

**Programación Paralela (2015-2016)**  
LENGUAJES Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA  
E. T. S. DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD DE GRANADA

---

## Práctica 1: Implementación distribuida de un algoritmo paralelo de datos usando MPI

---

Francisco Javier Bolívar Lupiáñez

30 de marzo de 2016

# Índice

<b>1. Planteamiento</b>	<b>2</b>
1.1. Algoritmo de Floyd . . . . .	2
1.1.1. Pseudocódigo . . . . .	2
<b>2. Solución</b>	<b>2</b>
2.1. Versión unidimensional . . . . .	2
2.1.1. Descripción . . . . .	2
2.1.2. Pseudocódigo . . . . .	3
2.1.3. Problemas y soluciones . . . . .	3
2.1.4. Código . . . . .	3
2.2. Versión bidimensional . . . . .	6
2.2.1. Descripción . . . . .	6
2.2.2. Pseudocódigo . . . . .	6
2.2.3. Problemas y soluciones . . . . .	6
2.2.4. Código . . . . .	11
<b>3. Resultados</b>	<b>14</b>
3.1. Consideraciones iniciales . . . . .	14
3.2. Tabla de tiempos y ganancia . . . . .	14
3.3. Gráficas de tiempos y ganancia . . . . .	15

## 1. Planteamiento

En esta práctica se llevará a cabo la paralelización del **algoritmo Floyd** para la búsqueda del camino más corto en un grafo.

Se desarrollarán dos versiones:

- **Unidimensional:** Se repartirán las filas de la matriz a los procesos.
- **Bidimensional:** Se repartirán submatrices de la matriz a los procesos.

### 1.1. Algoritmo de Floyd

El algoritmo de Floyd deriva una matriz en  $N$  pasos (tantos como número de nodos), obteniendo en cada paso una matriz intermedia con el camino más corto entre cada par de nodos.

#### 1.1.1. Pseudocódigo

```
1 M[i][j] = A
2 for k = 0 to N-1
3   for i = 0 to N-1
4     for j = 0 to N-1
5       M[i][j] = min(M[i][j], M[i][k] + M[k][j])
```

## 2. Solución

### 2.1. Versión unidimensional

#### 2.1.1. Descripción

Para solucionarlo con este enfoque, asumiendo que el tamaño del problema es divisible entre el número de procesos, **cada proceso tendrá una matriz local de tamaño  $N/P \times N$ .**

**El reparto se realizará por bloques.** Es decir. Al primer proceso le corresponden las primeras  $N/P$  filas, al segundo las siguientes... Por ejemplo, si el tamaño del problema es 8 y tenemos 4 procesos, al  $P_0$  le corresponderán las filas 0 y 1, al  $P_1$  las 2 y 3, al  $P_2$  las 4 y 5 y al  $P_3$  las 6 y 7.

En el cálculo de cada submatriz resultado, cada proceso necesitará, en el paso  $k$ , la fila  $k$  y puede tener suerte y ser suya o no y corresponderle a otro proceso. Entonces debería comunicarse con éste para poder realizar el cálculo. Por tanto, en cada iteración del primer bucle  $k$ , **el proceso detectará si la fila  $k$  le pertenece y si es así, hace un *broadcast* al resto de procesos.**

Por tanto, para solucionar el problema, nos basta con un *scatter* para repartir la matriz, un *broadcast* para difundir cada fila  $k$  y un *gather* para recolectar la matriz resultado y el único problema que nos podríamos encontrar es el traducir de local a global un índice según lo que se necesite.

### 2.1.2. Pseudocódigo

```

1 M[i][j] = A
2 for k = 0 to N-1
3   broadcast(K)
4   for i = 0 to N/P-1
5     for j = 0 to N-1
6       M[i][j] = min(M[i][j], M[i][k] + K[j])

```

### 2.1.3. Problemas y soluciones

#### 2.1.3.1 Traducir índices locales a globales

El principal problema que se puede encontrar en esta versión es, como he comentado anteriormente, el **traducir un índice de local en un proceso a global**.

