2º curso / 2º cuatr.

Grado en
Ing. Informática

Arquitectura de Computadores
Tema 1

Arquitecturas Paralelas: Clasificación y Prestaciones

Material elaborado por los profesores responsables de la asignatura:
Mancia Anguita – Julio Ortega

ugr | Universidad de Granada

ETSIIT
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación

ATC
Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores
UNIVERSIDAD DE GRANADA

Lecciones

- Lección 1. Clasificación del paralelismo implícito en una aplicación
- Lección 2. Clasificación de arquitecturas paralelas
- Lección 3. Evaluación de prestaciones de una arquitectura
  - Medidas usuales para evaluar prestaciones
    - Tiempo de respuesta
    - Productividad: MIPS, MFLOPS
  - Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)
  - Ganancia en prestaciones

Objetivos Lección 3

- Distinguir entre tiempo de CPU (sistema y usuario) de unix y tiempo de respuesta
- Distinguir entre productividad y tiempo de respuesta
- Obtener, de forma aproximada mediante cálculos, el tiempo de CPU, GFLOPS y los MIPS del código ejecutado en un núcleo de procesamiento
- Explicar el concepto de ganancia en prestaciones
- Aplicar la ley de Amdahl

Bibliografía

- Fundamental
  - Capítulo 1, M. Anguita, J. Ortega. Fundamentos y problemas de Arquitectura de Computadores, Editorial Técnica Avicam. ESIIT/C.1 ANG fun
  - Secciones 1.2,1.4, 7.5.1. J. Ortega, M. Anguita, A. Prieto. *Arquitectura de Computadores*, Thomson, 2005. ESIIT/C.1 ORT arq
- Complementaria
  - 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

Evaluación de prestaciones de una arquitectura

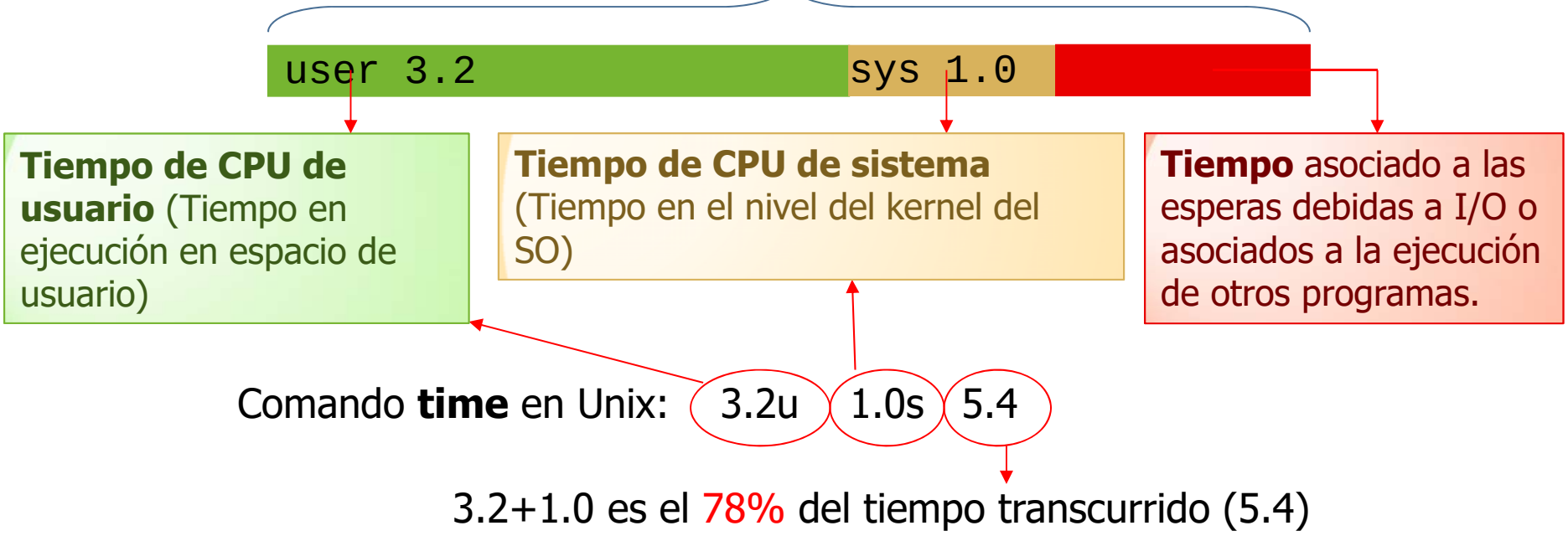
- Medidas usuales para evaluar prestaciones
  - Tiempo de respuesta
  - Productividad: MIPS, MFLOPS
- Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)
- Ganancia en prestaciones

