UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

COMPUTACIÓN PARALELA
Memoria de la práctica 2

Grado en Ingeniería Informática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática

Curso 2020-21

Fabián Scherle Carboneres

Lishuang Sun (María)

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

Esta memoria pretende describir los cambios que hicimos partiendo del archivo C original, ***planets.c***, para obtener distintas versiones de paralelización de la función *process_data*.

Los archivos C involucrados son *planets.c*, *planets1.c*, *planets2i.c*, *planets2j.c* y *planets5.c*.

Usaremos el resultado de *planets.c* (secuencial) como plantilla para comprobar que nuestras paralelizaciones son correctas. Ejemplo, resultado correcto para 5000 planetas:

```
The center of mass is in ( 1180.98, 1184.01, 1175.36 ).
The planet with most neighbors is 569 (15 neighbors).
```

Antes de todo, hay que destacar que es necesario conectarse al nodo frontend de *kahan** para compilar y lanzar ejecuciones: *ssh usuario@kahan.dsic.upv.es*

Para compilar los archivos C: *gcc -fopenmp -Wall -o filename filename.c -lm*

Para ejecutar: *qsub execFilename.sh*, siendo *execFilename.sh* un fichero de trabajo. Ejemplo de archivo *execFilename.sh*:

```
1  #!/bin/sh
2  #PBS -l nodes=1,walltime=00:05:00
3  #PBS -q cpa
4  #PBS -d .
5
6  ./filename
```

Se puede consultar el estado de las colas de trabajo con *qstat*.

Tras ejecutar, para mirar el resultado de la ejecución de *filename*: *cat execFilename.sh.o1234*, siendo 1234 el número de trabajo mostrado por *qsub*.

**kahan*: Clúster compuesto por 6 nodos de cálculo, cada uno con 32 cores.

Nota: Para usar funciones de OpenMP, hay que importar su librería, *#include <omp.h>*.

2. DESARROLLO

2.1. Ejercicio 1

Se nos pide modificar *planets.c* en un fichero con nombre ***planets1.c*** con el fin de mostrar el tiempo empleado por la función *process_data* en versión secuencial y mostrar el número de planetas (n) utilizado (por defecto es N=10000).

Para ello:

- Añadimos lo siguiente en el *main*:

Imprimir tiempo de ejecución
Imprimir número de planetas

```
double t1 = omp_get_wtime();
k = process_data( n, p, &cm );
double t2 = omp_get_wtime();
printf("Tiempo de ejecución empleado en process_data: %f\n", t2-t1);
printf("Cantidad de planetas: %d\n", n);
```

- Compilamos y ejecutamos *planets1.c* con el fichero de trabajo *execPlanets1.sh*:

```
#!/bin/sh
#PBS -l nodes=1,walltime=00:05:00
#PBS -q cpa
#PBS -d .

gcc -fopenmp -Wall -o planets1 planets1.c -lm

./planets1 5000
```

n = 5000 planetas

- Lanzamos el trabajo a la cola de *kahan* y vemos el resultado así:

```
[fasccar@kahan material]$ qsub execPlanets1.sh
269230
[fasccar@kahan material]$ cat execPlanets1.sh.o269230
Tiempo de ejecución empleado en process_data: 0.329386
Cantidad de planetas: 5000
The center of mass is in ( 1180.98, 1184.01, 1175.36 ).
The planet with most neighbors is 569 (15 neighbors).
```

2.2. Ejercicio 2

Se nos pide crear dos versiones de paralelización: paralelizar el primer *bucle i* (*planets2i.c*) y el *bucle j* (*planets2j.c*). Para ambas versiones, se nos pide intentar paralelizar el segundo *bucle i*, por lo que empezaremos explicando este.

2.2.1. Segundo bucle i

El objetivo es encontrar el ***planeta i*** con mayor cantidad de vecinos (*max*). Si hay varios planetas con el máximo nº de vecinos, nos quedamos con el del índice menor, *k*.

Para paralelizar este *bucle i*, hemos usado las directivas *for* y *critical* y añadido otra condición (*else if*).

