

2º curso / 2º cuatr.

Grado en
Ing. Informática

ETSIT
Universidad de Granada

Prácticas de Arquitectura de Computadores

Programación paralela

Material elaborado por los profesores responsables de la asignatura:

Mancia Anguita, Julio Ortega

Licencia Creative Commons 

0 Contenido

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introducción | 3 |
| 1.1 | Objetivo general de las prácticas | 3 |
| 1.2 | Plataforma de prácticas..... | 3 |
| 1.3 | Planificación y estructura de las prácticas de AC | 5 |
| 1.4 | Evaluación de las prácticas | 6 |
| 1.4.1 | Evaluación continua en la convocatoria ordinaria de junio | 6 |
| 1.4.2 | Evaluación mediante una única prueba final y evaluaciones en convocatorias extraordinarias (septiembre y diciembre) | 7 |
| 2 | Bloque Práctico 0. Entorno de programación | 8 |
| 2.1 | Objetivos..... | 8 |
| 2.2 | Seminario..... | 8 |
| 2.3 | Práctica o trabajo a desarrollar | 8 |
| 2.3.1 | Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico | 8 |
| 2.3.2 | Resto de ejercicios | 9 |
| 3 | Bloque Práctico 1. Programación paralela I: Directivas OpenMP | 14 |
| 3.1 | Objetivos..... | 14 |
| 3.2 | Seminario..... | 14 |
| 3.3 | Práctica o trabajo a desarrollar | 14 |
| 3.3.1 | Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico | 14 |
| 3.3.2 | Resto de ejercicios | 15 |
| 4 | Bloque Práctico 2. Programación paralela II: Cláusulas OpenMP | 18 |
| 4.1 | Objetivos..... | 18 |
| 4.2 | Seminario..... | 18 |
| 4.3 | Práctica o trabajo a desarrollar | 18 |
| 4.3.1 | Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico | 18 |
| 4.3.2 | Resto de ejercicios | 19 |
| 5 | Bloque Práctico 3. Programación paralela III: Interacción con el entorno en OpenMP | 20 |



| | | |
|-------|--|----|
| 5.1 | Objetivos..... | 20 |
| 5.2 | Seminario..... | 20 |
| 5.3 | Práctica o trabajo a desarrollar | 20 |
| 5.3.1 | Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico..... | 20 |
| 5.3.2 | Resto de ejercicios..... | 21 |
| 6 | Bibliografía..... | 22 |
| 6.1 | Linux | 22 |
| 6.2 | C/C++ | 23 |
| 6.3 | Gcc | 23 |
| 6.4 | OpenMP..... | 23 |
| 6.5 | Eclipse..... | 24 |
| 6.6 | Programación paralela | 24 |
| 7 | Agradecimientos..... | 24 |

En este guion de prácticas podrá encontrar información general sobre las prácticas de la asignatura Arquitectura de Computadores (AC) y, en particular, encontrará las prácticas de programación paralela de AC. AC es una asignatura de rama del Grado de Ingeniería Informática que se imparte en el segundo cuatrimestre del segundo curso (cuarto semestre). Este guion se divide en siete secciones: una introducción (Sección 1), una sección dedicada a los cuatro bloques prácticos (del 0 al 3) que componen las prácticas de programación paralela (Secciones 2 a 5) y una última sección con la bibliografía recomendada (Sección 6).

En la sección de introducción podrá encontrar el objetivo general que se persigue con las prácticas de AC (Apartado 1.1), información sobre la plataformas que se va a utilizar en las aulas de prácticas y sobre las que en general se pueden utilizar para desarrollar las prácticas (Apartado 1.2), la planificación y estructura de las mismas (Apartado 1.3) e información sobre cómo se va a evaluar y calificar la adquisición de los objetivos (Apartado 1.4).

En las secciones dedicadas a bloques prácticos (Secciones 2 a 5) encontrará un primer apartado con los objetivos que se persiguen con el bloque y que, por tanto, se van a evaluar, un segundo apartado que describe a grandes rasgos los contenidos del seminario del bloque, y un último apartado con el trabajo que debe desarrollar y entregar para su evaluación.

La Sección 6 contiene la bibliografía recomendada dividida en varios apartados. Las referencias, que pueden encontrar en esta sección, son direcciones web y algunos libros disponibles en la Biblioteca de la ETSIT. Con estas referencias puede resolver dudas y ampliar conocimientos relacionados con las herramientas que se van a utilizar en prácticas (Apartados 6.1 a 6.5) y consultar contenidos y ampliar conocimientos sobre programación paralela (Apartado 6.6).



1 Introducción

1.1 Objetivo general de las prácticas

Las prácticas de AC persiguen como objetivo general que el estudiante sea capaz de programar aplicaciones con un buen rendimiento en computadores personales y servidores de gama baja (Figura 1); es decir, se trata de conseguir código para estas plataformas con una buena relación entre las prestaciones (tiempo de respuesta, calidad de las salidas y funcionalidades) y el coste que supone conseguirlas. La programación con un buen rendimiento del resto de computadores del mercado (Figura 1) se cubre en una parte con los contenidos abordados en AC (hay características de los componentes, que aquí se aprovechan, de PC y servidores básicos, que están presentes también en otros niveles del mercado) y, principalmente, con las dos materias de la especialidad de Ingeniería de Computadores (IC): Sistemas de Cómputo de Altas Prestaciones (asignaturas Arquitecturas y Computación de Altas Prestaciones, Centros de Procesamiento de Datos y Arquitectura de Sistemas) y Sistemas de Cómputo para Aplicaciones Específicas (asignaturas Desarrollo de Hardware Digital, Sistemas con Microprocesadores y Sistemas Empotrados). La primera materia estudia sistemas de gama media y alta y, la segunda, sistemas empotrados.

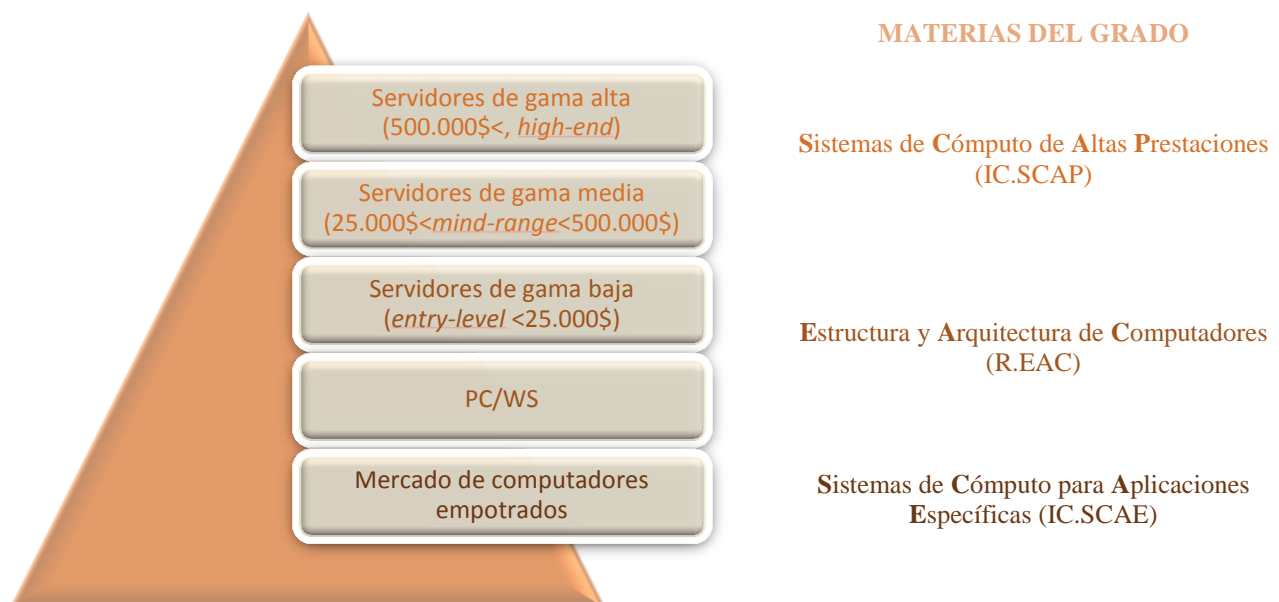


Figura 1. Pirámide del mercado de computadores (WS: *Workstation*, IC: Ingeniería de Computadores, R: Rama). Conforme se sube hacia arriba en la pirámide disminuye el volumen de venta y aumenta el precio.

1.2 Plataforma de prácticas

Para el desarrollo de las prácticas se usarán los PC del aula de prácticas y un pequeño cluster de servidores (atcgrid).

En los PC del aula de prácticas se usará la distribución de Linux ([1], [2]) Ubuntu de 64 bits ([3], [5]) con procesadores de 64 bits. Se sugiere usar el entorno de ventanas GNOME [6] instalado en este sistema operativo (para iniciar el entorno en las aulas de prácticas se usará `startx`). Se trabajará con las siguientes herramientas disponibles en el aula de prácticas bajo Ubuntu de 64 bits:

- **C/C++.** El código secuencial se escribirá en C ([13], [14], [15]), aunque se comparará un código sencillo en C con su equivalente en C++ ([16], [17], [18]) en el Bloque Práctico 0. Para compilar código C/C++ en el aula se usarán los compiladores de GNU: gcc o *GNU Compiler Collection* ([19], [20]). Los ejecutables deben ser de 64 bits.

