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

Licencia Creative Commons

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

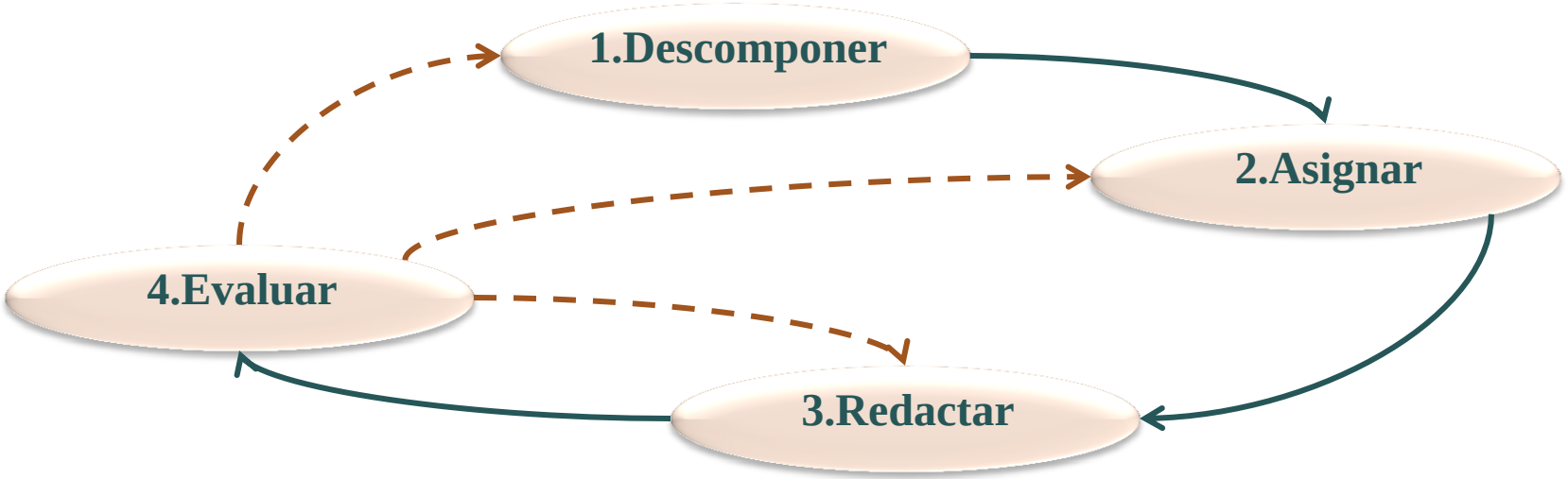
- Abordar la paralelización de una aplicación.
- Distinguir entre asignación estática y dinámica, ventajas e inconvenientes.