No obstante, si se trabaja con índices locales, es decir, el b́ucle va desde 0 a  $N/P$ , solo se necesita el índice global para comprobar que no se est́a iterando sobre la diagonal de la matriz ( $i=j$ ,  $i=k$  o  $j=k$ ). Éste seŕa f́acil de calcular, tan solo haŕa falta saber ćual es el **inicio en global de ese proceso**, calculado como:

$$inicio_i = id \times tama_{bloque}$$

donde:

$$tama_{bloque} = N/P$$

Para obtener el índice global, al índice de inicio para este proceso **se le sumaría el desplazamiento**, dado por el valor que tenga  $i$  en esa iteración.

#### 2.1.3.2 Hacer *broadcast* de la fila $k$

El otro problema con el que me encontré fue durante el *broadcast* de la fila  $k$ . Y es que al escribir la sentencia `MPI_BCast` no cambié el índice del proceso raíz y siempre mandaba la fila  $k$  el proceso 0. Esto es f́acil de corregir, una vez detectado el fallo, pues el índice del proceso raíz siempre seŕa  $k / \text{tamaño de bloque}$  (siendo el tamaño de bloque  $N/P$ ).

### 2.1.4. Código

```

1 #include <iostream>
2 #include <fstream>
3 #include <string.h>
4 #include "Graph.h"
5 #include "mpi.h"

```

```

6
7 // #define PRINT_ALL
8
9 using namespace std;
10
11 int main (int argc, char *argv[])
12 {
13     /**
14      * Paso 1: Iniciar MPI y obtener tamaño e id para cada proceso
15      */
16     int rank, size, tama;
17
18     MPI_Init(&argc, &argv); // Inicializamos la comunicación de los procesos
19     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size); // Número total de procesos
20     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank); // Valor de nuestro identificador
21
22     /**
23      * Paso 2: Comprobar entradas
24      */
25     if (argc != 2) { // Debe haber dos argumentos
26         if (rank == 0) { // El proceso 0 imprime el error
27             cerr << "Sintaxis:_" << argv[0] << "_<archivo_de_grafo>" << endl;
28         }
29         MPI_Finalize();
30         return -1;
31     }
32
33     /**
34      * Paso 3: Crear grafo y obtener número de vértices
35      */
36     Graph G;
37     int nverts;
38
39     if (rank == 0) { // Solo lo hace un proceso
40         G.lee(argv[1]);
41         #ifdef PRINT_ALL
42             cout << "El_grafo_de_entrada.es:" << endl;
43             G.imprime();
44         #endif
45         nverts = G.vertices;
46     }
47
48     /**
49      * Paso 4: Hacer broadcast del número de vértices a todos los procesos
50      */
51     MPI_Bcast(&nverts, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
52
53     /**
54      * Paso 5: Reservar espacio para matriz y fila k
55      */
56     int tamaLocal, tamaBloque;
57
58     tamaLocal = nverts * nverts / size;
59     tamaBloque = nverts / size;
60
61     int M[tamaBloque][nverts], K[nverts]; // Matriz local y fila k
62
63     /**
64      * Paso 6: Repartir matriz entre los procesos
65      */
66     MPI_Scatter(G.ptrMatriz(), tamaLocal, MPI_INT, &M[0][0], tamaLocal, MPI_INT, 0,
67                MPI_COMM_WORLD);