Dentro de un *critical* hay únicamente un hilo ejecutando. Para disminuir la frecuencia con la que los hilos entran al *critical*, solo los hilos que cumplen alguna condición de *if*/*else if* dentro del *critical* (expresadas en el *if* exterior) se quedan esperando para entrar a la sección crítica. El resto de hilos no se quedan esperando para entrar al *critical*, sino que continúan con el resto de sus iteraciones del *bucle i*. Ahora explicamos *if*/*else if*:

if(p[i].ngb > max) → Si el nº de vecinos del *planeta i* es mayor que *max*, actualizamos *max* con el nº de vecinos de este planeta y *k* con el índice *i* de dicho planeta.

else if(p[i].ngb == max && i < k) → Si el nº de vecinos del *planeta i* es igual que *max* pero el índice *i* es menor, actualizamos *k* con dicho *i*.

```
86  // Find the planet with most neighbors
87  k = 0; max = -1;
88  #pragma omp parallel for
89  for (i=0; i<n; i++) {
90    if ( p[i].ngb > max || (p[i].ngb == max && i < k) ){
91      #pragma omp critical
92      {
93        if ( p[i].ngb > max ) {
94          max = p[i].ngb; k = i;
95        }
96        else if( p[i].ngb == max && i < k ) {
97          k = i;
98        }
99      }
100   }
101 }
```

2.2.2. Primer bucle i

El objetivo es acumular las masas de todos los ***planetas i*** (*m*), calcular el centro de masa [*cmx*, *cmy*, *cmz*] y el nº de vecinos de cada ***planeta i***.

Respecto a este último, se utiliza un *bucle j interno* para comparar las distancias con cada *planeta j*, que explicaremos en la siguiente sección.

Para paralelizar este bucle i, hemos usado la directiva *for* definiendo el alcance de las variables conforme se ve en la *figura*, siendo el del índice *i* por defecto *private*, al usar *for*. Además, hemos creado las variables *cmx, cmy, cmz* que sustituyen a cm.x, cm.y, cm.z para encargarse de calcular el centro de masa de forma más eficiente que usando tres directivas *atomic*, pues todos los hilos podrán actualizar cada una de estas variables de forma privada y simultánea dentro de esta región paralela. De la misma forma, se va acumulando las masas en la variable m. Aquellas variables que son utilizadas solo en la región paralela (*bucle i*) son *private*.

Al final, el nº de vecinos de cada *planeta i* se guarda en *p[i].ngb*. Utilizamos dos directivas *atomic* ya que dos o más iteraciones de i podrían estar modificando el nº de vecinos del mismo planeta, por ejemplo:

hilo0 (i=0) puede acceder y modificar *p[1].ngb* en su *bucle j*, a la vez hilo1 (i=1) accede y modifica *p[1].ngb* fuera del *bucle j*.

```
48  double dx, dy, dz,d, m, cmx, cmy, cmz;
49  Point3D cm; // center of mass
50
51  cmx = cmy = cmz = 0; m = 0;
52  #pragma omp parallel for private(j,dx,dy,dz,d,ngbi) reduction(+:m,cmx,cmy,cmz)
53  for (i=0; i<n; i++) {
54    // Accumulate mass and weighted position to compute the center of mass
55    m += p[i].m;
56    cmx += p[i].m*p[i].p.x;
57    cmy += p[i].m*p[i].p.y;
58    cmz += p[i].m*p[i].p.z;
59
60    // Update count of neighboring planets
61    ngbi = 0;
62    for (j=i+1; j<n; j++) {
63      // Compute distance between planet i and planet j
64      dx = p[i].p.x - p[j].p.x;
65      dy = p[i].p.y - p[j].p.y;
66      dz = p[i].p.z - p[j].p.z;
67      d = sqrt(dx*dx + dy*dy + dz*dz);
68      if ( d < NGB_DST ) {
69        // Planets i and j are neighbors. Update number of neighbors
70        // for both planets
71        ngbi++;
72        #pragma omp atomic
73        p[j].ngb++;
74      }
75    }
76    #pragma omp atomic
77    p[i].ngb += ngbi;
78  }
79  cm.x = cmx; cm.y = cmy; cm.z = cmz;
```

2.2.3. Bucle j

El objetivo es **ayudar al *bucle i*** a calcular el nº de vecinos de cada ***planeta i*** con respecto a un número de *planetas j*.