- **OpenMP.** Es un estándar de facto para la programación paralela con el estilo/paradigma de variables compartidas ([21], [22], [23], [24], [25]) que se puede utilizar con C/C++ y Fortran. Esta herramienta de programación paralela, como se mostrará a lo largo de los bloques prácticos 1, 2 y 3, se basa en directivas y funciones (en la Lección 4/Tema 2 de AC se estudian los tipos de herramientas y los estilos/paradigmas de programación paralela). Para escribir código fuente paralelo con OpenMP se usará principalmente lenguaje C más la API (*Application Programming Interface*) de OpenMP. En particular se usará la implementación de OpenMP que viene integrada con el compilador de GNU desde su versión 4.1.1 (puede encontrar el manual de OpenMP de GNU en [20]).

Para editar los códigos fuente en C se puede usar, por ejemplo, `gedit`, disponible en el entorno de ventanas que utilizamos en las aulas prácticas (GNOME). Otra alternativa sería usar el editor de un entorno de desarrollo para C/C++. Si prefiere usar un entorno de desarrollo, se recomienda el entorno de desarrollo Eclipse ([26], [27], [28], [29] y [30]) porque, entre otras cosas, tiene soporte para multinúcleo. Una ventaja de usar un entorno es que facilitan la depuración de errores porque incluye un depurador. Eclipse permite depurar un programa a alto nivel (en nuestro caso en C) y en ensamblador.

El cluster `atcgrid` (Figura 2), que según se ha mencionado más arriba, se va a utilizar en prácticas, tiene instalado Red Hat de 64 bits. Consta de tres servidores (`atcgrid1`, `atcgrid2` y `atcgrid3`), cada uno con dos procesadores Intel® Xeon® E5645 (6 cores/12 threads, 12M L2 Cache compartida, 2.40 GHz cada core, 5.86 GT/s Intel® QPI, [http://ark.intel.com/products/48768?wapkw=\(E5645\)](http://ark.intel.com/products/48768?wapkw=(E5645))). Además dispone de un nodo que actúa como *front-end*, *master* o *host* (`atcgrid.ugr.es`). El cluster `atcgrid` ha sido financiado por el Programa de Apoyo a la Docencia Práctica de la Universidad de Granada a petición del ámbito de Arquitectura y Tecnología de Computadores.

Se recomienda acceder al cluster `atcgrid` mediante `ssh` (*secure shell*) para ejecutar comandos y con `sftp` (*secure file transfer protocol*) para transferir ficheros. El usuario que accede a `atcgrid.ugr.es` en realidad accede a su cuenta de usuario en el nodo *front-end* (es un computador que "da la cara"). Desde el *front-end* el usuario enviará trabajos a `atcgrid1`, `atcgrid2` y `atcgrid3` a través de un gestor de recursos distribuidos, en particular, se usará el gestor TORQUE [11][12]). TORQUE está basado, al igual que otros sistemas de colas conocidos, en PBS (*Portable Batch System*). En el Seminario 0 del Bloque Práctico 0 hay información más detallada sobre el cluster `atcgrid`, el sistema de colas TORQUE y el acceso remoto a `atcgrid` de los usuarios.

Se puede acceder al *front-end*, `atcgrid.ugr.es`, desde cualquier punto dentro de la red de la Universidad de Granada, como por ejemplo desde los PC de las aulas de prácticas o desde su propio portátil personal, en

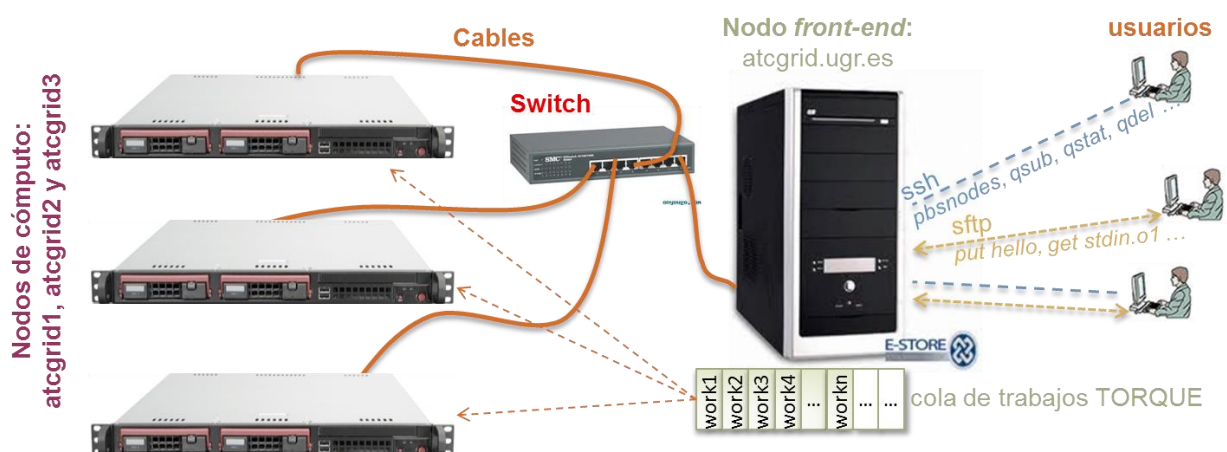


Figura 2. Componentes del cluster `atcgrid` (nodos de cómputo, *switch* y cables de interconexión) y nodo *front-end*. Los usuarios acceden al cluster (en particular al nodo *front-end*) de forma remota usando `ssh` y `sftp`. Desde el *front-end* se accede a los nodos de cómputo usando el gestor TORQUE.

este último caso usando el campus virtual inalámbrico <https://csirc.ugr.es/informatica/RedUGR/CVI/>. Si accede a través del campus virtual inalámbrico utilice eduroam o, en su defecto, cviugr estableciendo una conexión VPN (<https://csirc.ugr.es/informatica/RedUGR/CVI/ConectarCVI-UGR/>). También puede acceder desde fuera de la red de la Universidad de Granada (desde casa, etc.) mediante conexión VPN. Para establecer una conexión VPN siga las instrucciones que se encuentran en la siguiente dirección web: <https://csirc.ugr.es/informatica/RedUGR/VPN/>. Para realizar una conexión a eduroam o a cviugr siga las instrucciones que se encuentran en la siguiente dirección web: <https://csirc.ugr.es/informatica/RedUGR/CVI/ConectarCVI-UGR/>.

Para acceder al *front-end*, atcgrid.ugr.es, desde Windows puede utilizar:

- Un cliente `ssh`, como por ejemplo `putty`, para ejecutar comandos (<http://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/download.html>).
- Un cliente `sftp`, como por ejemplo `FileZilla` (<http://filezilla-project.org/download.php>) o `psftp` (<http://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/download.html>) para cargar y descargar ficheros.

Para acceder al *front-end*, atcgrid.ugr.es, desde Linux puede utilizar:

- `ssh -X usuario@atcgrid.ugr.es` para ejecutar comandos (se usa `-X` para exportar gráficos). Si el Linux que está usando tiene instaladas las páginas de manual, ejecute `man ssh` para más información.
- `sftp usuario@atcgrid.ugr.es` para cargar y descargar ficheros. Si el Linux que está usando tiene instaladas las páginas de manual, ejecute `man sftp` para más información.

No use en ningún caso máquinas virtuales al realizar las prácticas, los resultados obtenidos en máquinas virtuales llevan frecuentemente a interpretaciones erróneas.

1.3 Planificación y estructura de las prácticas de AC

Las prácticas se organizan en cinco bloques, del Bloque Práctico 0 al 4:

- Bloque Práctico 0. Entorno de programación: cluster `atcgrid` y gestor `TORQUE`
- Bloque Práctico 1. Programación paralela I: Directivas `OpenMP`
- Bloque Práctico 2. Programación paralela II: Cláusulas `OpenMP`
- Bloque Práctico 3. Programación paralela III: Interacción con el entorno en `OpenMP`
- Bloque Práctico 4. Optimización de código

Los bloques de 0 a 3 están incluidos en este guion de prácticas, el bloque 4 tiene su propio guion. Cada bloque práctico consta de un Seminario y de varios ejercicios. Estos últimos se realizarán en clase presencial y en casa. En la sección correspondiente a cada bloque se especifican los objetivos que se pretenden conseguir con el seminario y los ejercicios del bloque.

Al bloque práctico 0 se dedicarán dos semanas. El resto de prácticas se pueden desarrollar en dos o tres semanas. La Figura 3 presenta una planificación que, por ser para todos los grupos de prácticas, es necesariamente **aproximada** (porque, por ejemplo, los días festivos no coinciden ni en número ni temporalmente en todos los grupos de prácticas). Los seminarios (S en la figura) se presentarán en una clase presencial o troceados en varias clases presenciales dependiendo de la preferencia del profesor de prácticas. En clase presencial, durante las semanas dedicadas a un bloque, los estudiantes realizarán parte del trabajo del bloque práctico y el profesor de prácticas resolverá las dudas que puedan surgir en el grupo de prácticas (representado con P en la figura). El resto de trabajo lo realizarán los estudiantes en casa y el resto de dudas las resolverá el profesor en horario de tutorías (en la plataforma docente y en la web de grados se puede consultar el lugar y el horario de las tutorías de los profesores).