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

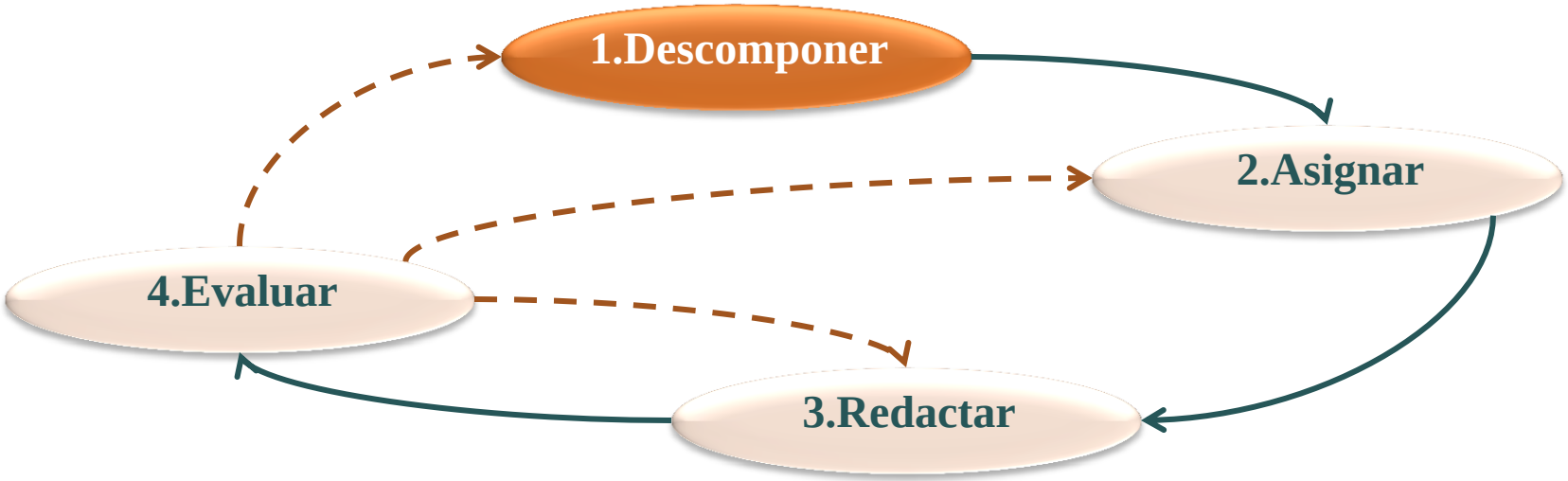
Proceso de paralelización

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.



