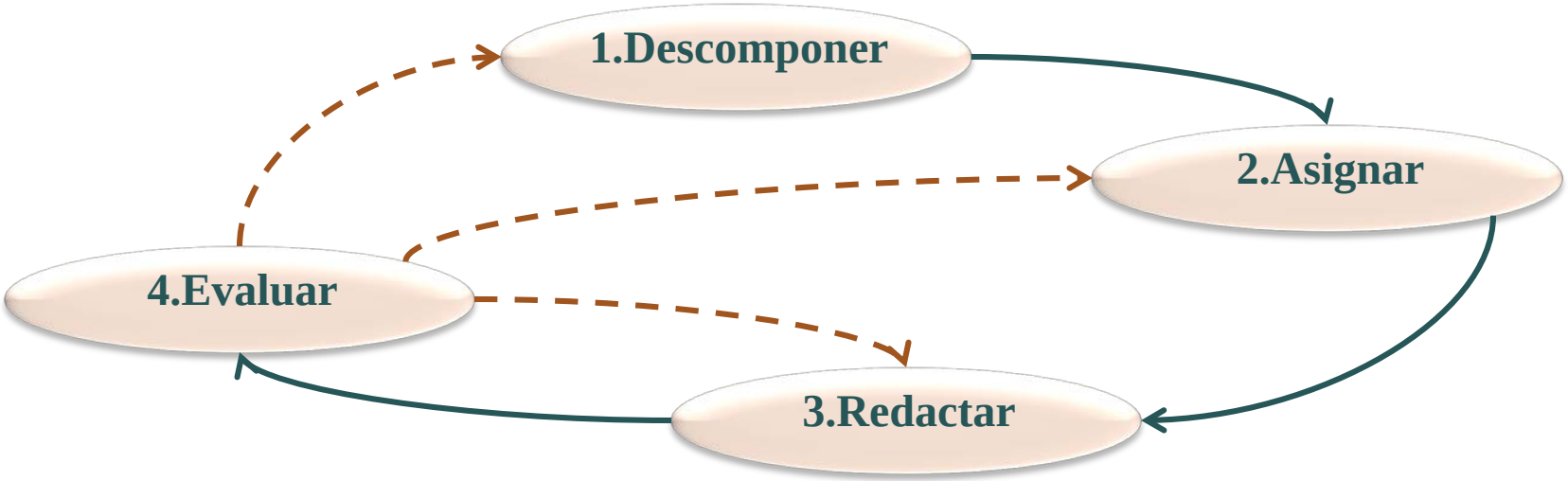
- Abordar la paralelización de una aplicación.
- Distinguir entre asignación estática y dinámica, ventajas e inconvenientes.

Bibliografía Lección 5

- Fundamental
  - Capítulo 7. Sección 7.4. J. Ortega, M. Anguita, A. Prieto. “Arquitectura de Computadores”. Thomson, 2005. ESII/C.1 ORT arq
- Complementaria
  - Thomas Rauber, Gudula Rünger. “Parallel Programming: for Multicore and Cluster Systems.” Springer, 2010. Disponible en línea (biblioteca UGR): http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04818-0
  - Barry Wilkinson.“Parallel programming : techniques and applications using networked workstations and parallel computer”, 2005. ESIIT/D.1 WIL par

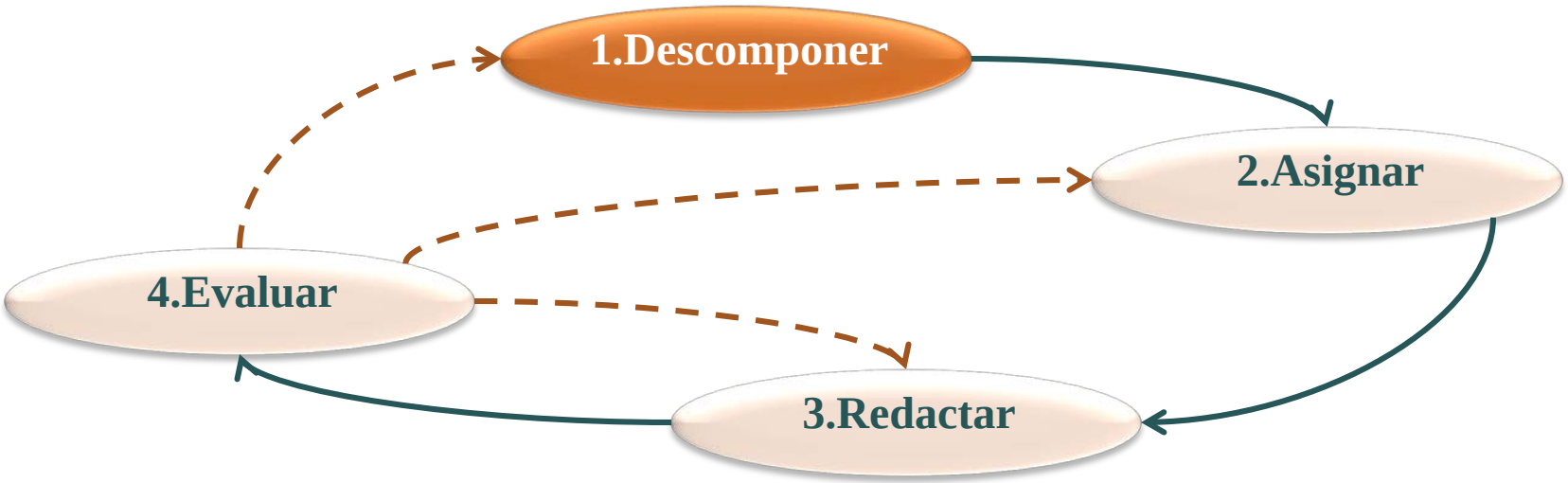
Proceso de paralelización

1. *Descomponer (descomposition)* en tareas independientes o Localizar paralelismo
2. *Asignar (planificar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