Tiempo de respuesta de un programa en una arquitectura

- Real (*wall-clock time, elapsed time, real time*)
- *CPU time* = *user* + *sys* (no incluye todo el tiempo)
- Con un flujo de control
  - elapsed >= CPU time
- Con múltiples flujos de control
  - elapsed < CPU time, elapsed >= CPU time/nº flujos control

```
$ time ./program.exe
elapsed 5.4
user 3.2
sys 1.0
```

Elapsed >= CPU time



Algunas alternativas para obtener tiempos

Función	Fuente	Tipo	Resolución aprox. (microsegundos)
time	SO (/usr/bin/time)	*elapsed, user, system*	10000
clock()	SO (time.h)	*CPU*	10000
gettimeofday()	SO (sys/time.h)	*elapsed*	1
clock_gettime()/clock_getres()	SO (time.h)	*elapsed*	0.001
omp_get_wtime()/ omp_get_wtick()	OpenMP (omp.h)	*elapsed*	0.001
SYSTEM_CLOCK()	Fortran	*elapsed*	1

La resolución depende de la plataforma

Tiempo de CPU I

$$\textbf{Tiempo de CPU } (T_{CPU}) = \textbf{Ciclos\_del\_Programa} \times T_{CICLO} = \frac{\textbf{Ciclos\_del\_Programa}}{\textbf{Frecuencia\_de\_Reloj}}$$

$$\text{Ciclos por Instrucción (CPI)} = \frac{Ciclos\_del\_Programa}{Numero\_de\_Instrucciones(NI)}$$

$$T_{CPU} = NI \times CPI \times T_{CICLO}$$

$$\textbf{Ciclos\_del\_Programa} = \sum_{i=1}^{n} CPI_i x I_i$$

$$CPI = \frac{\sum_{i=1}^{n} CPI_i x I_i}{NI}$$

En el programa hay I_i instrucciones del tipo i (i=1,…n)

Cada instrucción del tipo i consume CPI_i ciclos

Hay n tipos de instrucciones distintos.

