2º curso / 2º cuatr.

Grados en
Ing. Informática

# Arquitectura de Computadores
# Tema 2

# Programación paralela

Material elaborado por Mancia Anguita y Julio Ortega
Profesores: Mancia Anguita, Maribel García y Christian Morillas

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 de herramienta.
- Distinguir entre las estructuras de tareas/procesos/treads master-slave, cliente-servidor, descomposición de dominio, flujo de datos o segmentación, y divide y vencerás.

# Bibliografía Lección 4



- Fundamental
  - Capítulo 2, Secciones 1-3. M. Anguita, J. Ortega. Fundamentos y problemas de Arquitectura de Computadores, Editorial Técnica Avicam. ESIIT/C.1 ANG fun
  - 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

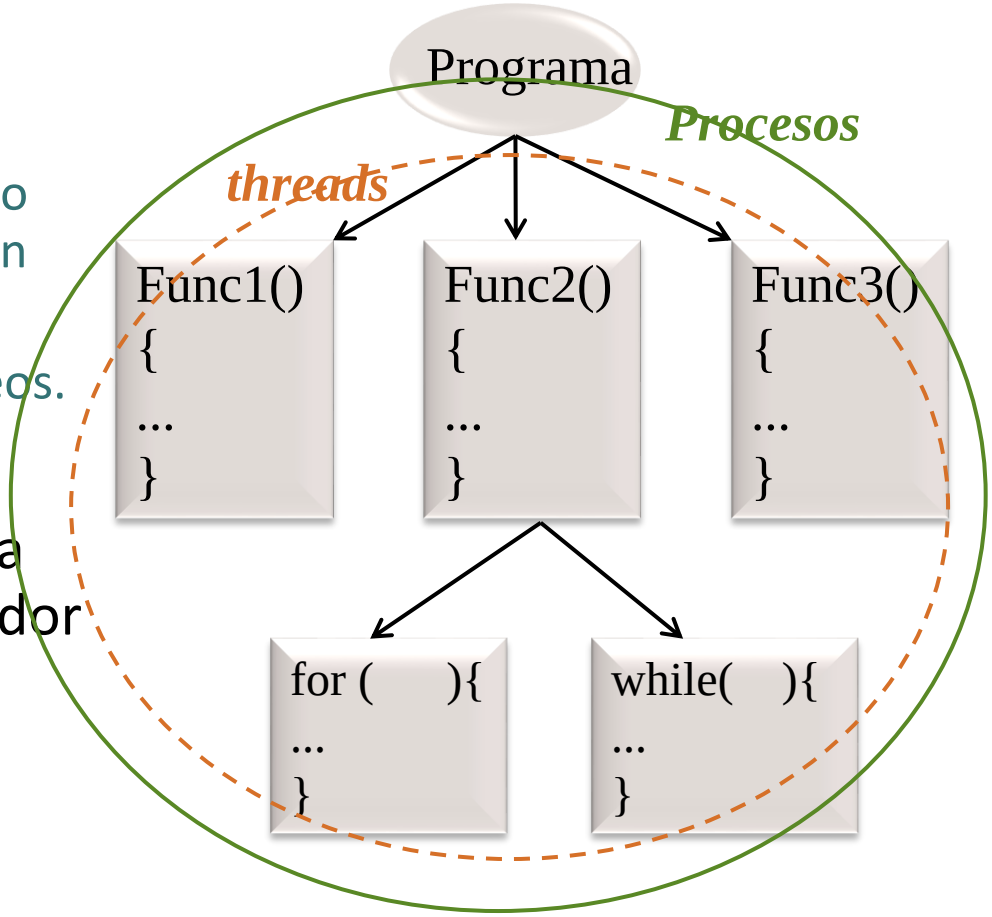


- Problemas que plantea la programación paralela al programador. Punto de partida
- Herramientas para obtener código paralelo
- Estilos/paradigmas de programación paralela
- Estructuras típicas de códigos paralelos

# 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 SO



# Punto de partida

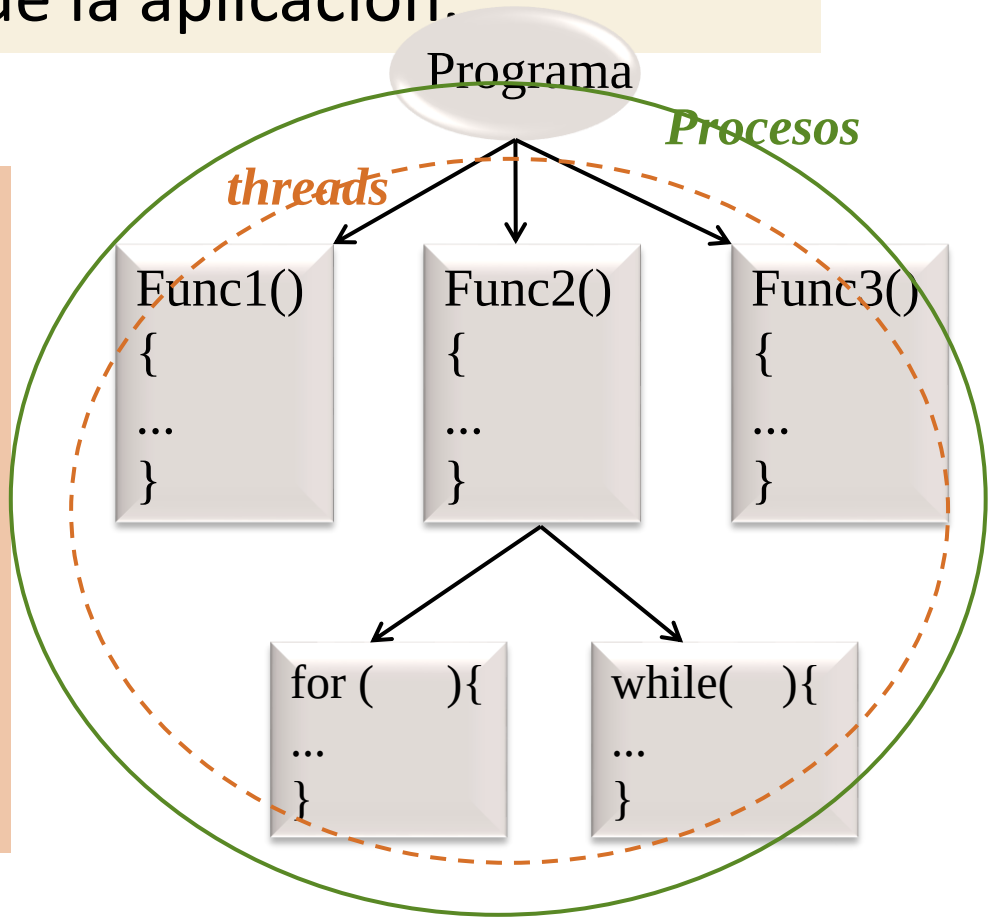


- Partir de una versión secuencial.
- Descripción o definición de la aplicación.

Apoyo:

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

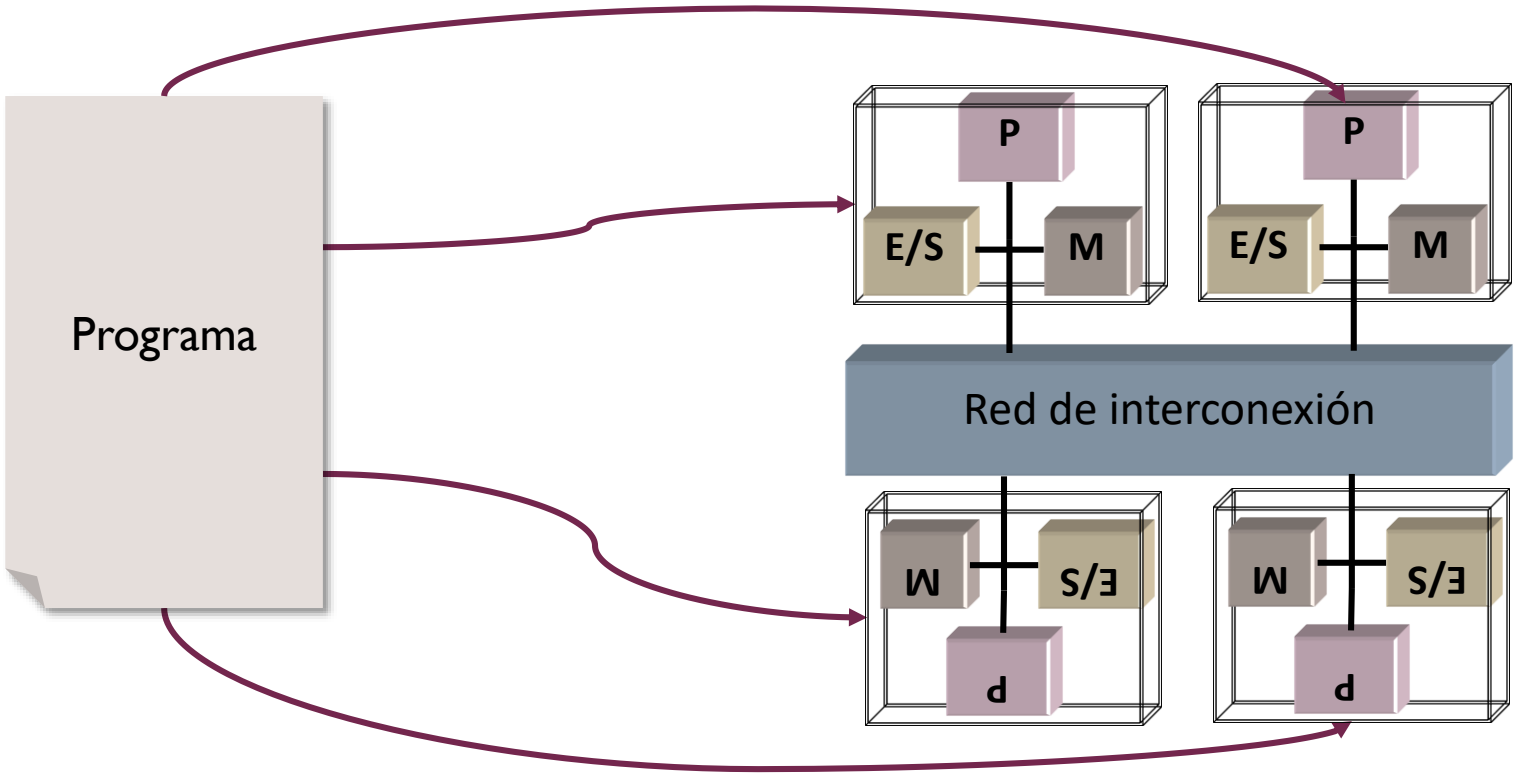
BLAS (*Basic Linear Algebra Subroutine* ), LAPACK (*Linear Algebra PACKage*), ...



# Modos de programación MIMD



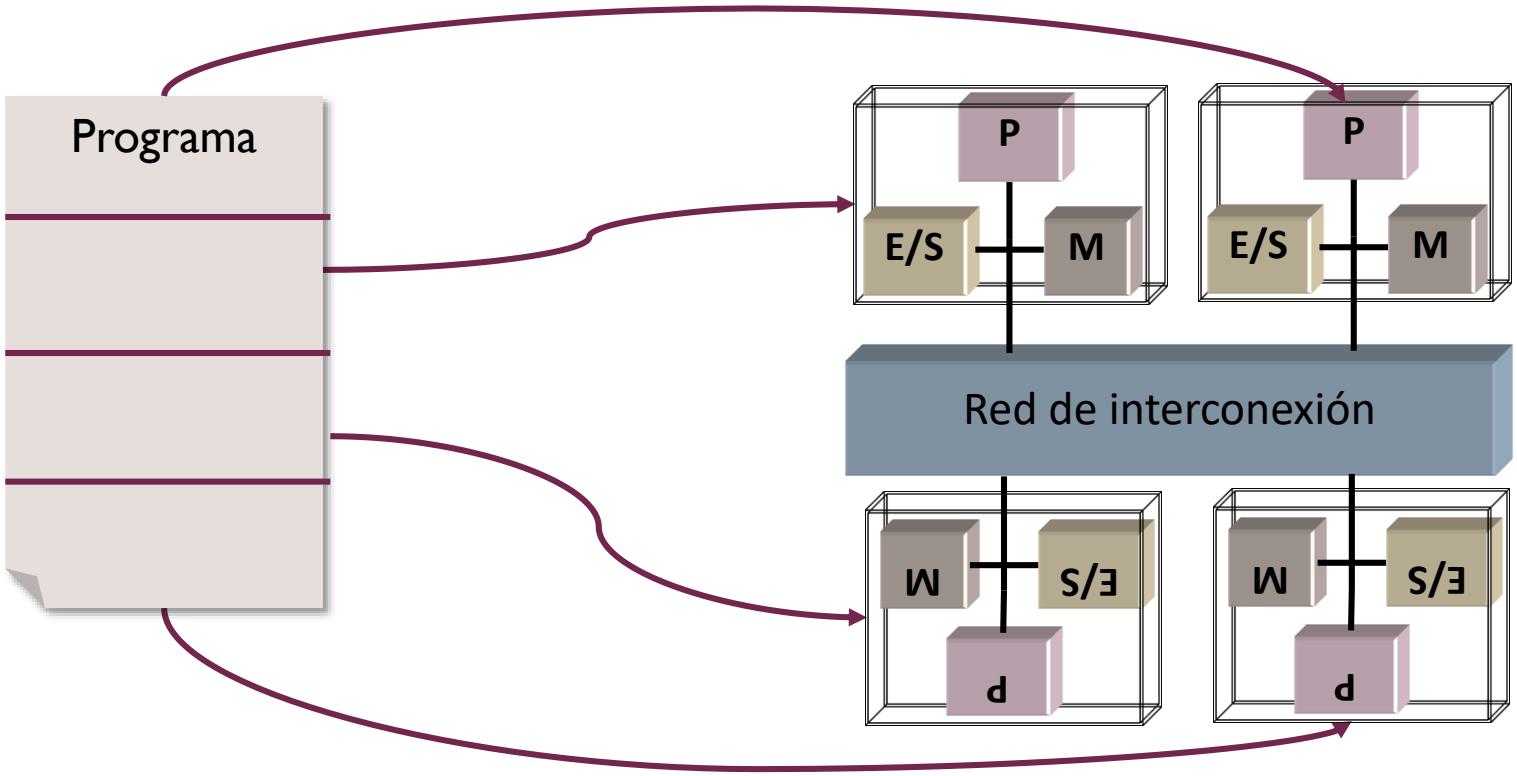
- SPMD (*Single-Program Multiple Data*)



# Modos de programación MIMD



- MPMD (*Multiple-Program Multiple Data*)



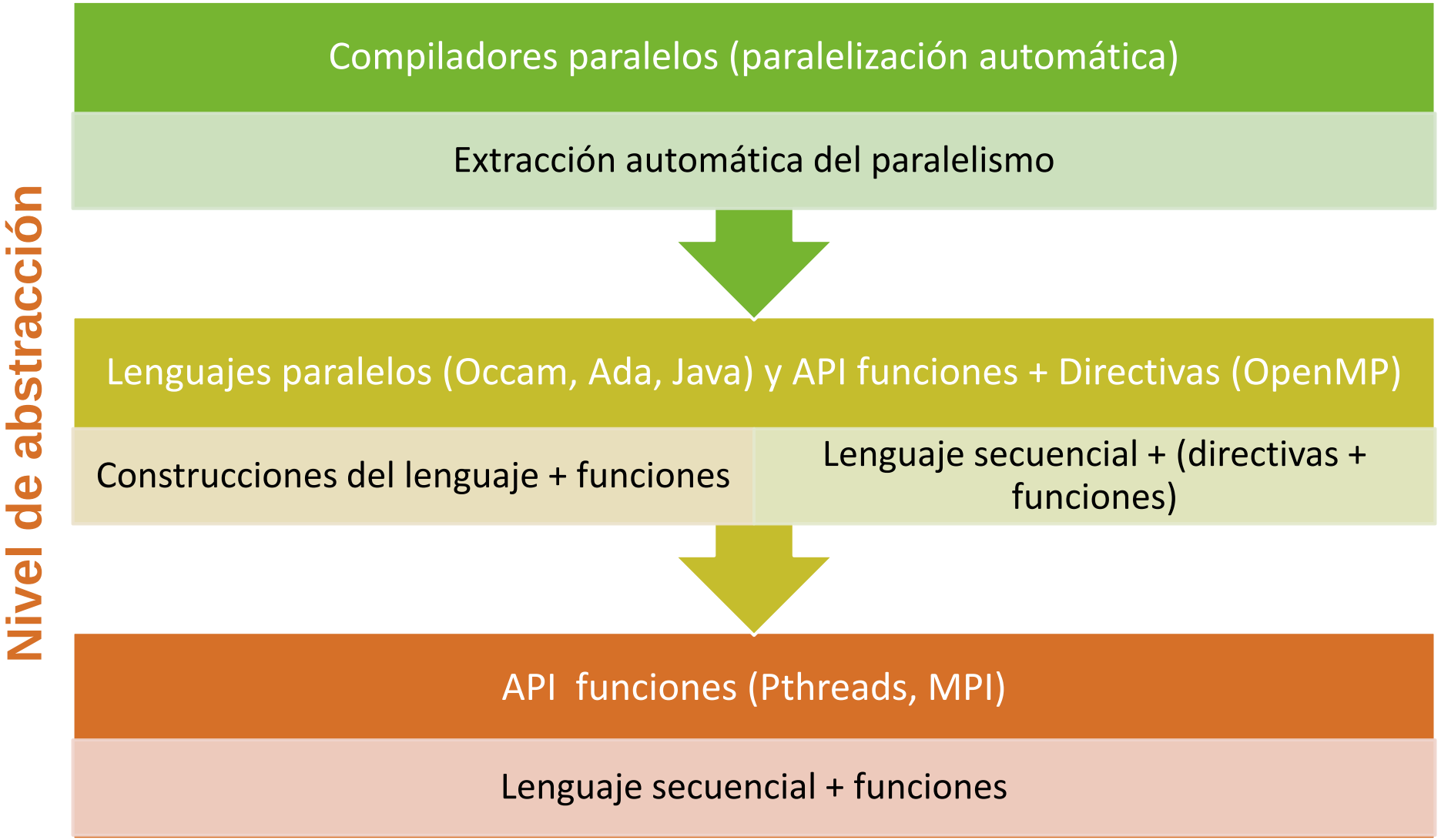
# Contenido Lección 4



- 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 (*decomposition*)
  - **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 y Asignar