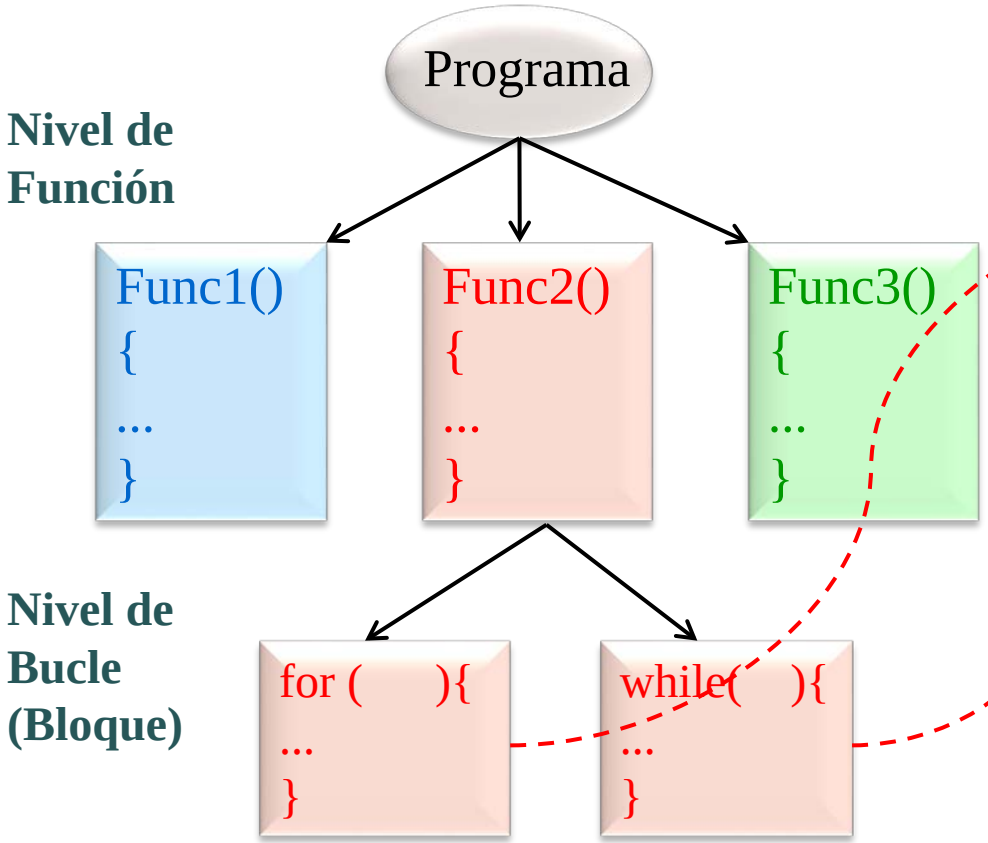
Proceso de paralelización

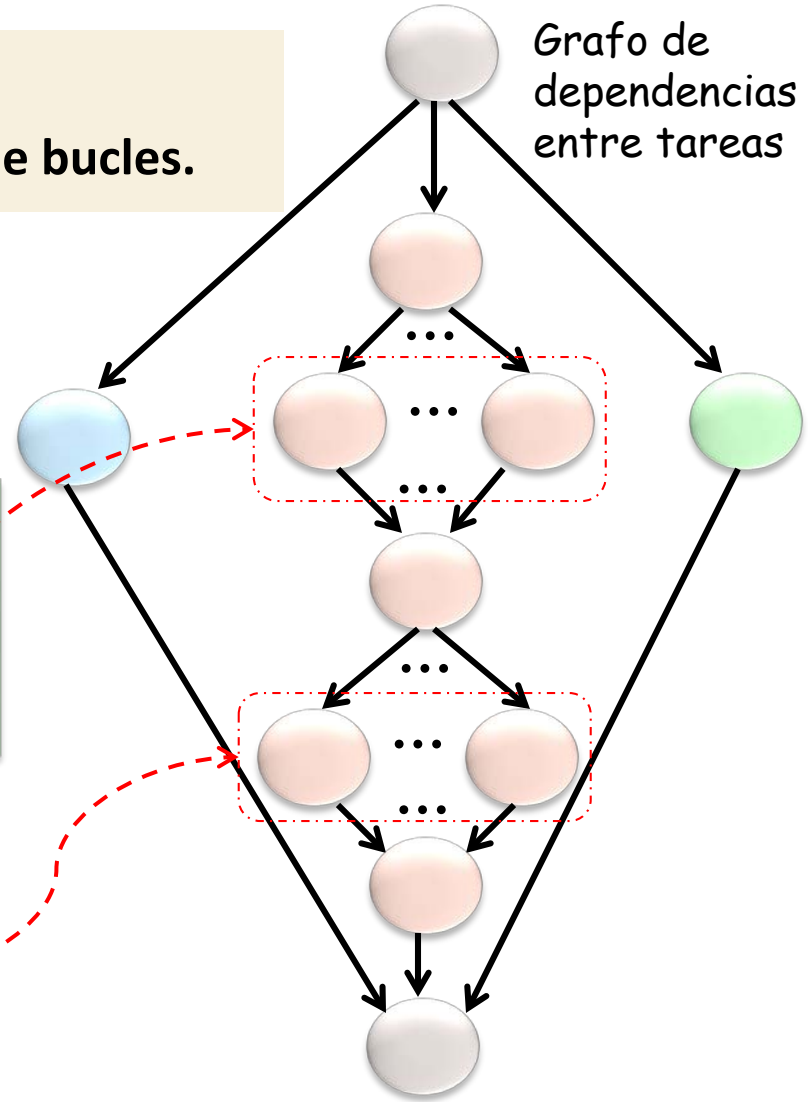
1. *Descomponer* en tareas independientes.
2. *Asignar (planificar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



Descomposición en tareas independientes

- Análisis de dependencia entre **funciones**.
- Análisis de dependencia entre **iteraciones de bucles.**

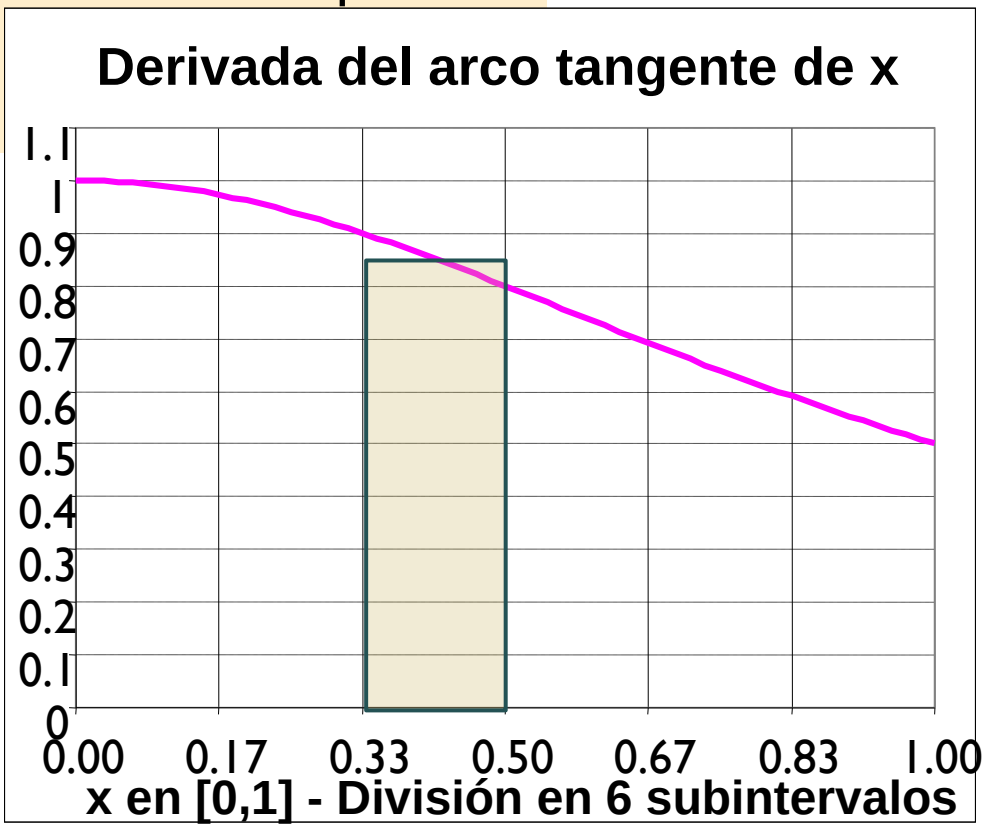




Ejemplo de cálculo PI: Descomposición en tareas independientes

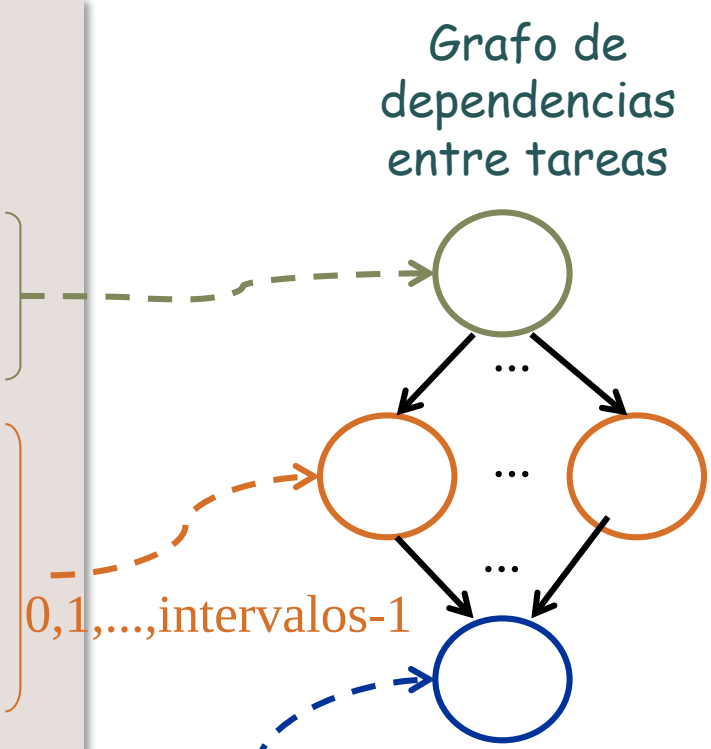
$$\left.\begin{array}{l} \text{arctg}'(x) = \dfrac{1}{1+x^2} \\ \text{arctg}(1) = \dfrac{\pi}{4} \\ \text{arctg}(0) = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} = \text{arctg}(x)\Big|_0^1 = \frac{\pi}{4} - 0$$

- PI se puede calcular por integración numérica.



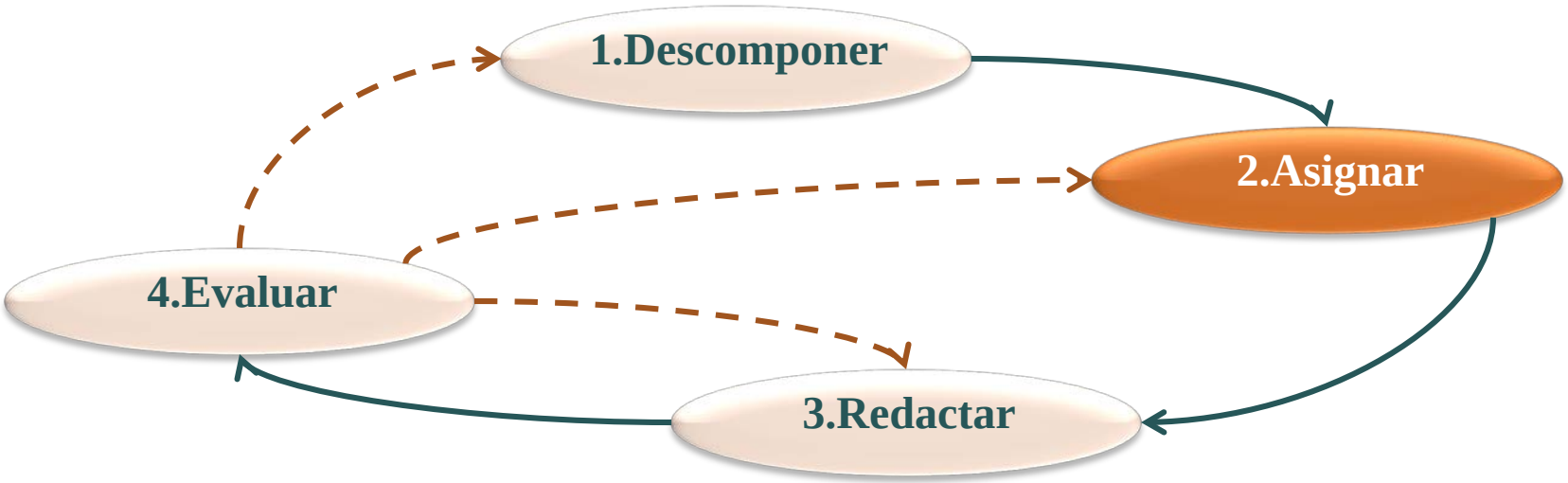
Ejemplo de cálculo PI: Descomposición en tareas independientes


```
main(int argc, char **argv) {
double ancho, sum=0;
int intervalos, i;

  intervalos = atoi(argv[1]);
  ancho = 1.0/(double) intervalos;

  for (i=0;i< intervalos; i++){
        x = (i+0.5)*ancho;
        sum = sum + 4.0/(1.0+x*x);

  }

  sum* = ancho;

}
```