Tiempo de CPU II

$$T_{CPU} = NI \times (CPE / IPE) \times T_{ciclo}$$

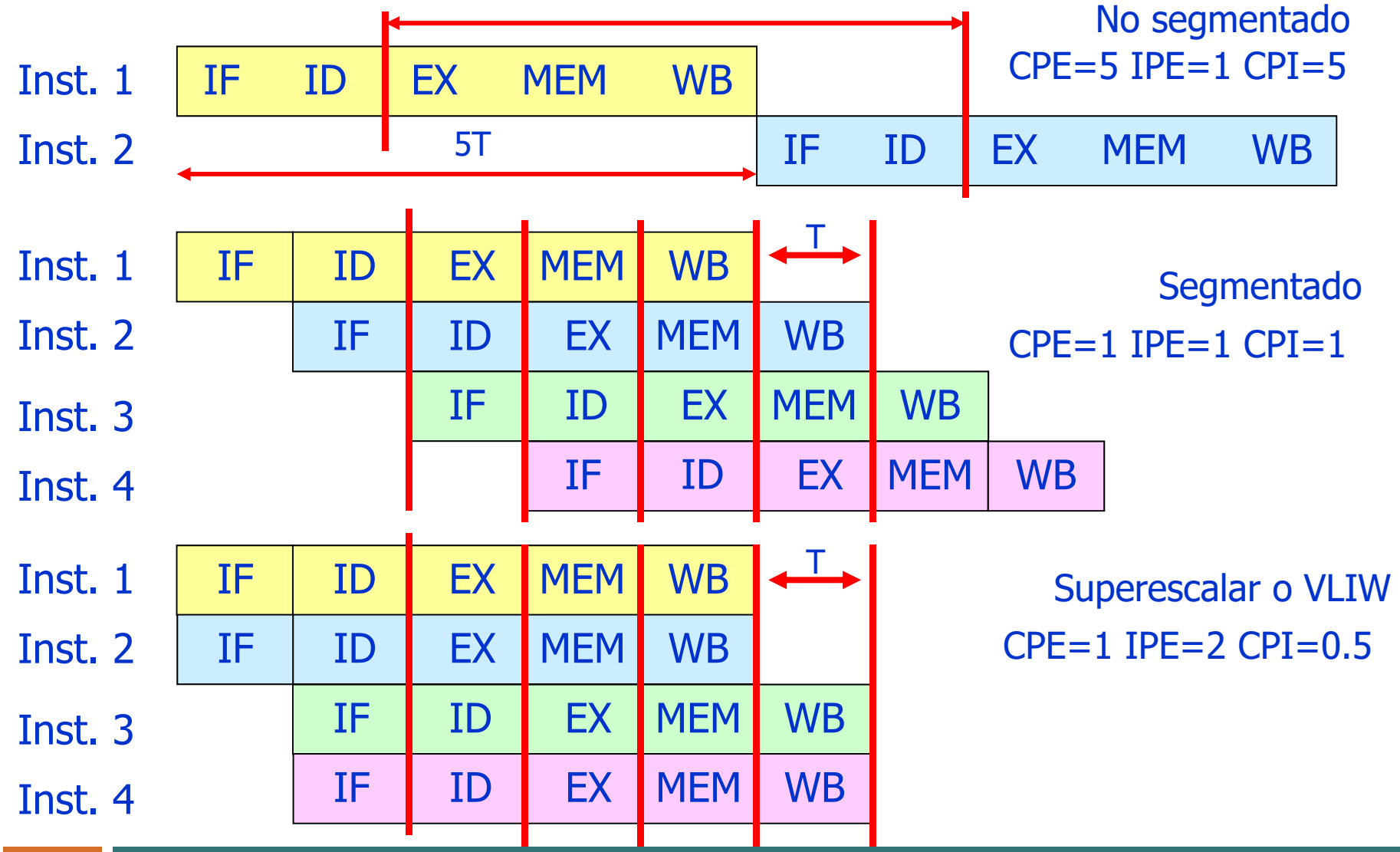
(CPE / IPE) = **CPI**

Hay procesadores que pueden lanzar para que empiecen a ejecutarse (emitir) varias instrucciones al mismo tiempo.

CPE: Número mínimo de ciclos transcurridos entre los instantes en que el procesador puede emitir instrucciones

IPE: Instrucciones que pueden emitirse (para empezar su ejecución) cada vez que se produce dicha emisión.

Tiempo de CPU III



Tiempo de CPU IV

$$T_{CPU} = \underbrace{(Noper/Op\_instr)}_{NI} \times CPI \times T_{ciclo}$$

Hay procesadores que pueden codificar varias operaciones en una instrucción.

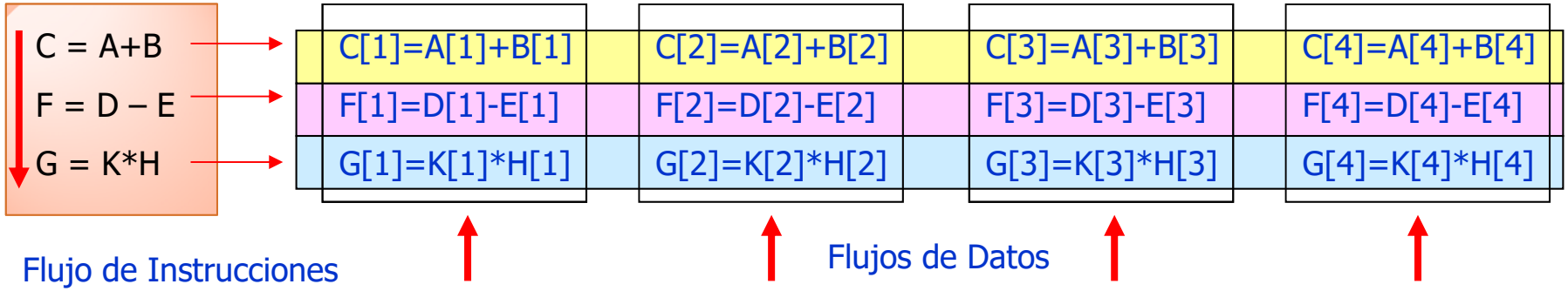
Noper: Número de operaciones que realiza el programa

Op_instr: Número de operaciones que puede codificar una instrucción.