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

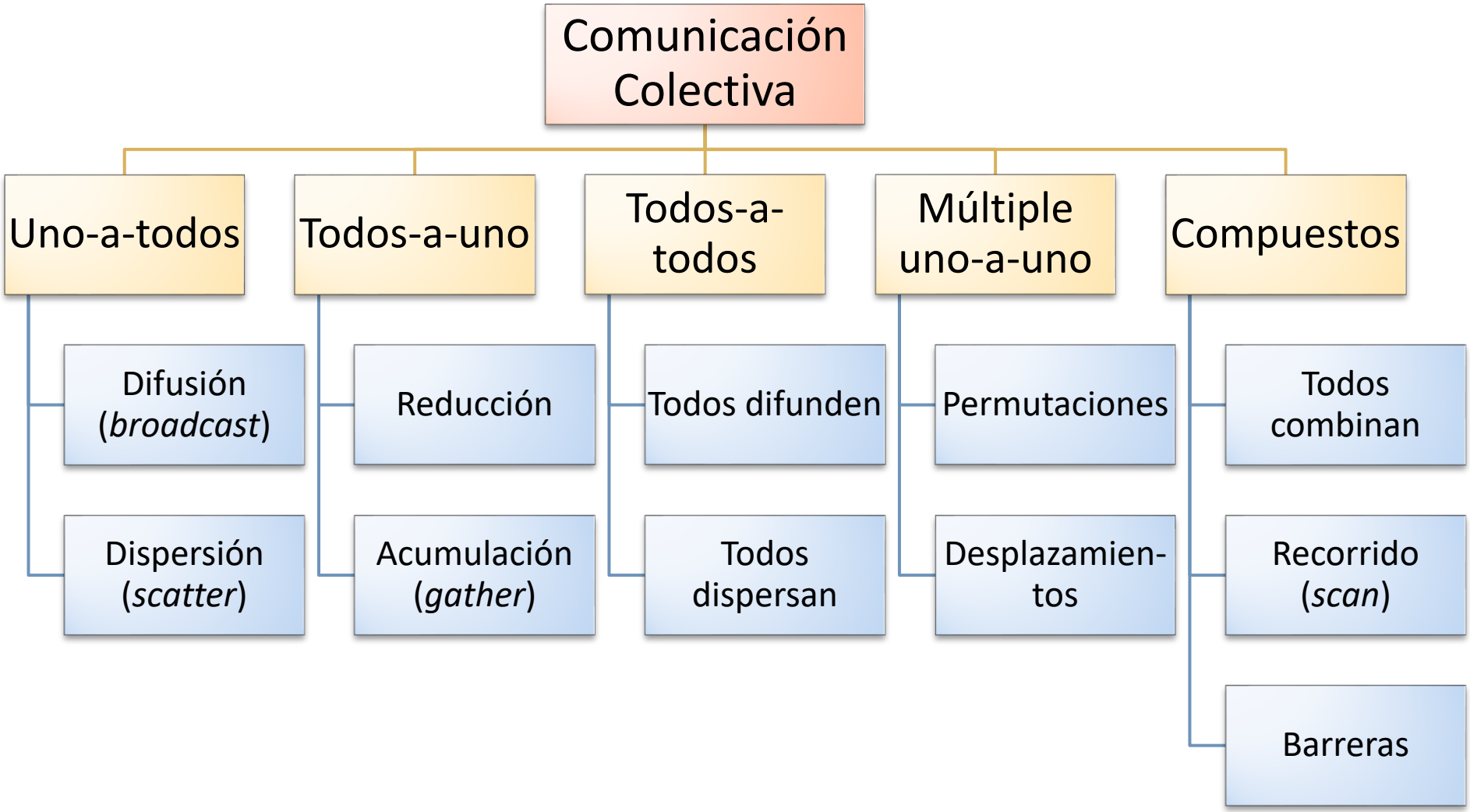
Localizar y Asignar

Comunicar/sincronizar

Desenrolar

# Comunicaciones colectivas

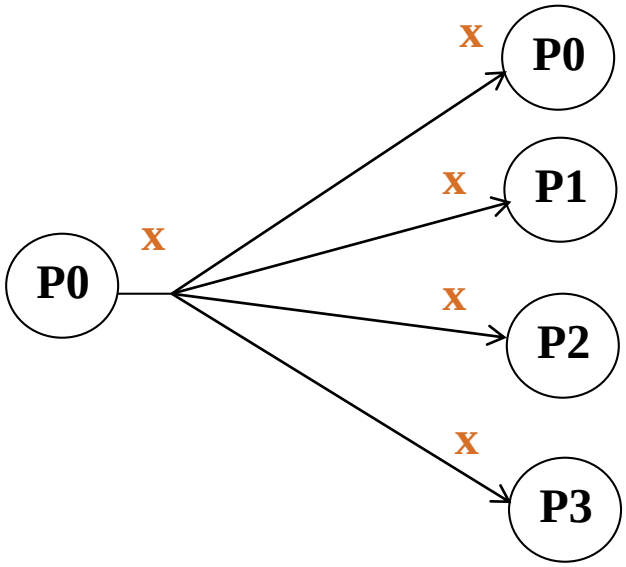




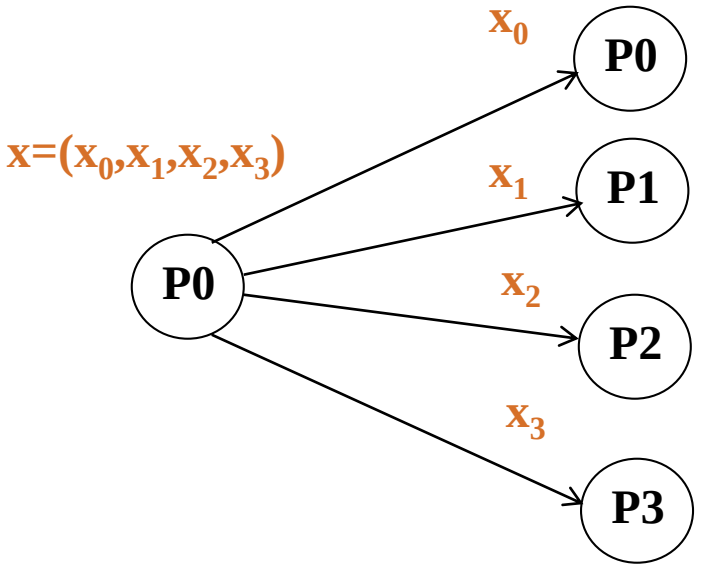
# Comunicación uno-a-todos



Difusión (*broadcast*)



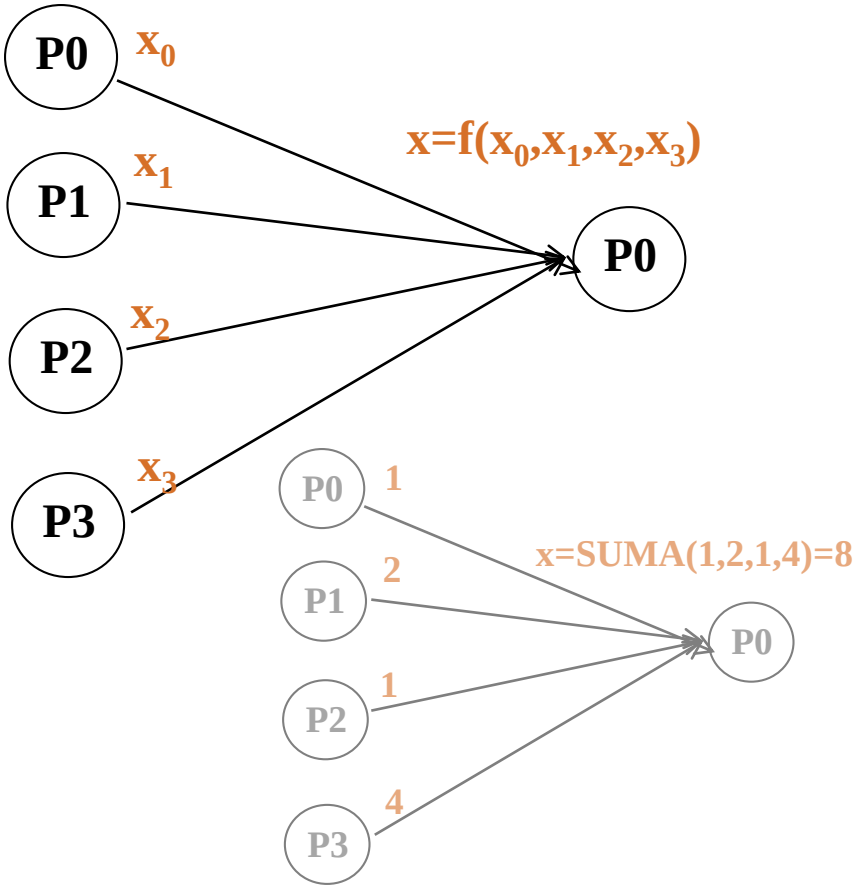

Dispersión (*scatter*)



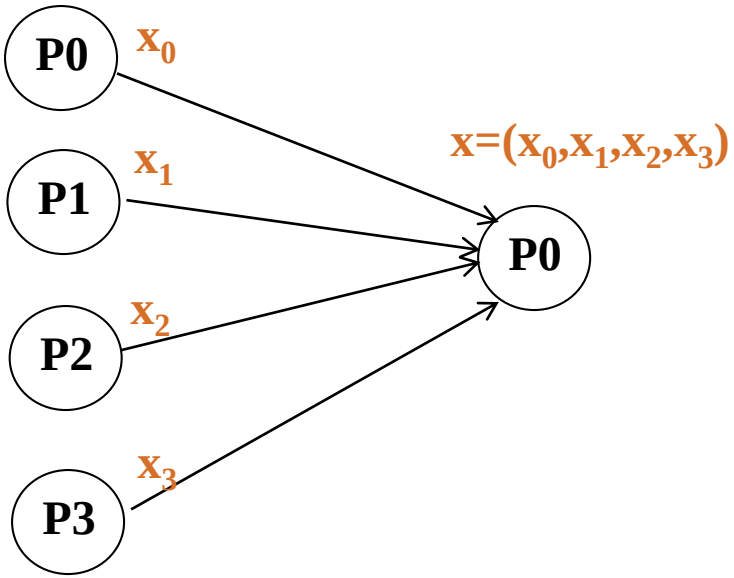
# Comunicación todos-a-uno



## Reducción



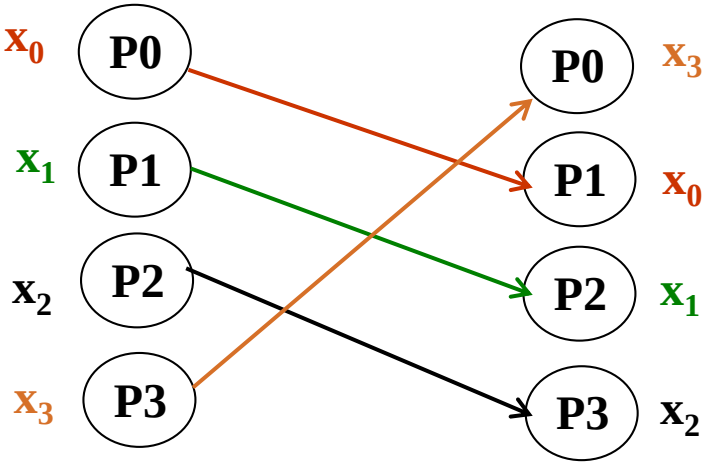

## Acumulación (*gather*)



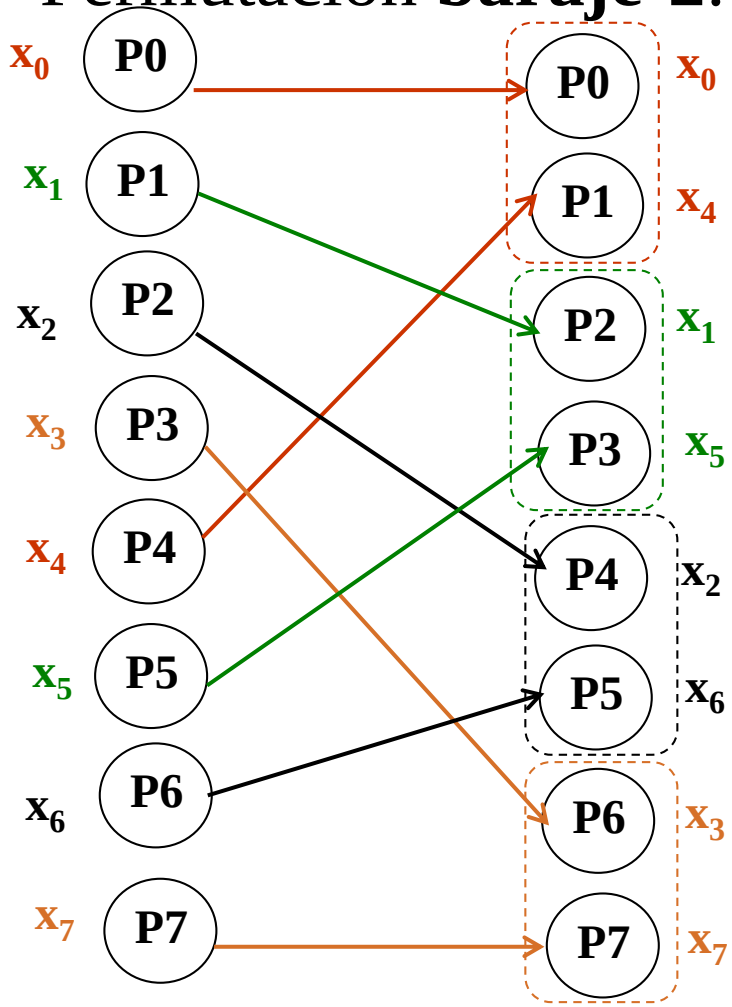
# Comunicación múltiple uno-a-uno



Permutación **rotación**:



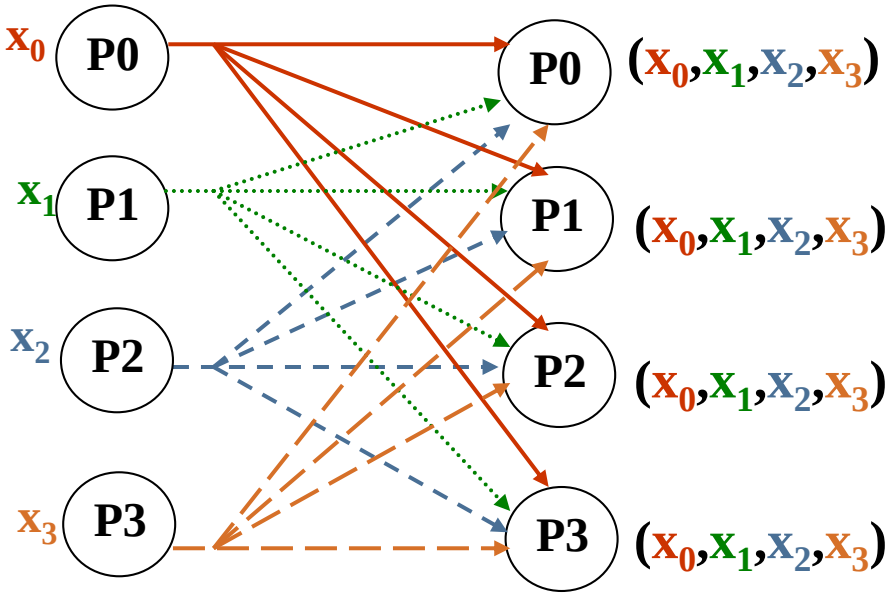

Permutación **baraje-2**:



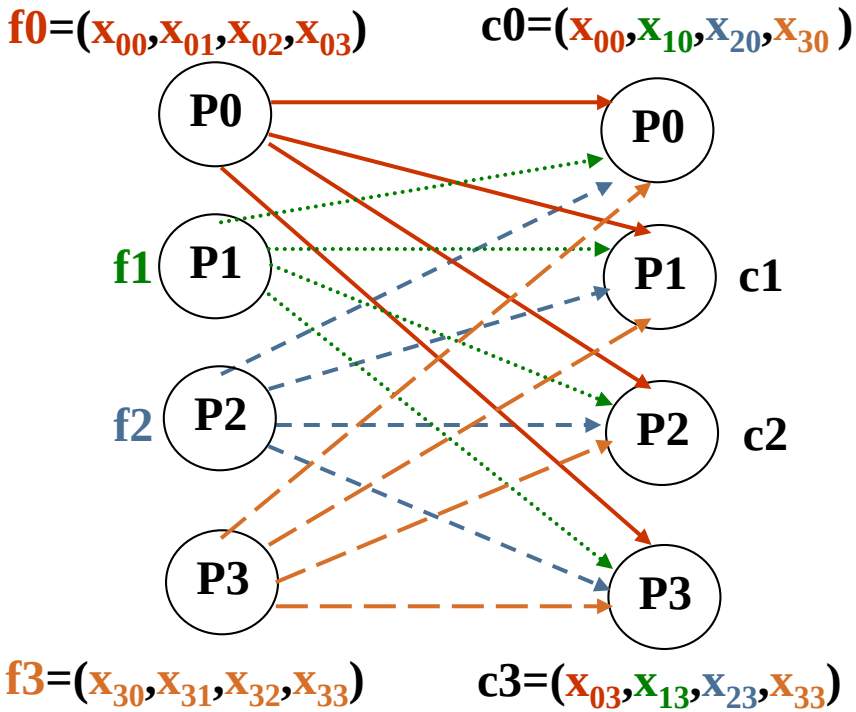
# Comunicación todos-a-todos



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




Todos Dispersan (*all-scatter*)



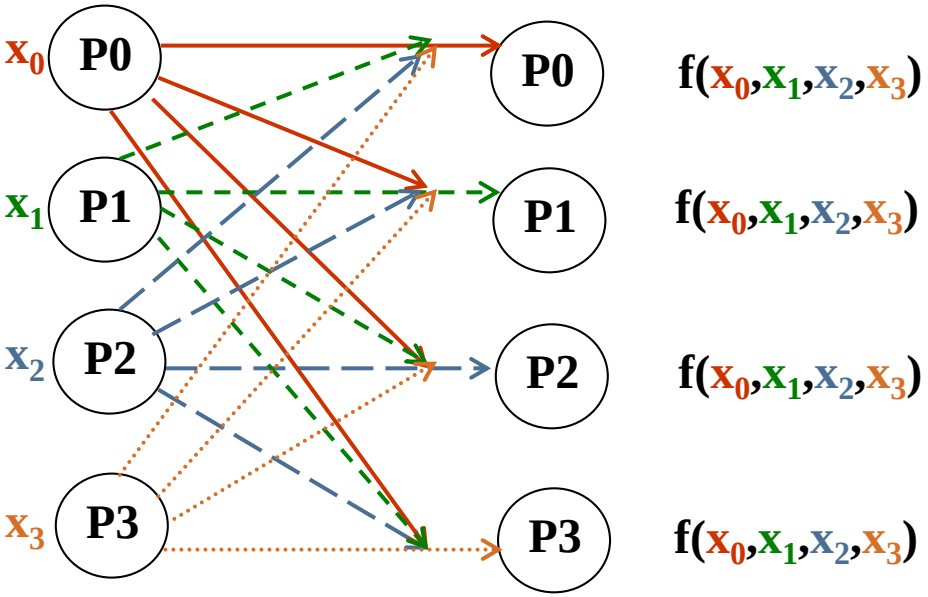

c= columna matriz

f= fila matriz

# Servicios compuestos



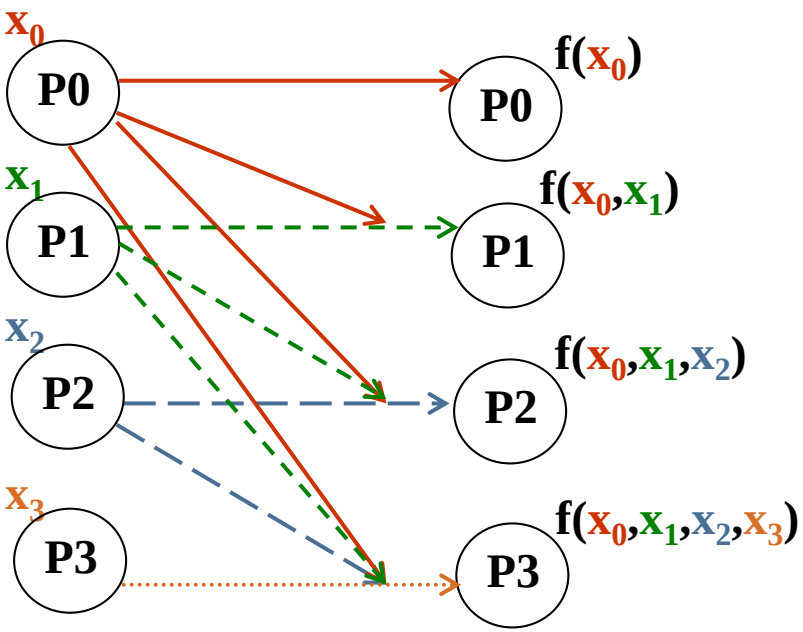
## Todos combinan



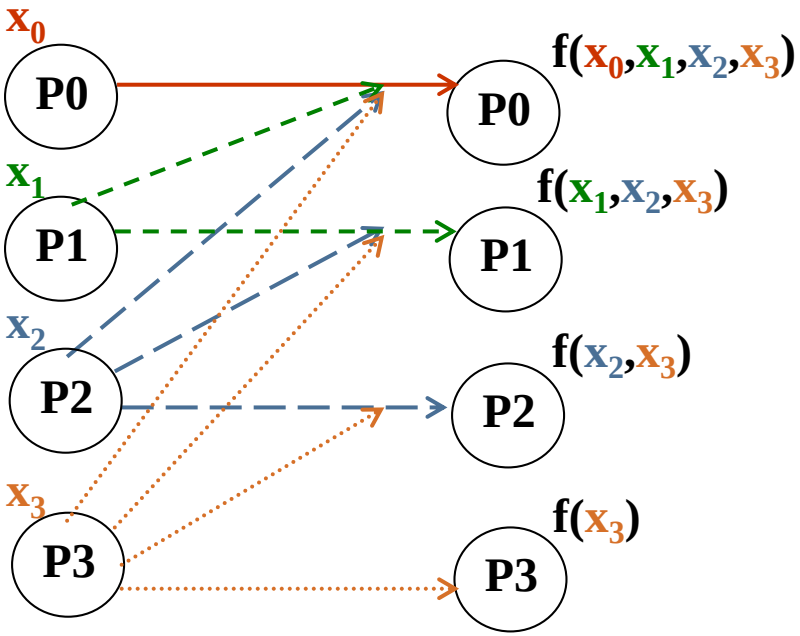
# Servicios compuestos



Recorrido (scan) prefijo paralelo




Recorrido sufijo paralelo



# Ejemplo: comunicación colectiva en OpenMP



| | | |
|---|---|---|
| **Uno-a-todos** | Difusión (Seminario pract. 2) | ✓ Cláusula `firstprivate` (desde thread 0)<br>✓ Directiva `single` con cláusula `copyprivate`<br>✓ 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))

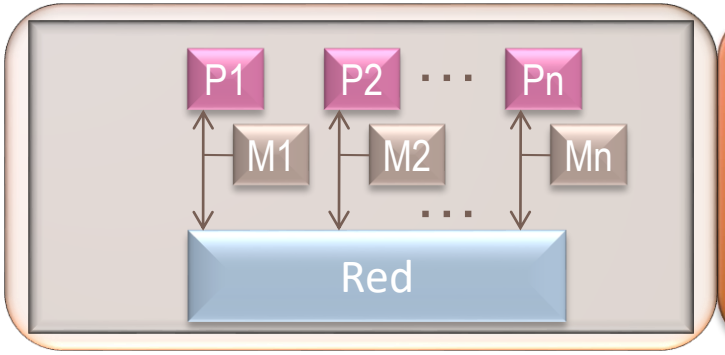
# Contenido Lección 4



- 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

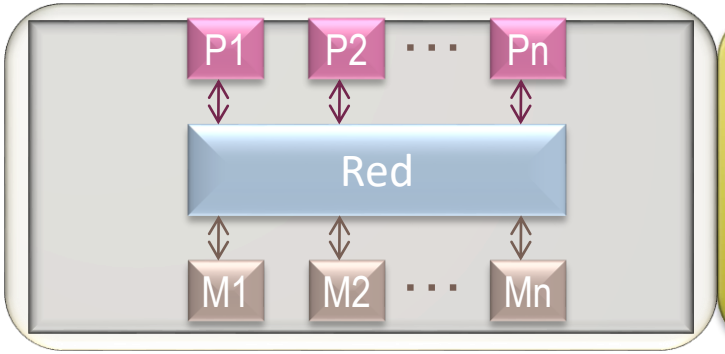
# Estilos de programación y arquitecturas paralelas





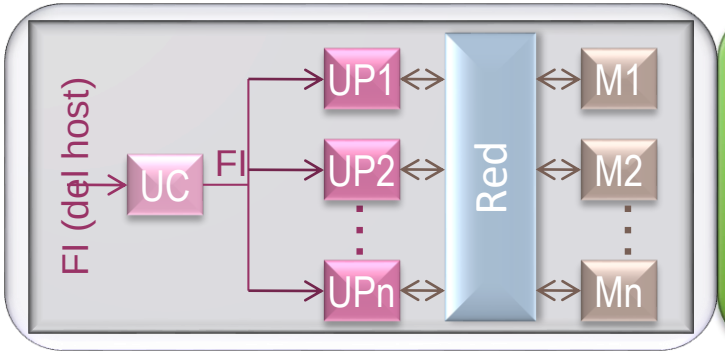

Paso de mensajes

- 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*), C++ con clases thread, mutex, atomic …
- Paralelismo de datos (*data parallelism*)
  - Lenguajes de programación + funciones: HPF (*High Performance Fortran*), Fortran 95 (`forall`, operaciones con matrices/vectores), Nvidia CUDA
  - API (directivas del compilador + funciones - *stream processing*): OpenACC

# Contenido Lección 4



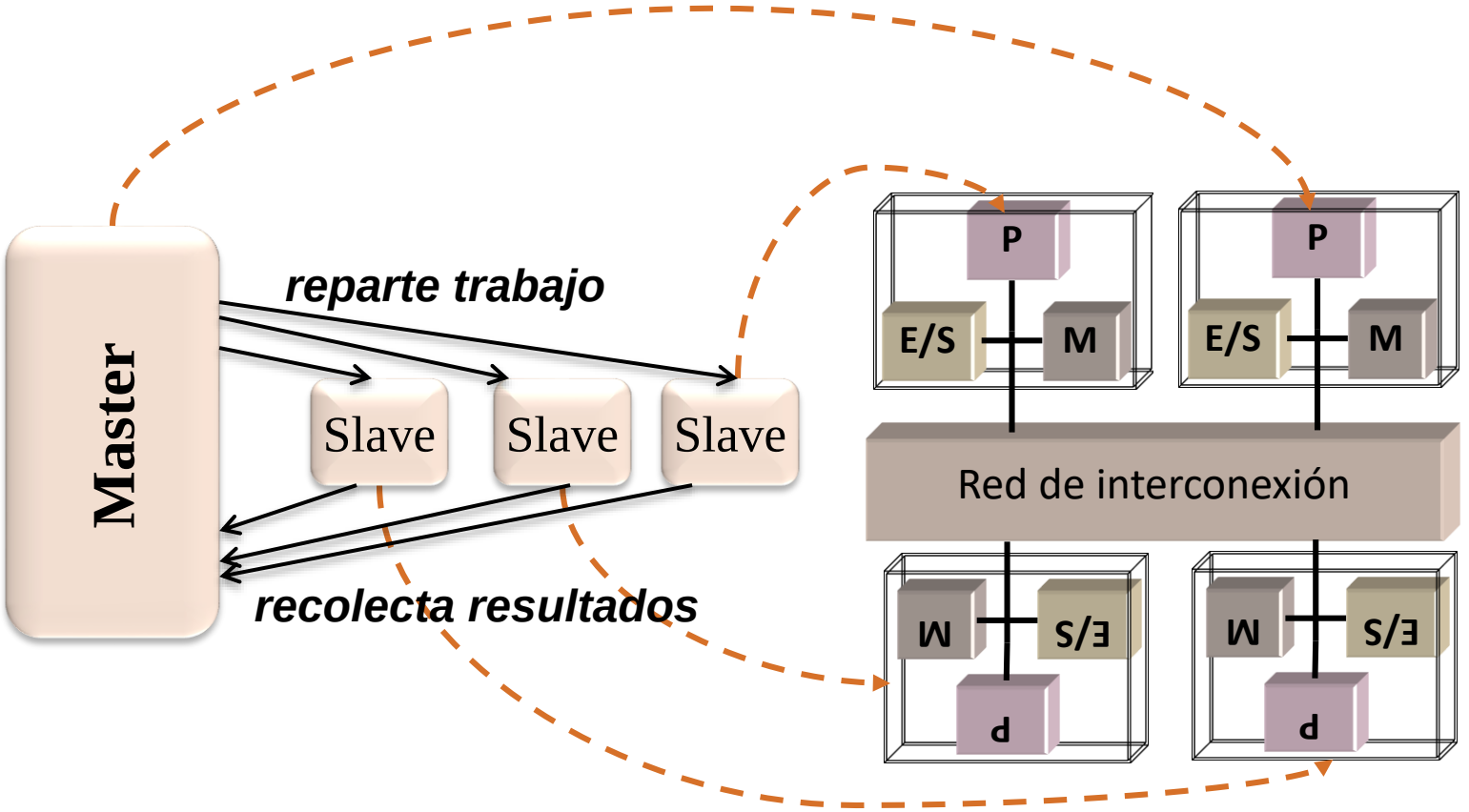
- Problemas que plantea la programación paralela al programador. Punto de partida
- Herramientas para obtener código paralelo
- Estilos/paradigmas de programación paralela
- Estructuras típicas de códigos paralelos