Los vecinos son aquellos *planetas j* cuyas distancias *d* con el *planeta i* son menores que la constante NGB_DST.

Para paralelizar este *bucle j*, hemos usado la directiva *for* definiendo el alcance de las variables conforme se ve en la *figura*, siendo el del índice *j* por defecto *private*, al usar *for*.

Por una parte, en cada iteración de j se accede solo al *planeta j* de su respectiva iteración, *p[j]*, por lo que modificar su cantidad de vecinos (*p[j].ngb++*) no supone condición de carrera, por ende, aquí **no hace falta** la directiva *atomic*.

Por otra parte, para calcular el nº de vecinos de cada *planeta i*, además de *p[j].ngb++* (j=i en otras iteraciones de i), utilizamos la variable *ngbi*. Para un mismo *planeta i* (una iteración de i), varios hilos actualizan *ngbi* dentro del *bucle j*. Como explicamos en la sección 2.2.2, al final de cada iteración de i, el nº de vecinos de cada *planeta i* se guarda en *p[i].ngb*. Fuera de la **región paralela (*bucle j*)** necesitamos la suma de los *ngbi* calculados por dichos hilos, por eso usamos *reduction(+:ngbi)*.

```
63      #pragma omp parallel for private(d,dx,dy,dz) reduction(+:ngbi)
64      for (j=i+1; j<n; j++) {
65        // Compute distance between planet i and planet j
66        dx = p[i].p.x - p[j].p.x;
67        dy = p[i].p.y - p[j].p.y;
68        dz = p[i].p.z - p[j].p.z;
69        d = sqrt(dx*dx + dy*dy + dz*dz);
70        if ( d < NGB_DST ) {
71          // Planets i and j are neighbors. Update number of neighbors
72          // for both planets
73          ngbi++;
74          p[j].ngb++;
75        }
76      }
```

2.3. Ejercicio 3

La planificación de las iteraciones afecta a las prestaciones del primer *bucle i* paralelizado y del *bucle j* paralelizado.

En el caso del primer *bucle i* paralelizado, los hilos cuyas iteraciones tienen valores menores de *i* ejecutan más iteraciones del *bucle j*. Ejemplo:

Para i=0, se ejecutan n-1-0 = *n-1 iteraciones* de j (de j=1 a n-1).

Para i=50, se ejecutan n-1-50 = *n-51 iteraciones* de j (de j=51 a n-1).

El equilibrio de carga será malo si usamos la planificación *static sin chunk* o *guided*, puesto que el bloque de iteraciones más costosas le tocará a un mismo hilo, sin embargo, con *static* o *dynamic* (ambas con valores mínimos de *chunk*) obtendremos mejores prestaciones.

En el caso del *bucle j* paralelizado, los hilos se activan y desactivan tantas veces como iteraciones tenga el primer *bucle i*, esto supone un sobrecoste. Así, las planificaciones de tipo *dynamic* y '*guided* con mayor número de hilos' añadirán un sobrecoste mayor que las de tipo *static*, ya que la asignación de las iteraciones a cada hilo se realiza en tiempo de ejecución.

2.4. Ejercicio 4

Un ejemplo de número de planetas para que el tiempo secuencial esté entre 30 y 90 segundos es 60000.

```
[fasccar@kahan material]$ cat execPlanets1.sh.o273436
Tiempo de ejecución empleado en process_data: 47.688506
Cantidad de planetas: 60000
The center of mass is in ( 2723.05, 2730.01, 2724.31 ).
The planet with most neighbors is 40354 (18 neighbors).
```

Sacamos los tiempos de las distintas versiones de paralelización realizadas, usando siempre 60000 planetas y como máximo 32 hilos, porque nuestros trabajos se lanzan a un único nodo del clúster *kahan*, y cada uno de estos tiene 32 procesadores físicos.

Para definir el número de hilos en tiempo de ejecución, en el fichero de trabajo agregamos OMP_NUM_THREADS=*nHilos* precediendo al comando que ejecuta los ejecutables, siendo *nHilos* 2 | 4 | 8 | 16 | 32.