Tiempo de CPU V

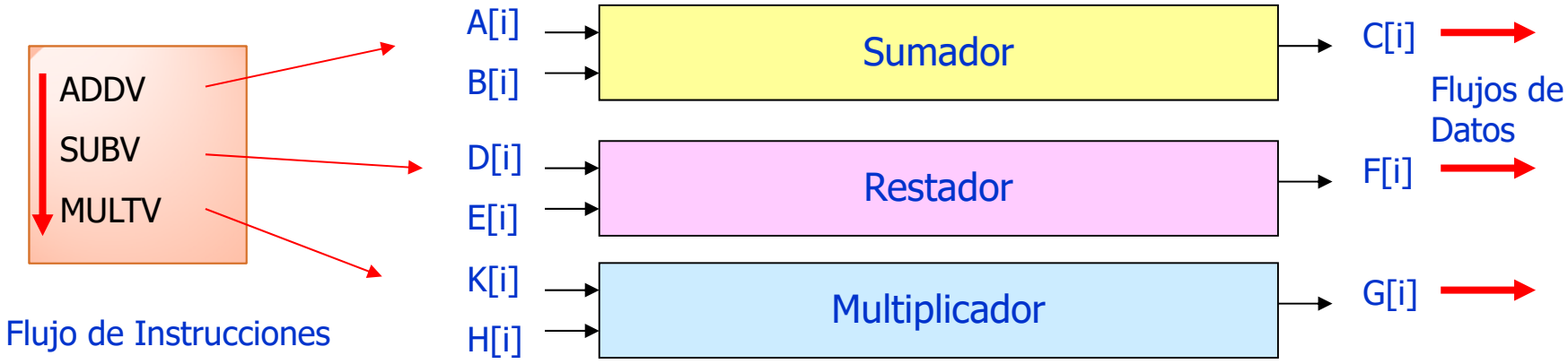
Procesador Matricial

Noper=12 Op_instr=4 NI=3

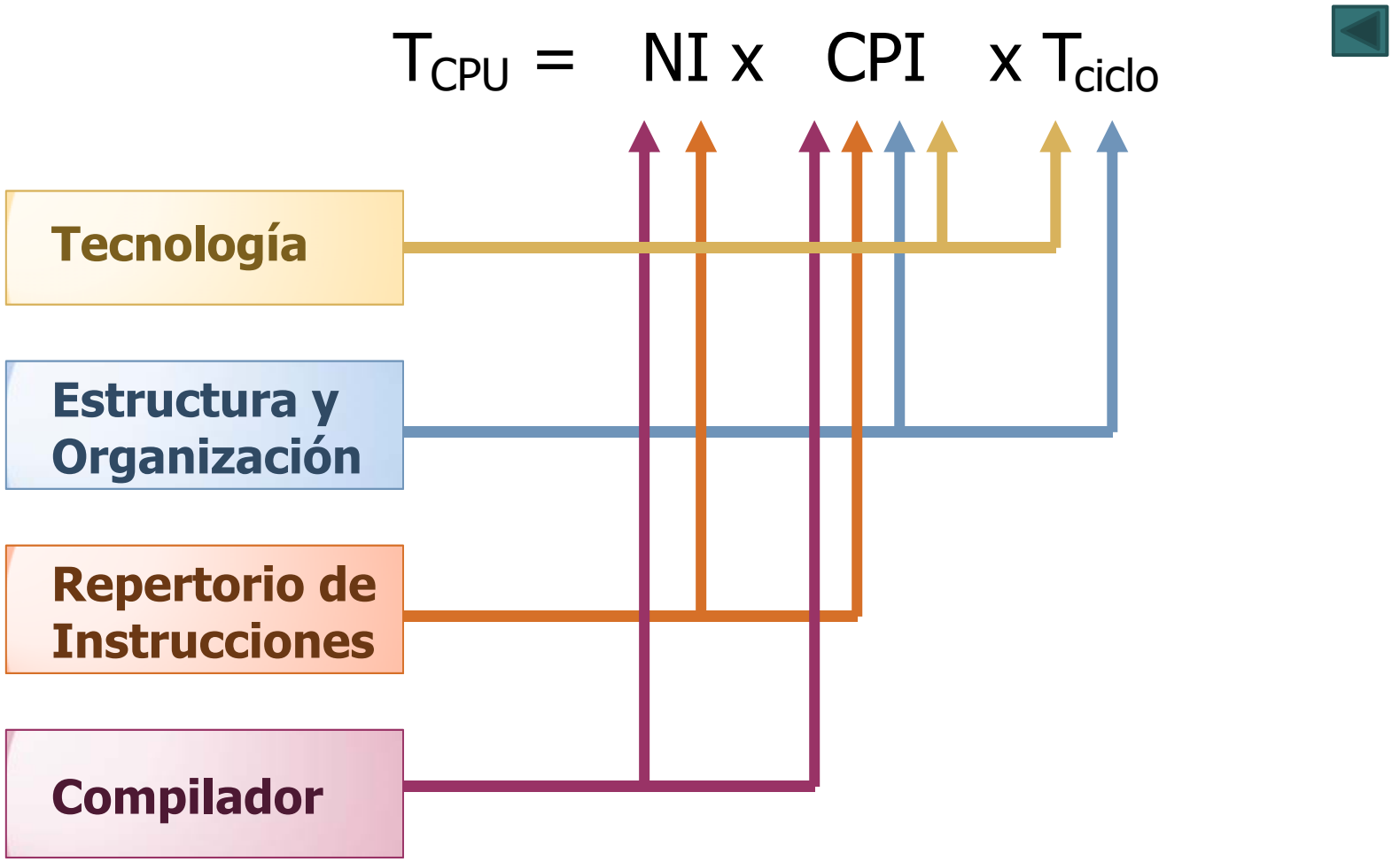


Procesador Vectorial

Noper=12 Op_instr=4 NI=3



Tiempo de CPU VI



http://arstechnica.com/gadgets/2015/02/intel-forges-ahead-to-10nm-will-move-away-from-silicon-at-7nm/

Evaluación de prestaciones de una computador

- Medidas usuales para evaluar prestaciones
  - Tiempo de respuesta
  - Productividad: MIPS, MFLOPS
- Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)
- Ganancia en prestaciones

MIPS

MIPS: Millones de Instrucciones por segundo

$$\mathbf{MIPS} = \frac{\mathbf{NI}}{\mathbf{T_{CPU} x 10^6}} = \frac{\mathbf{F(frecuencia)}}{\mathbf{CPI x 10^6}}$$

- **Depende del repertorio de instrucciones** (difícil la comparación de máquinas con repertorios distintos)
- **Puede variar con el programa** (no sirve para caracterizar la máquina)
- **Puede variar inversamente con las prestaciones** (mayor valor de MIPS corresponde a peores prestaciones)

MIPS (Meaningless Indication of Processor Speed)

MFLOPS

MFLOPS: Millones de operaciones en coma flotante por segundo

$$\mathbf{MFLOPS} = \frac{\mathbf{Operaciones\_en\_Coma\_Flotante}}{\mathbf{T_{CPU} x 10^6}}$$

- **No es una medida adecuada para todos los programas** (sólo tiene en cuenta las operaciones en coma flotante del programa)