Proceso de paralelización

1. *Descomponer* en tareas independientes.
2. *Asignar (planificar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



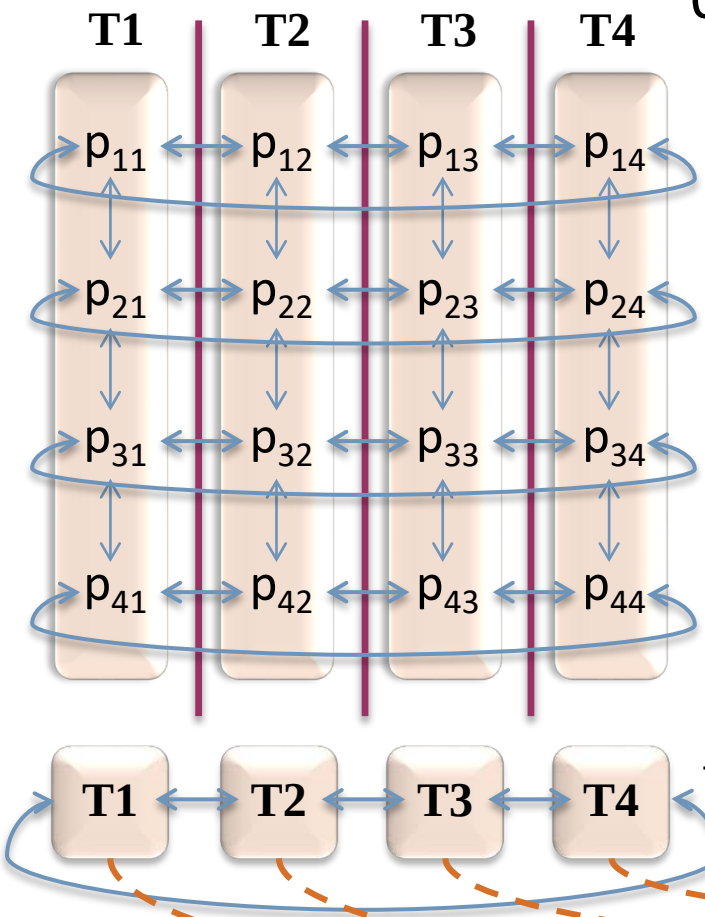
Asignación de tareas a procesos/threads I

- Incluimos: agrupación de tareas en procesos/threads (*scheduling*) y mapeo a procesadores/cores (*mapping*)
- La granularidad de la carga asignada a los procesos/threads depende de:
  - número de cores o procesadores o elementos de procesamiento
  - tiempo de comunicación/sincronización frente a tiempo de cálculo
- Equilibrado de la carga (tareas = código + datos) o *load balancing*:
  - Objetivo: unos procesos/threads no deben hacer esperar a otros

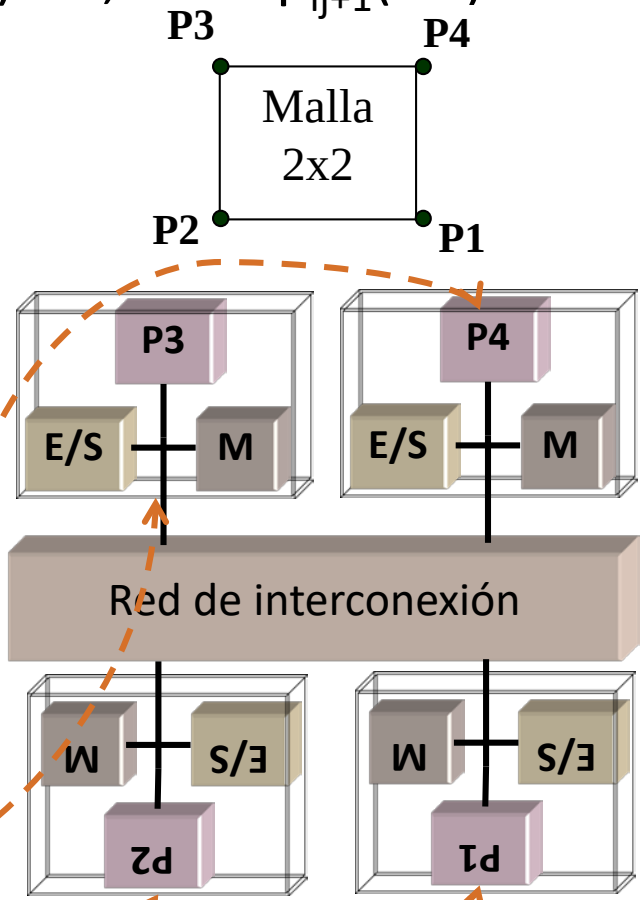
Asignación (planificación + mapeo). Ej.: filtrado de imagen I

$$p_{ij}(t) = 0{,}75 \times p_{ij}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{i-1j}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{ij-1}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{i+1j}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{ij+1}(t-1)$$

Planificación: agrupar tareas en threads

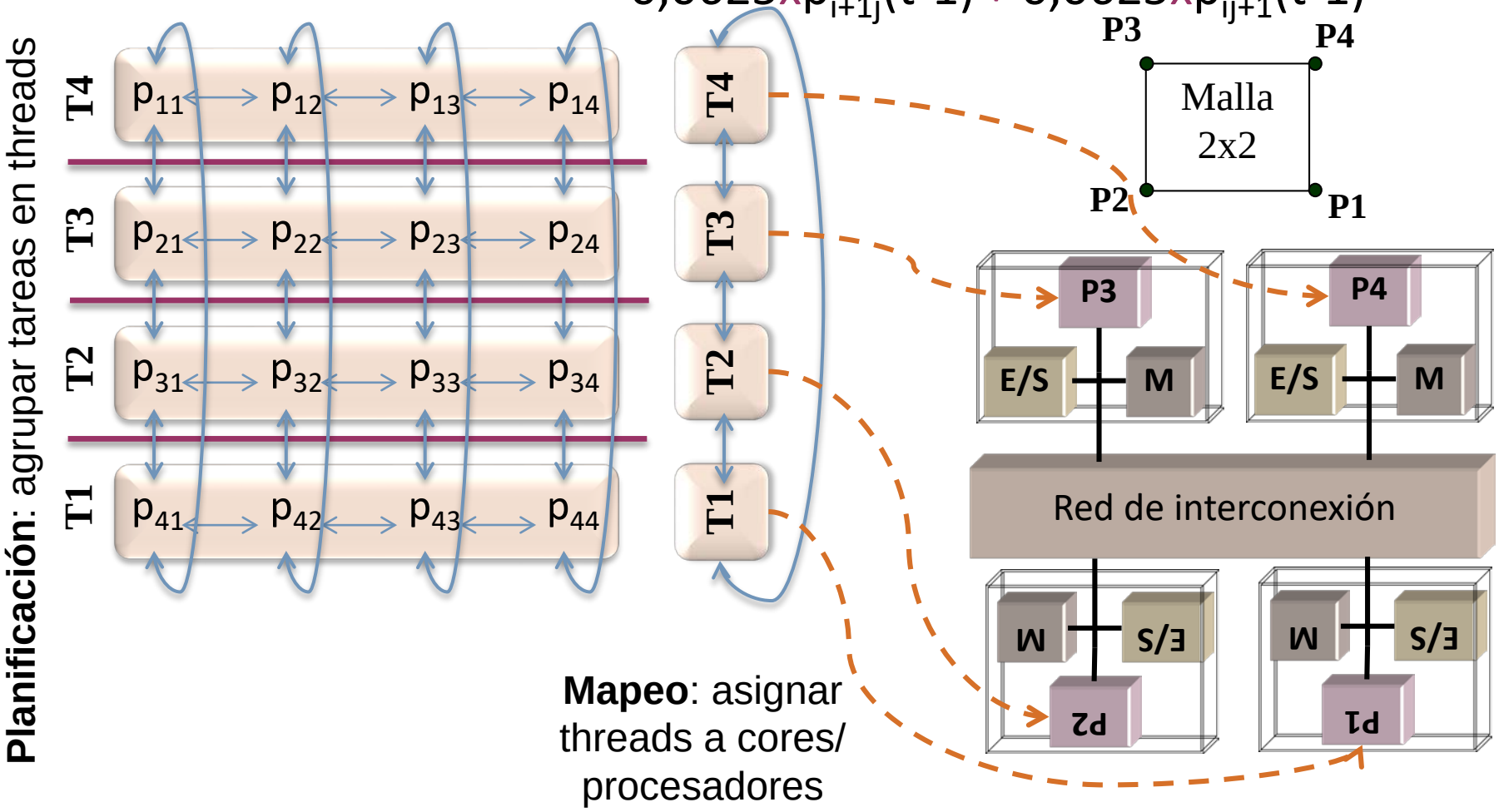


Mapeo: asignar threads a cores/ procesadores



Asignación (planificación + mapeo). Ej.: filtrado de imagen II

$$p_{ij}(t) = 0{,}75 \times p_{ij}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{i-1j}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{ij-1}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{i+1j}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{ij+1}(t-1)$$