```

```

68
69
70 /**
71  * Paso 7: Bucle principal del algoritmo
72  */
73 int i, j, k, vikj, iGlobal, iIniLocal, iFinLocal, kEntreTama, kModuloTama;
74
75 iIniLocal = rank * tamaBloque; // Fila inicial del proceso (valor global)
76 iFinLocal = (rank + 1) * tamaBloque; // Fila final del proceso (valor global)
77
78 double t = MPI_Wtime();
79
80 for (k = 0; k < nverts; k++) {
81     kEntreTama = k / tamaBloque;
82     kModuloTama = k % tamaBloque;
83     if (k >= iIniLocal && k < iFinLocal) { // La fila K pertenece al proceso
84         copy(M[kModuloTama], M[kModuloTama] + nverts, K);
85     }
86     MPI_Bcast(K, nverts, MPI_INT, kEntreTama, MPI_COMM_WORLD);
87     for (i = 0; i < tamaBloque; i++) { // Recorrer las filas (valores locales)
88         iGlobal = iIniLocal + i; // Convertir la fila a global
89         for (j = 0; j < nverts; j++) {
90             if (iGlobal != j && iGlobal != k && j != k) { // No iterar sobre diagonal
91                 vikj = M[i][k] + K[j];
92                 vikj = min(vikj, M[i][j]);
93                 M[i][j] = vikj;
94             }
95         }
96     }
97 }
98
99 t = MPI_Wtime() - t;
100
101 /**
102  * Paso 8: Recoger resultados en la matriz
103  */
104 MPI_Gather(&M[0][0], tamaLocal, MPI_INT, G.ptrMatriz(), tamaLocal, MPI_INT, 0,
105           MPI_COMM_WORLD);
106
107 /**
108  * Paso 9: Finalizar e imprimir resultados
109  */
110 MPI_Finalize();
111
112 if (rank == 0) { // Solo lo hace un proceso
113     #ifdef PRINT_ALL
114         cout << endl << "Solucion:" << endl;
115         G.imprime();
116         cout << "Tiempo_gastado_=" << t << endl << endl;
117     #else
118         cout << t << endl;
119     #endif
120 }
121 }

```

## 2.2. Versión bidimensional

### 2.2.1. Descripción

Para solucionarlo con este enfoque, asumiendo que el tamaño del problema es divisible entre la raíz cuadrada del número de procesos, **cada proceso tendrá una matriz local de tamaño  $N/\sqrt{P} \times N/\sqrt{P}$ .**

El reparto, a diferencia del enfoque anterior, no es inmediato. En la versión unidimensional realizábamos un *scatter* directamente porque se repartían celdas consecutivas en memoria. En este caso, al distribuir submatrices cuadradas, **deberemos definir un tipo de dato MPI.**

Se realizarán  $\sqrt{P}$  particiones en cada dimensión, obteniendo P submatrices de tamaño  $N/\sqrt{P} \times N/\sqrt{P}$  cada una. Se repartirán a los procesos de izquierda a derecha y arriba abajo. Si, por ejemplo, tuviésemos 9 procesos, la de arriba a la izquierda le correspondería al  $P_0$ , la de arriba al centro al  $P_1$ , la de arriba a la derecha al  $P_2$ , la del centro a la izquierda al  $P_3$ , la del centro al  $P_4$ , la del centro a la derecha al  $P_5$ , la de abajo a la izquierda al  $P_6$ , la de abajo al centro al  $P_7$  y la de abajo a la derecha al  $P_8$ .

Si para el reparto y recolección del resultado se complica la cosa, para el cálculo de éste también. Y es que antes, con la repartición unidimensional, tan solo se necesitaba la fila k, pero **ahora se necesitan valores en las dos dimensiones para calcular el resultado**: hace falta una subfila k y una subcolumna k de los procesos que están colocados en la misma columna y fila respectivamente.

Para llevar a cabo estas comunicaciones hará falta definir **dos comunicadores** y asignarlos a cada proceso para que, en el comunicador horizontal se comuniquen aquellos que se encuentran en la misma fila y en el vertical los que están en la misma columna.

### 2.2.2. Pseudocódigo

```
1 M[i][j] = A
2 for k = 0 to N-1
3   broadcast(filK)
4   broadcast(colK)
5   for i = 0 to N/sqrt(P)-1
6     for j = 0 to N/sqrt(P)-1
7       M[i][j] = min(M[i][j], ColK[i] + FilK[j])
```

### 2.2.3. Problemas y soluciones

#### 2.2.3.1 Traducir índices locales a globales

Pasar de índice local a global no debería de resultar muy problemático, pues **se realizaría de la misma forma que en la versión unidimensional**, solo que aquí también haría falta pasar el índice j de local a global usando el mismo método que en la otra versión,

sumando al inicio el desplazamiento. En esta versión los inicios se calcularía de la siguiente forma:

$$inicio_i = id / \sqrt{P} \times tama_{bloque}$$

$$inicio_j = id \% \sqrt{P} \times tama_{bloque}$$

donde:

$$tama_{bloque} = N / \sqrt{P}$$

### 2.2.3.2 Tipo de dato MPI personalizado

Para trabajar con un tipo de dato personalizado, hay que **definirlo y empaquetarlo** para poder hacer tanto el *scatter* como el *gather*.