- **El conjunto de operaciones en coma flotante no es constante en máquinas diferentes y la potencia de las operaciones en coma flotante no es igual para todas las operaciones** (por ejemplo, con diferente precisión, no es igual una suma que una multiplicación..):

  Es necesaria una normalización de las instrucciones en coma flotante

Evaluación de prestaciones de una arquitectura

- Medidas usuales para evaluar prestaciones
  - Tiempo de respuesta
  - Productividad: MIPS, MFLOPS
- Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)
- Ganancia en prestaciones

Benchmarks

- Propiedades exigidas a medidas de prestaciones:
  - Fiabilidad => *Representativas, evaluar diferentes componentes del sistema* y *reproducibles*
  - Permitir comparar diferentes realizaciones de un sistema o diferentes sistemas => Aceptadas por todos los interesados (usuarios, fabricantes, vendedores)
- Interesados:
  - Vendedores y fabricantes de hardware o software.
  - Investigadores de hardware o software.
  - Compradores de hardware o software.

Tipos de *Benchmarks*

- Tipos de Benchmark:
  - De bajo nivel o microbenchmark
    - test ping-pong, evaluación de las operaciones con enteros o con flotantes
  - Kernels
    - resolución de sistemas de ecuaciones, multiplicación de matrices, FFT, descomposición LU
  - Sintéticos
    - Dhrystone, Whetstone
  - Programas reales
    - SPEC CPU2006: enteros (gcc, gzip, perlbmk)
  - Aplicaciones diseñadas
    - Predicción de tiempo, simulación de terremotos.