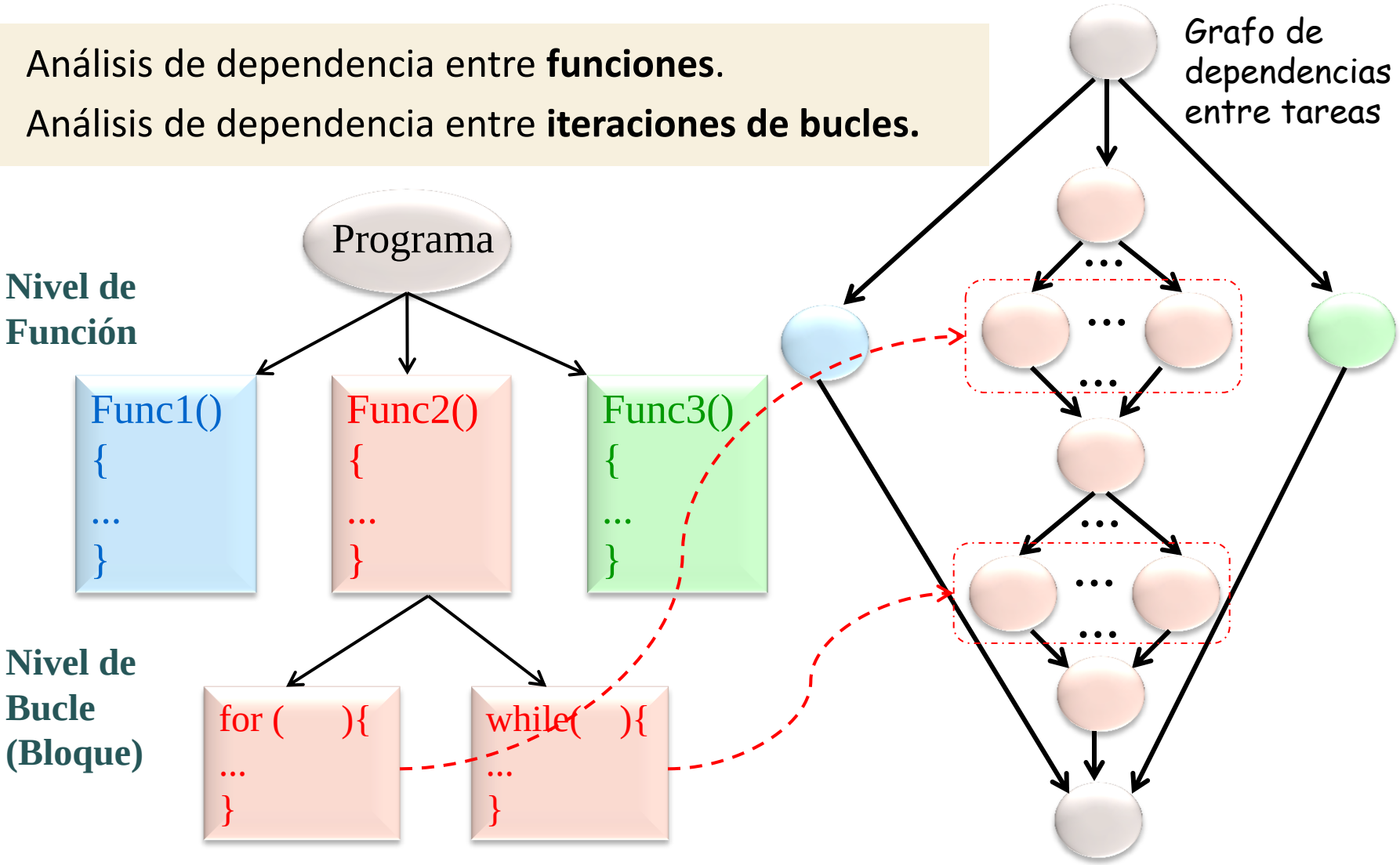
Proceso de paralelización

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

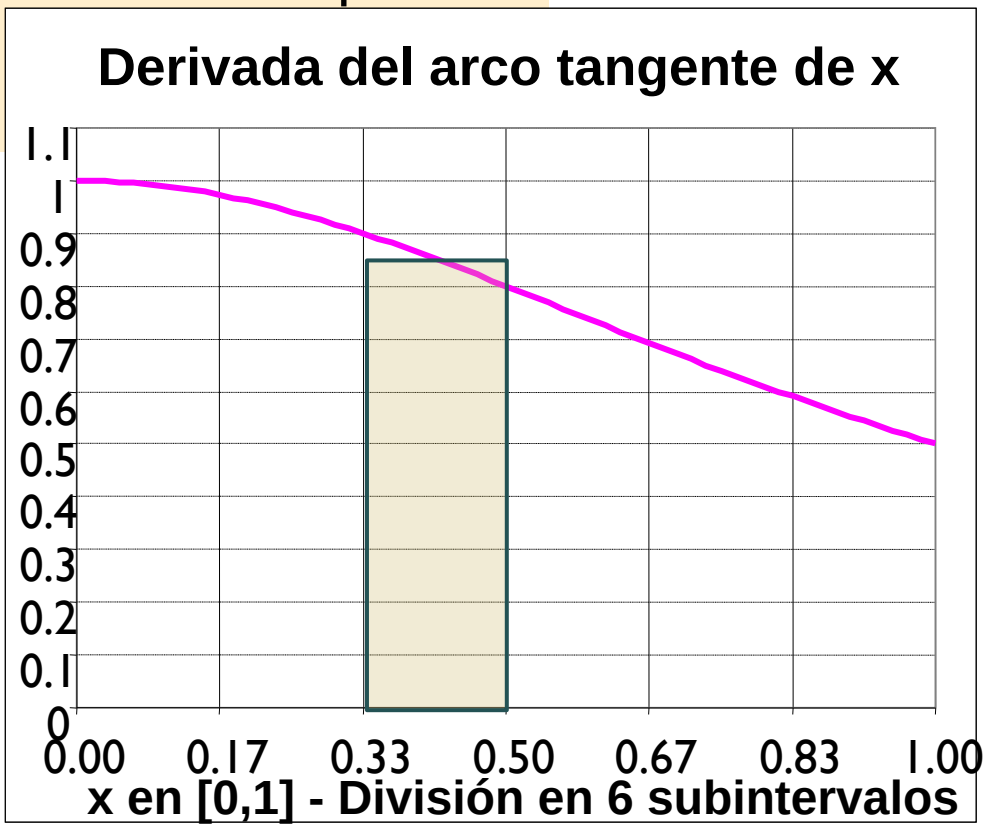
- Análisis de dependencia entre **funciones**.
- Análisis de dependencia entre **iteraciones de bucles.**