Códigos filtrado imagen

Descomposición por columnas

```
#include <omp.h>
…
omp_set_num_threads(M)
#pragma omp parallel private(i)
{
   for (i=0;i<N;i++) {
      #pragma omp for
      for (j=0;j<M;j++) {
         pS[i,j] = 0,75*p[i,j] +
                   0,0625*(p[i-1,j]+p[i,j-1]+
                           p[i+1,j]+ p[i,j+1]);
      }
   }
}
…
```

Descomposición por filas

```
#include <omp.h>
…
omp_set_num_threads(N)
#pragma omp parallel private(j)
{
   #pragma omp for
   for (i=0;i<N;i++) {
      for (j=0;j<M;j++) {
         pS[i,j] = 0,75*p[i,j] +
                   0,0625*(p[i-1,j]+p[i,j-1]+
                           p[i+1,j]+ p[i,j+1]);
      }
   }
}
…
```

Asignación. Ej.: multiplicación matriz por vector I

$$c = A \bullet b; \quad c_i = \sum_{k=0}^{M-1} a_{ik} \bullet b_k = a_i^T \bullet b, \quad c(i) = \sum_{k=0}^{M-1} A(i,k) \bullet b(k), \; i = 0,\ldots N\text{-}1$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} \end{pmatrix}_{8x6} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix}$$

N=8
M=6

$$= \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} c(1) = \sum_{k=0}^{M-1} A(1,k) \bullet b(k) \\ c(2) = \sum_{k=0}^{M-1} A(2,k) \bullet b(k) \\ c(3) = \sum_{k=0}^{M-1} A(3,k) \bullet b(k) \\ c(4) = \sum_{k=0}^{M-1} A(4,k) \bullet b(k) \\ c(5) = \sum_{k=0}^{M-1} A(5,k) \bullet b(k) \\ c(6) = \sum_{k=0}^{M-1} A(6,k) \bullet b(k) \\ c(7) = \sum_{k=0}^{M-1} A(7,k) \bullet b(k) \\ c(8) = \sum_{k=0}^{M-1} A(8,k) \bullet b(k) \end{matrix}$$

Asignación. Ej.: multiplicación matriz por vector II

$$c = A \bullet b; \quad c_i = \sum_{k=0}^{M-1} a_{ik} \bullet b_k = a_i^T \bullet b, \quad c(i) = \sum_{k=0}^{M-1} A(i,k) \bullet b(k), \; i = 0,\ldots N-1$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} \end{pmatrix}_{8x6} \bullet \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} N=8 \\ M=6 \end{matrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_1 + a_{12}b_2 + a_{13}b_3 + a_{14}b_4 + a_{15}b_5 + a_{16}b_6 \\ a_{21}b_1 + a_{22}b_2 + a_{23}b_3 + a_{24}b_4 + a_{25}b_5 + a_{26}b_6 \\ a_{31}b_1 + a_{32}b_2 + a_{33}b_3 + a_{34}b_4 + a_{35}b_5 + a_{36}b_6 \\ a_{41}b_1 + a_{42}b_2 + a_{43}b_3 + a_{44}b_4 + a_{45}b_5 + a_{46}b_6 \\ a_{51}b_1 + a_{52}b_2 + a_{53}b_3 + a_{54}b_4 + a_{55}b_5 + a_{56}b_6 \\ a_{61}b_1 + a_{62}b_2 + a_{63}b_3 + a_{64}b_4 + a_{65}b_5 + a_{66}b_6 \\ a_{71}b_1 + a_{72}b_2 + a_{73}b_3 + a_{74}b_4 + a_{75}b_5 + a_{76}b_6 \\ a_{81}b_1 + a_{82}b_2 + a_{83}b_3 + a_{84}b_4 + a_{85}b_5 + a_{86}b_6 \end{pmatrix}$$

Asignación de tareas a procesos/threads II

- ¿De qué depende el equilibrado?
  - La arquitectura:
    - homogénea frente a heterogénea,
    - uniforme frente a no uniforme
  - La aplicación/descomposición
- Tipos de asignación:
  - Estática
    - Está determinado qué tarea va a realizar cada procesador o core
    - Explícita: programador
    - Implícita: herramienta de programación al generar el código ejecutable
  - Dinámica (en tiempo de ejecución)
    - Distintas ejecuciones pueden asignar distintas tareas a un procesador o core
    - Explícita: el programador
    - Implícita: herramienta de programación al generar el código ejecutable

Asignación estática

- Asignación **estática** y explícita de las iteraciones de un bucle:

Bucle

```
for (i=0;i<Iter;i++) {
   código para i    }
```

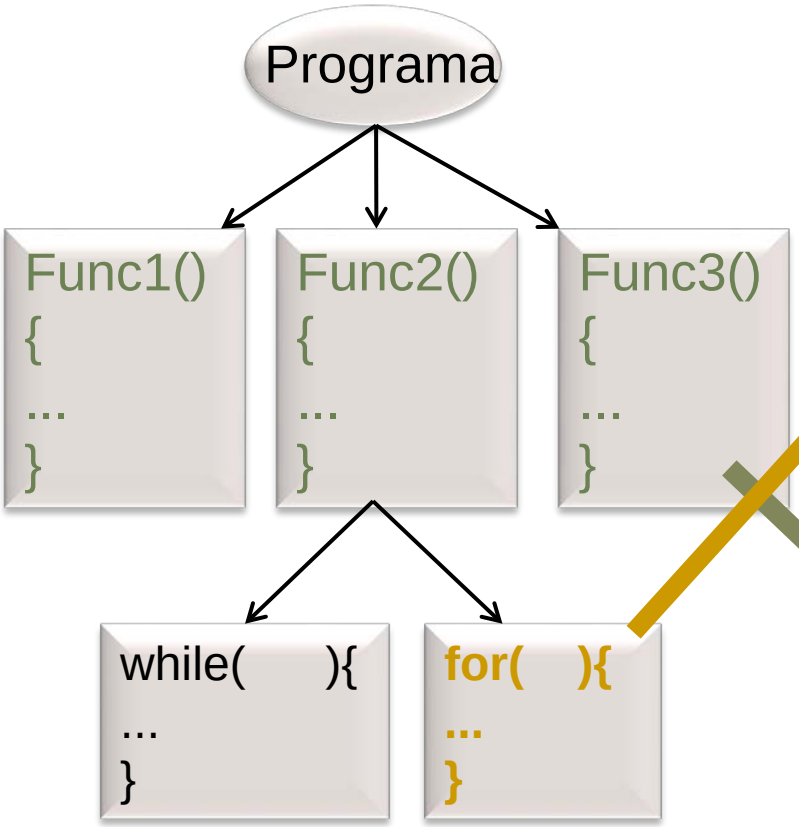
Estática Round-Robin

```
for (i=idT;i<Iter;i=i+nT) {
   código para i    }
```

Estática Continua

```
for (i= idT * Iter/nT  ; i< (idT+1) * Iter/nT  ; i++) {
   código para i    }
```

Ejemplo de asignación estática del paralelismo de tareas y datos con OpenMP




```
Func1() {…}
Func2() { …
  #pragma omp parallel for \
                    schedule(static)
     for (i=0;i<N;i=++){
           código para i
     }
…}
Func3() {…}
Main () {

 #pragma omp parallel sections
 { #pragma omp section
         Func1();
   #pragma omp section
         Func2();
   #pragma omp section
         Func3();
 }
…}
```

Asignación dinámica

- Asignación **dinámica** y explícita de las iteraciones de un bucle:

Bucle

```
for (i=0;i<Iter;i++) {
   código para i    }
```

Dinámica

```
lock(k);
    n=i;  i=i+1;
unlock(k);
while (n<Iter) {
      código para n ;
       lock(k);
            n=i;  i=i+1;
       unlock(k);
  }
```