Benchmark suites I

- Benchmark: SPEC CPU2006
  - **Dirección**: http://www.spec.org/cpu2006/
  - **Aplicación**: evaluación de operaciones con enteros (CINT2006) y con punto flotante (CFP2006) en un core
  - **Tipo**: aplicaciones reales
    - CINT2006: compilador gcc, compresor bzip2, planificación de vehículos de transporte, inteligencia artificial, análisis de secuencia de proteínas, compresión de vídeo, …
    - CFP2006: dinámica de fluidos, dinámica molecular, Image Ray-tracing, progamación lineal, reconocimiento de voz, modelado y predicción del tiempo atmosférico, …
  - **Herramientas**: C, C++ y Fortran

Benchmark suites II

- Benchmark paralelo: SPEC OMP 2001 (SPEC OpenMP)
  - **Dirección**: www.spec.org/hpg/omp2001
  - **Aplicación**: Científico
  - **Estilo**: variables compartidas.
  - **Tipo**: Aplicaciones diseñadas. Basado en SPEC CPU2000. Evalúa procesador, memoria, SO y herr. de programación
  - **Herramientas**: OpenMP

Benchmark suites III

- Benchmark paralelo: SPEC HPC2002
  - **Dirección**: www.specbench.org/hpc2002/
  - **Aplicación**: Científico.
  - **Estilo**: Variables compartidas, paso de mensajes, y combinación de ambos.
  - **Tipo**: Basado en aplicaciones HPC diseñadas reales. Evalúa procesador, comunicación, E/S, compilador y bibliotecas
  - **Herramientas**: Serie, OpenMP, MPI, combinación MPI-OpenMP.

Benchmark suites VI

- Benchmark: TPC (Transaction Processing Performance Council)
  - **Dirección**: www.tpc.org
  - **Aplicación**: Procesamiento de transacciones o OLTP (TPC-C); sistemas de soporte de decisiones o DSS (TPC-R, TPC-H); comercio electrónico o e-commerce (TPC-W) o servidores web y de aplicaciones (TPC-App).
  - **Tipo**: entradas software comercial (bases de datos, servidores de información de Internet) y carga de trabajo diseñada

Benchmark suites VII

- Benchmark paralelo : NPB2, NPB3 (NAS Parallel Benchmark)
  - **Dirección**: http://www.nas.nasa.gov/Resources/Software/npb.html
  - **Aplicación**: Científico.
  - **Estilo**: paso de mensajes, variables compartidas.
  - **Tipo**: núcleos y aplicaciones diseñadas.
  - **Herramientas**: NPB2 (MPI). NPB3 (OpenMP, java, HPF)

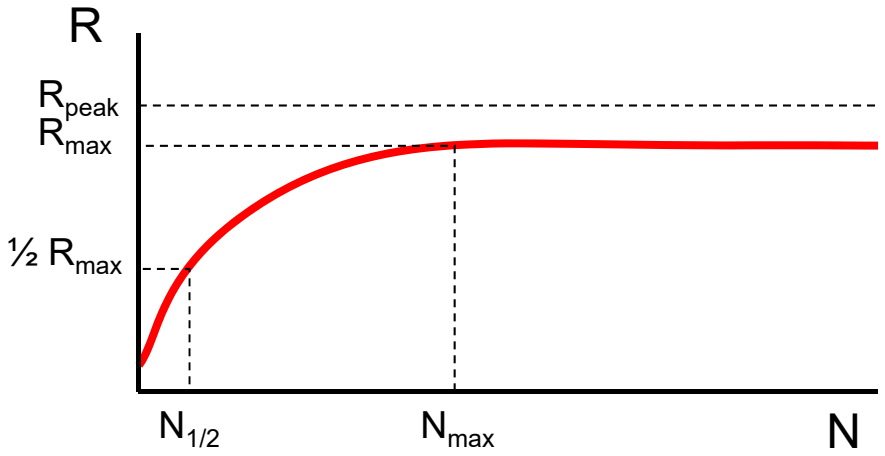
Benchmark suites VIII

- Implementaciones de la biblioteca BLAS (*Basic Linear Algebra Subprograms*)
  - **Tipo**: núcleos con operaciones del álgebra lineal:
    - operaciones con vectores, como producto escalar o AXPY (***A****lpha* ***X*** ***P****lus* ***Y***) ,
    - vector-matriz, como producto matriz por vector
    - matriz-matriz, producto de matrices (*GEMM-GEneral Matrix Multiply*)
  - **Herramientas**: hay implementaciones con diferentes herramientas de programación (Fortran, C, C++, OpenCL, CUDA, …) y optimizadas para diferentes arquitecturas (Intel x86, AMD, GPU, …)