Se define con `MPI_Type_vector` y se le pasa como parámetros:

- **Número de grupo de bloques:** Coincide con las filas de cada submatriz.
- **Número de elementos en cada bloque:** Coincide con las columnas de cada submatriz.
- **Número de elementos entre comienzo de cada bloque:** Coincide con el tamaño del problema.
- **Tipo de dato de los elementos:** `MPI_INT`.
- **Nuevo tipo de dato:** Variable `MPI_Datatype` del nuevo tipo de dato.

Una vez definido, se realiza un `MPI_Type_commit`.

A continuación hay que **empaquetarlos en un búfer de envío**, para eso se realizarán tantas iteraciones en un bucle como número de procesos haya. En cada una de estas iteraciones se tiene que empaquetar con `MPI_Pack` a la que se le pasarán como parámetros:

- **Búfer de entrada:** Puntero a la posición de la matriz donde comienza la submatriz de cada proceso, para ello hará falta calcular el desplazamiento desde el inicio de la submatriz que se detallará más adelante.
- **Número de datos de entrada:** 1.
- **Tipo de dato de los datos de entrada:** El tipo de dato MPI que definimos anteriormente.
- **Inicio del búfer de salida:** Puntero al búfer de salida.
- **Tamaño del búfer de de salida** (en bytes): Tamaño de un entero multiplicado por el tamaño de la matriz solución.



- **Posición actual del búfer** (en bytes): Variable inicializada a cero en la primera iteración del bucle que el propio `MPI_Pack` se encargará de modificar.
- **Comunicador**: `MPI_COMM_WORLD`.

De entre todas estas variables, la única que habría que calcular es el desplazamiento desde el inicio de la matriz para apuntar al inicio de cada submatriz y sería:

$$desplazamiento = col_P \times tama_{bloque} + fil_P \times tama_{bloque}^2 \times \sqrt{P}$$

donde:

$$\begin{aligned} col_P &= i / \sqrt{P} \\ fil_P &= i \% \sqrt{P} \\ tama_{bloque} &= N / \sqrt{P} \end{aligned}$$

Una vez empaquetado se realiza un `MPI_Type_free` para liberar el tipo de dato y se podría realizar el `MPI_Scatter` con los siguientes parámetros:

- **Dirección inicial del búfer de envío**: Búfer de envío que usamos como búfer de salida en el `MPI_Pack`.
- **Tamaño de los elementos que se van a repartir a cada proceso** (en bytes): Tamaño del entero multiplicado por el tamaño de la submatriz local de cada proceso.
- **Tipo de dato del búfer de envío**: `MPI_PACKED`.
- **Dirección inicial del búfer de recepción**: Inicio de la submatriz local de cada proceso.
- **Tamaño del búfer de recepción**: Tamaño de la submatriz.
- **Tipo de dato del búfer de recepción**: `MPI_INT`.
- **Proceso raíz**: 0.
- **Comunicador**: `MPI_COMM_WORLD`.

Antes de desempaquetar, se puede realizar sin problemas el `MPI_Gather` con los siguientes parámetros:

- **Dirección inicial del búfer de envío**: Inicio de la submatriz local de cada proceso.
- **Tamaño del búfer de envío**: Tamaño de la submatriz.
- **Tipo de dato del búfer de envío**: `MPI_INT`.
- **Dirección inicial del búfer de recepción**: Búfer utilizado como búfer de envío en el *scatter*.