Ejemplo de cálculo PI: Descomposición en tareas independientes

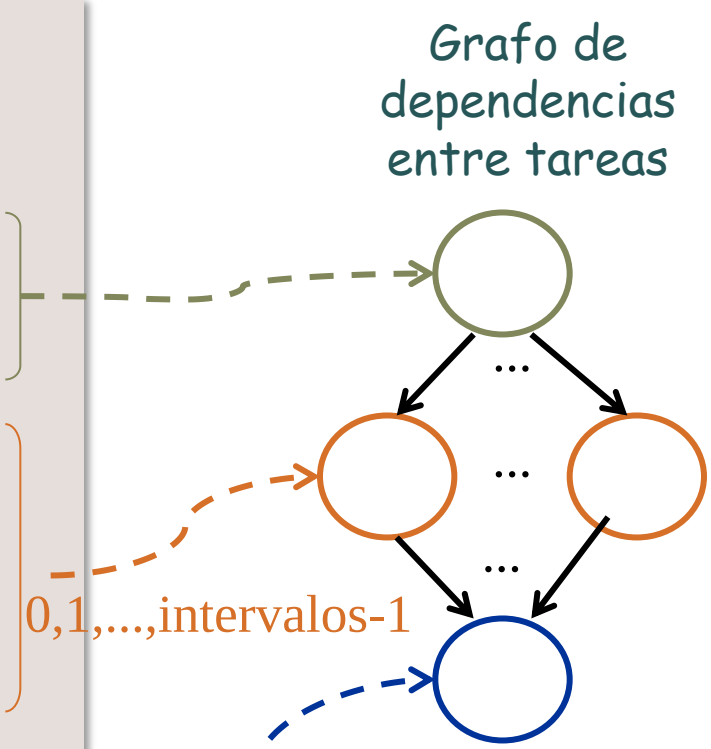
$$\left.\begin{array}{l} \text{arctg}'(x) = \dfrac{1}{1+x^2} \\ \text{arctg}(1) = \dfrac{\pi}{4} \\ \text{arctg}(0) = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} = \text{arctg}(x)\Big|_0^1 = \frac{\pi}{4} - 0$$

- PI se puede calcular por integración numérica.