Todos los códigos fuente implementados, los resultados de su ejecución y la contestación a las preguntas deberán aparecer en el cuaderno de trabajo del bloque práctico que se entregará en la plataforma docente para la evaluación por parte de los profesores de prácticas. En la plataforma docente puede encontrar las plantillas de los cuadernos de trabajo de los cinco bloques prácticos.

| Grupo reducido (14 semanas aprox.: 2-15) | | Grupo amplio (14 semanas aprox.:1-14) | |
|--|-------|---------------------------------------|--|
| Bloque 0. Entorno de Prog. | S0 P0 | Clases de paralelismo | Tema 1. Arquitecturas paralelas: clasificación y prestaciones |
| | S0 P0 | Clases arquitecturas | |
| Bloque 1. Directivas OpenMP | | Eva. prestaciones | Tema 2. Programación paralela |
| | S1 P1 | Herram., estilos, estruct. | |
| | S1 P1 | Proceso paralelización | |
| Bloque 2. Cláusulas OpenMP | P1 | Evaluación prestaciones | Tema 3. Arquitecturas con paralelismo a nivel de thread |
| | S2 P2 | Arquitecturas TLP | |
| | P2 | Coherencia | |
| Bloque 3. Interacción con el entorno en OpenMP | S3 P3 | Consistencia | Tema 4. Arquitecturas con paralelismo a nivel de instrucción (ILP) |
| | S3 P3 | Sincronización | |
| | P3 | Microarq. ILP. Cauces | |
| Bloque 4. Optimización de código | S4 P4 | Consistencia proc., Saltos | Tema 5. Arquitecturas de propósito específico |
| | S4 P4 | VLIW | |
| | P4 | SIMD, GPU y proc. de red | |

Cada fila es una semana (15 filas)
(S)eminario (P)ráctica

Figura 3. Planificación **aproximada** para todos los grupos. (S)eminario (P)ráctica. Cada fila representa una semana (total 15 semanas,1-15)

1.4 Evaluación de las prácticas

Las prácticas suponen **4 puntos** (sobre 10) de la puntuación final de la asignatura. Para poder aprobar la asignatura se necesita obtener un **mínimo 1.6 puntos** en prácticas.

1.4.1 Evaluación continua en la convocatoria ordinaria de junio

La metodología de evaluación por defecto según la normativa de la Universidad de Granada es la evaluación continua, para la calificación de las prácticas con evaluación continua en la convocatoria ordinaria (convocatoria junio) se tendrá en cuenta las calificaciones obtenidas por:

- **Evaluación continua** durante el cuatrimestre (50%, **2 puntos**):
 - Cuaderno de trabajo en formato electrónico de los diferentes bloques.
 - Evaluación/defensa del trabajo realizado en el aula.
- **Examen escrito** a realizar junto con el examen de teoría en la convocatoria de junio (50%, **2 puntos**).

El cuaderno y la defensa suponen un 50% de la calificación total de prácticas y el examen escrito otro 50%. La proporción se justifica en base a que durante la evaluación continua el alumno está en fase de aprendizaje, por ese motivo el porcentaje de la evaluación continua no supera el 50%. La proporción en la que afecta cada una de las cinco evaluaciones continuas realizadas durante el cuatrimestre es la siguiente: el bloque práctico 0 supone un 5 %, el 2 un 20% y el resto de bloques un 25% de los 2 puntos de la evaluación continua.

1.4.1.1 Normas y fechas de entrega

El cuaderno de trabajo de cada bloque práctico, que el estudiante ha ido confeccionando **en formato electrónico** durante las semanas de trabajo del bloque (las plantillas de los cuadernos de trabajo se encuentran en la plataforma docente SWAD, en *Asignatura>Documentos*), se entregará en **pdf** en la plataforma docente SWAD (en *Evaluación->Mis Trabajos*) en la fecha que fijen los profesores de prácticas. El pdf debe contener:

1. todos los códigos implementados,
2. todos los resultados de ejecución (incluidas las capturas de pantalla),
3. todas las gráficas que se soliciten, y
4. la contestación a todas las preguntas.

Además, aparte de este pdf, se entregarán los ficheros con los códigos fuente y el resto de ficheros utilizados para el desarrollo de las prácticas (scripts, hojas de cálculos, ficheros de salida de atcgrid, etc.). El pdf y los códigos fuente se entregarán en un fichero que **necesariamente** debe ser **zip**. El nombre del fichero pdf debe ser **BloquePracticoX_Apellido1Apellido2Nombre.pdf** y el nombre del fichero zip **BloquePracticoX_Apellido1Apellido2Nombre.zip**, donde X es el número del bloque práctico (0, 1, 2, 3 o 4). Se recomienda usar un software gratuito para generar el pdf; por ejemplo, podría utilizar PDFCreator o, si usa OpenOffice para editar su cuaderno de trabajo, la opción *Archivo->Exportar en formato PDF* (OpenOffice está disponible en las aulas de prácticas).

El profesor de prácticas informará de las fechas de entrega del trabajo a desarrollar en prácticas. En cualquier caso, las fechas de entrega de trabajo de un bloque práctico serán anteriores al día de la primera sesión del siguiente bloque práctico.

1.4.1.2 Evaluación y defensa en clase

La **evaluación/defensa** en el aula se realizará durante sesiones presenciales de trabajo. Para contestar a las preguntas puede necesitar un computador y el cuaderno de trabajo de las prácticas realizadas hasta el momento; por tanto, deberá tener accesible este material en el aula de prácticas los días de evaluación. En el examen escrito de prácticas los profesores le podrán plantear cualquier pregunta que permita comprobar si ha adquirido uno o varios de los objetivos de los bloques prácticos. Tenga en cuenta que “*evaluar el trabajo*” significa “*comprobar que se han adquirido los objetivos del mismo*” y que, en las secciones de cada bloque práctico, se especifica cuáles son sus objetivos.

1.4.2 Evaluación mediante una única prueba final y evaluaciones en convocatorias extraordinarias (septiembre y diciembre)

Además de la evaluación continua, para la convocatoria ordinaria (junio) el alumno puede optar por la evaluación de la asignatura mediante una **única prueba final** (tal y como se especifica en la normativa de evaluación de la universidad). En este caso, la prueba final constará de un examen escrito de 4 puntos el que se comprobará si el estudiante ha adquirido los objetivos de los bloques prácticos (seminarios incluidos) que se describen en los dos guiones de prácticas de la asignatura.

En las convocatorias extraordinarias (septiembre y diciembre) se utilizará la evaluación mediante una **única prueba final** que constará de un examen escrito de 4 puntos con el que se comprobará si el estudiante ha adquirido los objetivos de los bloques prácticos (seminarios incluidos).



2 Bloque Práctico 0. Entorno de programación

2.1 Objetivos

Una vez finalizado el bloque debería ser capaz de (si observa que no alcanza alguno de estos objetivos pregunte las dudas que tenga a su profesor en clase presencial o en su despacho de tutorías en horario de tutorías):

1. Usar `ssh` (*secure shell*) para conectarse desde un PC del aula a su home del nodo *front-end* del cluster `atcgrid` con el objetivo de ejecutar comandos.
2. Usar `sftp` (*secure file transfer protocol*) para conectarse desde un PC del aula a su home del *front-end* de `atcgrid` con el objetivo de cargar y descargar ficheros.
3. Enviar desde el *front-end*, usando las colas de TORQUE, trabajos a los dos nodos servidores de `atcgrid` usando `qsub`, comprobar el estado del trabajo en las colas con `qstat`, borrar trabajos de las colas con `qdel` y leer los dos ficheros de resultados (errores y salida del trabajo ejecutado) que devuelve `qsub`.
4. Obtener información del procesador (número de encapsulados, número de cores, denominación de marca, frecuencia de reloj, flag de características,...) en Linux.
5. Distinguir entre variables locales, globales y dinámicas en C/C++. (Lección 1/ Tema 1)
6. Usar la función `clock_gettime()` para obtener el tiempo de ejecución de un trozo de código de un programa. (Lección 3/ Tema 1)

2.2 Seminario

El seminario presenta las características de `atcgrid` y el uso de `ssh`, `sftp` y TORQUE para ejecutar trabajos en `atcgrid`.

2.3 Práctica o trabajo a desarrollar

2.3.1 Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico

En clase presencial y en casa se reproducirá los ejemplos presentados en el seminario y se trabajarán los siguientes ejercicios y cuestiones:

1. En el primer ejemplo de ejecución en `atcgrid` usando TORQUE, se ejecuta el código `HelloOMP.c` de la página 10 del seminario usando la siguiente orden: `echo 'hello/HelloOMP' | qsub -q ac`. El resultado de la ejecución de este código en `atcgrid` se puede ver en la página 17 del seminario. Conteste a las siguientes preguntas:
 - a. ¿Para qué se usa en `qsub` la opción `-q`?
 - b. ¿Cómo sabe el usuario que ha terminado la ejecución en `atcgrid`?
 - c. ¿Cómo puede saber el usuario si ha habido algún error en la ejecución?
 - d. ¿Cómo ve el usuario el resultado de la ejecución?
 - e. ¿Por qué en el resultado de la ejecución aparecen 24 saludos “`!!!Hello World!!!`”?
2. En el segundo ejemplo de ejecución en `atcgrid` usando TORQUE, se ejecuta el script `script_helloomp.sh` de la página 22 del seminario mediante la siguiente orden: `qsub script_helloomp.sh`. El script repite varias veces la ejecución del código `HelloOMP.c`. El resultado de la ejecución de este código en `atcgrid` se puede ver en la página 26 del seminario. Conteste a las siguientes preguntas:
 - a. ¿Por qué no acompaña a la orden `qsub` la opción `-q` en este caso?



- b. ¿Cuántas veces ejecuta el `script` el fichero ejecutable `HelloOMP` en `atcgrid`? ¿Por qué ejecute ese número?
 - c. ¿Cuántos saludos “`!!!Hello World!!!`” se imprimen en cada ejecución? (indique el número exacto) ¿Por qué se imprime ese número?
3. Realizar las siguientes modificaciones en el script “`!!!Hello World!!!`”:
- Eliminar la variable de entorno `$PBS_O_WORKDIR` en el punto en el que aparece.
 - Añadir lo necesario para que, cuando se ejecute el script, se imprima la variable de entorno `$PBS_O_WORKDIR`.