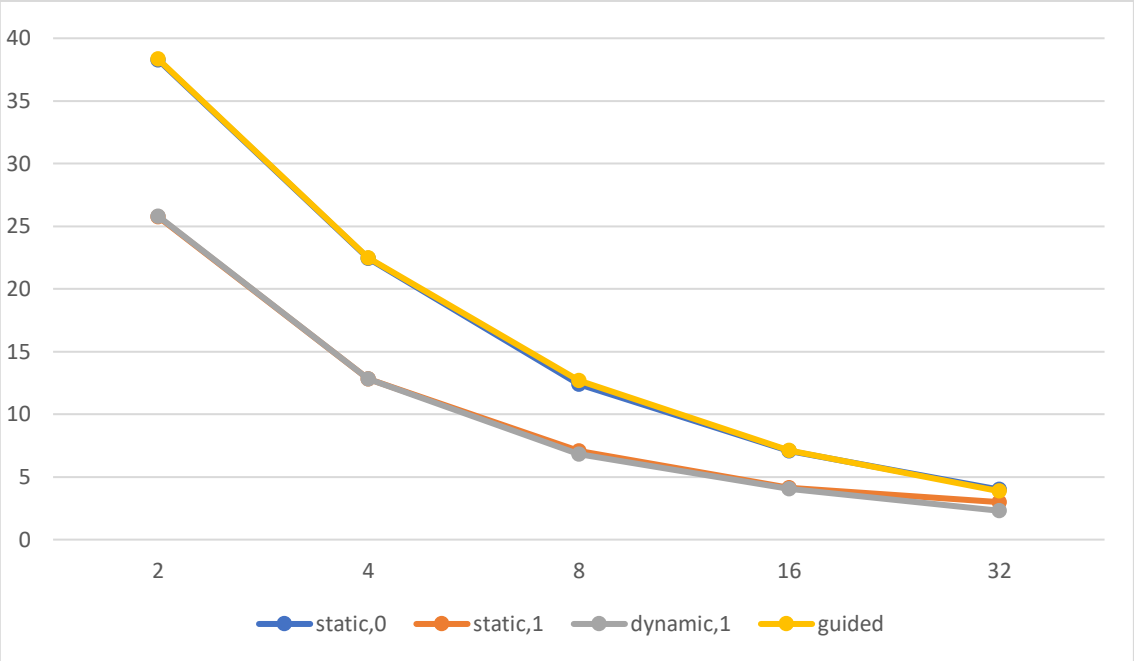
Para definir la planificación en tiempo de ejecución, agregamos la directiva *schedule(runtime)* en la declaración de las regiones paralelas y, en el fichero de trabajo agregamos OMP_SCHEDULE=*tipo_planificación* precediendo al comando que ejecuta los ejecutables, siendo *tipo_planificación* static,0 | static,1 | dynamic,1 | guided.

Un ejemplo de fichero de trabajo para ejecutar *planets2i* y *planets2j* usando dos hilos y una planificación de tipo *static* sin chunk:

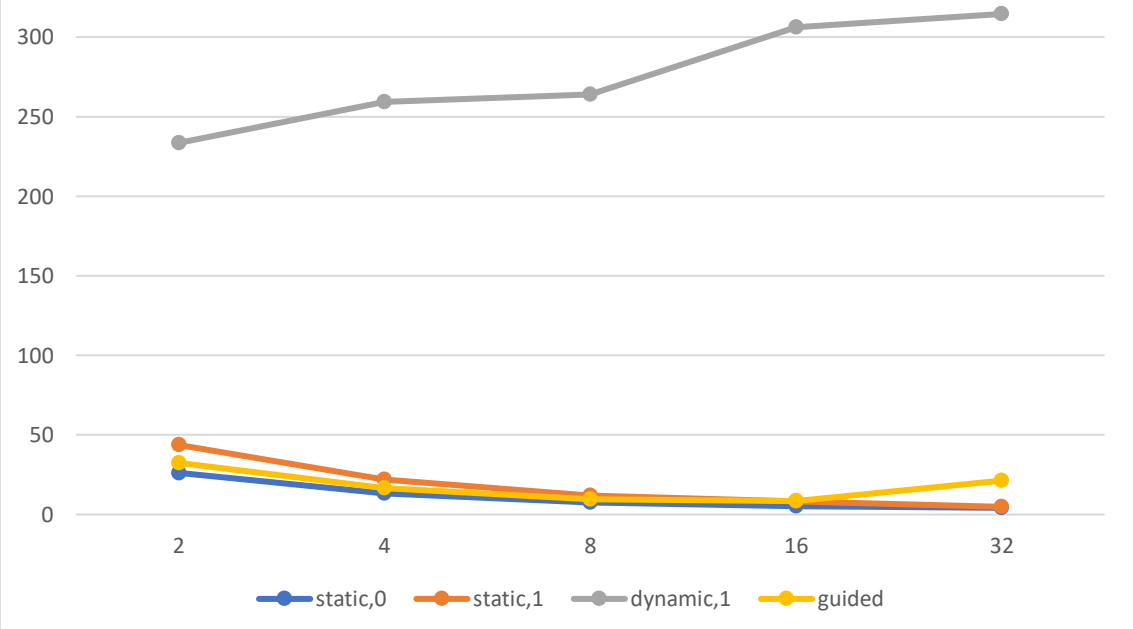
```
#!/bin/sh
#PBS -l nodes=1,walltime=00:05:00
#PBS -q cpa
#PBS -d .

gcc -fopenmp -Wall -o planets2i planets2i.c -lm
gcc -fopenmp -Wall -o planets2j planets2j.c -lm

echo -e "\nResultado de ejecución de planets2i:  (2 hilos)"
OMP_NUM_THREADS=2 OMP_SCHEDULE=static,0 ./planets2i 60000
echo -e "-------------------------------------------------------"
echo -e "Resultado de ejecución de planets2j:  (2 hilos)"
OMP_NUM_THREADS=2 OMP_SCHEDULE=static,0 ./planets2j 60000
```

En las tablas, las filas representan las planificaciones utilizadas y las columnas el número de hilos utilizado. Cada tabla lleva un gráfico asociado. A continuación, las **tablas de los tiempos** (eje Y, se mide en segundos):

planets2i.c	**2**	**4**	**8**	**16**	**32**
Static,0	38.27	22.43	12.37	7.08	3.99
Static,1	25.75	12.82	7.05	4.14	2.99
Dynamic,1	25.80	12.83	6.83	4.04	2.30
Guided	38.33	22.49	12.67	7.13	3.86