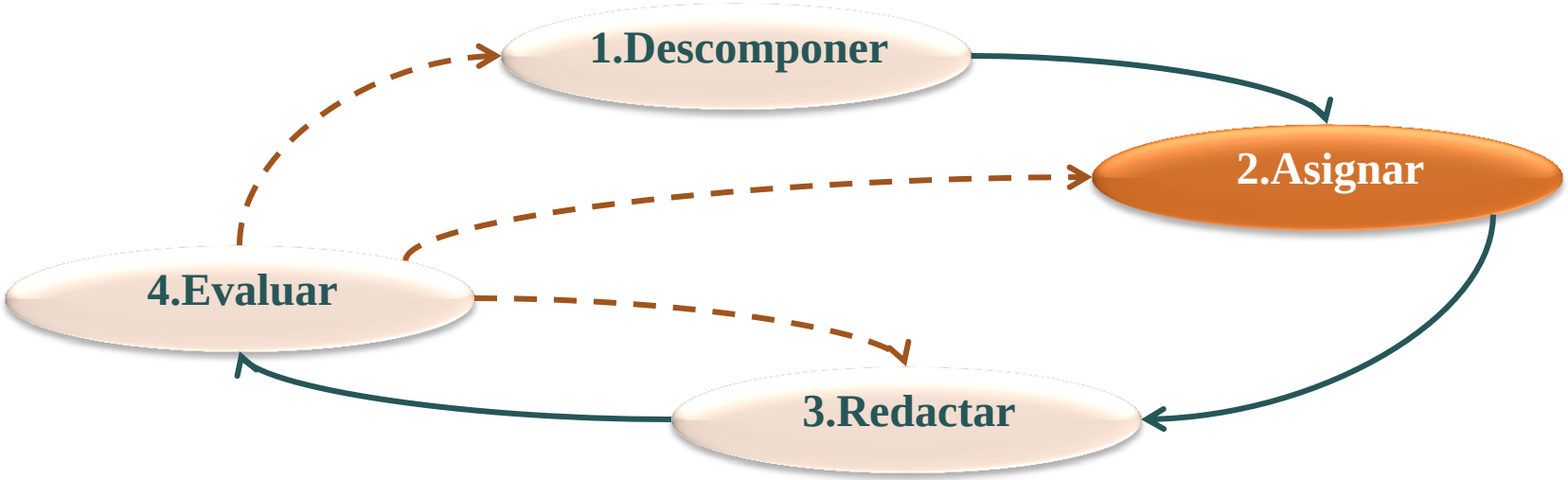
Ejemplo de cálculo PI: Descomposición en tareas independientes


```
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

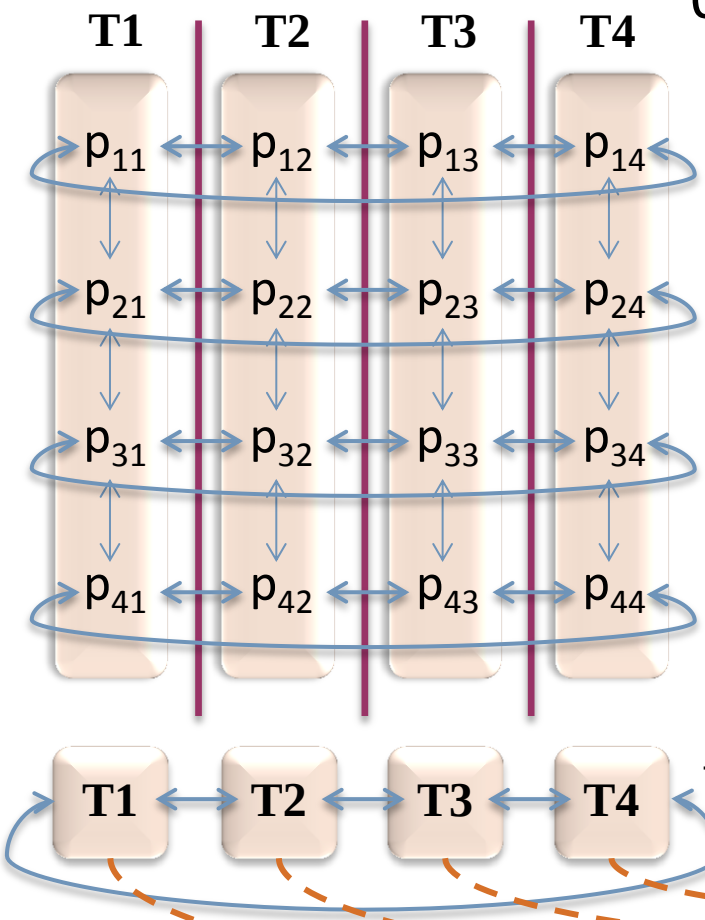
1. *Descomponer* en tareas independientes.
2. *Asignar (planificar+mapear)* tareas a procesos y/o threads.
3. *Redactar* código paralelo.
4. *Evaluar* prestaciones.