Ejecutar el script con estas modificaciones. ¿Qué resultados de ejecución se obtienen en este caso? Incorporar en el cuaderno de trabajo volcados de pantalla que muestren los resultados.

2.3.2 Resto de ejercicios

4. Incorporar en el fichero `.zip` que se entregará al profesor el fichero `/proc/cpuinfo` de alguno de los nodos de `atcgrid` (`atcgrid1`, `atcgrid2`, `atcgrid3`), del PC del aula de prácticas y de su PC (si tiene Linux instalado). Indique qué ha hecho para obtener el contenido de `/proc/cpuinfo` en `atcgrid`. Teniendo en cuenta el contenido de `cpuinfo` conteste a las siguientes preguntas (justifique las respuestas):
 - a. ¿Cuántos cores físicos y cuántos cores lógicos tiene el PC del aula de prácticas?
 - b. ¿Cuántos cores físicos y cuántos cores lógicos tiene su PC?
 - c. ¿Cuántos cores físicos y cuántos cores lógicos tiene un nodo de `atcgrid`?
5. En el Listado 1 se puede ver un código fuente C que calcula la suma de dos vectores y en el Listado 2 una versión con C++:

$$v3 = v1 + v2; \quad v3(i) = v1(i) + v2(i), \quad i=0, \dots, N-1$$

Los códigos utilizan directivas del compilador para fijar el tipo de variable de los vectores (`v1`, `v2` y `v3`). En los comentarios que hay al principio de los códigos se indica cómo hay que compilarlos. Los vectores pueden ser:

- Variables locales: descomentando en el código `#define VECTOR_LOCAL` y comentando `#define VECTOR_GLOBAL` y `#define VECTOR_DYNAMIC`
- Variables globales: descomentando `#define VECTOR_GLOBAL` y comentando `#define VECTOR_LOCAL` y `#define VECTOR_DYNAMIC`
- Variables dinámicas: descomentando `#define VECTOR_DYNAMIC` y comentando `#define VECTOR_LOCAL` y `#define VECTOR_GLOBAL`. Si se usan los códigos tal y como están en Listado 1 y Listado 2, sin hacer ningún cambio, los vectores (`v1`, `v2` y `v3`) serán variables dinámicas.

Por tanto, se debe definir sólo una de las siguientes constantes: `VECTOR_LOCAL`, `VECTOR_GLOBAL` o `VECTOR_DYNAMIC`.

- a. En los dos códigos (Listado 1 y Listado 2) se utiliza la función `clock_gettime()` para obtener el tiempo de ejecución del trozo de código que calcula la suma de vectores. En el código se imprime la variable `ncgt`, ¿qué contiene esta variable? ¿qué información devuelve exactamente la función `clock_gettime()`? ¿en qué estructura de datos devuelve `clock_gettime()` la información?
 - b. Escribir en el cuaderno de prácticas las diferencias que hay entre el código fuente C y el código fuente C++ para la suma de vectores.
6. Generar el ejecutable del código fuente C del Listado 1 para vectores locales (para ello antes de compilar debe descomentar la definición de `VECTOR_LOCAL` y comentar las definiciones de `VECTOR_GLOBAL` y

VECTOR_DYNAMIC). Ejecutar el código ejecutable resultante en atcgrid usando el la cola TORQUE. Incorporar volcados de pantalla que demuestren la ejecución correcta en atcgrid.

7. Ejecutar en atcgrid el código generado en el apartado anterior usando el `script` del Listado 3 . Generar el ejecutable usando la opción de optimización `-O2` tal y como se indica en el comentario que hay al principio del programa. Ejecutar el código también en su PC local para los mismos tamaños. ¿Se obtiene error para alguno de los tamaños? En caso afirmativo, ¿a qué se debe este error?
8. Generar los ejecutables del código fuente C para vectores globales y para dinámicos (usando `-O2`). Ejecutar los dos códigos en atcgrid usando un `script` como el del Listado 3 (hay que poner en el `script` el nombre de los ficheros ejecutables generados en este ejercicio) para el mismo rango de tamaños utilizado en el ejercicio anterior. Ejecutar también los códigos en su PC local. ¿Se obtiene error usando vectores globales o dinámicos? Razonar los motivos.
9. Rellenar una tabla como la Tabla 1 para atcgrid y otra para el PC local con los tiempos de ejecución obtenidos en los ejercicios anteriores para el trozo de código que realiza la suma de vectores. En la columna “Bytes de un vector” hay que poner el total de bytes reservado para un vector. Ayudándose de una hoja de cálculo represente en una misma gráfica los tiempos de ejecución obtenidos en atcgrid para vectores locales, globales y dinámicos (eje y) en función del tamaño en bytes de un vector (eje x). Realice otra gráfica con los tiempos obtenidos en el PC local. Utilice escala logarítmica en el eje ordenadas (eje y) en todas las gráficas. ¿Hay diferencias en los tiempos de ejecución con vectores locales, globales y dinámicos?

Tabla 1 . Tiempos de ejecución de la suma de vectores para vectores locales, globales y dinámicos

| Nº de Componentes | Bytes de un vector | Tiempo para vect. locales | Tiempo para vect. globales | Tiempo para vect. dinámicos |
|-------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 65536 | | | | |
| 131072 | | | | |
| 262144 | | | | |
| 524288 | | | | |
| 1048576 | | | | |
| 2097152 | | | | |
| 4194304 | | | | |
| 8388608 | | | | |
| 16777216 | | | | |
| 33554432 | | | | |
| 67108864 | | | | |

10. Modificar el código fuente C para que el límite de los vectores cuando se declaran como variables globales sea igual al máximo número que se puede almacenar en la variable N ($\text{MAX}=2^{32}-1$). Generar el ejecutable usando variables globales. ¿Qué ocurre? ¿A qué es debido? Razone además por qué el máximo número que se puede almacenar en N es $2^{32}-1$.

Listado 1 . Código C que suma dos vectores

```
/* SumaVectoresC.c
Suma de dos vectores: v3 = v1 + v2
```

```

Para compilar usar (-lrt: real time library):
gcc -O2 SumaVectores.c -o SumaVectores -lrt

Para ejecutar use: SumaVectoresC longitud
*/

#include <stdlib.h> // biblioteca con funciones atoi(), malloc() y free()
#include <stdio.h> // biblioteca donde se encuentra la función printf()
#include <time.h> // biblioteca donde se encuentra la función clock_gettime()

//#define PRINTF_ALL// comentar para quitar el printf ...
// que imprime todos los componentes

//Sólo puede estar definida una de las tres constantes VECTOR_ (sólo uno de los ...
//tres defines siguientes puede estar descomentado):
//#define VECTOR_LOCAL // descomentar para que los vectores sean variables ...
// locales (si se supera el tamaño de la pila se ...
// generará el error "Violación de Segmento")
//#define VECTOR_GLOBAL // descomentar para que los vectores sean variables ...
// globales (su longitud no estará limitada por el ...
// tamaño de la pila del programa)
#define VECTOR_DYNAMIC // descomentar para que los vectores sean variables ...
// dinámicas (memoria reutilizable durante la ejecución)

#ifdef VECTOR_GLOBAL
#define MAX 33554432 //2^25
double v1[MAX], v2[MAX], v3[MAX];
#endif

int main(int argc, char** argv){

    int i;

    struct timespec cgt1,cgt2; double ncgt; //para tiempo de ejecución

    //Leer argumento de entrada (nº de componentes del vector)
    if (argc<2){
        printf("Faltan nº componentes del vector\n");
        exit(-1);
    }

    unsigned int N = atoi(argv[1]); // Máximo N =2^32-1=4294967295 (sizeof(unsigned int) = 4 B)
    #ifdef VECTOR_LOCAL
    double v1[N], v2[N], v3[N]; // Tamaño variable local en tiempo de ejecución ...
    // disponible en C a partir de actualización C99
    #endif
    #ifdef VECTOR_GLOBAL
    if (N>MAX) N=MAX;
    #endif
    #ifdef VECTOR_DYNAMIC
    double *v1, *v2, *v3;
    v1 = (double*) malloc(N*sizeof(double)); // malloc necesita el tamaño en bytes
    v2 = (double*) malloc(N*sizeof(double)); //si no hay espacio suficiente malloc devuelve NULL
    v3 = (double*) malloc(N*sizeof(double));
    if ( (v1==NULL) || (v2==NULL) || (v3==NULL) ){
        printf("Error en la reserva de espacio para los vectores\n");
        exit(-2);
    }
    #endif

    //Inicializar vectores
    for(i=0; i<N; i++){
        v1[i] = N*0.1+i*0.1; v2[i] = N*0.1-i*0.1; //los valores dependen de N
    }

    clock_gettime(CLOCK_REALTIME,&cgt1);
    //Calcular suma de vectores
    for(i=0; i<N; i++){
        v3[i] = v1[i] + v2[i];
    }

    clock_gettime(CLOCK_REALTIME,&cgt2);
    ncgt=(double) (cgt2.tv_sec-cgt1.tv_sec)+
        (double) ((cgt2.tv_nsec-cgt1.tv_nsec)/(1.e+9));

    //Imprimir resultado de la suma y el tiempo de ejecución
    #ifdef PRINTF_ALL