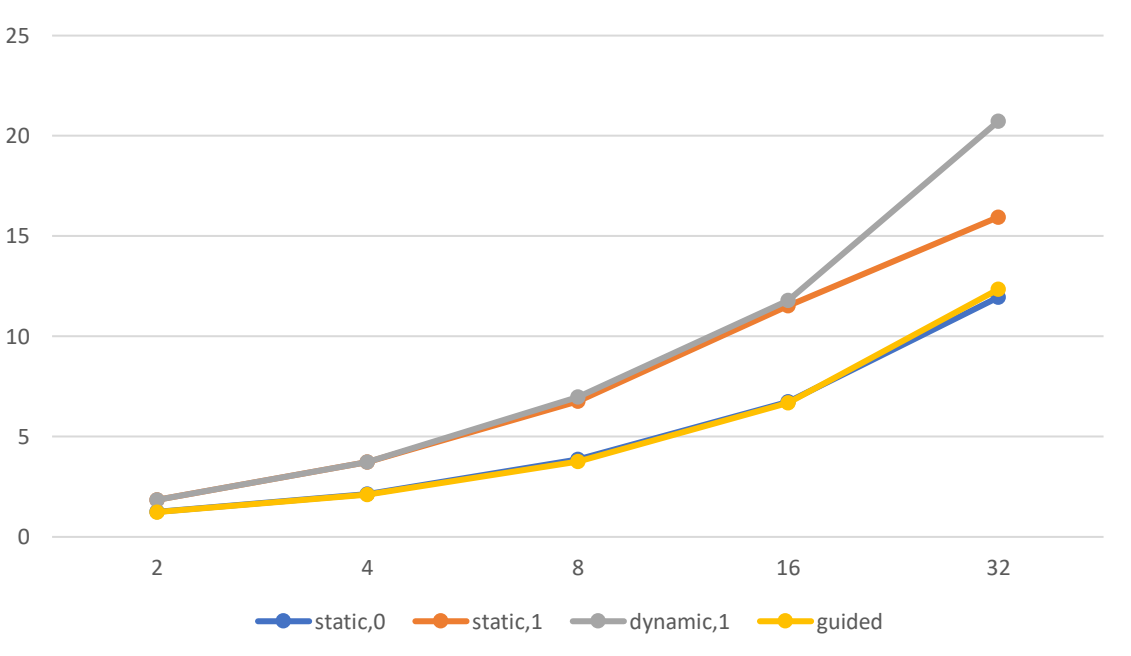


planets2j.c	2	4	8	16	32
Static,0	26.16	13.27	7.53	5.33	4.22
Static,1	43.69	22.05	11.85	8.29	4.82
Dynamic,1	233.51	259.29	264.06	306.31	314.50
Guided	32.44	16.74	9.46	8.47	21.46

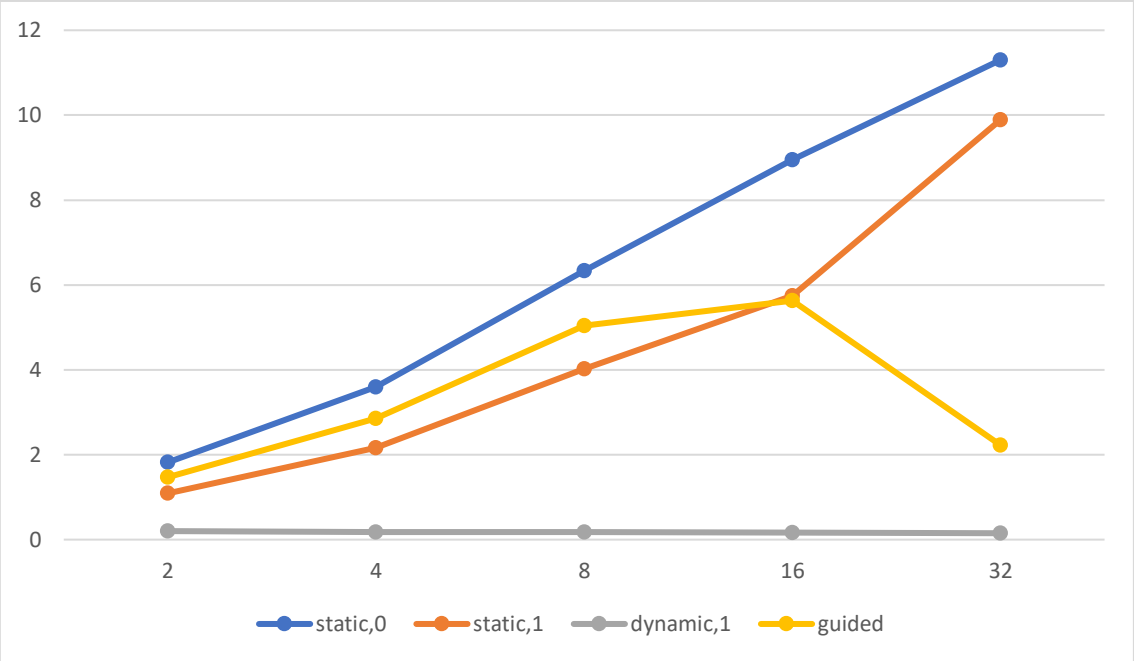


A continuación, calcularemos los ***speedups*** (eje Y) usando el tiempo secuencial *t(n)*=47.69*s* con los diferentes tiempos de cada una de las versiones, *t(n,p)*, en el mismo orden que las tablas anteriores.

planets2i.c	**2**	**4**	**8**	**16**	**32**
Static,0	1.25	2.13	3.86	6.74	11.95
Static,1	1.85	3.72	6.76	11.52	15.95
Dynamic,1	1.85	3.72	6.98	11.8	20.73
Guided	1.24	2.12	3.76	6.69	12.35