- **Tamaño de los elementos que se van a recibir de cada proceso** (en bytes): Tamaño del entero multiplicado por el tamaño de la submatriz.
- **Tipo de dato del búfer de recepción:** MPI\_PACKED.
- **Proceso raíz:** 0.
- **Comunicador:** MPI\_COMM\_WORLD.

Una vez realizada esta operación, hay que desempaquetar (paso inverso al empaquetado anterior). Para ello se definirá de nuevo el tipo (MPI\_Type\_vector y MPI\_Type\_commit con los mismos parámetros que en el empaquetado) y se utilizará un bucle como en el empaquetado, pero esta vez se utilizará MPI\_Unpack con los siguientes parámetros:

- **Búfer de entrada:** Búfer donde hemos recogido las submatrices de todos los procesos en el *gather*.
- **Tamaño del búfer de entrada** (en bytes): Tamaño de un entero multiplicado por el tamaño de la matriz solución.
- **Posición actual del búfer** (en bytes): Variable inicializada a cero en la primera iteración del bucle que el propio MPI\_Unpack se encargará de modificar.
- **Inicio del búfer de salida:** Puntero a la matriz donde se almacenará el resultado con el desplazamiento correspondiente para cada proceso (calculado como en el empaquetado).
- **Número de elementos de datos de salida:** 1.
- **Tipo de dato de los datos de salida:** El tipo de dato MPI que definimos anteriormente.
- **Comunicador:** MPI\_COMM\_WORLD.

### 2.2.3.3 Comunicadores para filas y columnas

Para definir los comunicadores, lo primero que tenemos que hacer es **identificar en qué fila y columna está cada proceso** para asignarle ese color en el comunicador. Para ello se calculará de la siguiente forma:

$$color_{fila} = id / sqrtP$$

$$color_{columna} = id \% sqrtP$$

Una vez hecho esto, cada proceso sabrá en qué fila y columna está y se podrán realizar dos MPI\_Comm\_split. Para el comunicador horizontal, es decir, por filas se utilizarán los siguientes parámetros:

- **Comunicador padre:** MPI\_COMM\_WORLD.

- **Color:**  $color_{fila}$ .
- **Prioridad:** id del proceso.
- **Nuevo comunicador:** Variable `MPI_Comm` que hemos creado para el comunicador horizontal.

Y para el comunicador vertical, por columnas, los siguientes:

- **Comunicador padre:** `MPI_COMM_WORLD`.
- **Color:**  $color_{columna}$ .
- **Prioridad:** id del proceso.
- **Nuevo comunicador:** Variable `MPI_Comm` que hemos creado para el comunicador vertical.

Una vez definidos los comunicadores podemos hacer uso de ellos para enviar la subfila y subcolumna  $k$ . Para ello, al igual que como se hacía en la versión unidimensional, **se comprueba si la subfila y la subcolumna  $k$  pertenecen a un proceso** para que este copie ambas en dos vectores locales de los que luego hará *broadcast al resto de procesos*. A continuación **se realizarían dos `MPI_Bcast`**. Uno para comunicar la subfila con los siguientes parámetros:

- **Dirección inicial del búfer** (tanto de entrada como de salida): Vector donde se ha copiado la subfila  $k$ .
- **Número de elementos en el búfer:** Tamaño de la subfila.
- **Tipo de dato de los elementos del búfer:** `MPI_INT`.
- **Proceso raíz:**  $k$  dividido entre el tamaño de la subfila.
- **Comunicador:** Comunicador vertical (por columnas).

Y otro para comunicar la subcolumna con estos parámetros:

- **Dirección inicial del búfer** (tanto de entrada como de salida): Vector donde se ha copiado la subcolumna  $k$ .
- **Número de elementos en el búfer:** Tamaño de la subcolumna.
- **Tipo de dato de los elementos del búfer:** `MPI_INT`.
- **Proceso raíz:**  $k$  dividido entre el tamaño de la subcolumna.
- **Comunicador:** Comunicador horizontal (por filas).