```



```

printf("Tiempo(seg.):%11.9f\t / Tamaño Vectores:%u\n",ncgt,N);
for(i=0; i<N; i++)
    printf("/ V1[%d]+V2[%d]=V3[%d] (%8.6f+%8.6f=%8.6f) /\n",
        i,i,i,v1[i],v2[i],v3[i]);

#else
    printf("Tiempo(seg.):%11.9f\t / Tamaño Vectores:%u\t/ V1[0]+V2[0]=V3[0] (%8.6f+%8.6f=%8.6f) / /
        V1[%d]+V2[%d]=V3[%d] (%8.6f+%8.6f=%8.6f) /\n",
        ncgt,N,v1[0],v2[0],v3[0],N-1,N-1,N-1,v1[N-1],v2[N-1],v3[N-1]);
#endif

#ifdef VECTOR_DYNAMIC
free(v1); // libera el espacio reservado para v1
free(v2); // libera el espacio reservado para v2
free(v3); // libera el espacio reservado para v3
#endif
return 0;
}

```

Listado 2 .Código C++ que suma dos vectores

```

/* SumaVectoresCpp.cpp
Suma de dos vectores: v3 = v1 + v2

Para compilar usar (-lrt: real time library):
g++ -O2 SumaVectoresCpp.cpp -o SumaVectoresCpp -lrt

Para ejecutar use: SumaVectoresCpp longitud
*/

#include <cstdlib> // biblioteca con atoi()
#include <iostream> // biblioteca donde se encuentra la función cout
using namespace std;
#include <time.h> // biblioteca donde se encuentra la función clock_gettime()

// #define COUT_ALL // comentar para quitar el cout ...
// que imprime todos los componentes

// Sólo puede estar definida una de las tres constantes VECTOR_ (sólo uno de los ...
// tres defines siguientes puede estar descomentado):
// #define VECTOR_LOCAL // descomentar para que los vectores sean variables ...
// locales (si se supera el tamaño de la pila se ...
// generará el error "Violación de Segmento")
// #define VECTOR_GLOBAL // descomentar para que los vectores sean variables ...
// globales (su longitud no estará limitada por el ...
// tamaño de la pila del programa)
#define VECTOR_DYNAMIC // descomentar para que los vectores sean variables ...
// dinámicas (memoria reutilizable durante la ejecución)

#ifdef VECTOR_GLOBAL
#define MAX 33554432 // = 2^25
double v1[MAX], v2[MAX], v3[MAX];
#endif

int main(int argc, char** argv){

    struct timespec cgt1,cgt2; // para tiempo de ejecución

    // Leer argumento de entrada (nº de componentes del vector)
    if (argc<2){
        cout << "Faltan nº componentes del vector\n" << endl ;
        exit(-1);
    }

    unsigned int N = atoi(argv[1]);
    #ifdef VECTOR_LOCAL
    double v1[N], v2[N], v3[N];
    #endif
    #ifdef VECTOR_GLOBAL
    if (N>MAX) N=MAX;
    #endif
    #ifdef VECTOR_DYNAMIC
    double *v1, *v2, *v3;
    v1 = new double [N]; // si no hay espacio suficiente new genera una excepción

```



```

v2 = new double [N];
v3 = new double [N];
#endif

//Inicializar vectores
for(int i=0; i<N; i++){
    v1[i] = N*0.1+i*0.1; v2[i] = N*0.1-i*0.1; //los valores dependen de N
}

clock_gettime(CLOCK_REALTIME,&cgt1);
//Calcular suma de vectores
for(int i=0; i<N; i++)
    v3[i] = v1[i] + v2[i];

clock_gettime(CLOCK_REALTIME,&cgt2);
double ncgt=(double) (cgt2.tv_sec-cgt1.tv_sec)+
    (double) ((cgt2.tv_nsec-cgt1.tv_nsec)/(1.e+9));

//Imprimir resultado de la suma y el tiempo de ejecución
#ifdef COUNT_ALL
cout << "Tiempo(seg.):" << ncgt << "\t/ Tamaño Vectores:" << N << endl;
for(int i=0; i<N; i++)
    cout << "/ V1[" << i << "]+V2[" << i << "]=V3" << i << "]" (" << v1[i] << "+" << v2[i] << "="
    << v3[i] << ") /\t" << endl;
cout << "\n" << endl;
#else
cout << "Tiempo(seg.):" << ncgt << "\t/ Tamaño Vectores:" << N << "\t/ V1[0]+V2[0]=V3[0] ("
    << v1[0] << "+" << v2[0] << "=" << v3[0] << ") / / V1[" << N-1 << "]+V2[" << N-1 << "]=V3["
    << N-1 << "]" (" << v1[N-1] << "+" << v2[N-1] << "=" << v3[N-1] << ") /\n" << endl;
#endif

#ifdef VECTOR_DYNAMIC
delete [] v1; // libera el espacio reservado para v1
delete [] v2; // libera el espacio reservado para v2
delete [] v3; // libera el espacio reservado para v3
#endif
return 0;
}

```

Listado 3. Script para la suma de vectores (SumaVectores.sh). Se supone en el script que el fichero a ejecutar se llama SumaVectorC y que se encuentra en el directorio en el que se ha ejecutado qsub.

```

#!/bin/bash
#Se asigna al trabajo el nombre SumaVectoresC_vlocales
#PBS -N SumaVectoresC_vlocales
#Se asigna al trabajo la cola ac
#PBS -q ac
#Se imprime información del trabajo usando variables de entorno de PBS
echo "Id. usuario del trabajo: $PBS_O_LOGNAME"
echo "Id. del trabajo: $PBS_JOBID"
echo "Nombre del trabajo especificado por usuario: $PBS_JOBNAME"
echo "Nodo que ejecuta qsub: $PBS_O_HOST"
echo "Directorio en el que se ha ejecutado qsub: $PBS_O_WORKDIR"
echo "Cola: $PBS_QUEUE"
echo "Nodos asignados al trabajo:"
cat $PBS_NODEFILE
#Se ejecuta SumaVectorC, que está en el directorio en el que se ha ejecutado qsub,
#para N potencia de 2 desde 2^16 a 2^26
for ( (N=65536;N<67108865;N=N*2) )
do
    $PBS_O_WORKDIR/SumaVectoresC $N
done

```



3 Bloque Práctico 1. Programación paralela I: Directivas OpenMP

3.1 Objetivos

En este bloque práctico se utilizarán las directivas OpenMP [21] para crear y terminar una región paralela, para realizar trabajo compartido y para sincronización/comunicación ([22], [23], [24], [25]). Una vez finalizado el bloque debería ser capaz de (si observa que no alcanza alguno de estos objetivos pregunte las dudas que tenga a su profesor en clase presencial o en su despacho de tutorías en horario de tutorías):

1. Definir OpenMP y caracterizarlo dentro de las herramientas de programación.
2. Distinguir entre los tres componentes de OpenMP: directivas, funciones y variables de entorno.
3. Escribir código fuente OpenMP añadiendo, a código fuente C, directivas y funciones OpenMP.
4. Generar código ejecutable paralelo a partir de código fuente OpenMP usando el compilador `gcc` desde la línea de comandos.
5. Escribir código fuente OpenMP a partir del cual se pueda generar código ejecutable secuencial (código fuente OpenMP portable).
6. Fijar, modificando variables de entorno, el número de *threads* que se va a utilizar en la ejecución de código ejecutable paralelo.
7. Distinguir entre directiva ejecutable y directiva declarativa.
8. Distinguir entre bloque estructurado, construcción y región.
9. Describir la acción que realiza y utilizar la directiva `parallel`.
10. Describir las acciones que realizan y utilizar las directivas de trabajo compartido de OpenMP `for`, `sections` y `single`.
11. Describir las acciones que realizan y utilizar las directivas para comunicación y sincronización `critical`, `atomic` y `barrier`.
12. Distinguir entre las directivas `single` y `master`.
13. Usar la directiva `parallel` y las directivas de trabajo compartido de OpenMP para paralelizar un código paralelo.
14. Generar el código ensamblador de un programa fuente usando la opción `-S` de `gcc`.
15. Obtener el tiempo de ejecución (*elapsed time*), tiempo de CPU, los MIPS y los MFLOPS de un código (consultar Lección 3/Tema 1 de AC).

3.2 Seminario

El seminario de este bloque práctico presenta las principales directivas de OpenMP usadas para escribir código paralelo ([21], [22], [23], [24], [25]).

3.3 Práctica o trabajo a desarrollar

3.3.1 Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico

En clase presencial y en casa se ejecutarán los códigos presentados en el seminario y se trabajarán los siguientes ejercicios y cuestiones:

1. Usar la directiva `parallel` combinada con directivas de trabajo compartido en los ejemplos `bucle-for.c` y `sections.c` del seminario. Incorporar el código fuente resultante al cuaderno de prácticas.
2. Imprimir los resultados del programa `single.c` usando una directiva `single` dentro de la construcción `parallel` en lugar de imprimirlos fuera de la región `parallel`. Añadir lo necesario, dentro de la nueva directiva `single` incorporada, para que se imprima el identificador del thread que ejecuta el bloque



estructurado de la directiva `single`. Incorpore en su cuaderno de trabajo el código fuente y volcados de pantalla con los resultados de ejecución obtenidos.

3. Imprimir los resultados del programa `single.c` usando una directiva `master` dentro de la construcción `parallel` en lugar de imprimirlos fuera de la región `parallel`. Añadir lo necesario, dentro de la nueva directiva `master` incorporada, para que se imprima el identificador del thread que ejecuta el bloque estructurado de la directiva `master`. Incorpore en su cuaderno el código fuente y volcados de pantalla con los resultados de ejecución obtenidos. ¿Qué diferencia observa con respecto a los resultados de ejecución del ejercicio anterior?
4. ¿Por qué si se elimina directiva `barrier` en el ejemplo `master.c` la suma que se calcula e imprime no siempre es correcta? Responda razonadamente.