# Estructuras típicas de procesos/ threads/tareas 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

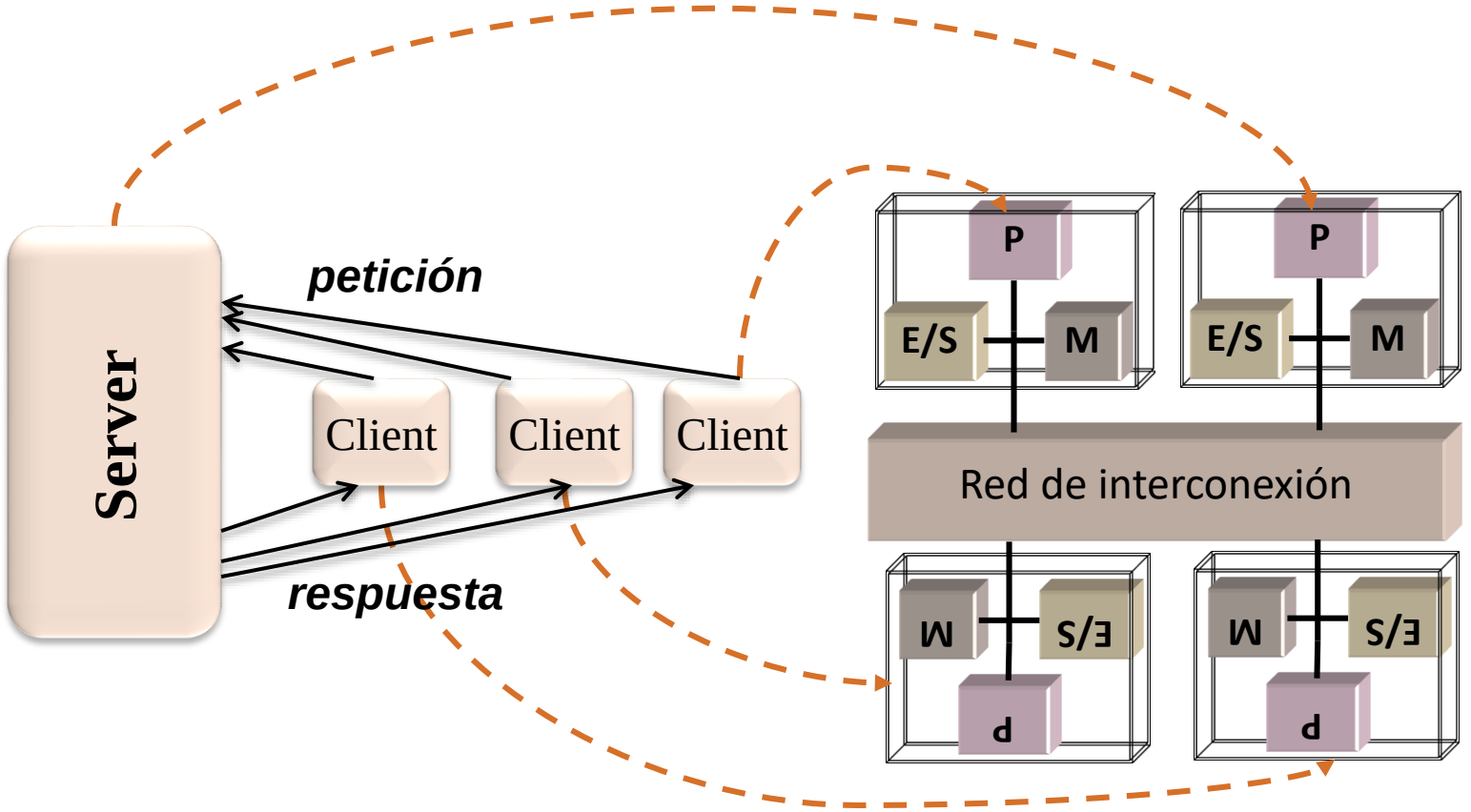
# Master-Slave o granja de tareas





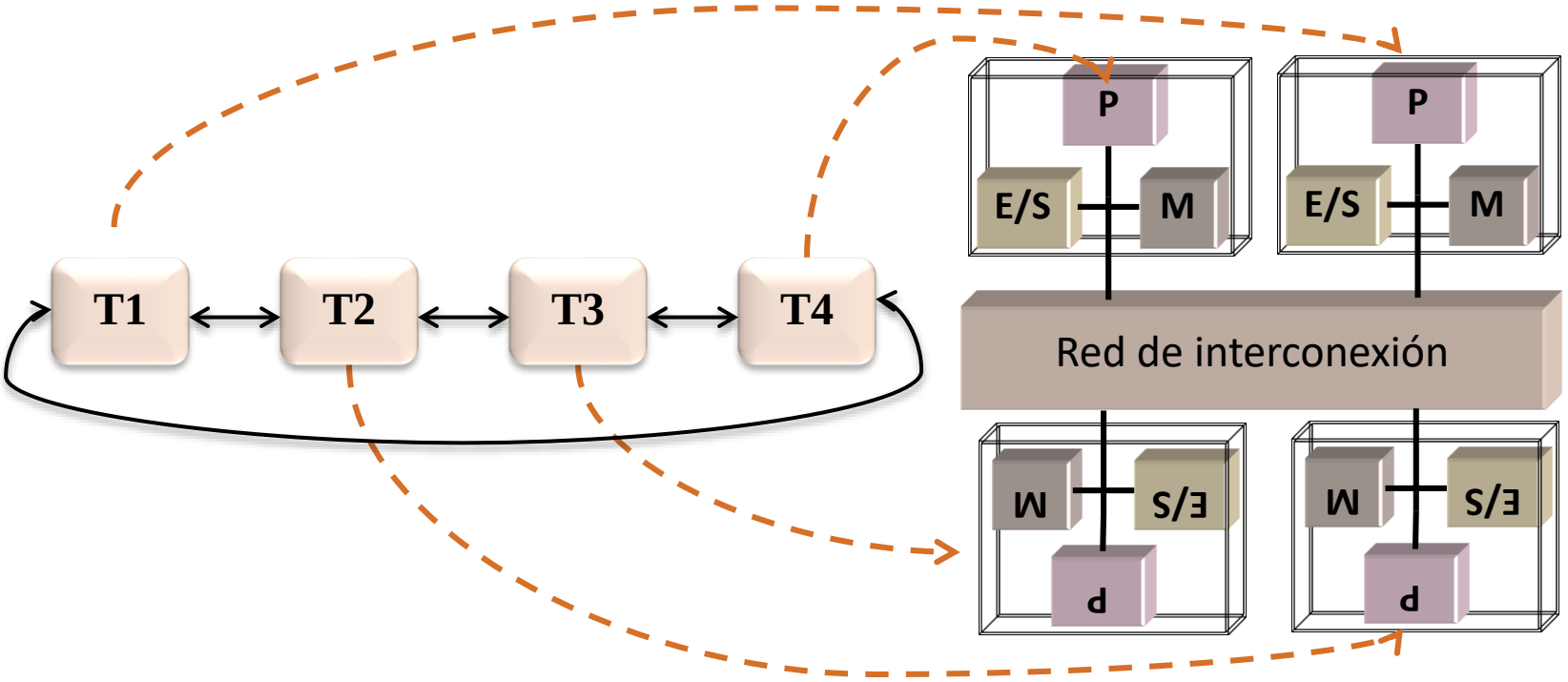
# Cliente-Servidor





# Descomposición de dominio o descomposición de datos I

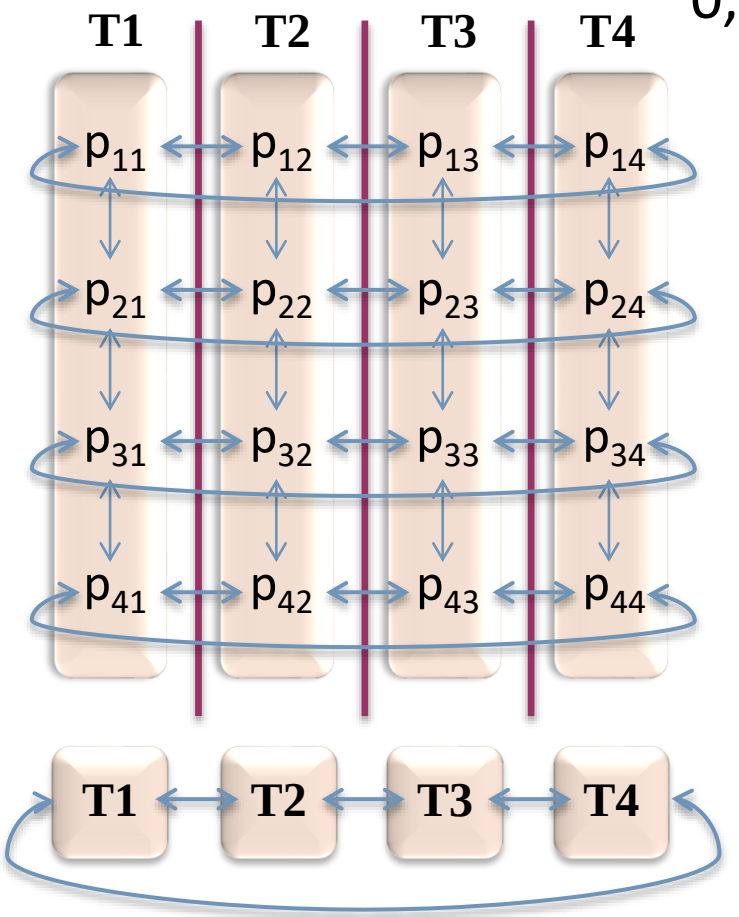




# Descomposición de dominio II. Ej: filtrado imagen



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

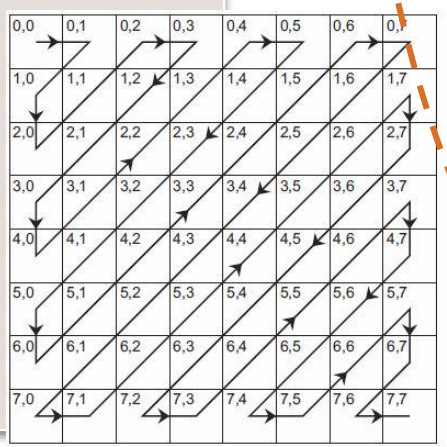


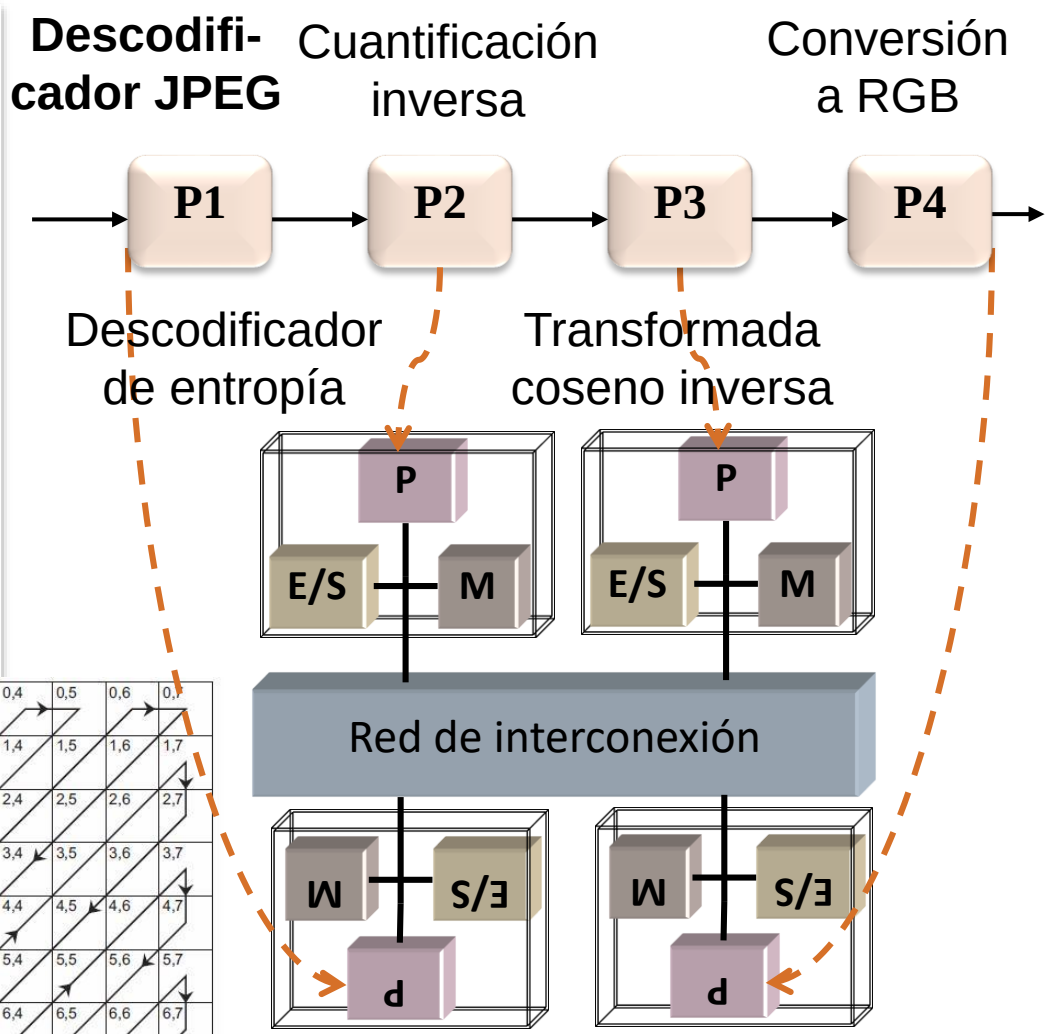

```
#include <omp.h>
…
omp_set_num_threads(M)
#pragma omp parallel private(i)
{ …
  #pragma omp barrier
  …
  for (i=0;i<N;i++)      //recorre filas
    #pragma omp for schedule(static)
    for (j=0;j<M;j++)  //recorre columnas
      pS[i,j] = 0,75*p[i,j] +
        0,0625*(p[i-1,j]+p[i,j-1]+
       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

# Estructura segmentada o de flujo de datos



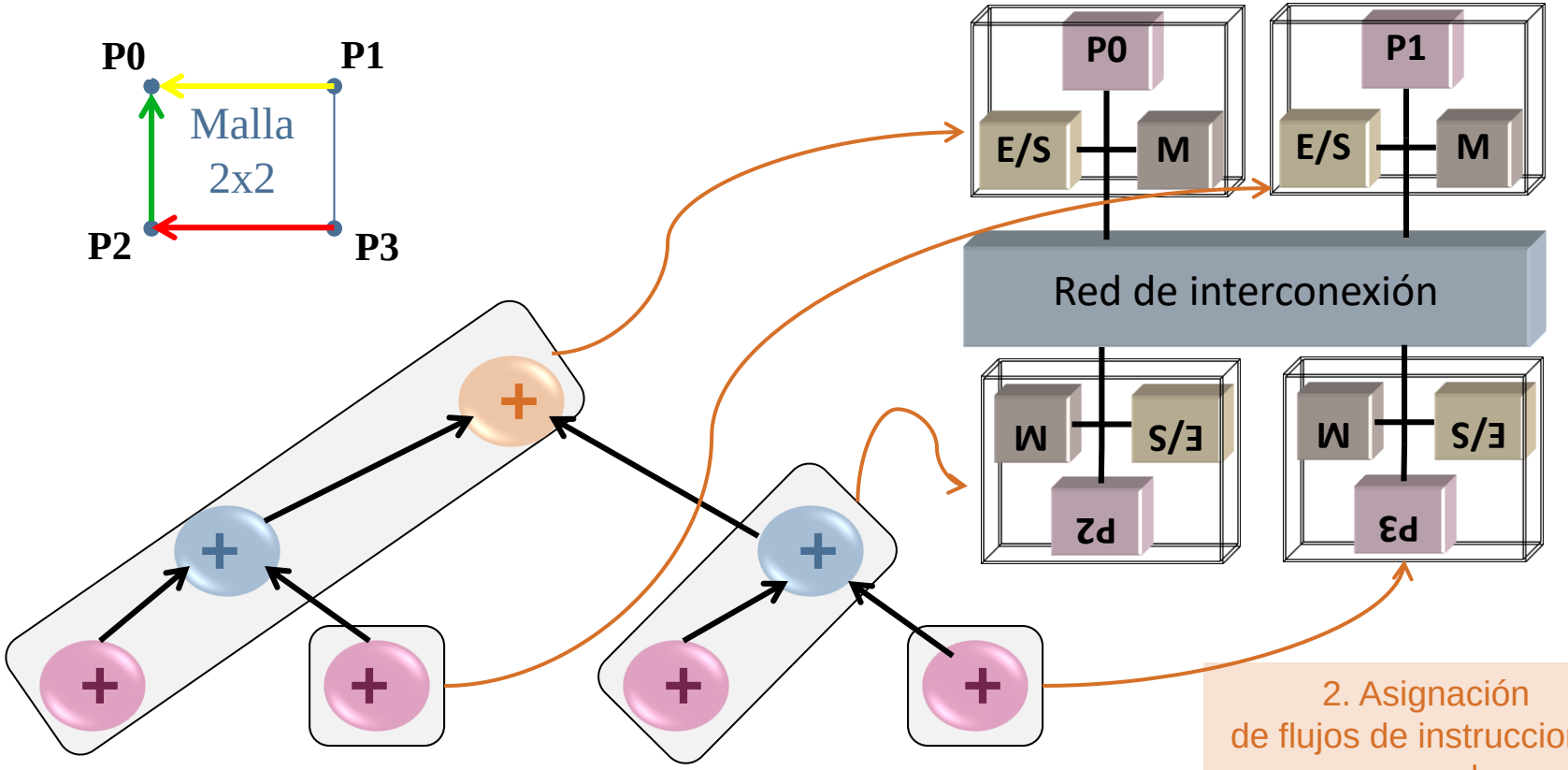
```
#include <omp.h>
...
omp_set_num_threads(4);
...
#pragma omp parallel
{...
 for (i=0;i<N;i++) {
   ...
   #pragma omp sections
   {
    #pragma omp section
      P1();
    #pragma omp section
      P2();
    #pragma omp section
      P3();
    #pragma omp section
      P4();
   } ...
 }
...
} ...
```



# Divide y vencerás o descomposición recursiva






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

2. Asignación de flujos de instrucciones a procesadores

1. Agrupación/Asignación de tareas a flujos de instrucciones

2º curso / 2º cuatr.

Grados en
Ing. Informática

# Arquitectura de Computadores
# Tema 2

# Programación paralela

Material elaborado por Mancia Anguita y Julio Ortega