## 2.2.4. Código

```
1  #include <iostream>
2  #include <fstream>
3  #include <string.h>
4  #include <math.h>
5  #include "Graph.h"
6  #include "mpi.h"
7
8  //define PRINT_ALL
9
10 using namespace std;
11
12 int main (int argc, char *argv[])
13 {
14     /**
15      * Paso 1: Iniciar MPI y obtener tamaño e id para cada proceso
16      */
17     int rank, size, tama;
18
19     MPI_Init(&argc, &argv); // Inicializamos la comunicación de los procesos
20     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size); // Numero total de procesos
21     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank); // Valor de nuestro identificador
22
23     /**
24      * Paso 2: Comprobar entradas
25      */
26     if (argc != 2) { // Debe haber dos argumentos
27         if (rank == 0) { // El proceso 0 imprime el error
28             cerr << "Sintaxis:_" << argv[0] << "_<archivo_de_grafo>" << endl;
29         }
30         MPI_Finalize();
31         return -1;
32     }
33
34     /**
35      * Paso 3: Crear grafo y obtener número de vértices
36      */
37     Graph G;
38     int nverts;
39
40     if (rank == 0) { // Solo lo hace un proceso
41         G.lee(argv[1]);
42         #ifdef PRINT_ALL
43             cout << "El_grafo_de_entrada_es:" << endl;
44             G.imprime();
45         #endif
46         nverts = G.vertices;
47     }
48
49     /**
50      * Paso 4: Hacer broadcast del número de vértices a todos los procesos
51      */
52     int raizP, tamaBloque;
53     MPI_Bcast(&nverts, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
54
55     raizP = sqrt(size);
56     tamaBloque = nverts / raizP;
57
58     /**
59      * Paso 5: Crear comunicadores
60      */
```

```

61  int colorHorizontal, colorVertical, rankHorizontal, rankVertical;
62  MPI_Comm commHorizontal, commVertical;
63
64  colorHorizontal = rank / raizP;
65  colorVertical = rank % raizP;
66
67  MPI_Comm_split(MPI_COMM_WORLD, colorHorizontal, rank, &commHorizontal);
68  MPI_Comm_split(MPI_COMM_WORLD, colorVertical, rank, &commVertical);
69
70  MPI_Comm_rank(commHorizontal, &rankHorizontal);
71  MPI_Comm_rank(commVertical, &rankVertical);
72
73  /**
74   * Paso 6: Empaquetar
75   */
76  MPI_Datatype MPI_BLOQUE;
77  int buffEnvio[nverts][nverts]; // Buffer para almacenar los datos empaquetados
78  int filaP, columnaP, comienzo;
79
80  if (rank == 0) {
81      // Se define el tipo de bloque cuadrado
82      MPI_Type_vector(tamaBloque, tamaBloque, nverts, MPI_INT, &MPI_BLOQUE);
83      MPI_Type_commit(&MPI_BLOQUE); // Se crea el nuevo tipo
84      for (int i = 0, posicion = 0; i < size; i++) {
85          // Calculo de la posicion de comienzo de cada submatriz
86          filaP = i / raizP;
87          columnaP = i % raizP;
88          comienzo = columnaP * tamaBloque + filaP * tamaBloque * tamaBloque * raizP;
89          MPI_Pack(G_ptrMatriz() + comienzo, 1, MPI_BLOQUE, buffEnvio,
90                  sizeof(int) * nverts * nverts, &posicion, MPI_COMM_WORLD);
91      }
92      MPI_Type_free(&MPI_BLOQUE); // Se libera el tipo bloque
93  }
94
95  /**
96   * Paso 7: Distribuir la matriz entre los procesos
97   */
98  int M[tamaBloque][tamaBloque], FilK[tamaBloque], ColK[tamaBloque];
99
100  MPI_Scatter(buffEnvio, sizeof(int) * tamaBloque * tamaBloque,
101              MPI_PACKED, M, tamaBloque * tamaBloque, MPI_INT, 0,
102              MPI_COMM_WORLD);
103
104  /**
105   * Paso 8: Bucle principal del algoritmo
106   */
107  int i, j, k, a, vikj, iGlobal, jGlobal, iIniLocal, iFinLocal,
108      jIniLocal, jFinLocal, kEntreTama, kModuloTama;
109
110  iIniLocal = colorHorizontal * tamaBloque; // Fila ini del proceso (global)
111  iFinLocal = (colorHorizontal + 1) * tamaBloque; // Fila fin del proceso (global)
112  jIniLocal = colorVertical * tamaBloque; // Columna ini del proceso (global)
113  jFinLocal = (colorVertical + 1) * tamaBloque; // Columna fin del proceso (global)
114
115  double t = MPI_Wtime();
116
117  for (k = 0; k < nverts; k++) {
118      kEntreTama = k / tamaBloque;
119      kModuloTama = k % tamaBloque;
120      if (k >= iIniLocal && k < iFinLocal) { // La fila K pertenece al proceso
121          // Copia la fila en el vector FilK
122          copy(M[kModuloTama], M[kModuloTama] + tamaBloque, FilK);

