

2º curso / 2º cuatr.

Grados en  
Ing. Informática

# Arquitectura de Computadores

## Tema 1

# Arquitecturas Paralelas: Clasificación y Prestaciones

Material elaborado por Mancia Anguita

Profesores: Mancia Anguita, Maribel García y Christian Morillas



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

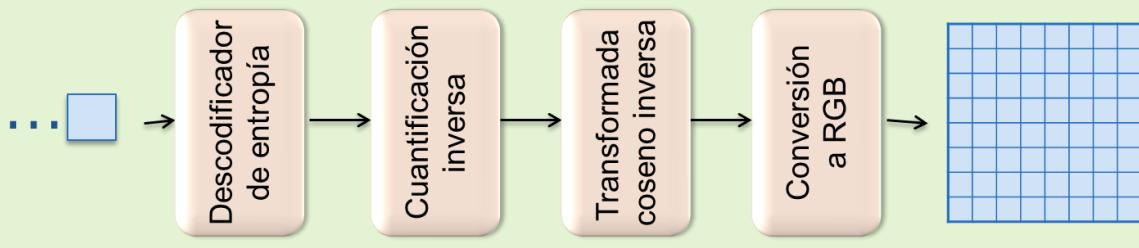


**ICAR**  
INGENIERÍA DE COMPUTADORES,  
AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA

# Lecciones

- Lección 1. Clasificación del paralelismo implícito en una aplicación
- Lección 2. Clasificación de arquitecturas paralelas
- Lección 3. Evaluación de prestaciones

Estructura de funciones de un decodificador JPEG



Suma de vectores  
 $\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$

Producto de matrices  
 $\mathbf{C} = \mathbf{A} * \mathbf{B}$

```
Func1 () { ... }
Func2 () { ...
    for (i=0;i<N;i++) {
        código para i
    }
}
Func3 () { ... }
Main () {
...
    Func1 (...);
    Func2 (...);
    Func3 (...);
...
}
```

# Objetivos Lección 1

- Conocer las clasificaciones usuales del paralelismo implícito en una aplicación. Distinguir entre paralelismo de tareas y paralelismo de datos.
- Distinguir entre dependencias RAW, WAW, WAR.
- Distinguir entre *thread* y proceso.
- Relacionar el paralelismo implícito en una aplicación con el nivel en el que se hace explícito para que se pueda utilizar (instrucción, thread, proceso) y con las arquitecturas paralelas que lo aprovechan.

# Bibliografía

## ➤ Fundamental

- Sección 7.1. J. Ortega, M. Anguita, A. Prieto. *Arquitectura de Computadores*, Thomson, 2005. ESIIT/C.1 ORT arq

## ➤ Complementaria

- Secciones 3.7.1, 3.7.2. 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>

# Criterios de clasificaciones del paralelismo implícito en una aplicación



# Niveles de paralelismo implícito en una aplicación

Niveles:

Programas

Programa1

Programa2

...



Funciones

Func1() {  
...  
}

Func2() {  
...  
}

Func3() {  
...  
}

Bucle (bloques)

for ( ){  
...  
}

while( ){  
...  
}

Operaciones

\*

+

/

Granularidad:

Grano Grueso

Grano  
Medio

Grano  
Medio-Fino

Grano Fino

# Dependencias de datos

- Condiciones que se deben cumplir para que el bloque de código  $B_2$  presente dependencia de datos con respecto a  $B_1$ :
  - Deben hacer referencia a una misma posición de memoria M (variable).
  - $B_1$  aparece en la secuencia de código antes que  $B_2$
- Tipos de dependencias de datos (de  $B_2$  respecto a  $B_1$ ):
  - RAW (*Read After Write*) o dependencia verdadera
  - WAW (*Write After Write*) o anti-dependencia (dependencia de nombre)
  - WAR (*Write After Read*) o dependencia de salida (dependencia de nombre)

$B_1$   
 $B_2$



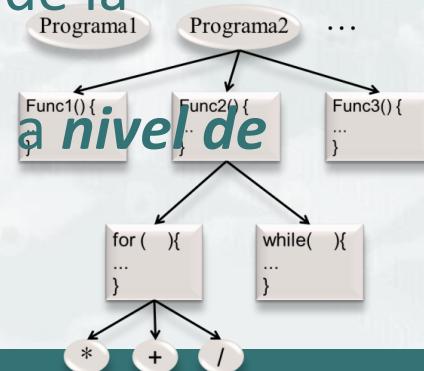
...  
a=b\*c  
... //código que no usa a  
d=a+c  
...