3.3.2 Resto de ejercicios

En clase presencial y en casa, usando plataformas (procesadores + SO) de 64 bits, se trabajarán los siguientes ejercicios y cuestiones:

5. El programa secuencial C del Listado 1 calcula la suma de dos vectores ($v3 = v1 + v2$; $v3(i) = v1(i) + v2(i)$, $i=0, \dots, N-1$). Generar el ejecutable del programa del Listado 1 para **vectores globales** (compile según se indica en los comentarios que hay al principio del código fuente, usar `-O2`). Usar `time` (Lección 3/ Tema 1) en la línea de comandos para obtener, en el PC local, el tiempo de ejecución (*elapsed time*) y el tiempo de CPU del usuario y del sistema para el ejecutable generado. Obtenga los tiempos para vectores con 10000000 componentes. ¿La suma de los tiempos de CPU del usuario y del sistema es mayor o igual que el tiempo real (*elapsed*)? Justifique la respuesta.
6. Generar el código ensamblador a partir del programa secuencial C del Listado 1 para **vectores globales** (para generar el código ensamblador tiene que compilar usando `-S` en lugar de `-o`, debe usar `-O2`). Utilice el fichero con el código fuente ensamblador generado y el fichero ejecutable generado en el ejercicio 5 para obtener para `atcgrid` los MIPS (*Millions of Instructions Per Second*) y los MFLOPS (*Millions of FLOating-point Per Second*) del código que obtiene la suma de vectores (código entre las funciones `clock_gettime()`); el cálculo se debe hacer para 10 y 10000000 componentes en los vectores (consulte la Lección 3/Tema1). Incorpore el código ensamblador de la parte de la suma de vectores en el cuaderno.
7. Implementar un programa en C con OpenMP, a partir del código del Listado 1, que calcule en paralelo la suma de dos vectores ($v3 = v1 + v2$; $v3(i)=v1(i)+v2(i)$, $i=0, \dots, N-1$) usando las directivas `parallel` y `for`. Se debe paralelizar también las tareas asociadas a la inicialización de los vectores. Como en el código del Listado 1 se debe obtener el tiempo (*elapsed time*) que supone el cálculo de la suma. Para obtener este tiempo usar la función `omp_get_wtime()`, que proporciona el estándar OpenMP, en lugar de `clock_gettime()`. NOTAS: (1) el número de componentes N de los vectores debe ser un argumento de entrada al programa; (2) se deben inicializar los vectores antes del cálculo; (3) se debe asegurar que el programa calcula la suma correctamente imprimiendo todos los componentes del vector resultante, `v3`, para varios tamaños pequeños de los vectores (por ejemplo, $N = 8$ y $N=11$); (5) se debe imprimir sea cual sea el tamaño de los vectores el tiempo de ejecución del código paralelo que suma los vectores y, al menos, el primer y último componente de `v1`, `v2` y `v3` (esto último evita que las optimizaciones del compilador eliminen el código de la suma).
8. Implementar un programa en C con OpenMP, a partir del código del Listado 1, que calcule en paralelo la suma de dos vectores usando las `parallel` y `sections/section` (se debe aprovechar el paralelismo de datos usando estas directivas en lugar de la directiva `for`); es decir, hay que repartir el trabajo (tareas) entre varios threads usando `sections/section`. Se debe paralelizar también las tareas asociadas a la inicialización de los vectores. Para obtener este tiempo usar la función `omp_get_wtime()` en lugar de `clock_gettime()`. NOTAS: (1) el número de componentes N de los vectores debe ser un argumento de entrada al programa; (2) se deben inicializar los vectores antes del cálculo; (3) se debe asegurar que el programa calcula la suma correctamente imprimiendo todos los componentes del vector resultante, `v3`, para tamaños pequeños de los vectores (por ejemplo, $N = 8$ y $N=11$); (5) se debe imprimir sea cual

sea el tamaño de los vectores el tiempo de ejecución del código paralelo que suma los vectores y, al menos, el primer y último componente de v1, v2 y v3 (esto último evita que las optimizaciones del compilador eliminen el código de la suma).

Tabla 2 . Tiempos de ejecución de la versión secuencial de la suma de vectores y de las dos versiones paralelas. Sustituir en el encabezado de la tabla “¿?” por el número de threads utilizados, que debe coincidir con el número de cores físicos **utilizados**.

| Nº de Componentes | T. secuencial vect. Globales 1 thread/core | T. paralelo (versión for) ¿?threads/cores | T. paralelo (versión sections) ¿?threads/cores |
|-------------------|--|---|--|
| 16384 | | | |
| 32768 | | | |
| 65536 | | | |
| 131072 | | | |
| 262144 | | | |
| 524288 | | | |
| 1048576 | | | |
| 2097152 | | | |
| 4194304 | | | |
| 8388608 | | | |
| 16777216 | | | |
| 33554432 | | | |
| 67108864 | | | |

Tabla 3 . Tiempos de ejecución de la versión secuencial de la suma de vectores y de las dos versiones paralelas en el PC local. Sustituir en el encabezado de la tabla “¿?” por el número de threads utilizados.

| Nº de Componentes | Tiempo secuencial vect. Globales 1 thread/core | | | Tiempo paralelo/versión for ¿? Threads/cores | | |
|-------------------|---|-----------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|
| | <i>Elapsed</i> | <i>CPU-user</i> | <i>CPU- sys</i> | <i>Elapsed</i> | <i>CPU-user</i> | <i>CPU- sys</i> |
| 65536 | | | | | | |
| 131072 | | | | | | |
| 262144 | | | | | | |
| 524288 | | | | | | |
| 1048576 | | | | | | |
| 2097152 | | | | | | |
| 4194304 | | | | | | |
| 8388608 | | | | | | |
| 16777216 | | | | | | |
| 33554432 | | | | | | |
| 67108864 | | | | | | |

9. ¿Cuántos threads y cuántos cores como máximo podría utilizar la versión que ha implementado en el ejercicio 7? Razone su respuesta. ¿Cuántos threads y cuantos cores como máximo podría utilizar la versión que ha implementado en el ejercicio 8? Razone su respuesta.
10. Rellenar una tabla como la Tabla 2 para atcgrid y otra para el PC local con los tiempos de ejecución de los programas paralelos implementados en los ejercicios 7 y 8 y el programa secuencial del Listado 1 . Debe usar -O2. En la tabla debe aparecer el tiempo de ejecución del trozo de código que realiza la suma en paralelo (este es el tiempo que deben imprimir los programas). Ponga en la tabla el número de threads/cores que usan los códigos. Represente en una gráfica los tres tiempos.
11. Rellenar una tabla como la Tabla 3 para el PC local con el tiempo de ejecución, tiempo de CPU del usuario y tiempo CPU del sistema obtenidos con `time` para el ejecutable del ejercicio 7, y para el programa secuencial del Listado 1 . Ponga en la tabla el número de threads/cores que usan los códigos. ¿El tiempo de CPU que se obtiene es mayor o igual que el tiempo real (*elapsed*)? Justifique la respuesta.

4 Bloque Práctico 2. Programación paralela II: Cláusulas OpenMP

4.1 Objetivos

En este bloque práctico se utilizarán las principales cláusulas OpenMP ([21], [22], [23], [24], [25]). Una vez finalizado el bloque deberá ser capaz de (si observa que no alcanza alguno de estos objetivos pregunte las dudas que tenga a su profesor en clase presencial o en su despacho de tutorías en horario de tutorías):

1. Distinguir entre directivas y cláusulas.
2. Describir la acción que realizan las cláusulas que determinan el ámbito de variables (`shared`, `private`, `lastprivate`, `firstprivate`, `default`) y explicar las diferencias entre ellas.
3. Describir la acción que realizan las cláusulas para comunicación y sincronización `reduction` y `copyprivate`.
4. Usar cláusulas de ámbito de variables: `shared`, `private`, `lastprivate`, `firstprivate`, `default`.
5. Discernir el ámbito de una variable en un código.
6. Usar la cláusula de comunicación y sincronización `reduction`.
7. Estudiar la escalabilidad de un programa en una plataforma (consulte la lección 6/Tema 2)

4.2 Seminario

El seminario de este bloque práctico presenta las principales cláusulas de OpenMP usadas para afinar el comportamiento de las directivas ([21], [22], [23], [24], [25]).

4.3 Práctica o trabajo a desarrollar

4.3.1 Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico

En clase presencial y en casa se ejecutarán los códigos presentados en el seminario y se trabajarán los siguientes ejercicios y cuestiones (incorpore al cuaderno de prácticas: los códigos con las modificaciones solicitadas y capturas de pantalla que muestren los resultados de ejecución).

1. **(a)** ¿Qué ocurre si en el ejemplo del seminario `shared-clause.c` se añade a la directiva `parallel` la cláusula `default(none)`? (añada una captura de pantalla que muestre lo que ocurre) **(b)** Resuelva el problema generado sin eliminar `default(none)`. Añada el código con la modificación al cuaderno de prácticas.
2. ¿Qué ocurre si en `private-clause.c` se inicializa la variable `suma` fuera de la construcción `parallel` en lugar de dentro? Razone su respuesta. Añada el código con la modificación al cuaderno de prácticas.
3. ¿Qué ocurre si en `private-clause.c` se elimina la cláusula `private(suma)`? ¿A qué cree que es debido?
4. En la ejecución de `firstlastprivate.c` de la pag. 21 del seminario se imprime un 6 fuera de la región `parallel`. ¿El código imprime siempre 6 fuera de la región `parallel`? Razone su respuesta.
5. ¿Qué ocurre si en `copyprivate-clause.c` se elimina la cláusula `copyprivate(a)` en la directiva `single`? ¿A qué cree que es debido?
6. En el ejemplo `reduction-clause.c` sustituya `suma=0` por `suma=10`. ¿Qué resultado se imprime ahora? Justifique el resultado.
7. En el ejemplo `reduction-clause.c`, elimine `for` de `#pragma omp parallel for reduction(+:suma)` y haga las modificaciones necesarias para que se siga realizando la suma de los componentes del vector `a` en paralelo.