LINPACK

El núcleo de este programa es una rutina denominada DAXPY (***D**ouble precision- real **A**lpha **X** **P**lus **Y***) que multiplica un vector por una constante y los suma a otro vector. Las prestaciones obtenidas se escalan con el valor de **N** (tamaño del vector):

```
for (i=0 ; i<N ; i++)
 y[i] = alpha*x[i] + y[i];
```



TOP500

R_{max}: Número máximo de Gflops alcanzados

R_{peak}: Límite teórico del sistema (en Gflops)

Rank	Site Country/Year	Computer / Processors Manufacturer	R_{max} R_{peak}
1	DOE/NNSA/LLNL United States/2005	*BlueGene/L* **eServer Blue Gene Solution** / 65536 IBM	136800 183500
2	IBM Thomas J. Watson Research Center United States/2005	*BGW* **eServer Blue Gene Solution** / 40960 IBM	91290 114688
3	NASA/Ames Research Center/NAS United States/2004	*Columbia* **SGI Altix 1.5 GHz, Voltaire Infiniband** / 10160 SGI	51870 60960
4	The Earth Simulator Center Japan/2002	**Earth-Simulator** / 5120 NEC	35860 40960
5	Barcelona Supercomputer Center Spain/2005	*MareNostrum* **JS20 Cluster, PPC 970, 2.2 GHz, Myrinet** / 4800 IBM	27910 42144
6	ASTRON/University Groningen Netherlands/2005	**eServer Blue Gene Solution** / 12288 IBM	27450 34406.4

Evaluación de prestaciones de una arquitectura

- Medidas usuales para evaluar prestaciones
  - Tiempo de respuesta
  - Productividad: MIPS, MFLOPS
- Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)
- Ganancia en prestaciones

Mejora o Ganancia de Prestaciones (*Speed-up* o ganancia en velocidad)

Si en un computador se incrementan las prestaciones de un recurso haciendo que su velocidad sea **p veces mayor** (ejemplos: se utilizan **p procesadores** en lugar de uno, la ALU realiza **las operaciones en un tiempo p veces menor**,..):

El incremento de velocidad que se consigue en la nueva situación con respecto a la previa (**máquina base**) se expresa mediante la ganancia de velocidad o *speed-up*, $\mathbf{S_p}$

$$S_p = \frac{V_p}{V_1} = \frac{T_1}{T_p}$$

$\mathbf{V_1}$ Velocidad de la máquina base
$\mathbf{V_p}$ Velocidad de la máquina mejorada (un factor p en uno de sus componentes)
$\mathbf{T_1}$ Tiempo de ejecución en la máquina base
$\mathbf{T_p}$ Tiempo de ejecución en la máquina mejorada

Ley de Amdahl

La mejora de velocidad, **S**, que se puede obtener cuando se mejora un recurso de una máquina en un factor **p** está limitada por:

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

donde **f** es la fracción del tiempo de ejecución en la máquina sin la mejora durante el que no se puede aplicar esa mejora.

Ejemplo: Si un programa pasa un 25% de su tiempo de ejecución en una máquina realizando instrucciones de coma flotante, y se mejora la máquina haciendo que estas instrucciones se ejecuten en la mitad de tiempo, entonces **p=2; f=0.75; y S≤2/(1+0.75)=1.14**

Hay que mejorar el caso más frecuente (lo que más se usa)

Ley enunciada por Amdahl en relación con la eficacia de los computadores paralelos: dado que en un programa hay código secuencial que no puede paralelizarse, los procesadores no se podrían utilizar eficazmente. (Tema 2)

Para ampliar ……

- Páginas Web:
  - http://www.top500.org
  - http://en.wikipedia.org/wiki/LINPACK
- Artículos de Revistas:
  - Henning, J.L.: “SPEC CPU2000: Measuring CPU Performance in the New Millenium”. IEEE Computer. Julio, 2000.
  - O’Neal, D.: “On Microprocessors, Memory Hierarchies, and Amdahl’s Law”.