...  
a=b\*c  
... //se lee a  
a=d+e  
... //se lee a

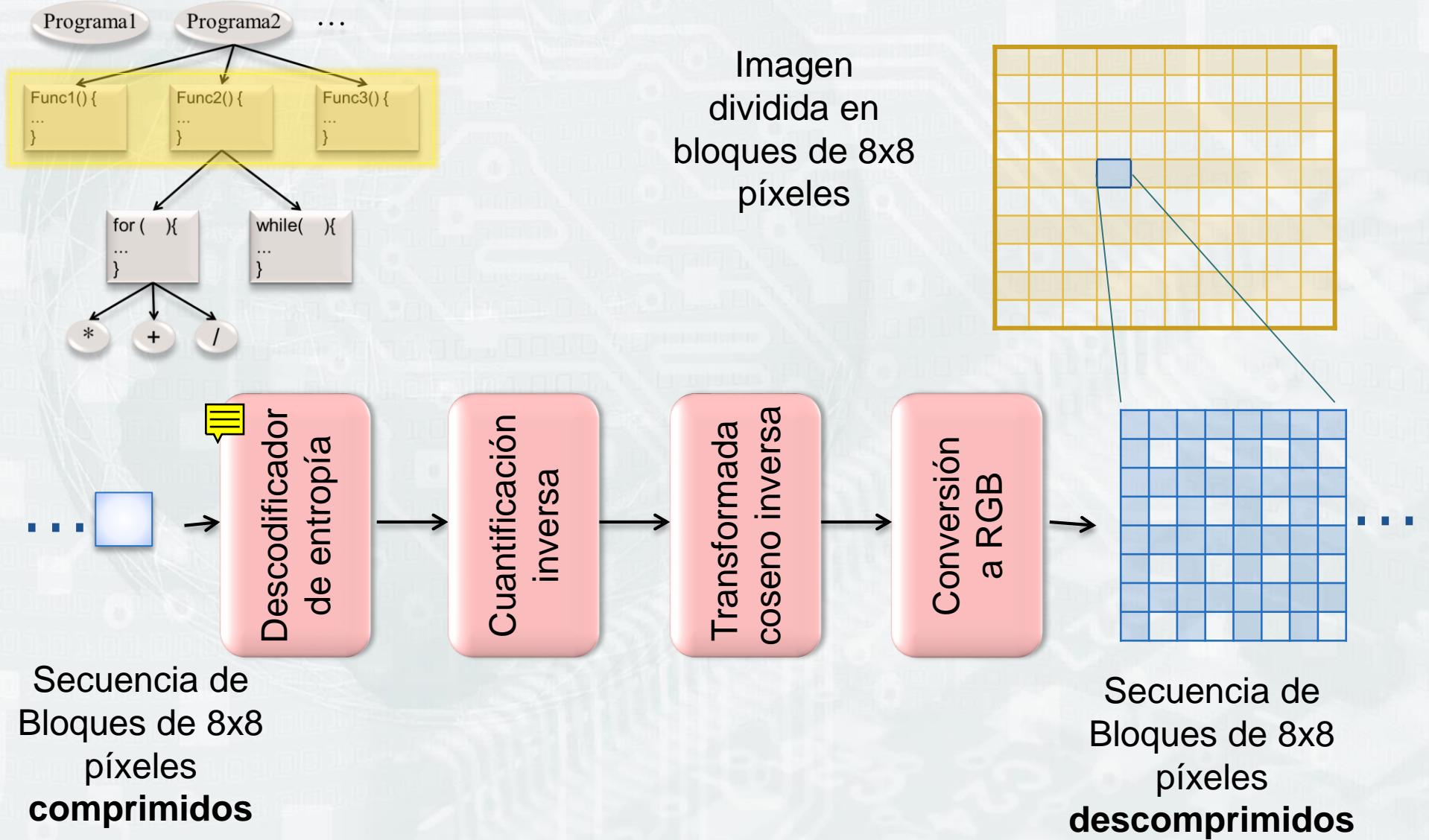
...  
b=a+1  
...  
a=d+e  
... //se lee a