4.3.2 Resto de ejercicios

En clase presencial y en casa se trabajarán los siguientes ejercicios y cuestiones (incorpore al cuaderno de prácticas: los códigos con las modificaciones solicitadas y capturas de pantalla que muestren los resultados de ejecución):

8. Implementar un programa secuencial en C que calcule el producto de una matriz cuadrada, M , por un vector, $v1$:

$$v2 = M \bullet v1; \quad v2(i) = \sum_{k=0}^{N-1} M(i,k) \bullet v(k), \quad i = 0, \dots, N-1$$

NOTAS: (1) el número de filas /columnas N de la matriz deben ser argumentos de entrada al programa; (2) se debe inicializar la matriz y el vector antes del cálculo; (3) se debe asegurar que el programa calcula la suma correctamente imprimiendo todos los componentes del vector resultante, $v3$, para tamaños pequeños de los vectores (por ejemplo, $N = 8$ y $N=11$); (5) se debe imprimir sea cual sea el tamaño de los vectores el tiempo de ejecución del código que calcula el producto matriz vector y, al menos, el primer y último componente del resultado (esto último evita que las optimizaciones del compilador eliminen el código de la suma).

9. Implementar en paralelo el producto matriz por vector con OpenMP a partir del código escrito en el ejercicio anterior usando la directiva `for`. Debe implementar dos versiones del código (consulte la lección 5/Tema 2):
- una primera que paralelice el bucle que recorre las filas de la matriz y
 - una segunda que paralelice el bucle que recorre las columnas.

Use las directivas que estime oportunas y las cláusulas que sean necesarias **excepto la cláusula `reduction`**. Se debe paralelizar también la inicialización de las matrices. Respecto a este ejercicio:

- Anote en su cuaderno de prácticas todos los errores de compilación que se han generado durante la realización del ejercicio y explique cómo los ha resuelto (especifique qué ayudas externas ha usado o recibido).
- Anote todos los errores en tiempo de ejecución que se han generado durante la realización del ejercicio y explique cómo los ha resuelto (especifique qué ayudas externas ha usado o recibido).

NOTAS: (1) el número de filas /columnas N de la matriz deben ser argumentos de entrada; (2) se debe inicializar la matriz y el vector antes del cálculo; (3) se debe asegurar que el programa calcula la suma correctamente imprimiendo todos los componentes del vector resultante, $v3$, para tamaños pequeños de los vectores (por ejemplo, $N = 8$ y $N=11$); (5) se debe imprimir sea cual sea el tamaño de los vectores el tiempo de ejecución del código que calcula el producto matriz vector y, al menos, el primer y último componente del resultado (esto último evita que las optimizaciones del compilador eliminen el código de la suma).

10. A partir de la segunda versión de código paralelo desarrollado en el ejercicio anterior, implementar una versión paralela del producto matriz por vector con OpenMP que use para comunicación/sincronización la cláusula `reduction`. Respecto a este ejercicio:
- Anote en su cuaderno de prácticas todos los errores de compilación que se han generado durante la realización del ejercicio y explique cómo los ha resuelto (especifique qué ayudas externas ha usado o recibido).
 - Anote todos los errores en tiempo de ejecución que se han generado durante la realización del ejercicio y explique cómo los ha resuelto (especifique qué ayudas externas ha usado o recibido).
11. Ayudándose de una hoja de cálculo (recuerde que en las aulas está instalado OpenOffice) realice una tabla y una gráfica que permitan comparar la escalabilidad (ganancia en velocidad en función del número de cores) en atcgrid y en el PC del aula de prácticas de los tres códigos implementados en los ejercicios anteriores para tres tamaños (N) distintos (consulte la Lección 6/Tema 2). Usar `-O2` al compilar.

5 Bloque Práctico 3. Programación paralela III: Interacción con el entorno en OpenMP

5.1 Objetivos

En este bloque práctico aprenderá a interactuar con el entorno con OpenMP ([22], [23], [24], [25]). Una vez finalizado el bloque deberá ser capaz de (si observa que no alcanza alguno de estos objetivos pregunte las dudas que tenga a su profesor en clase presencial o en su despacho de tutorías en horario de tutorías):

1. Definir las variables de control de OpenMP `nthreads-var`, `dyn-var`, `nest-var`, `run-sched-var`, `def-sched-var`
2. Usar las variables de entorno `OMP_NUM_THREADS`, `OMP_DYNAMIC`, `OMP_SCHEDULE` para modificar y consultar variables de control.
3. Usar las funciones de OpenMP 2.5 para modificar y consultar las variables de control:
`omp_get_dynamic()`, `omp_set_dynamic()`, `omp_get_num_threads()`,
`omp_set_num_threads()`, `omp_get_thread_num()`, `omp_get_max_threads()`,
`omp_get_num_procs()`, `omp_in_parallel()`.
4. Usar las siguientes funciones de OpenMP 3.0 que modifican y consultan las variables de control:
`omp_get_thread_limit`, `omp_get_schedule(kind, modifier)` y
`omp_set_schedule(kind, modifier)`
5. Describir la diferencia entre las dos cláusulas que influyen en el número de *threads* de una región paralela (`if`, `num_threads`) y ser capaz de usarlas.
6. Describir la acción que realizan las diferentes variantes de la cláusula `schedule` de la versión 2.5 de OpenMP que determinan la planificación de bucles (`static`, `dynamic`, `guided`, `runtime`), y ser capaz de usarlas.
7. Deducir el número de *threads* que va a ejecutar un trozo de código en paralelo.

5.2 Seminario

El seminario de este bloque práctico presenta las principales variables de control, variables de entorno, funciones y cláusulas de OpenMP usadas para interactuar con el entorno de ejecución (versión 2.5 y algunas de 3.0) ([21], [22], [23], [24], [25]). También dedica un apartado a clasificar las funciones de la biblioteca de OpenMP.

5.3 Práctica o trabajo a desarrollar

5.3.1 Ejercicios basados en los ejemplos del seminario práctico

En clase presencial y en casa se ejecutarán los códigos presentados en el seminario y se trabajarán los siguientes ejercicios y cuestiones (incorpore al cuaderno de prácticas: el código con las modificaciones solicitadas y capturas de pantalla que muestren los resultados de ejecución):

1. Usar la cláusula `num_threads(x)` en el ejemplo del seminario `if_clause.c`, y añadir un parámetro de entrada al programa que fije el valor `x` que se va a usar en la cláusula. Incorporar en el cuaderno de trabajo de esta práctica volcados de pantalla con ejemplos de ejecución que ilustren la funcionalidad de esta cláusula y explicar por qué lo ilustran.
2. (a) Rellenar la Tabla 4 (se debe poner en la tabla el id del *thread* que ejecuta cada iteración) ejecutando los ejemplos del seminario `schedule_clause.c`, `scheduled_clause.c` y `scheduleg_clause.c` con dos *threads* (0,1) y unas entradas de:
 - iteraciones: 16 (0,...15)
 - chunk= 1, 2 y 4

(b) Rellenar otra tabla como la de la figura pero esta vez usando cuatro *threads* (0,1,2,3).

Escriba en el cuaderno de prácticas las diferencias en el comportamiento de `schedule()` con `static`, `dynamic` y `guided`.

- Añadir al programa `scheduled-clause.c` lo necesario para que imprima el valor de las variables de control `dyn-var`, `nthreads-var`, `thread-limit-var` y `run-sched-var` dentro (debe imprimir sólo un thread) y fuera de la región paralela. Realizar varias ejecuciones usando variables de entorno para modificar estas variables de control antes de la ejecución. Incorporar en su cuaderno de prácticas volcados de pantalla de estas ejecuciones. ¿Se imprimen valores distintos dentro y fuera de la región paralela?
- Usar en el ejemplo anterior las funciones `omp_get_num_threads()`, `omp_get_num_procs()` y `omp_in_parallel()` dentro y fuera de la región paralela. Imprimir los valores que obtienen estas funciones dentro (lo debe imprimir sólo uno de los threads) y fuera de la región paralela. Incorporar en su cuaderno de prácticas volcados de pantalla con los resultados de ejecución obtenidos. Indicar en qué funciones se obtienen valores distintos dentro y fuera de la región paralela.
- Añadir al programa `scheduled-clause.c` lo necesario para modificar las variables de control `dyn-var`, `nthreads-var` y `run-sched-var` y para poder imprimir el valor de estas variables antes y después de dicha modificación. Incorporar en su cuaderno de prácticas volcados de pantalla con los resultados de ejecución obtenidos.

Tabla 4 . Tabla `schedule`. En la segunda fila, 1, 2 4 representan el tamaño del chunk (consulte seminario)

| Iteración | schedule-clause.c | | | schedule-claused.c | | | schedule-clauseg.c | | |
|-----------|-------------------|---|---|--------------------|---|---|--------------------|---|---|
| | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 |
| 0 | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | |

5.3.2 Resto de ejercicios

En clase presencial y en casa se trabajarán los siguientes ejercicios y cuestiones (incorpore al cuaderno de prácticas: el código con las modificaciones solicitadas y capturas de pantalla que muestren los resultados de ejecución):

- Implementar un programa secuencial en C que multiplique una matriz triangular por un vector.

NOTAS: (1) el número de filas/columnas debe ser un argumento de entrada; (2) se debe inicializar las matrices antes del cálculo; (3) se debe imprimir siempre las componentes (0,0) y (N-1, N-1) del resultado antes de que termine el programa.