Profesores: Mancia Anguita, Maribel García y Christian Morillas

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



- Programar en paralelo una aplicación sencilla.
- Distinguir entre asignación estática y dinámica (ventajas e inconvenientes).

# Bibliografía Lección 5

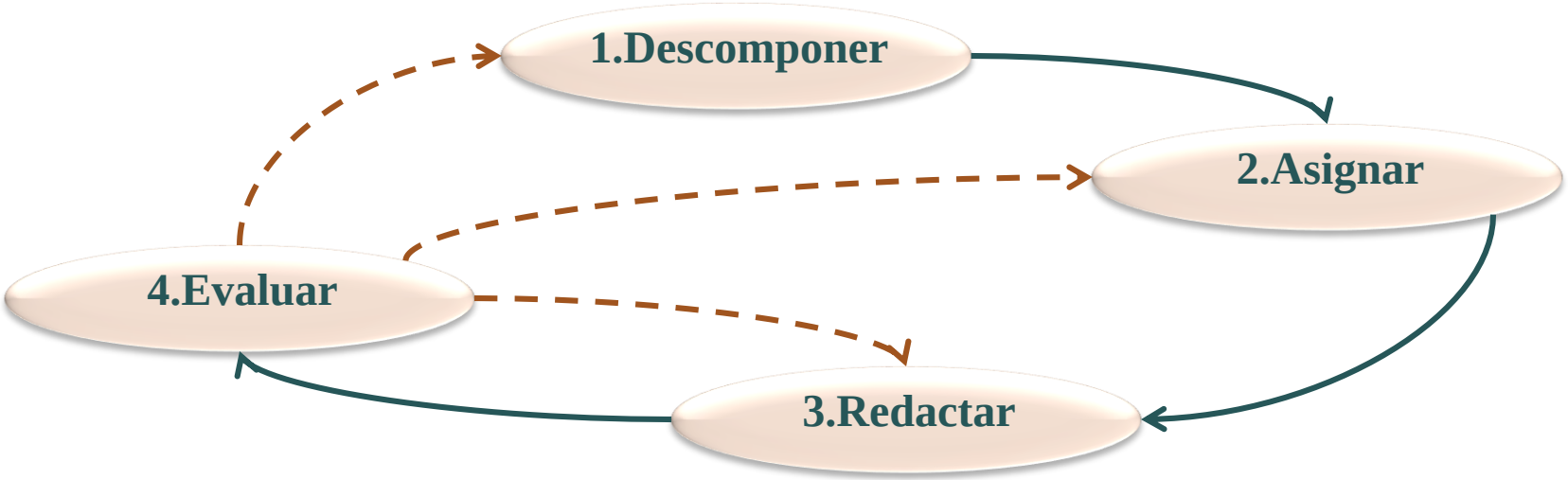


- Fundamental
  - Capítulo 7. Sección 7.4. J. Ortega, M. Anguita, A. Prieto. “Arquitectura de Computadores”. Thomson, 2005. ESII/C.1 ORT arq
- Complementaria
  - Thomas Rauber, Gudula Rünger. “Parallel Programming: for Multicore and Cluster Systems.” Springer, 2010. Disponible en línea (biblioteca UGR): 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



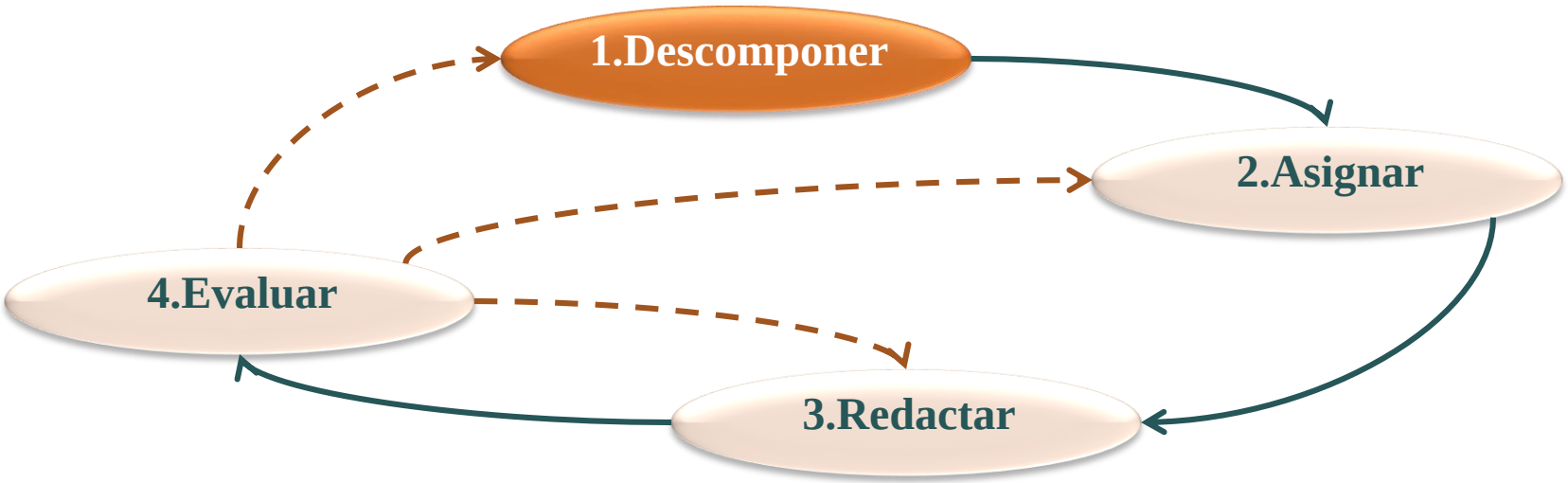
1. *Descomponer (decomposition)* en tareas independientes o Localizar paralelismo
2. *Asignar (planificar+mapear, schedule+map)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



# Proceso de paralelización



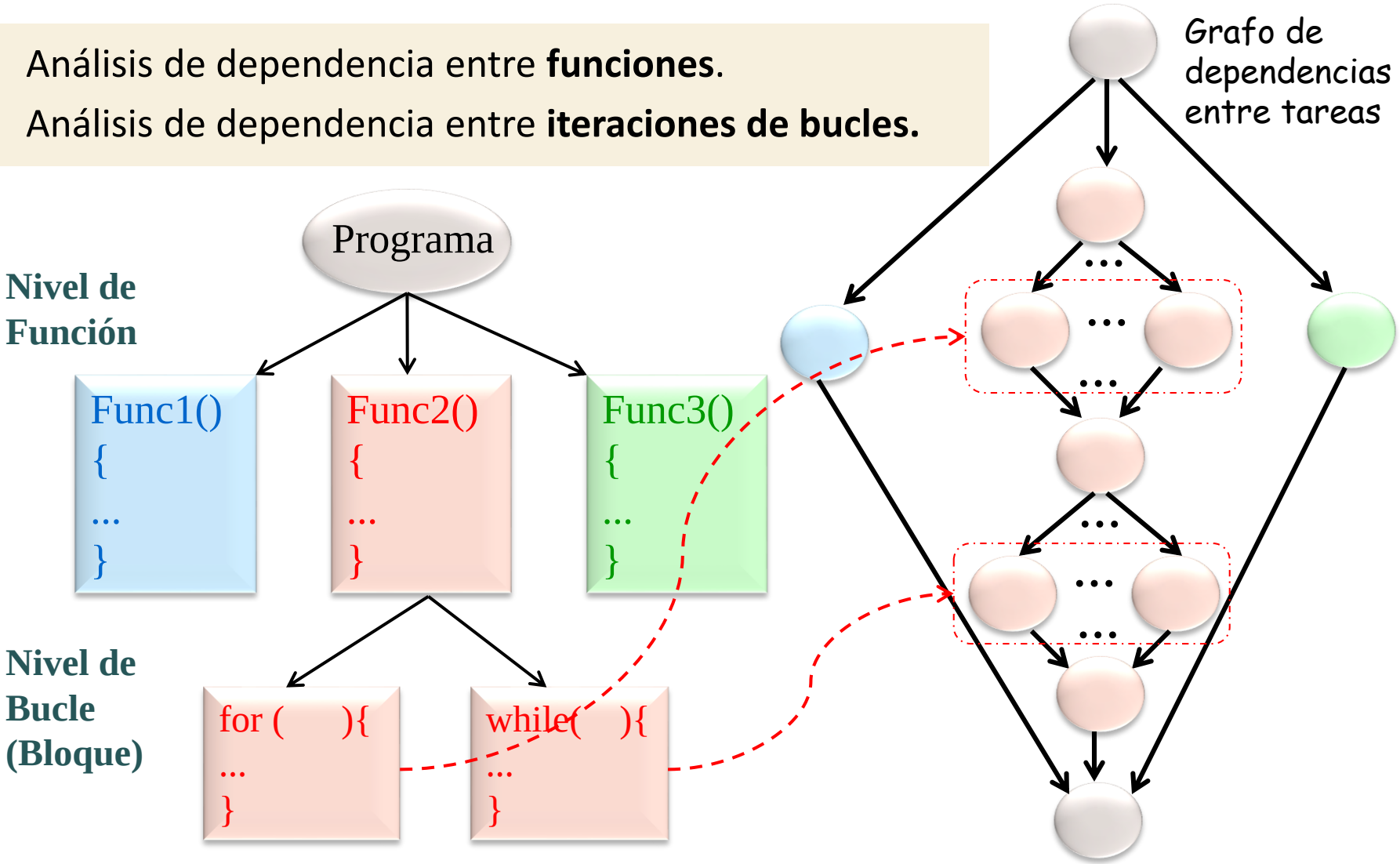
1. *Descomponer* en tareas independientes.
2. *Asignar (planificar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



# Descomposición en tareas independientes



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

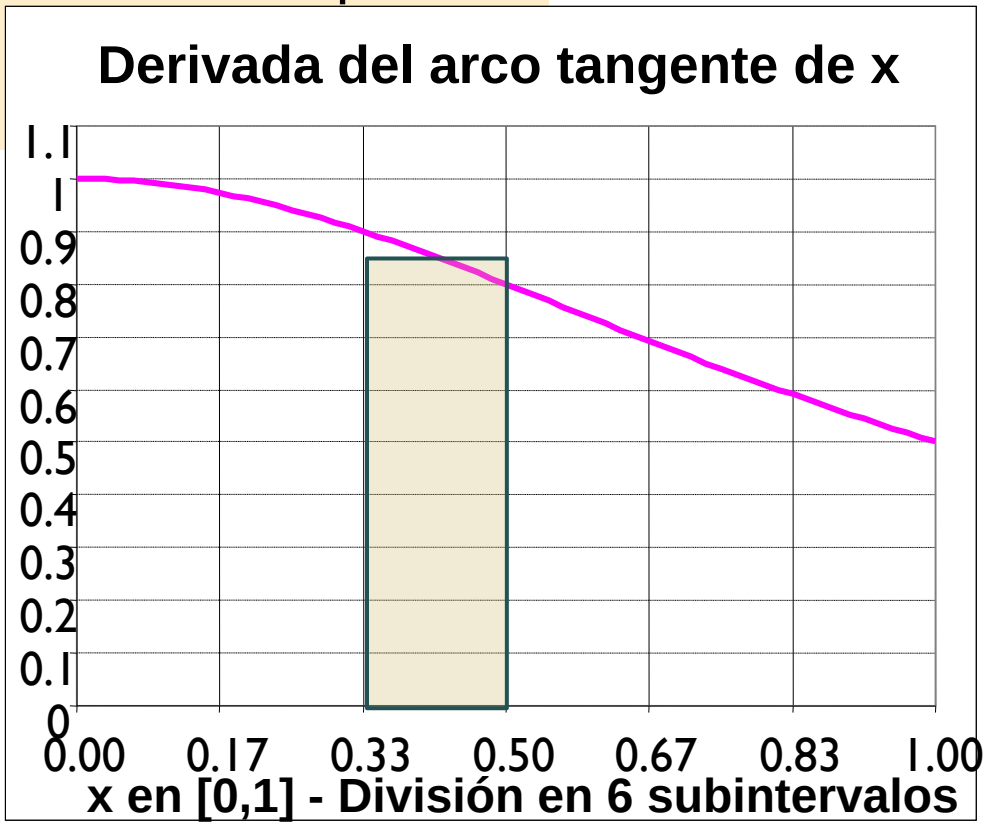


# Ejemplo de cálculo PI: Descomposición en tareas independientes



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

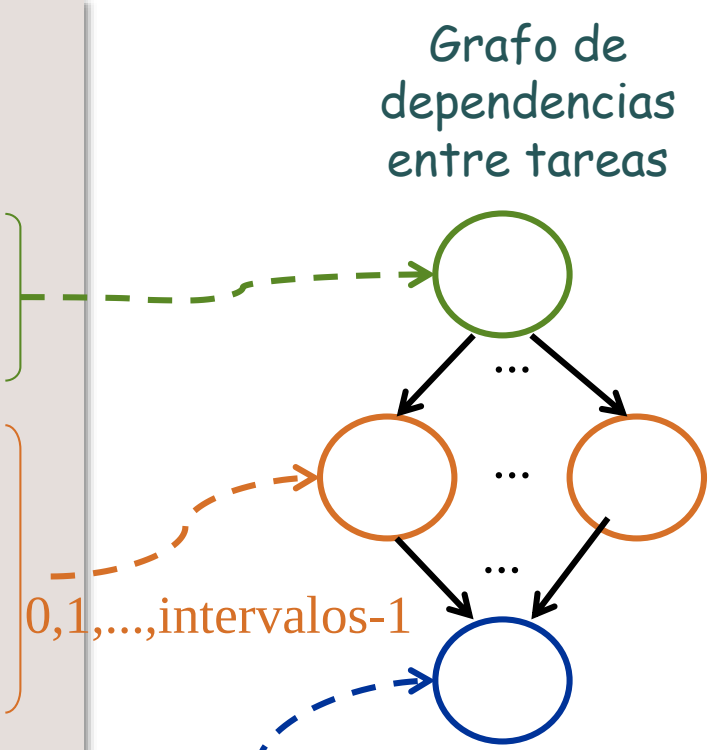
- PI se puede calcular por integración numérica.



# Ejemplo de cálculo PI: Descomposición en tareas independientes



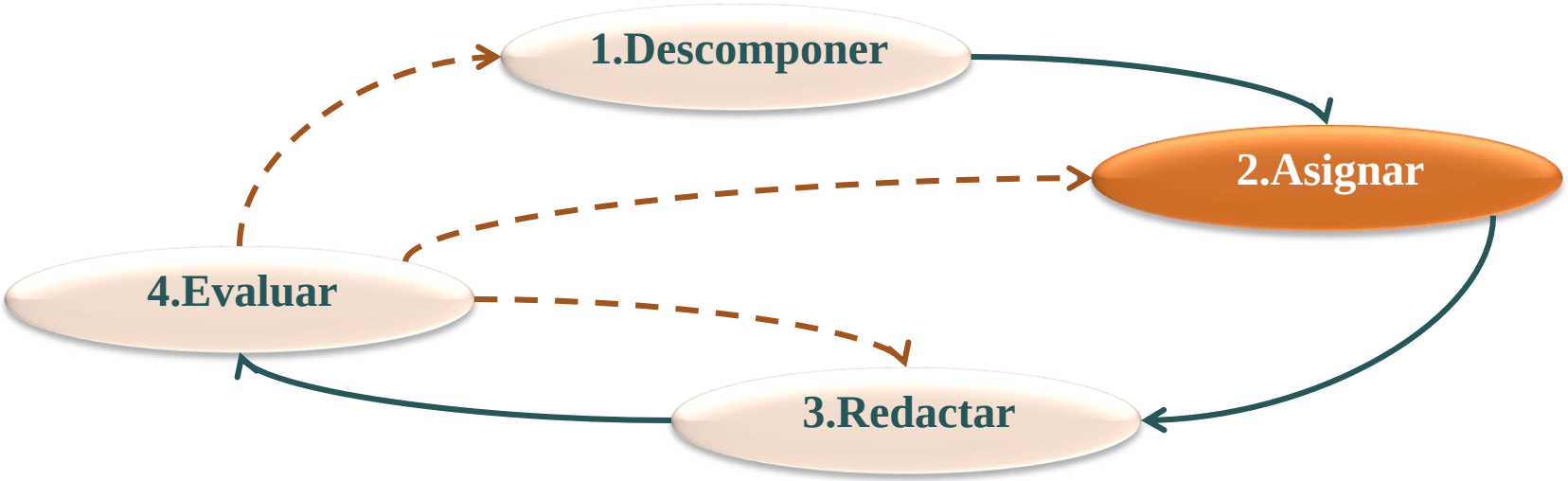
```
main(int argc, char **argv) {
double ancho, sum=0;
int intervalos, i;

  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.