```

```

123     }
124     if (k >= jIniLocal && k < jFinLocal) { // La columna K pertenece al proceso
125         for (a = 0; a < tamaBloque; a++) {
126             // Copia la columna en el vector ColK
127             ColK[a] = M[a][kModuloTama];
128         }
129     }
130     MPI_Bcast(FilK, tamaBloque, MPI_INT, kEntreTama, commVertical);
131     MPI_Bcast(ColK, tamaBloque, MPI_INT, kEntreTama, commHorizontal);
132     for (i = 0; i < tamaBloque; i++) { // Recorrer las filas (valores locales)
133         iGlobal = iIniLocal + i; // Convertir la fila a global
134         for (j = 0; j < tamaBloque; j++) { // Recorrer las columnas (val. locales)
135             jGlobal = jIniLocal + j;
136             // No iterar sobre diagonal
137             if (iGlobal != jGlobal && iGlobal != k && jGlobal != k) {
138                 vikj = ColK[i] + FilK[j];
139                 vikj = min(vikj, M[i][j]);
140                 M[i][j] = vikj;
141             }
142         }
143     }
144 }
145
146 t = MPI_Wtime() - t;
147
148 /**
149  * Paso 9: Recoger resultados en la matriz
150  */
151 MPI_Gather(M, tamaBloque * tamaBloque, MPI_INT, buffEnvio,
152           sizeof(int) * tamaBloque * tamaBloque, MPI_PACKED, 0,
153           MPI_COMM_WORLD);
154
155 /**
156  * Paso 10: Desempaquetar
157  */
158 if (rank == 0) {
159     // Se define el tipo de bloque cuadrado
160     MPI_Type_vector(tamaBloque, tamaBloque, nverts, MPI_INT, &MPI_BLOQUE);
161     MPI_Type_commit(&MPI_BLOQUE); // Se crea el nuevo tipo
162     for (int i = 0, posicion = 0; i < size; i++) {
163         // Calculo de la posicion de comienzo de cada submatriz
164         filaP = i / raizP;
165         columnaP = i % raizP;
166         comienzo = columnaP * tamaBloque + filaP * tamaBloque * tamaBloque * raizP;
167         MPI_Unpack(buffEnvio, sizeof(int) * nverts * nverts, &posicion,
168                   G.ptrMatriz() + comienzo, 1, MPI_BLOQUE, MPI_COMM_WORLD);
169     }
170     MPI_Type_free(&MPI_BLOQUE); // Se libera el tipo bloque
171 }
172
173 /**
174  * Paso 11: Finalizar e imprimir resultados
175  */
176 MPI_Finalize();
177
178 if (rank == 0) { // Solo lo hace un proceso
179     #ifdef PRINT_ALL
180         cout << endl << "Solucion:" << endl;
181         G.imprime();
182         cout << "Tiempo_gastado_=" << t << endl << endl;
183     #else
184         cout << t << endl;

```

```

185 | #endif
186 | }
187 | }

```

### 3. Resultados

#### 3.1. Consideraciones iniciales

Para tomar tiempos se ha utilizado un portátil *MSI CX61 2PC* con las siguientes características:

- **Procesador:** Intel® Core™ i7-4712MQ CPU @ 2.30GHz
- **Tamaño de caché:** 6MB
- **Memoria RAM:** 8GB
- **S.O.:** Linux Mint 17.3 Rosa Cinnamon (64-bit)
- **Versión g++:** 4.8.4
- **Versión MPI:** 1.6.5

#### 3.2. Tabla de tiempos y ganancia

Se han tomado tiempos con  $P = 4$  para ambos algoritmos paralelizados. Para tomar los tiempos en secuencial se ha utilizado el algoritmo paralelizado con la versión unidimensional con un solo proceso.

N	$T_{sec}$	$T_{1D}$	$T_{2D}$	$S_{1D}$	$S_{2D}$
60	0,00051	0,000826	0,00091	0,617433414	0,5604395604
240	0,01865	0,015684	0,01613	1,1891099209	1,1562306262
480	0,13686	0,078875	0,08168	1,7351505547	1,6755631734
600	0,28684	0,126785	0,13685	2,262412746	2,0960175374
800	0,57119	0,226878	0,23894	2,5176085826	2,3905164476
920	0,91609	0,336187	0,34841	2,7249417735	2,6293447375
1000	1,29221	0,436815	0,45487	2,9582546387	2,8408336448
1200	2,03944	0,652061	0,68765	3,1276828395	2,9658110958

Se puede observar que no se llegan a mejorar los resultados del algoritmo secuencial hasta que el tamaño no es mayor a 240. Para un tamaño de 1200 se llega a tener una ganancia de 3 (aproximadamente el 75 %) que no es todavía la de un sistema ideal donde  $S = P$ , pero se acerca bastante.

### 3.3. Gráficas de tiempos y ganancia

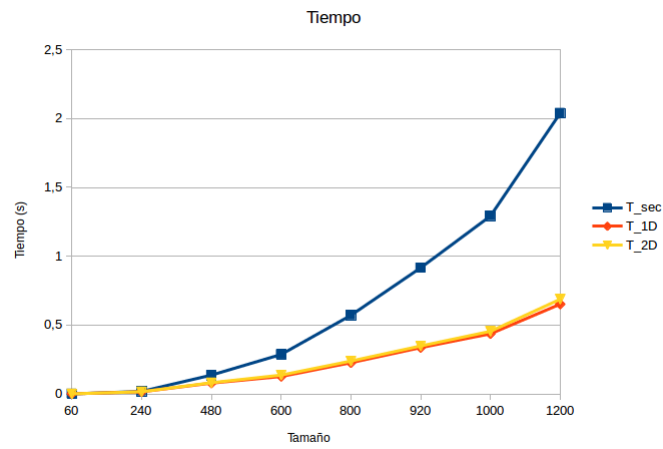


Figura 3.1: Gráfica de tiempo para  $P = 4$  y  $N = 60, 240, 480, 600, 800, 920, 1000, 1200$

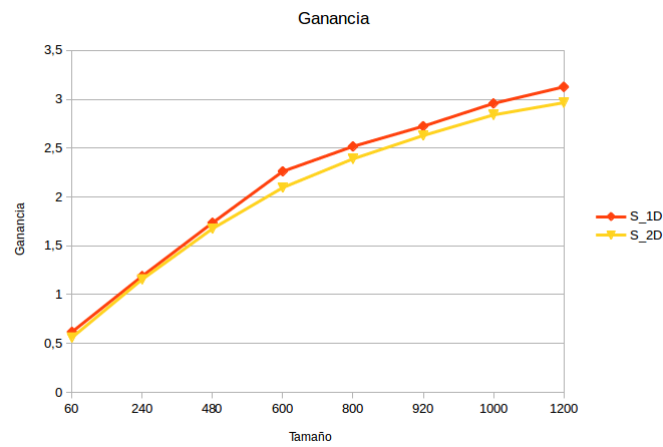


Figura 3.2: Gráfica de ganancia para  $P = 4$  y  $N = 60, 240, 480, 600, 800, 920, 1000, 1200$