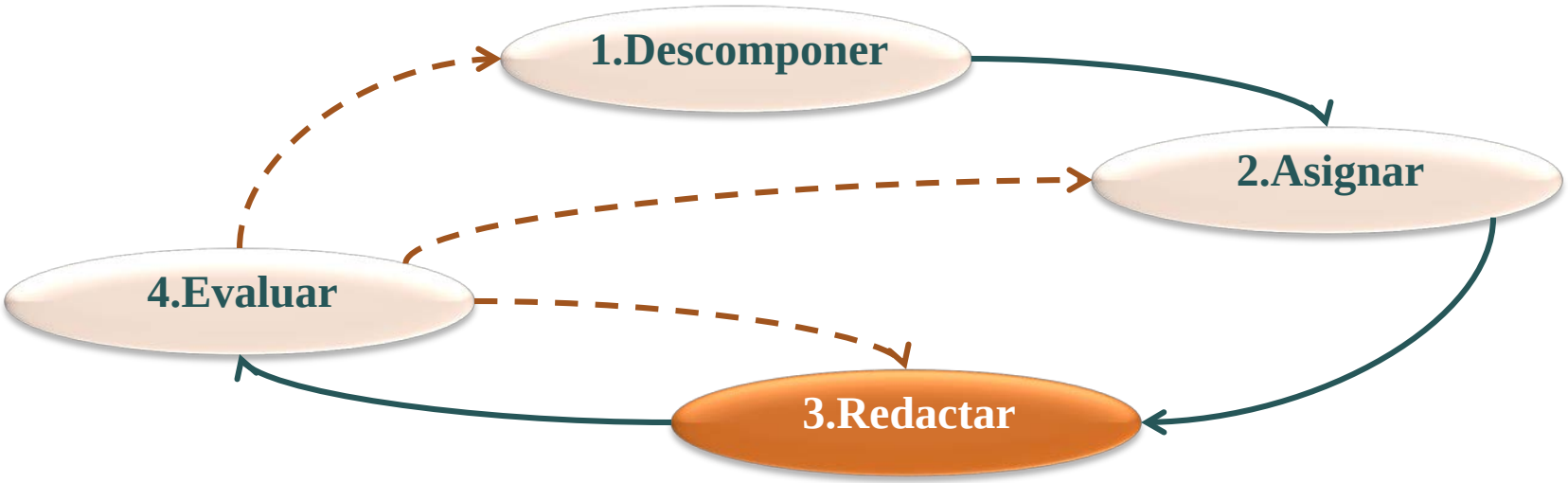
NOTA: La variable i se supone inicializada a 0

Mapeo de procesos/threads a unidades de procesamiento

- Normalmente se deja al SO el mapeo de threads (*light process*)
- Lo puede hacer el entorno o sistema en tiempo de ejecución (*runtime system*) de la herramienta de programación
- El programador puede influir

Proceso de paralelización

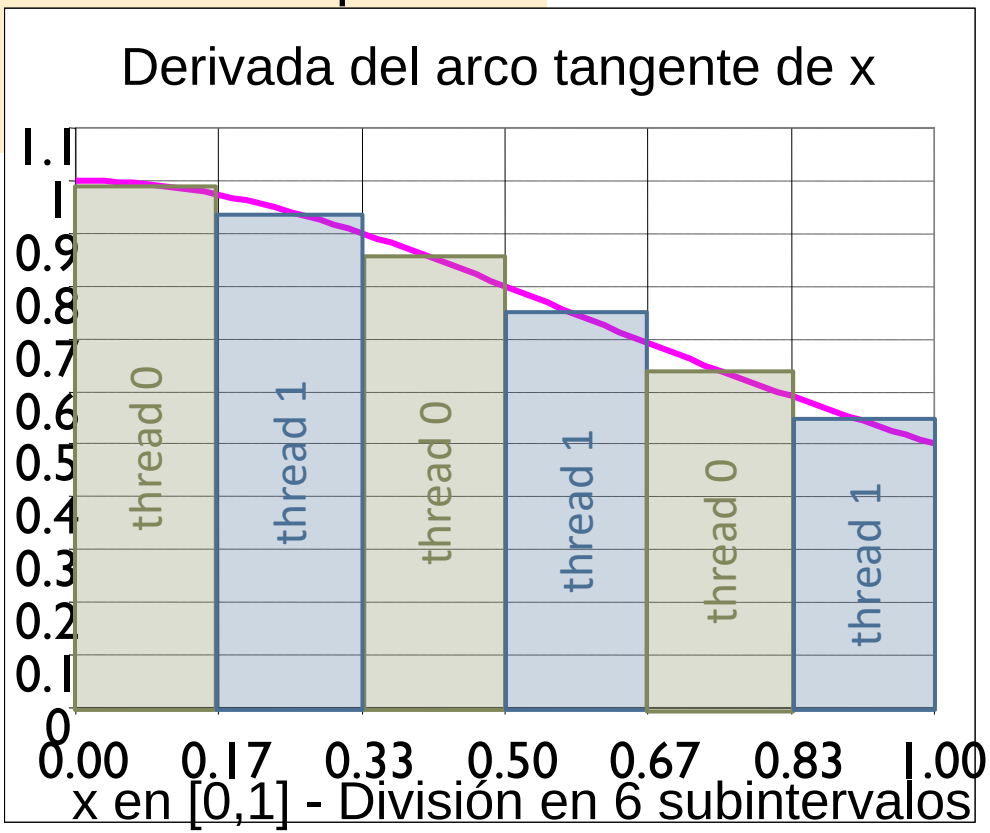
1. *Descomponer* en tareas independientes.
2. *Asignar (planificar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



Asignación de tareas a 2 threads estática por turno rotatorio

$$\left.\begin{array}{l} \text{arctg}'(x) = \dfrac{1}{1+x^2} \\ \text{arctg}(1) = \dfrac{\pi}{4} \\ \text{arctg}(0) = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \quad \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} = \text{arctg}(x)\Big|_0^1 = \frac{\pi}{4} - 0$$

- PI se puede calcular por integración numérica.



Ejemplo: cálculo de PI con OpenMP/C


```
#include <omp.h>
#define NUM_THREADS 4
main(int argc, char **argv)  {
   long double ancho,x, sum=0;  int intervalos, i;
   intervalos = atoi(argv[1]);
   ancho = 1.0/(double) intervalos;
   omp_set_num_threads(NUM_THREADS);
#pragma omp parallel
{
  #pragma omp for reduction(+:sum) private(x) \
                                  schedule(dynamic)
   for (i=0;i< intervalos; i++) {
       x = (i+0.5)*ancho; sum = sum + 4.0/(1.0+x*x);
   }
}
   sum* = ancho;
}
```

Crear/Terminar

Comunicar/sincronizar

Agrupar/Asignar

Localizar

Ejemplo: cálculo de PI en MPI/C


```
#include <mpi.h>
main(int argc, char **argv)  {
 double ancho,x,lsum,sum; int intervalos,i,nproc,iproc;
    if (MPI_Init(&argc, &argv) != MPI_SUCCESS) exit(1);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &nproc);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &iproc);
    intervalos=atoi(argv[1]);
    ancho=1.0/(double) intervalos;  lsum=0;
    for (i=iproc; i<intervalos; i+=nproc) {
        x = (i+0.5)*ancho;  lsum+= 4.0/(1.0+x*x);
    }
    lsum*= ancho;
    MPI_Reduce(&lsum, &sum, 1, MPI_DOUBLE,
                  MPI_SUM,0,MPI_COMM_WORLD);
    MPI_Finalize();
}
```

Enrolar

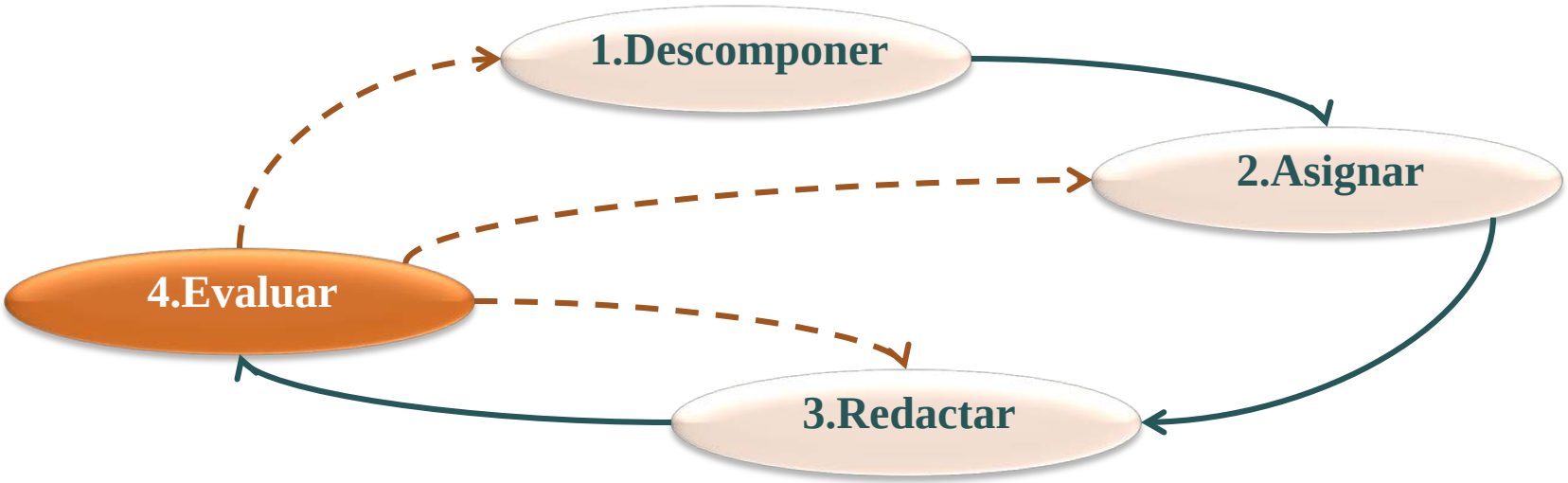
Localizar-Agrupar

Comunicar/sincronizar

Desenrolar

Proceso de paralelización

1. *Descomponer* en tareas independientes.
2. *Asignar (agrupar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



2º curso / 2º cuatr.