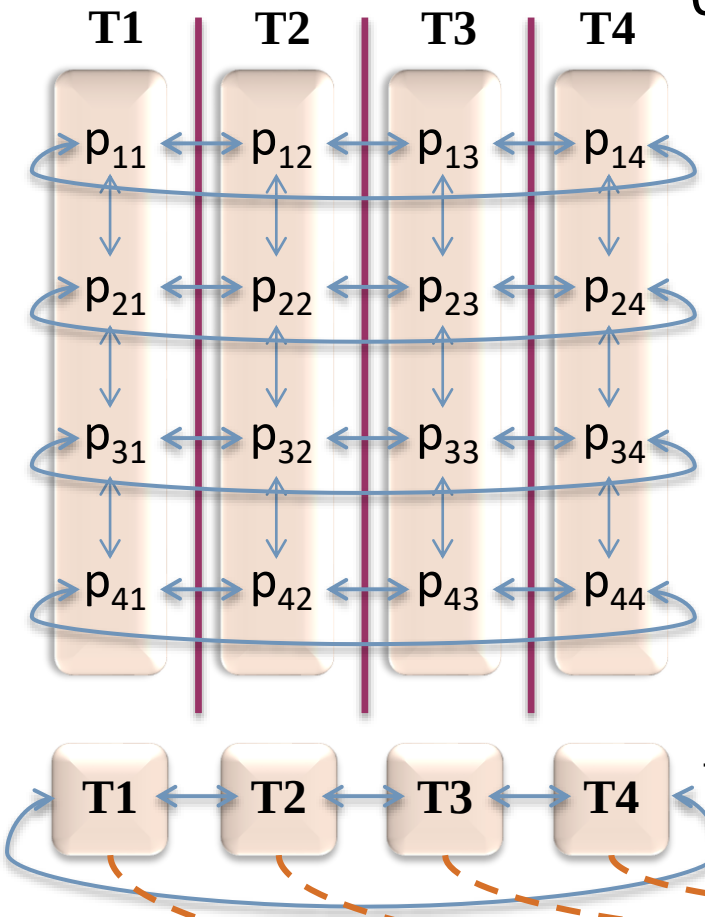


# Asignación (planificación + mapeo). Ej.: filtrado de imagen I

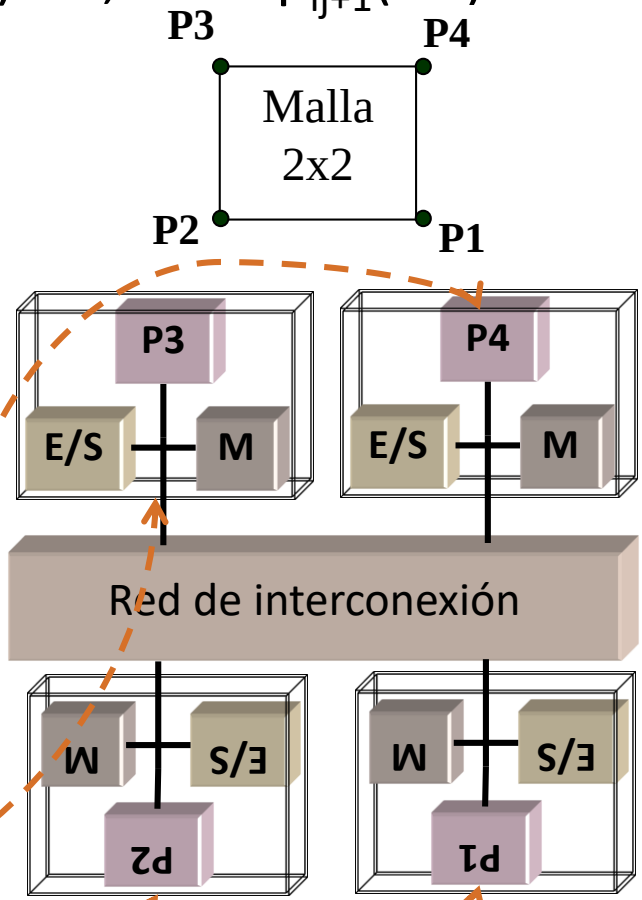


$$p_{ij}(t) = 0{,}75 \times p_{ij}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{i-1j}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{ij-1}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{i+1j}(t-1) + 0{,}0625 \times p_{ij+1}(t-1)$$

**Planificación**: agrupar tareas en threads




**Mapeo**: asignar threads a cores/ procesadores



# Asignación de tareas a procesos/threads I

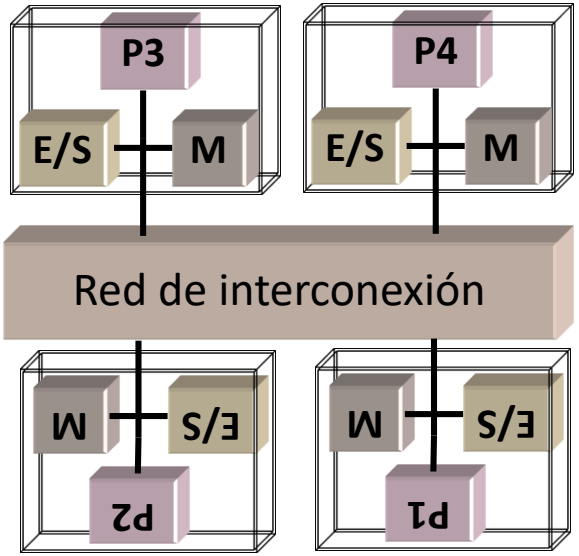


- Incluimos: agrupación de tareas en procesos/threads (*scheduling*) y mapeo a procesadores/cores (*mapping*)
- La **granularidad** de la carga de trabajo (tareas) asignada a los procesos/threads depende de:
  - número de cores o procesadores o elementos de procesamiento
  - tiempo de comunicación/sincronización 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 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

# Mapeo de procesos/threads a unidades de procesamiento

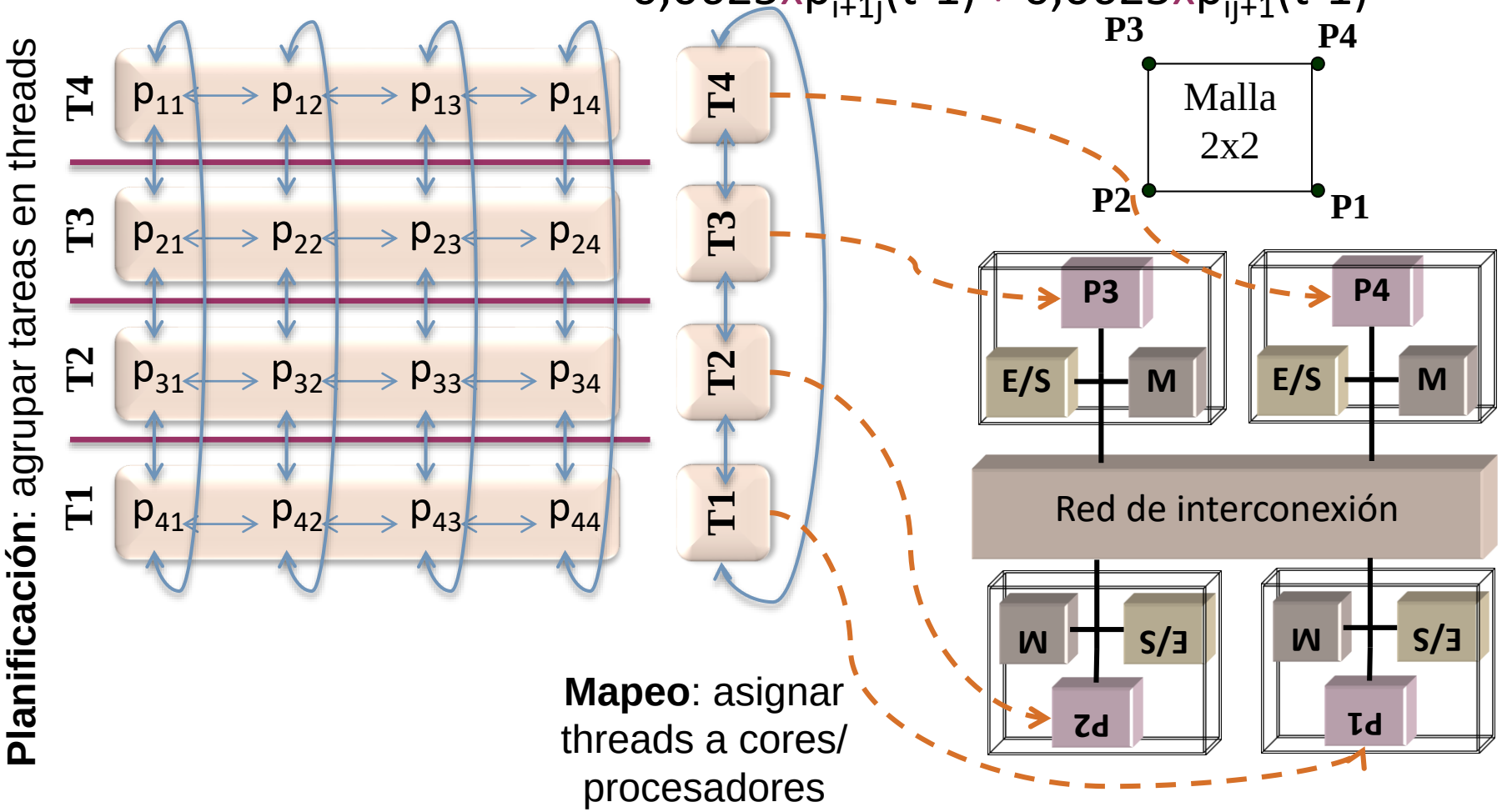


- Normalmente se deja al SO el mapeo de threads (*light process*)
- Lo puede hacer el entorno o sistema en tiempo de ejecución (*runtime system* de la herramienta de programación)
- El programador puede influir

# 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

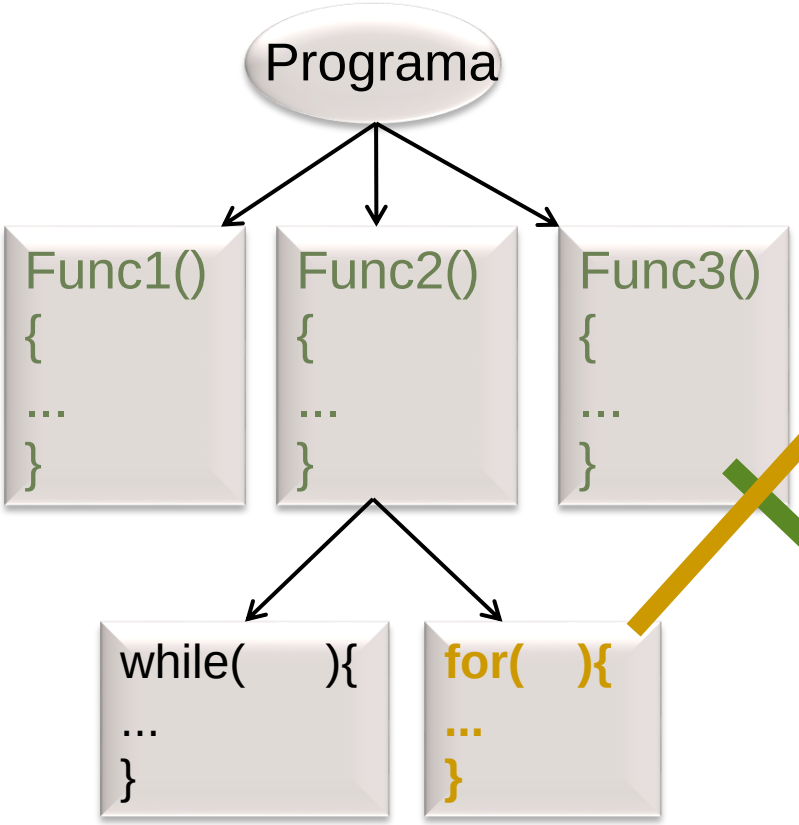
```
#include <omp.h>
…
omp_set_num_threads(M)
#pragma omp parallel private(i)
{
   for (i=0;i<N;i++) {
      #pragma omp for
      for (j=0;j<M;j++) {
         pS[i,j] = 0,75*p[i,j] +
                   0,0625*(p[i-1,j]+p[i,j-1]+
                           p[i+1,j]+ p[i,j+1]);
      }
   }
}
…
```

## 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]);
      }
   }
}
…
```

# 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 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**

$$\texttt{for (i=}\ \mathrm{idT}*\frac{\mathrm{Iter}}{\mathrm{nT}}\ \texttt{; i<}\ (\mathrm{idT}+1)*\frac{\mathrm{Iter}}{\mathrm{nT}}\ \texttt{; i++) \{}$$

```
código para i     }
```

# 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);

   }
```

- Dinámica e implícita

Ej. con OpenMP

NOTA: La variable i se supone inicializada a 0

# Asignación. Ej.: multiplicación matriz por vector I



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

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

N=8
M=6

$$= \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \end{pmatrix}$$

0: $c(1) = \sum_{k=0}^{M-1} A(1,k) \bullet b(k)$, $c(2) = \sum_{k=0}^{M-1} A(2,k) \bullet b(k)$

1: $c(3) = \sum_{k=0}^{M-1} A(3,k) \bullet b(k)$, $c(4) = \sum_{k=0}^{M-1} A(4,k) \bullet b(k)$

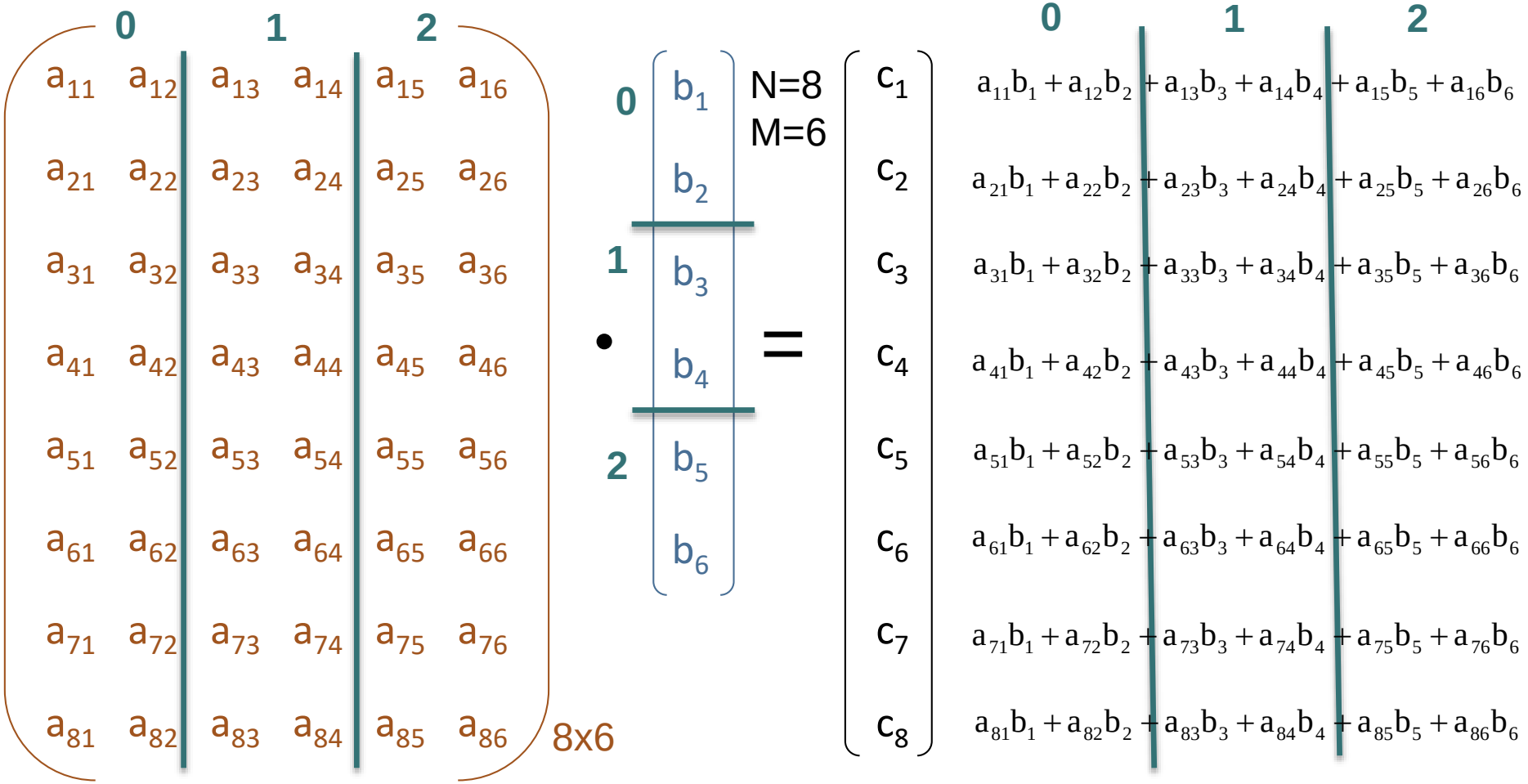
2: $c(5) = \sum_{k=0}^{M-1} A(5,k) \bullet b(k)$, $c(6) = \sum_{k=0}^{M-1} A(6,k) \bullet b(k)$