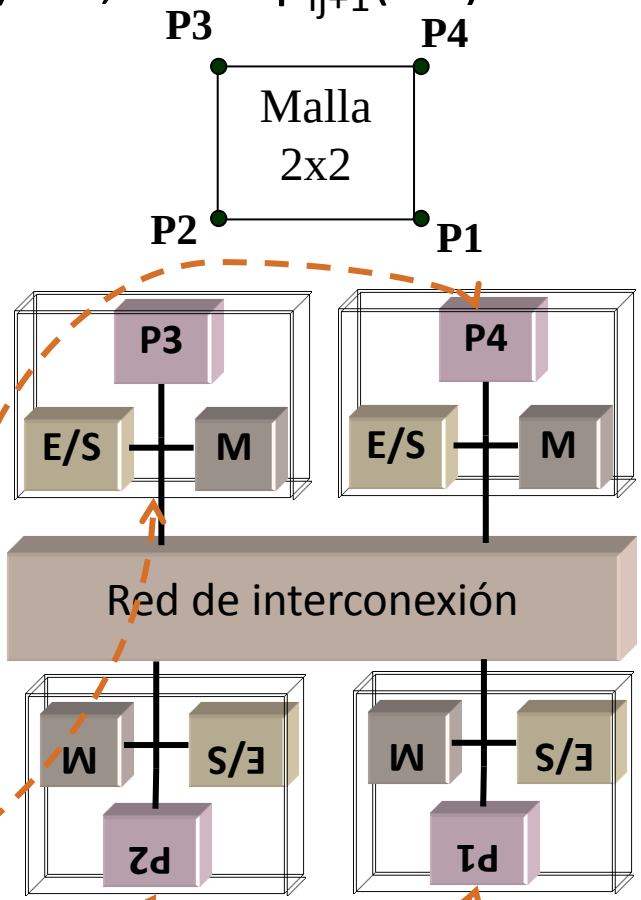
Asignación (planificación + mapeo). Ej.: filtrado de imagen I

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

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 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

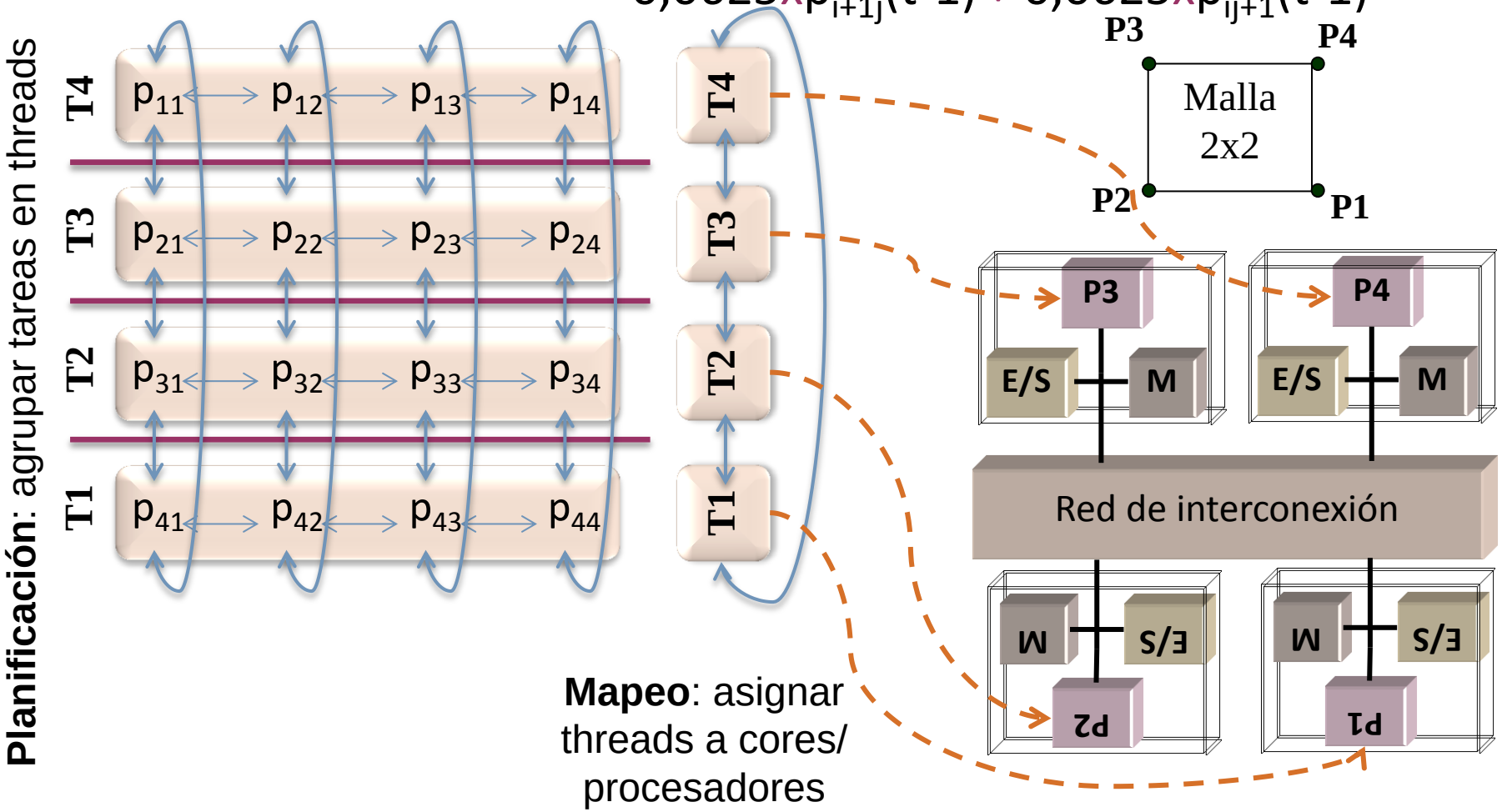
- ¿De qué depende el equilibrado?
  - La arquitectura:
    - homogénea frente a heterogénea,
    - uniforme frente a no uniforme
  - La aplicación/descomposición
- Tipos de asignación:
  - Estática
    - Está determinado qué tarea va a realizar cada procesador o core
    - Explícita: programador
    - 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

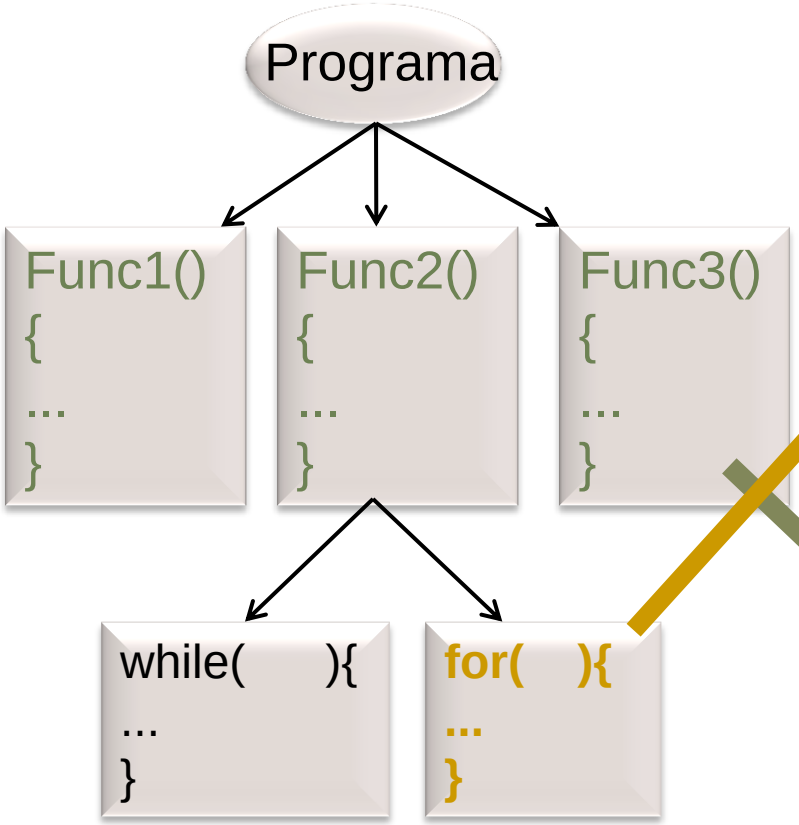
Descomposición por columnas