Grado en
Ing. Informática

Arquitectura de Computadores
Tema 2

Programación paralela

Material elaborado por los profesores responsables de la asignatura:
Mancia Anguita – Julio Ortega

ugr | Universidad de Granada

ETSIIT
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación

ATC
Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores
UNIVERSIDAD DE GRANADA

Lecciones

- Lección 4. Herramientas, estilos y estructuras en programación paralela
- Lección 5. Proceso de paralelización
- Lección 6. Evaluación de prestaciones en procesamiento paralelo
  - Ganancia en prestaciones y escalabilidad
  - Ley de Amdahl
  - Ganancia escalable

Bibliografía

- Fundamental
  - Secc. 7.5. J. Ortega, M. Anguita, A. Prieto. “Arquitectura de Computadores”. ESII/C.1 ORT arq

Contenido Lección 6

- Ganancia en prestaciones y escalabilidad
- Ley de Amdahl
- Ganancia escalable

Evaluación de prestaciones

- Medidas usuales
  - Tiempo de respuesta
    - Real (*wall-clock time, elapsed time*) (/usr/bin/time)
    - Usuario, sistema, CPU time = user + sys
  - Productividad
- Escalabilidad
- Eficiencia
  - Relación prestaciones/prestaciones máximas
  - Rendimiento = prestaciones/nº_recursos
  - Otras: Prestaciones/consumo_potencia, prestaciones/área_ocupada

Ganancia en prestaciones. Escalabilidad

Ganancia en prestaciones:

$$S(p) = \frac{\text{Prestaciones}(p)}{\text{Prestaciones}(1)} = \frac{T_S}{T_P(p)}$$

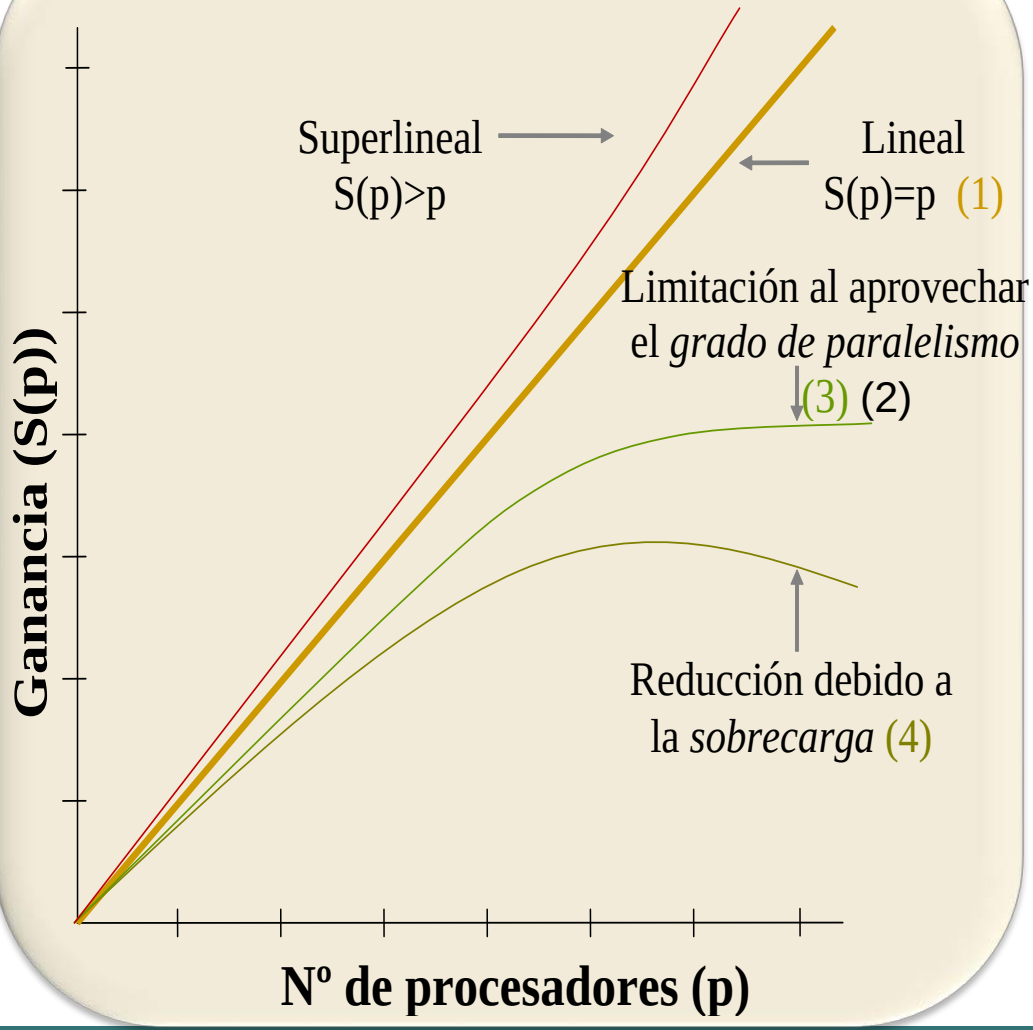
Ganancia en velocidad (Speedup)

$$T_P(p) = T_C(p) + T_O(p)$$

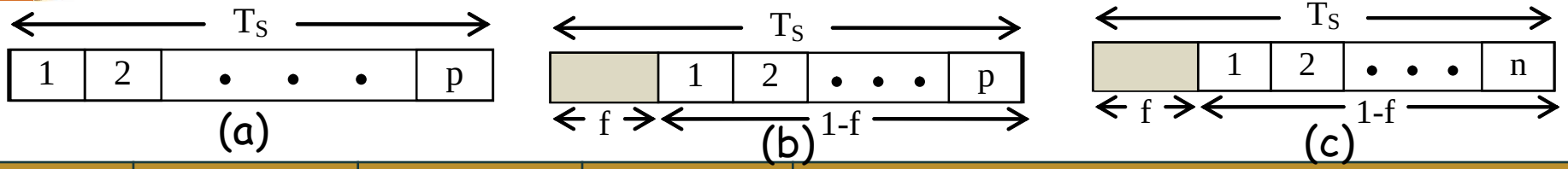
Sobrecarga *(Overhead)*:

- Comunicación/sincronización.
- Crear/terminar procesos/threads.
- Cálculos o funciones no presentes en versión secuencial.
- Falta de equilibrado.

Escalabilidad:

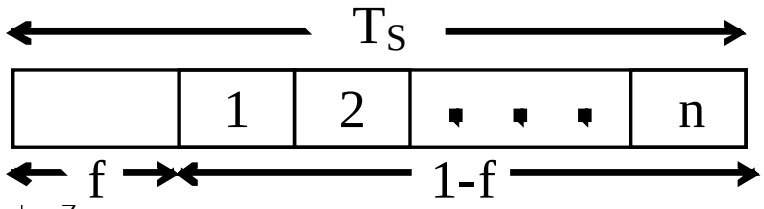


Ganancia en prestaciones. Ganancia máxima

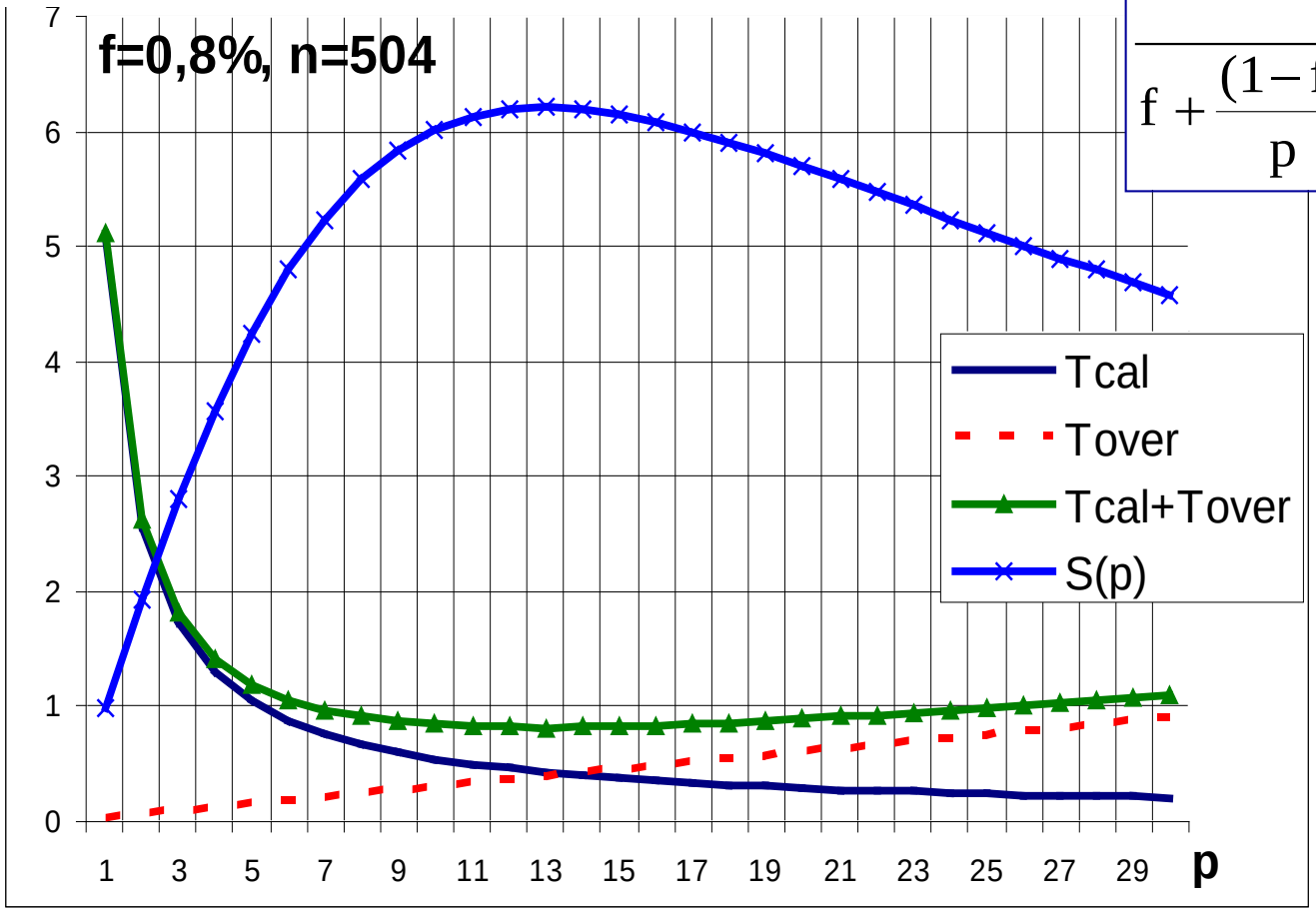


Modelo código	Fracción no paral. en T_S	Grado paralelismo	Overhead	Ganancia en función del número de procesadores *p* con T_S constante
(a)	0	ilimitado	0	$S(p) = \frac{T_S}{T_P(p)} = p$ Ganancia lineal (1)
(b)	f	ilimitado	0	$S(p) = \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{p}} \xrightarrow{p\to\infty} \frac{1}{f}$ (2)
(c)	f	n	0	$S(p) = \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{p}} \xrightarrow{p=n} \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{n}}$ (3)
(b)	f	ilimitado	Incrementa linealmente con *p*	$S(p) = \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{p} + \frac{T_O(p)}{T_S}} \xrightarrow{p\to\infty} 0$ (4)

Número de procesadores óptimo



$$S(p) = \frac{T_S}{T_P(p)} = \frac{T_S}{T_C(p) + T_O(p)} = \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{p} + \frac{T_O(p)}{T_S}}$$



$$T_C(p) = O\left(\frac{1}{p}\right)$$

$$T_O(p) = O(p)$$

```
For(i=0;i<n;i++) {
    Código para i
}
```

Contenido Lección 6

- Ganancia en prestaciones y escalabilidad
- Ley de Amdahl
- Ganancia escalable

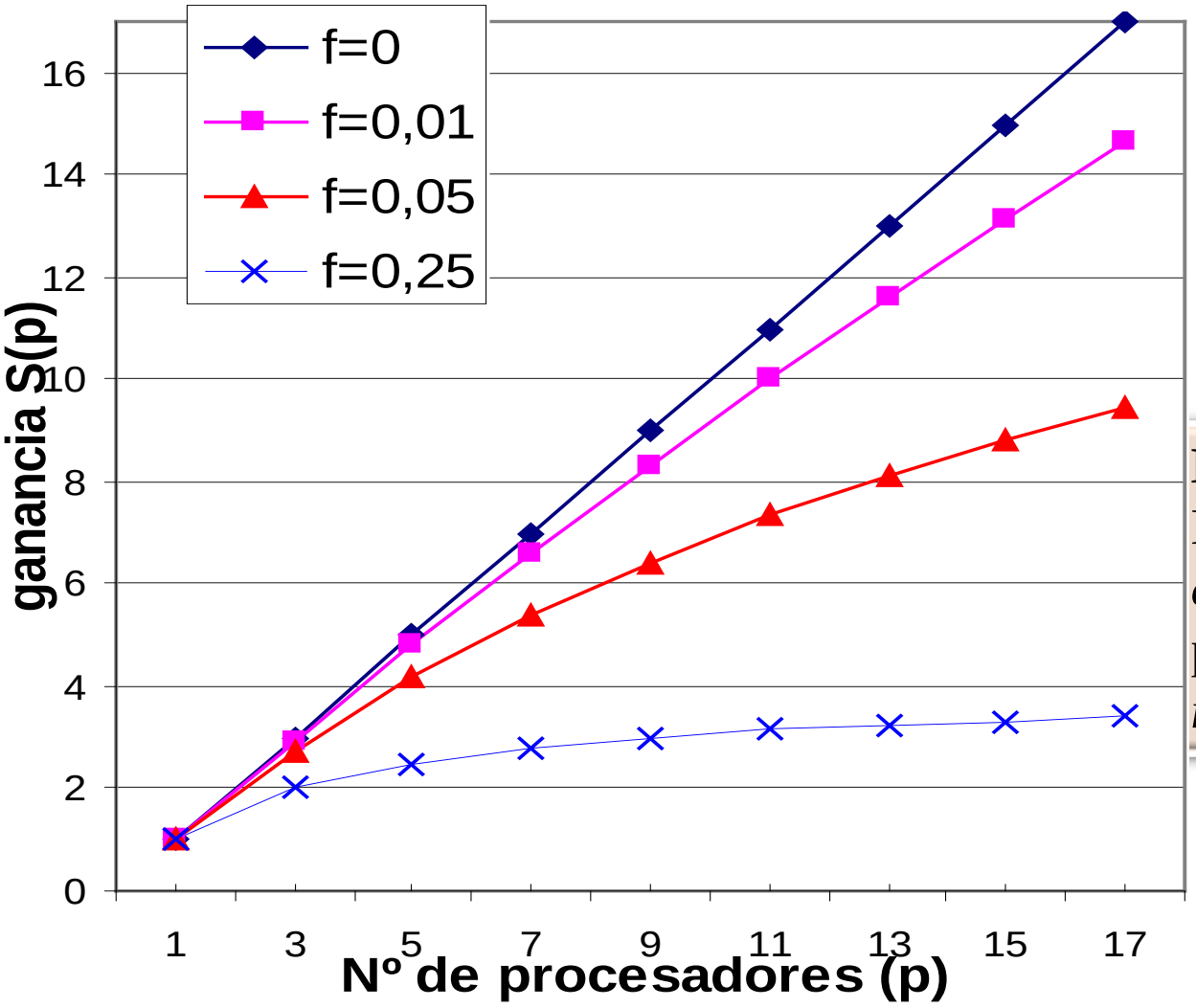
Ley de Amdahl

- Ley de Amdahl: la ganancia en prestaciones utilizando p procesadores está limitada por la fracción de código que no se puede paralelizar (2):

$$S(p) = \frac{T_S}{T_P(p)} \leq \frac{T_S}{f \cdot T_S + \frac{(1-f)\cdot T_S}{p}} = \frac{p}{1+f(p-1)} \rightarrow \frac{1}{f}\,(p \rightarrow \infty)$$

  - S : Incremento en velocidad que se consigue al aplicar una mejora. (paralelismo)
  - p : Incremento en velocidad máximo que se puede conseguir si se aplica la mejora todo el tiempo. (número de procesadores)
  - f : fracción de tiempo en el que no se puede aplicar la mejora. (fracción de t. no paralelizable)