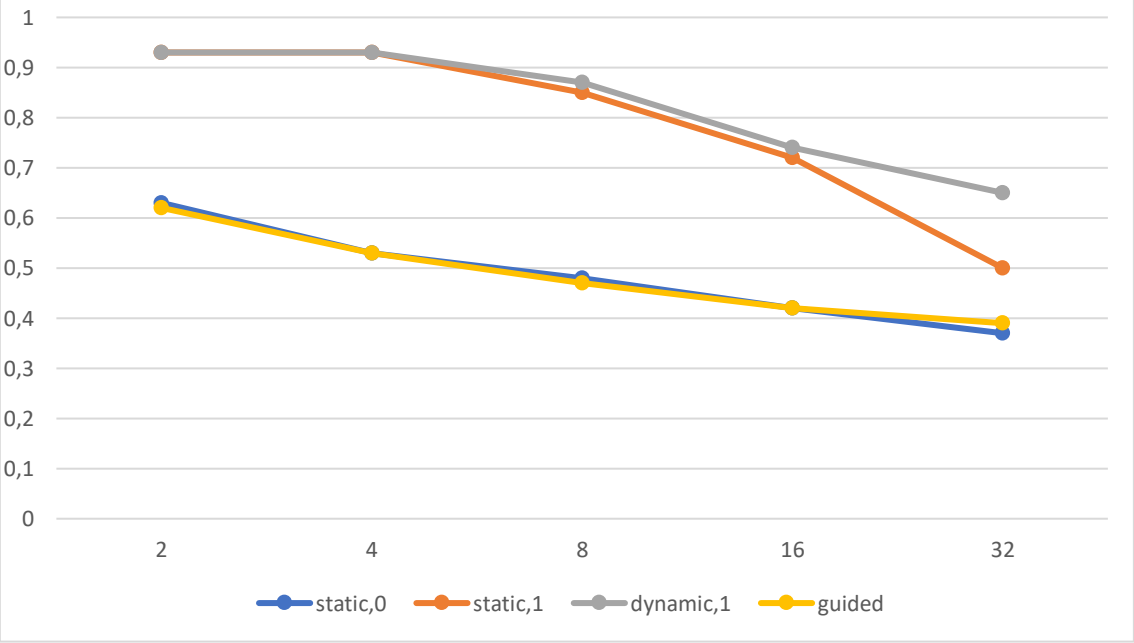


planets2j.c	**2**	**4**	**8**	**16**	**32**
Static,0	1.82	3.59	6.33	8.95	11.3
Static,1	1.09	2.16	4.02	5.75	9.89
Dynamic,1	0.20	0.18	0.18	0.16	0.15
Guided	1.47	2.85	5.04	5.63	2.22