```
#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

```
for (i= idT*Iter/nT ; i< (idT+1)*Iter/nT ; 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);

   }
```

NOTA: La variable i se supone inicializada a 0

Asignación. Ej.: multiplicación matriz por vector I

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

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} \end{pmatrix} \; 8\text{x}6 \quad \bullet \quad \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix}$$

N=8
M=6

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

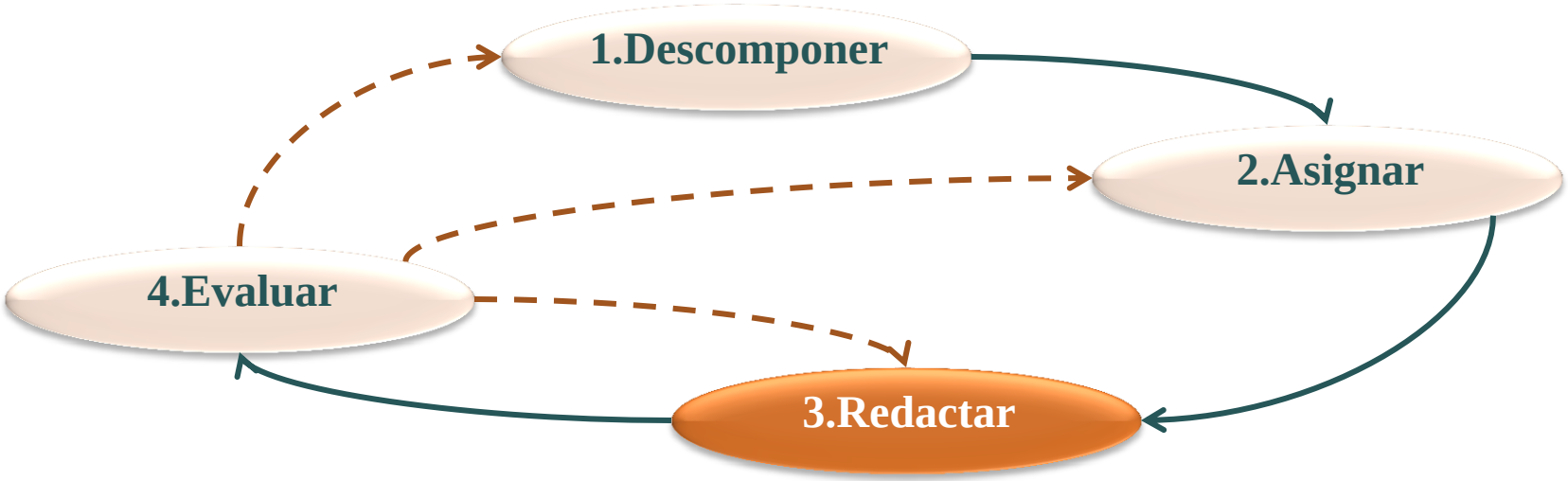
Asignación. Ej.: multiplicación matriz por vector II

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

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

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

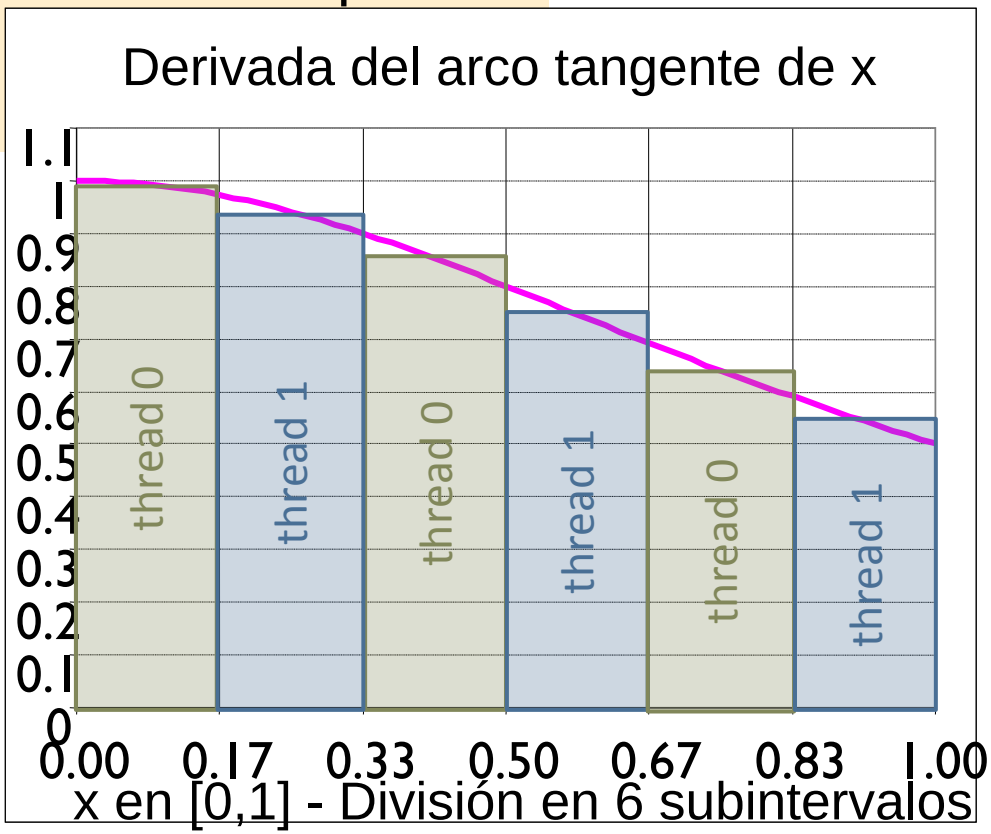
Agrupar/Asignar

Localizar

Asignación de tareas a 2 threads estática por turno rotatorio

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

- 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.