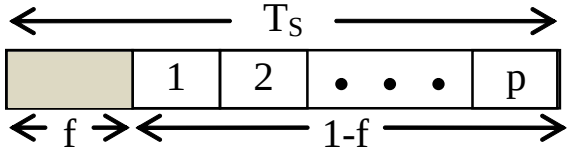
Ley de Amdahl



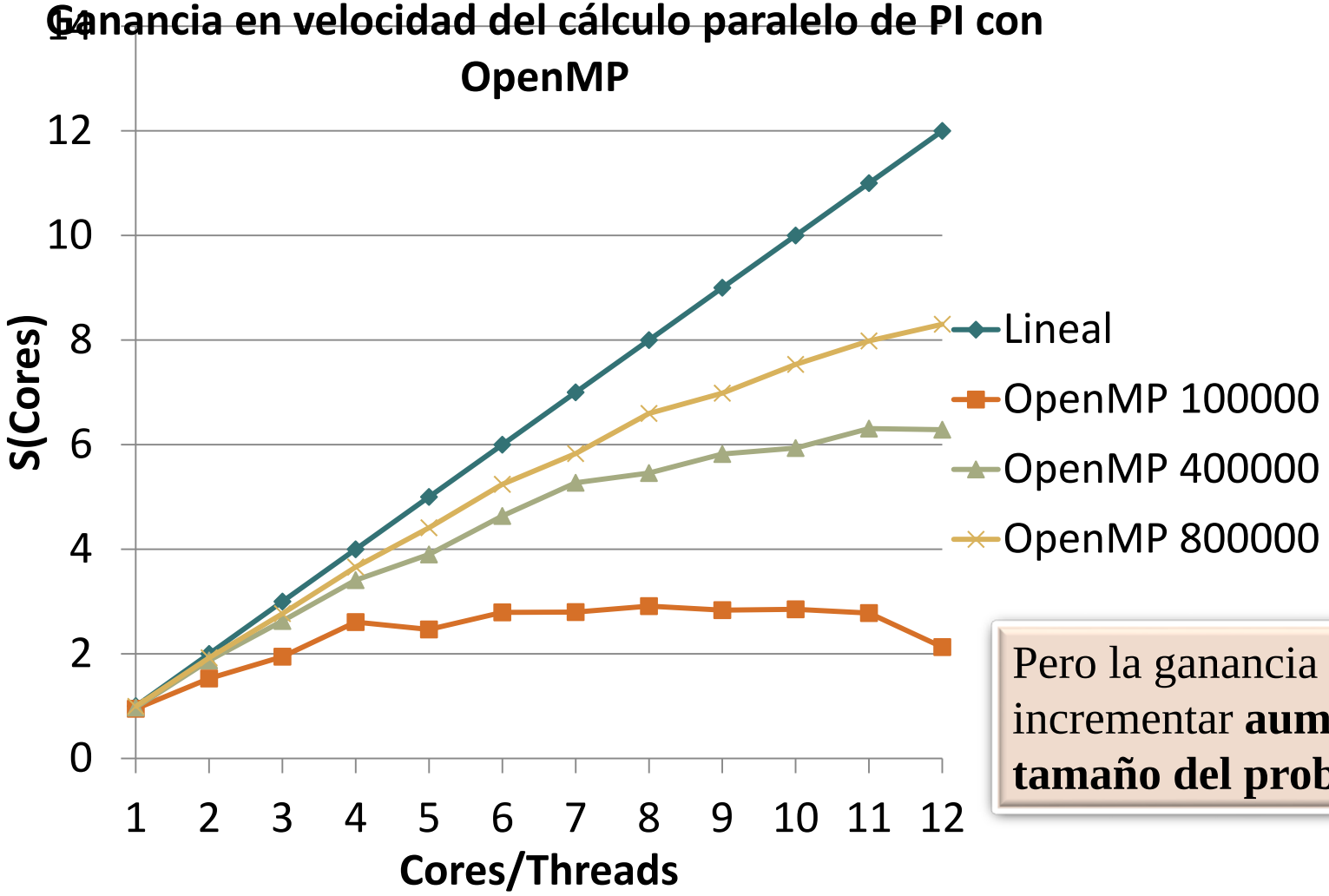
$$S(p) = \frac{p}{1 + f(p-1)}$$

$$S(p) \to \frac{1}{f} \; (p \to \infty)$$

Es pesimista.
Nos dice que la *escalabilidad* está limitada por *f (fracción de Ts que no se puede paralelizar)*



Ganancia escalable

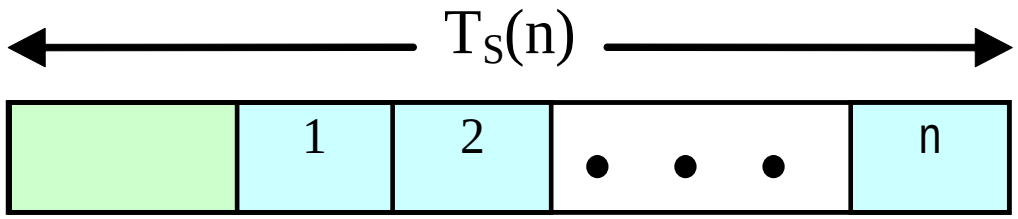


Pero la ganancia se puede incrementar **aumentando el tamaño del problema**

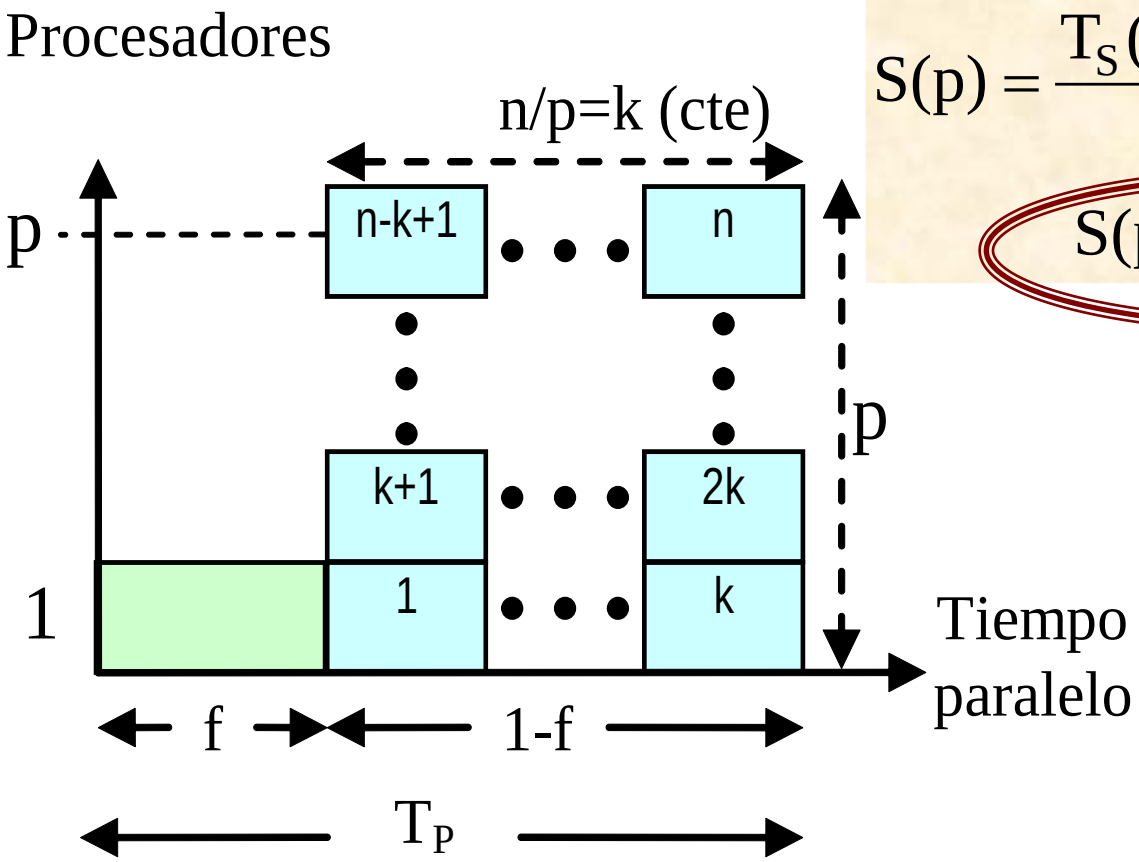
Contenido Lección 6

- Ganancia en prestaciones y escalabilidad
- Ley de Amdahl
- Ganancia escalable

Ganancia escalable o Ley de Gustafson



Amdahl mantiene constante $\mathbf{T_S}$,
Gustafson mantiene constante $\mathbf{T_P}$



$$S(p) = \frac{T_S(n = kp)}{T_P} = \frac{fT_P + p(1-f)T_P}{T_P}$$

$$S(p) = p(1-f) + f$$

Para ampliar …

- Páginas Web:
  - http://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_computing
- Artículos en revistas
  - Gene M. Amdahl. 1967. Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities. In *Proceedings of the April 18-20, 1967, spring joint computer conference* (AFIPS '67 (Spring)). ACM, New York, NY, USA. Disponible en línea (biblioteca UGR): http://doi.acm.org/10.1145/1465482.1465560
  - John L. Gustafson. 1988. Reevaluating Amdahl's law. *Commun. ACM* 31, 5 (May 1988), 532-533. Disponible en línea (biblioteca UGR): http://doi.acm.org/10.1145/42411.42415