- Implementar en paralelo la multiplicación de una matriz triangular por un vector a partir del código secuencial realizado para el ejercicio anterior utilizando la directiva `for` de OpenMP. Dibujar en el cuaderno de prácticas la descomposición de dominio utilizada (Lección 4/Tema 2) en el código paralelo implementado para asignar tareas a los

Tabla 5 . Tiempos de ejecución de la versión paralela del producto de una matriz triangular por un vector

| Chunk | Static 12 threads | Dynamic 12 threads | Guided 12 threads |
|-------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| por defecto | | | |
| 2 | | | |
| 32 | | | |
| 64 | | | |
| 1024 | | | |

threads (Lección 5/Tema 2). Añadir lo necesario para que el usuario pueda fijar la planificación de tareas usando la variable de entorno `OMP_SCHEDULE`. Obtener en `atcgrid` los tiempos de ejecución del código paralelo (debe recordar usar `-O2` al compilar) que multiplica una matriz triangular por un vector con las alternativas de planificación `static`, `dynamic` y `guided` para `chunk` de 2, 64, 128, 1024 y el `chunk` por defecto para la alternativa. No use vectores mayores de 32768 componentes ni menores de 4096 componentes. El número de threads en las ejecuciones debe coincidir con el número de cores. Rellenar la Tabla 5 con los tiempos obtenidos, ponga en la tabla el número de threads que utilizan las ejecuciones. Representar el tiempo para `static`, `dynamic` y `guided` en función del tamaño del `chunk` en una gráfica. Rellenar la tabla y realizar la gráfica también para el PC local. ¿Qué alternativa ofrece mejores prestaciones? Razone por qué.

8. Implementar un programa secuencial en C que calcule la multiplicación de matrices cuadradas, B y C:

$$A = B \bullet C; A(i, j) = \sum_{k=0}^{N-1} B(i, k) \bullet C(k, j), i, j = 0, \dots, N-1$$

NOTAS: (1) el número de filas/columnas debe ser un argumento de entrada; (2) se deben inicializar las matrices antes del cálculo; (3) se debe imprimir siempre las componentes (0,0) y (N-1, N-1) del resultado antes de que termine el programa.

9. Implementar en paralelo la multiplicación de matrices cuadradas con OpenMP a partir del código escrito en el ejercicio anterior. Use las directivas, las cláusulas y las funciones de entorno que considere oportunas. Se debe paralelizar también la inicialización de las matrices. Dibuje en su cuaderno de prácticas la descomposición de dominio que ha utilizado en el código paralelo implementado para asignar tareas a los threads (Lección 4/Tema 2, Lección 5/Tema 2).
10. Hacer un estudio de escalabilidad (ganancia en velocidad en función del número de cores) en `atcgrid` y en el PC local del código paralelo implementado para tres tamaños de las matrices. Debe recordar usar `-O2` al compilar. Presente los resultados del estudio en tablas de valores y en gráficas. Escoger los tamaños de manera que se observe diferentes curvas de escalabilidad en las gráficas que entregue en su cuaderno de prácticas (pruebe, por ejemplo con 100, 500, 1000 y 1500, y escoja tres). Consulte la Lección 6/Tema 2.

6 Bibliografía

Esta sección se ha dividido en varios apartados: Linux, C/C++, gcc, OpenMP, Eclipse y programación paralela.

6.1 Linux

Para resolver rápidamente las dudas más usuales relacionadas con el sistema operativo se recomienda utilizar las tarjetas de referencia (*reference cards*) de Linux [2] y Ubuntu [5]. Para resolver dudas al programar *scripts* (guiones) del intérprete de comandos (*shell*) GNU bash se recomienda usar la tarjeta de referencia de *bash* [3].

- [1]. Linux en Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/GNU/Linux> <http://en.wikipedia.org/wiki/Linux>
- [2]. Linux *reference card*: <http://files.fooswire.com/2007/08/fwunixref.pdf>
- [3]. Bash *reference card* (útil para programar *scripts*): <http://www.feif.de/tips/bash.quickref.pdf>,
<http://database.sarang.net/study/bash/bash.pdf>
- [4]. Ubuntu en Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Ubuntu>
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ubuntu_\(operating_system\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Ubuntu_(operating_system))
- [5]. Ubuntu *reference card*: <http://files.fooswire.com/2008/04/ubunturef.pdf>
<http://tangosoftware.com/refcard/> (de W. Martin Borgert, hay versión en español)
- [6]. GNOME en Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/GNOME> <http://en.wikipedia.org/wiki/GNOME>

- [7]. SSH en Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Secure_Shell
- [8]. Página de manual de SSH: <http://linux.die.net/man/1/ssh>
- [9]. SFTP en Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/SSH_File_Transfer_Protocol
- [10]. Página de manual de SFTP: <http://linux.die.net/man/1/sftp>
- [11]. TORQUE en Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/TORQUE_Resource_Manager
- [12]. TORQUE *home page* <http://www.adaptivecomputing.com/products/open-source/torque/>. TORQUE manual <http://docs.adaptivecomputing.com/torque/4-1-3/help.htm>.

6.2 C/C++

En este apartado puede encontrar direcciones web que pueden aclarar dudas y ampliar conocimientos de los lenguajes de programación C. Se recomienda usar, cuando se programa en C en el aula y en casa, la tarjeta de referencia de C [14], es útil para encontrar rápidamente como expresar lo que se necesita (declarar un tipo de variable o constante, definir un tipo de dato, hacer una operación, incluir librerías, usar funciones de librerías del estándar para entrada/salida, operar con cadenas, realizar operaciones matemáticas complejas, ...) en el lenguaje C. Si hace falta más detalle, entonces use el tutorial de C [14]. Comparando las tarjetas de referencia de C y C++ se pueden ver rápidamente las diferencias entre ambos.

- [13]. C en Wikipedia: http://es.wikipedia.org/wiki/Lenguaje_C, http://en.wikipedia.org/wiki/C_%28programming_language%29
- [14]. Tutorial de programación en C <http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/C/CE.html>
- [15]. C *reference card*: <http://users.ece.utexas.edu/~adnan/c-refcard.pdf>
- [16]. C++ en Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>, <http://en.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>
- [17]. Tutorial de programación en C++ en español <http://c.conclase.net/curso/index.php>
- [18]. C++ *reference card*: <http://www.cs.ccu.edu.tw/~damon/oop/CppQuickRef.pdf>

6.3 Gcc

Este apartado contiene direcciones web donde puede aclarar dudas y ampliar conocimientos sobre el compilador que se va a utilizar en las aulas (gcc o *GNU Compiler Collection*). Si necesita resolver dudas sobre opciones del compilador, sobre librerías o sobre la sintaxis del ensamblador, use la referencia [20].

- [19]. Gcc (*GNU Compiler Collection*) en Wikipedia: http://es.wikipedia.org/wiki/GNU_Compiler_Collection, http://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Compiler_Collection
- [20]. The GNU Compiler Collection manuals: <http://gcc.gnu.org/onlinedocs/>

6.4 OpenMP

Con las direcciones web de este apartado puede aclarar dudas de OpenMP y ampliar conocimientos. Se recomienda usar en el aula y en casa la tarjeta de referencia de OpenMP [23], es muy útil para encontrar rápidamente como realizar una acción, si necesita más detalle, entonces use el tutorial de OpenMP [22] o el manual con las especificaciones de OpenMP [24] o el manual de gcc para OpenMP que se puede encontrar en [20]. Si necesita un texto más didáctico para resolver las dudas, utilice el libro de Chapman et al. [25] (se encuentra en la biblioteca), que abarca la versión 2.5. En los seminarios hay ejemplos que se han extraído o son modificaciones de algún ejemplo de este libro, como se refleja en los propios seminarios.

- [21]. OpenMP en Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/OpenMP>, <http://en.wikipedia.org/wiki/OpenMP>

- [22]. Blaise Barney, OpenMP 3.0 Tutorial, Lawrence Livermore National Laboratory: <https://computing.llnl.gov/tutorials/openMP/>
- [23]. C/C++ OpenMP reference card: <http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP3.1-SummarySpec.pdf>
- [24]. Web de OpenMP: <http://openmp.org/wp/>: especificaciones de la API (<http://openmp.org/wp/openmp-specifications/>), FAQ, presentaciones, etc.
- [25]. [Chapman 2008] Barbara Chapman, Gabriele Jost, Ruud van der Pas, “*Using OpenMP. Portable Shared Memory Parallel Programming*”, The MIT Press. 2008. (dedicado a la versión OpenMP 2.5). ESIIT/D.1 CHA usi

6.5 Eclipse

En este apartado puede encontrar direcciones web que pueden aclarar dudas y ampliar conocimientos sobre el uso y los conceptos [30] de Eclipse, y una de las web de la que puede descargar el IDE de Eclipse para C/C++ [29].

- [26]. Eclipse en Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Eclipse_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Eclipse_(software))
- [27]. Web de Eclipse: <http://www.eclipse.org> , <http://www.eclipse.org/users/>
- [28]. Web de Eclipse CDT: <http://www.eclipse.org/cdt/>
- [29]. Sitio de descargas de CDT: <http://www.eclipse.org/cdt/downloads.php>
- [30]. Eclipse user interface guidelines http://wiki.eclipse.org/User_Interface_Guidelines

6.6 Programación paralela

- [31]. [Ortega 2005] J. Ortega, M. Anguita, A. Prieto. “*Arquitectura de Computadores*”. Thomson, 2005. ESIIT/C.1 ORT arq
- [32]. [Rauger 2010] T. Rauber, G. Ründer. “*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>

7 Agradecimientos

Agradecemos a todos los profesores de prácticas sus comentarios.