3: $c(7) = \sum_{k=0}^{M-1} A(7,k) \bullet b(k)$, $c(8) = \sum_{k=0}^{M-1} A(8,k) \bullet b(k)$

# Asignación. Ej.: multiplicación matriz por vector II



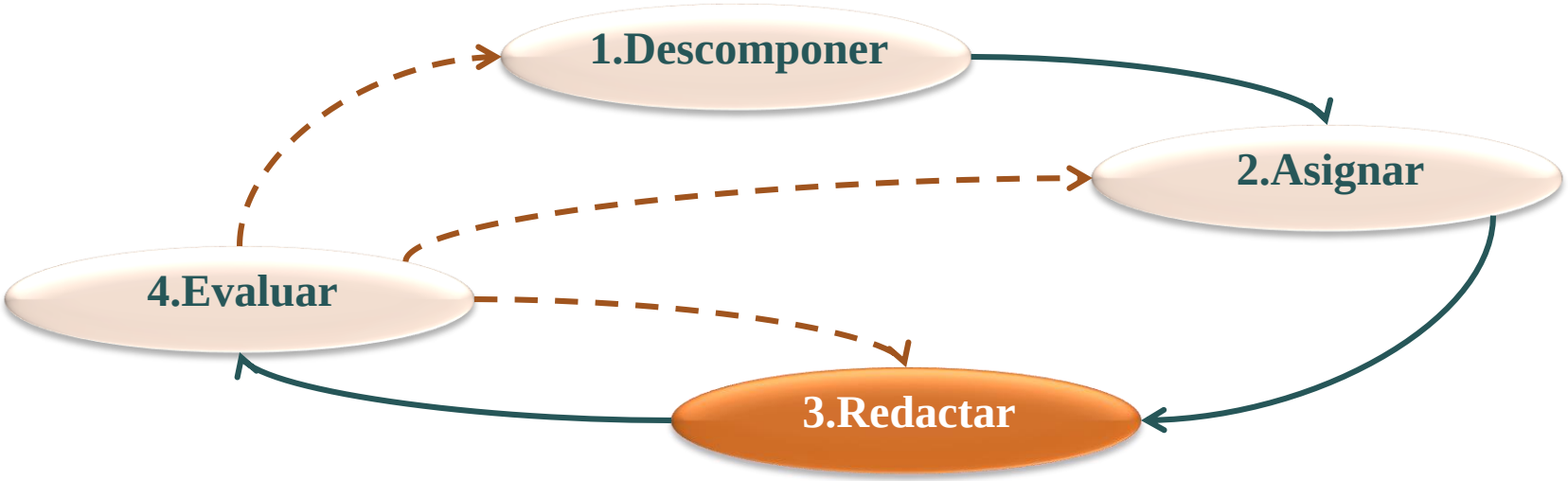
$$c = A \bullet b; \quad c_i = \sum_{k=0}^{M-1} a_{ik} \bullet b_k = a_i^T \bullet b, \quad c(i) = \sum_{k=0}^{M-1} A(i,k) \bullet b(k), \; i = 0,\ldots N\text{-}1$$



# Proceso de paralelización



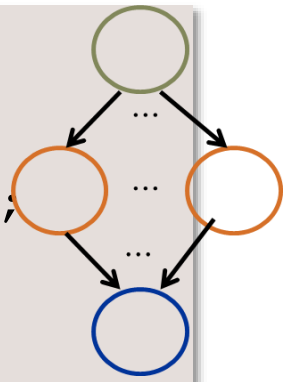
1. *Descomponer* en tareas independientes.
2. *Asignar (planificar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



# 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

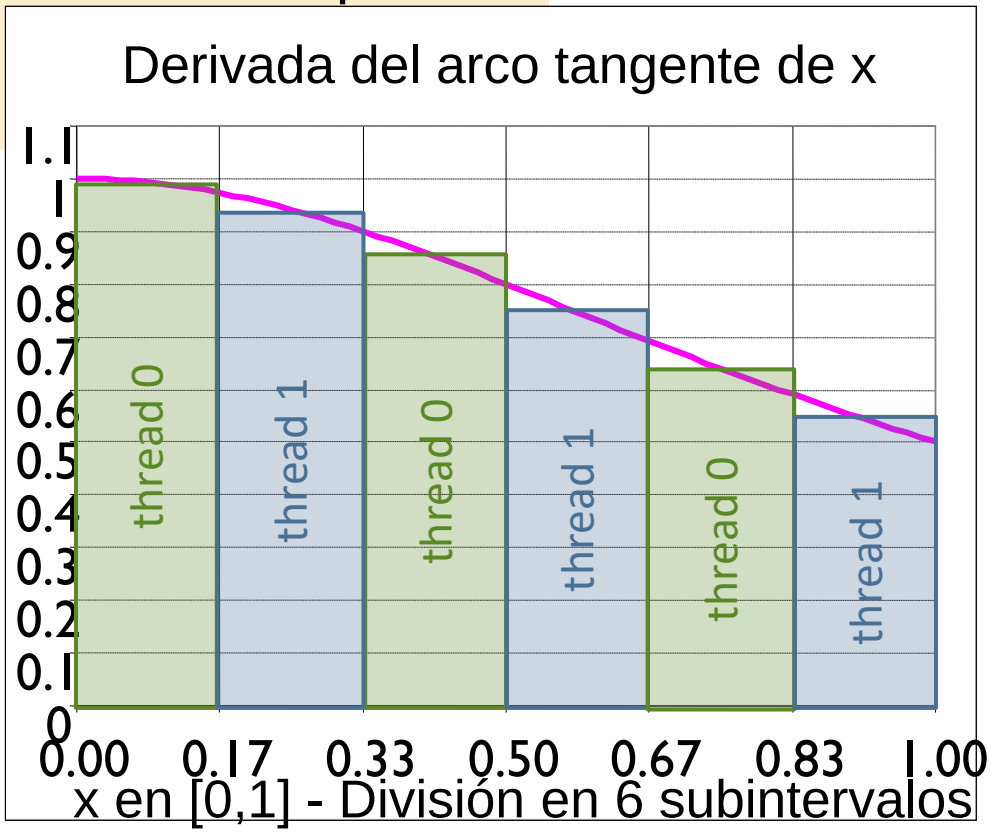
Localizar

# Asignación de tareas a 2 threads estática por turno rotatorio



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

- PI se puede calcular por integración numérica.



# Ejemplo: cálculo de PI 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

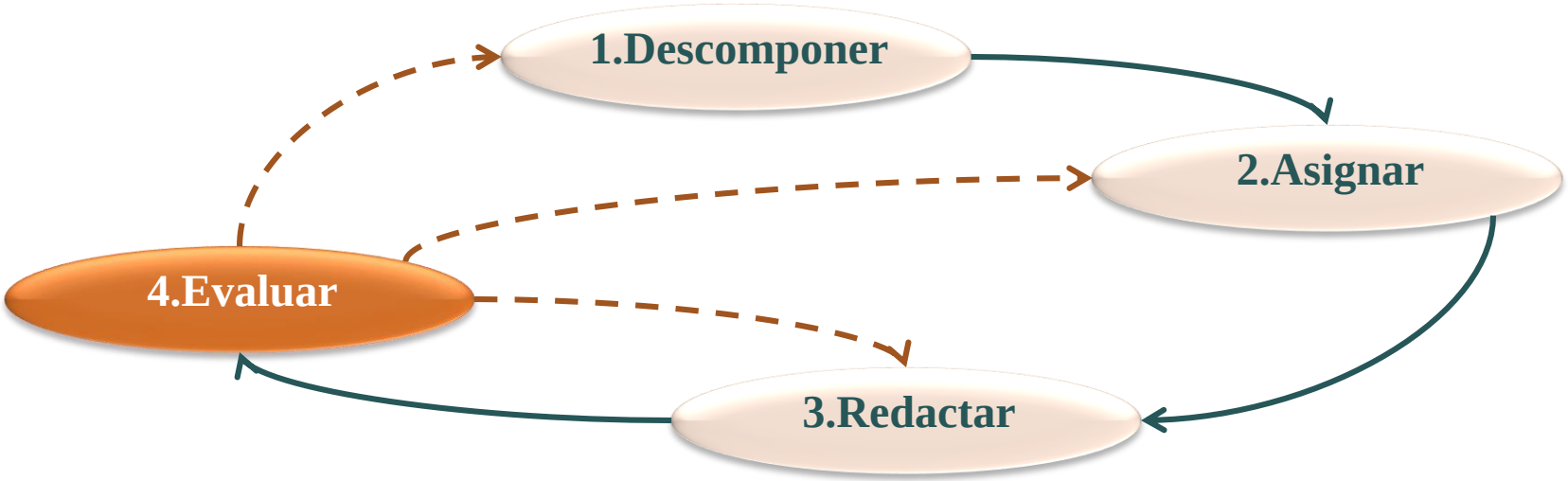
Comunicar/sincronizar

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.

Grados en
Ing. Informática

# Arquitectura de Computadores
# Tema 2

# Programación paralela

Material elaborado por Mancia Anguita y Julio Ortega
Profesores: Mancia Anguita, Maribel García y Christian Morillas

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

# Objetivos Lección 6



- Obtener ganancia y escalabilidad en el contexto de procesamiento paralela
- Aplicar la ley de Amdahl en el contexto de procesamiento paralela
- Comparar la ley de Amdahl y ganancia escalable.

# Bibliografía



- Fundamental
  - Capítulo 2, Secciones 4. M. Anguita, J. Ortega. Fundamentos y problemas de Arquitectura de Computadores, Editorial Técnica Avicam. ESIIT/C.1 ANG fun
  - 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:

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

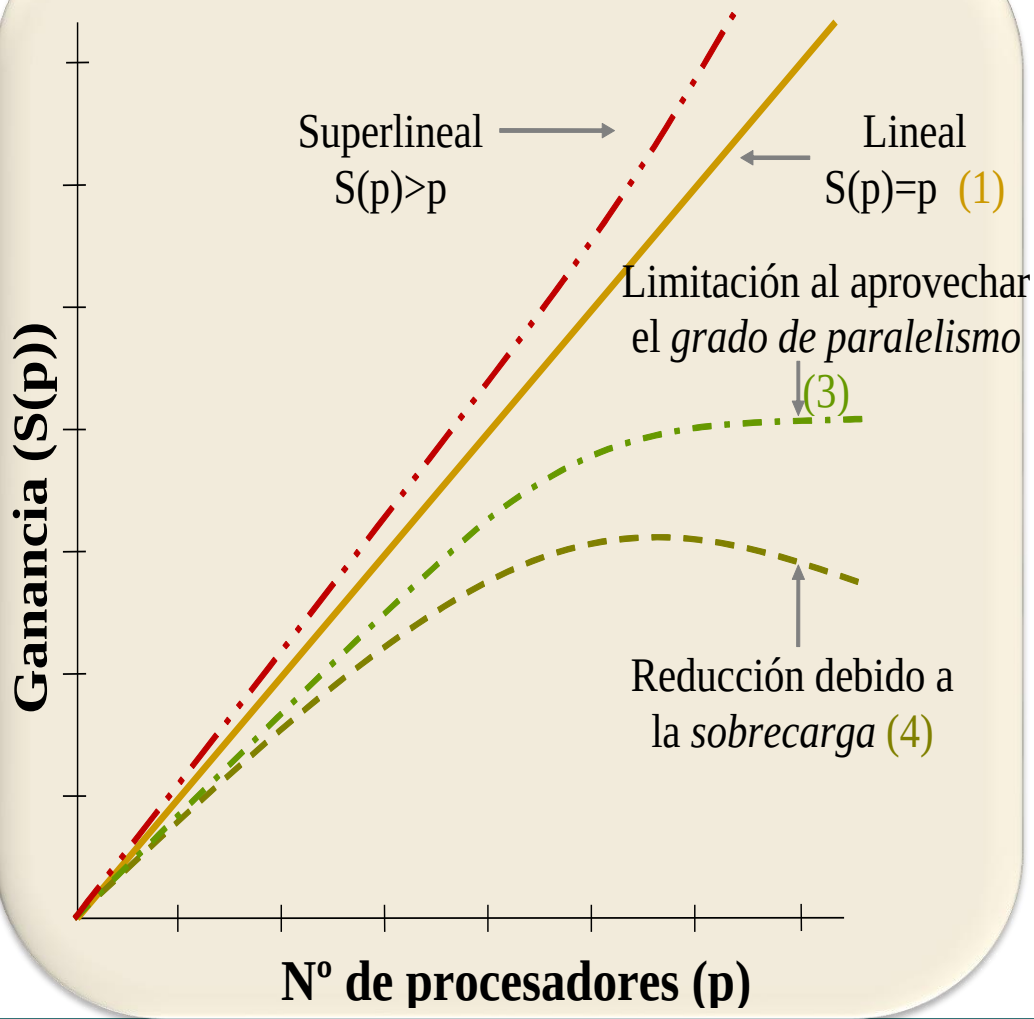
*Ganancia en velocidad (Speedup)*

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

**Sobrecarga *(Overhead)*:**

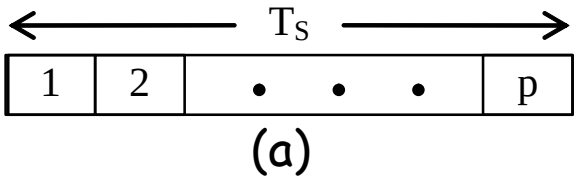
- Comunicación/sincronización.
- Crear/terminar procesos/threads.
- Cálculos o funciones no presentes en versión secuencial.
- Falta de equilibrado.