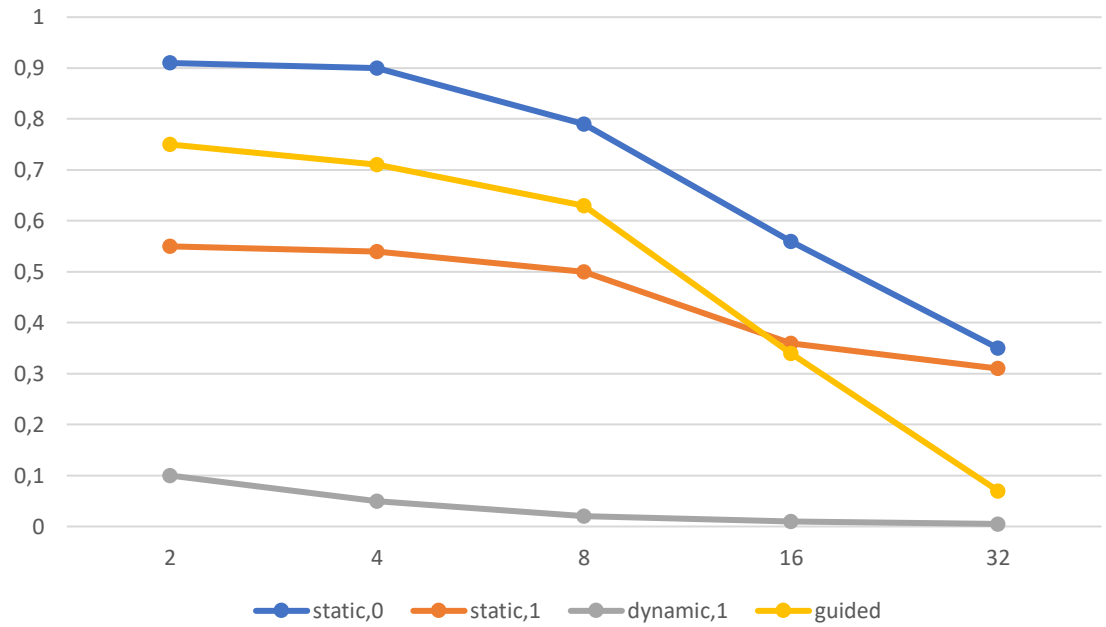


A continuación, calcularemos las **eficiencias** (eje Y) usando los *speedup*s de las dos tablas anteriores:

planets2i.c	2	4	8	16	32
Static,0	0.63	0.53	0.48	0.42	0.37
Static,1	0.93	0.93	0.85	0.72	0.50
Dynamic,1	0.93	0.93	0.87	0.74	0.65
Guided	0.62	0.53	0.47	0.42	0.39



planets2j.c	2	4	8	16	32
Static,0	0.91	0.90	0.79	0.56	0.35
Static,1	0.55	0.54	0.50	0.36	0.31
Dynamic,1	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
Guided	0.75	0.71	0.63	0.34	0.07



Las conclusiones sobre la mejor planificación para cada una de estas versiones paralelas lo hemos explicado en el ejercicio 3 (apartado anterior). Consideramos que las mejores son *dynamic,1* para *planets2i.c* y *static,0* para *planets2j.c*.

Respecto a la mejor versión, comparándolas eligiendo la mejor planificación de cada una, opinamos que es *planets2i.c*, pues es debido a la ausencia de ese sobrecoste que tiene *planets2j.c*, que hemos explicado en el ejercicio 3.

2.5. Ejercicio 5

Se nos pide crear una versión (*planets5.c*) basada en *planets2i.c*.

El objetivo es que cada hilo muestre por pantalla cuántos planetas le ha tocado procesar (*sum*) y el centro de masas de estos planetas.

Cambios con respecto a *planets2i.c*:

- Separamos la directiva *for* de la directiva *parallel* (región paralela), así conseguimos imprimir la cantidad de planetas procesados y centro de masas calculado por cada hilo.
- Añadimos las siguientes variables: *id*, identificador de cada hilo, por lo que es *private*; *sum*, contador de planetas de cada hilo; *maux*, acumulador de masas de los planetas procesados por cada hilo. Las dos últimas usan *firstprivate* para acceder al valor inicial asignado fuera de la región paralela.
- Desplazamos *reduction(+:cmx,cmy,cmz)* del pragma *for* al pragma *parallel*, de esta forma contendrán los valores correspondientes a cada hilo dentro de la región paralela y fuera del *bucle i*.

```
sum = cmx = cmy = cmz = 0; m = maux = 0;
#pragma omp parallel private(id) firstprivate(sum,maux) reduction(+:cmx,cmy,cmz)
{
  #pragma omp for private(j,dx,dy,dz,d,ngbi) reduction(+:m)
  for (i=0; i<n; i++) {
    sum++;
    // Accumulate mass and weighted position to compute the center of mass
    m += p[i].m; maux = m;
```

- Dos *printf* dentro de la región paralela y fuera del *bucle i*, imprimen el *id* de los hilos junto a su número de planetas y su centro de masas. El primer *printf* se ejecutará si la masa total es mayor a EPS, en caso contrario se ejecuta el segundo.

```
  }

  id = omp_get_thread_num();
  if ( m > EPS )
    printf("Hilo: %d ha procesado %d planetas con centro de masas: {%g,%g,%g}\n",
           id,sum,cmx/maux,cmy/maux,cmz/maux);
  else
    printf("Hilo: %d ha procesado %d planetas con centro de masas: {%g,%g,%g}\n",
           id,sum,cmx,cmy,cmz);
}
```

3. CONCLUSIONES

Al terminar esta práctica, hemos aprendido cómo usar la variedad de directivas, cláusulas y funciones que nos ofrece OpenMP, escoger las planificaciones adecuadas para cada versión y entender el ciclo de vida de los hilos. Y hemos observado que sí hay una mejor versión, pues la paralelización del bucle externo da mejores resultados.