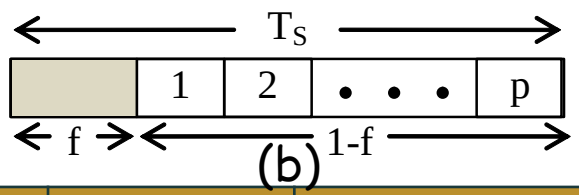
## Escalabilidad:

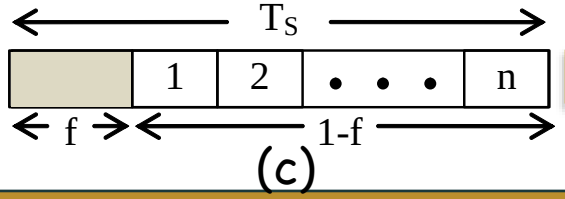


# Ganancia en prestaciones. Ganancia máxima





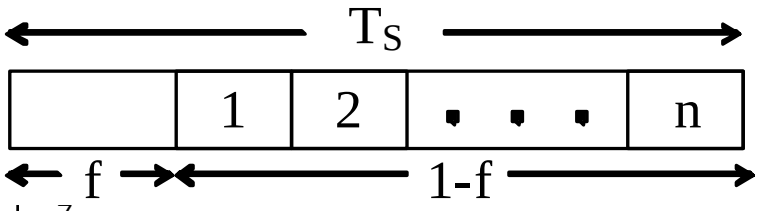



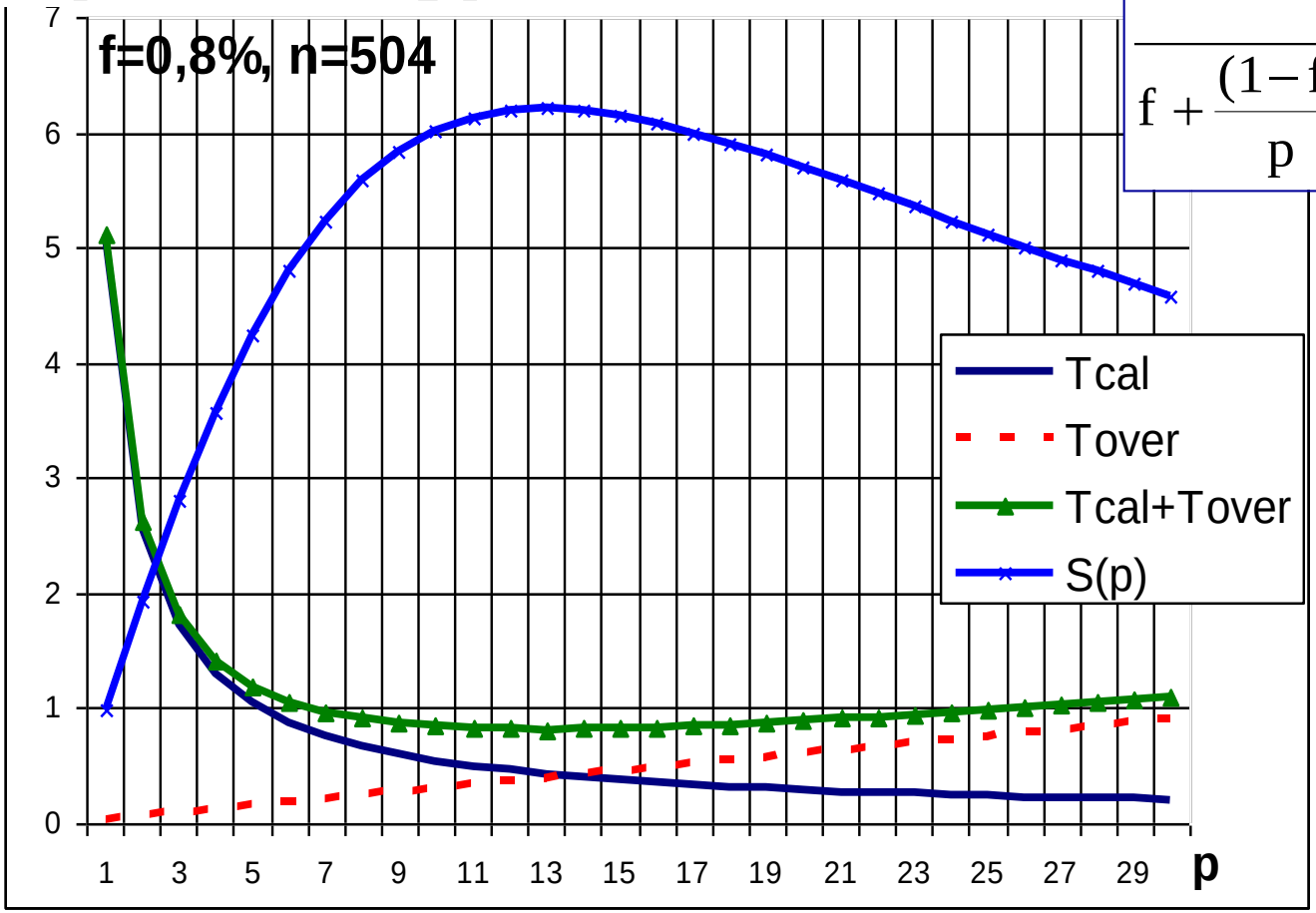

| Modelo código | Fracción no paral. en $T_S$ | Grado paralelismo | Overhead | Ganancia en función del número de procesadores *p* con $T_S$ constante |
|---|---|---|---|---|
| (a) | 0 | ilimitado | 0 | $S(p) = \frac{T_S}{T_P(p)} = p$ Ganancia lineal (1) |
| (b) | f | ilimitado | 0 | $S(p) = \frac{1}{f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



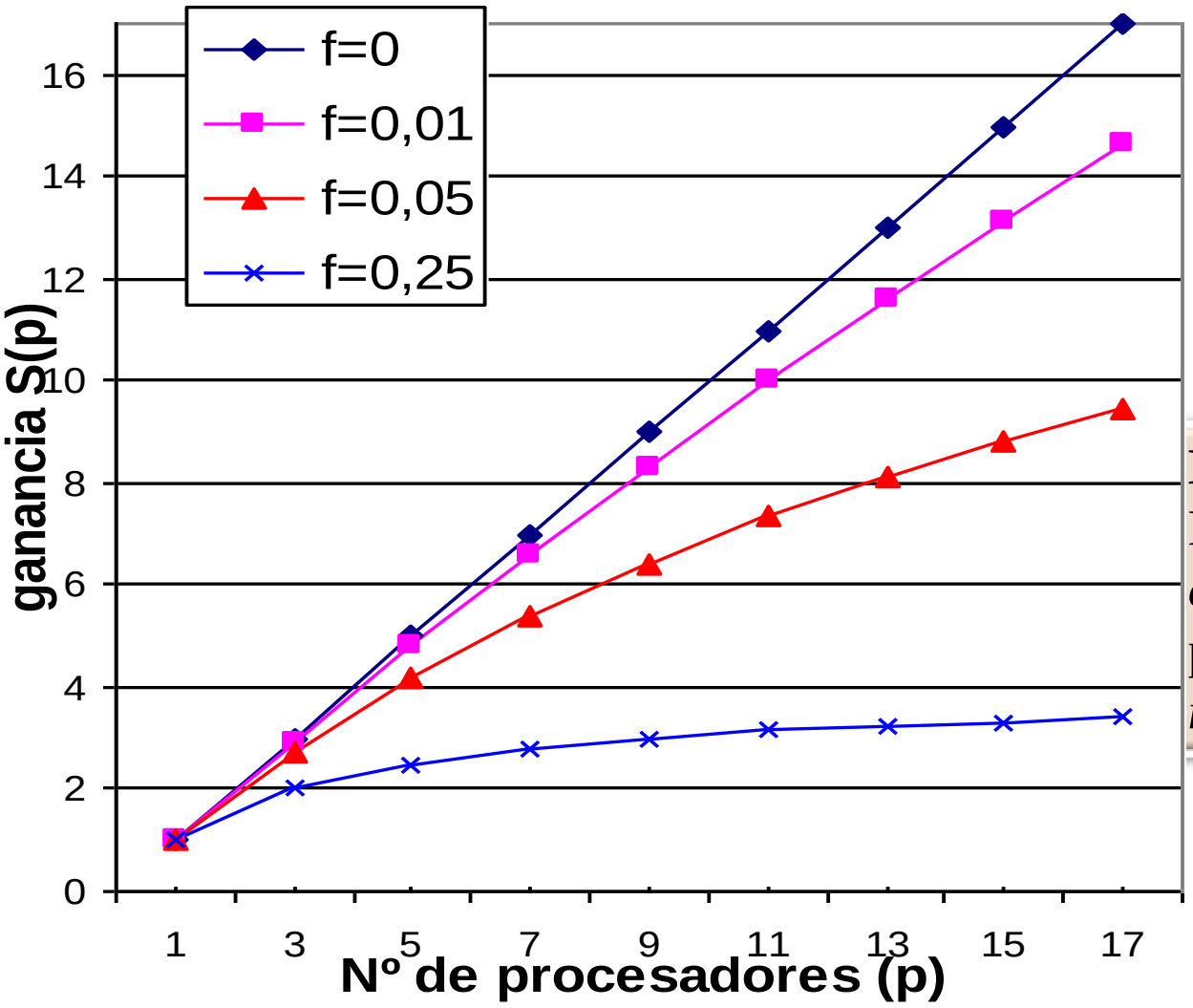
- Ley de Amdahl: la ganancia en prestaciones utilizando p procesadores está limitada por la fracción de código que no se puede paralelizar (2):

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

  - 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

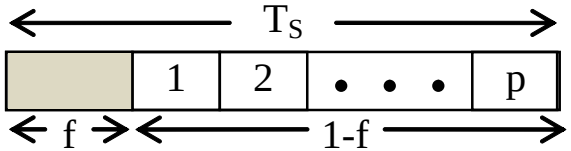





$$S(p) = \frac{p}{1 + f(p-1)}$$

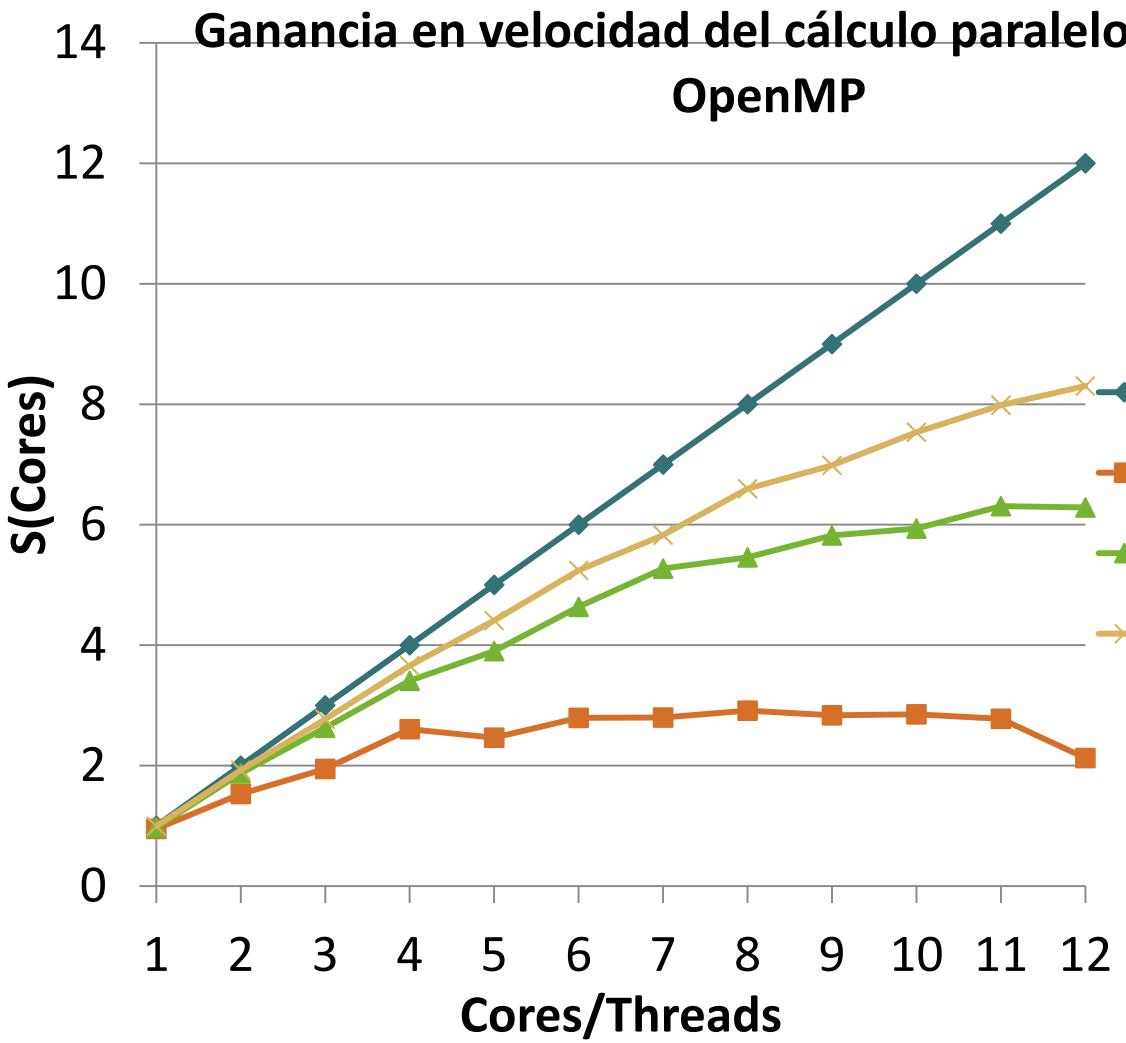
$$S(p) \to \frac{1}{f} \; (p \to \infty)$$

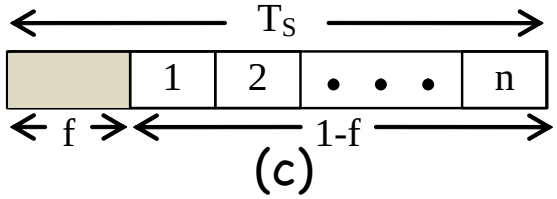
**Es pesimista.**
Nos dice que la *escalabilidad* está limitada por *f (fracción de Ts que no se puede paralelizar)*



# Ganancia escalable






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

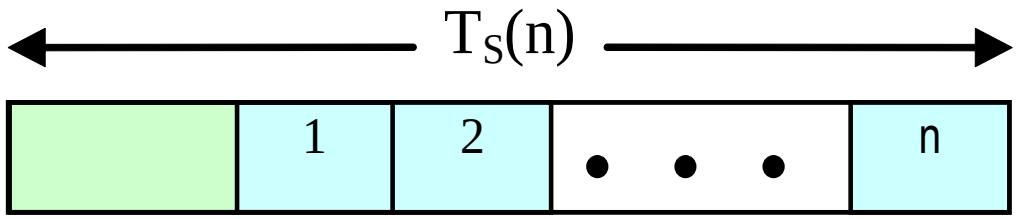
# Contenido Lección 6



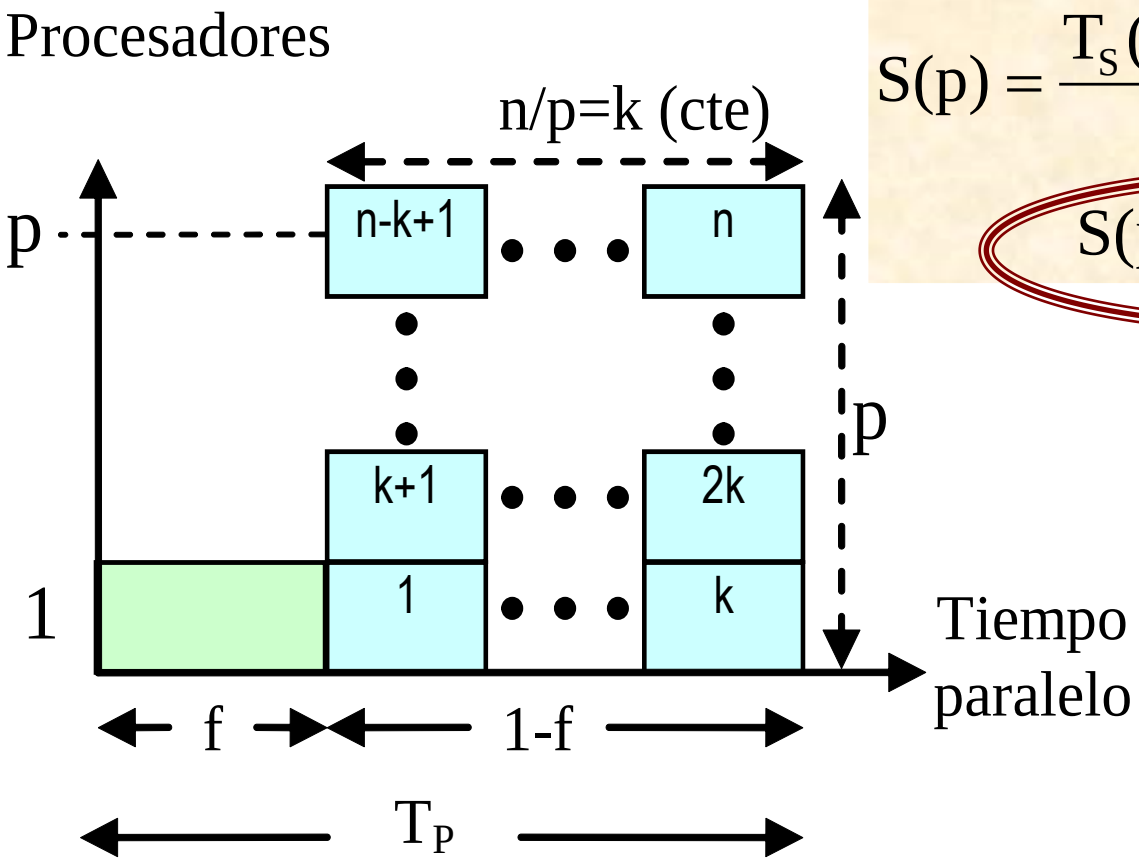
- Ganancia en prestaciones y escalabilidad
- Ley de Amdahl
- Ganancia escalable

# 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