# Paralelismo implícito en una aplicación

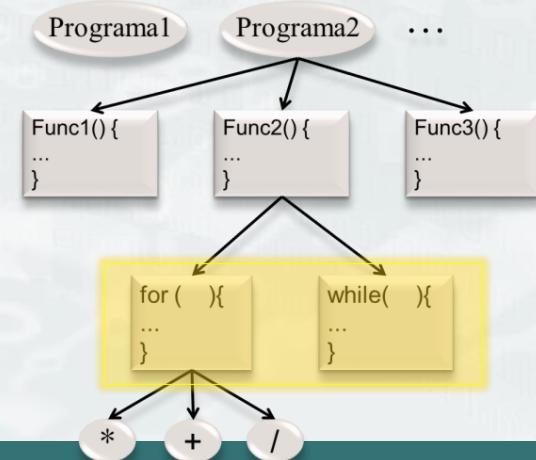
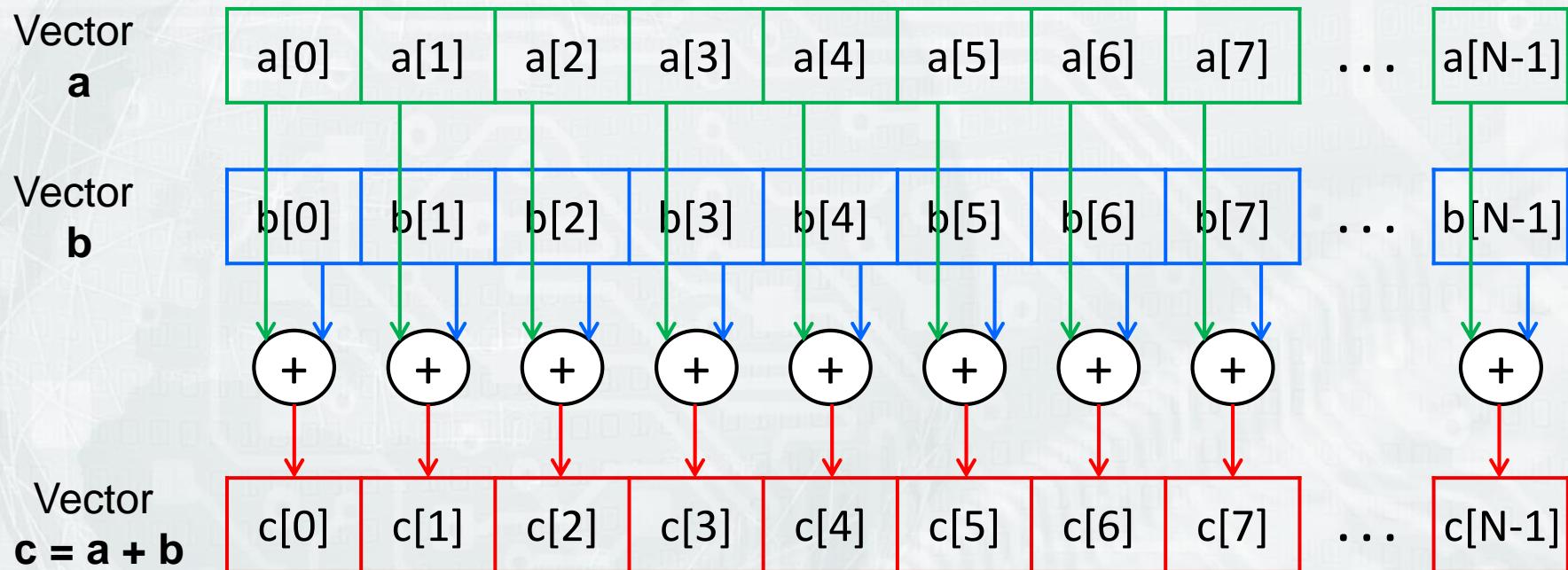
- Paralelismo de tareas (*task parallelism o TLP -Task Level Par.*)
  - Se encuentra extrayendo la estructura lógica de funciones de una aplicación.
  - Está relacionado con el paralelismo a **nivel de función**
- Paralelismo de datos (*data parallelism o DLP-Data Level Par.*)
  - Se encuentra implícito en las operaciones con estructuras de datos (vectores y matrices)
    - Por ejemplo, la operación vectorial  $V1=V2+V3$  engloba múltiples sumas de escalares.
  - Se puede extraer de la representación matemática de la aplicación.
  - Está relacionado principalmente con el paralelismo a **nivel de bucle**



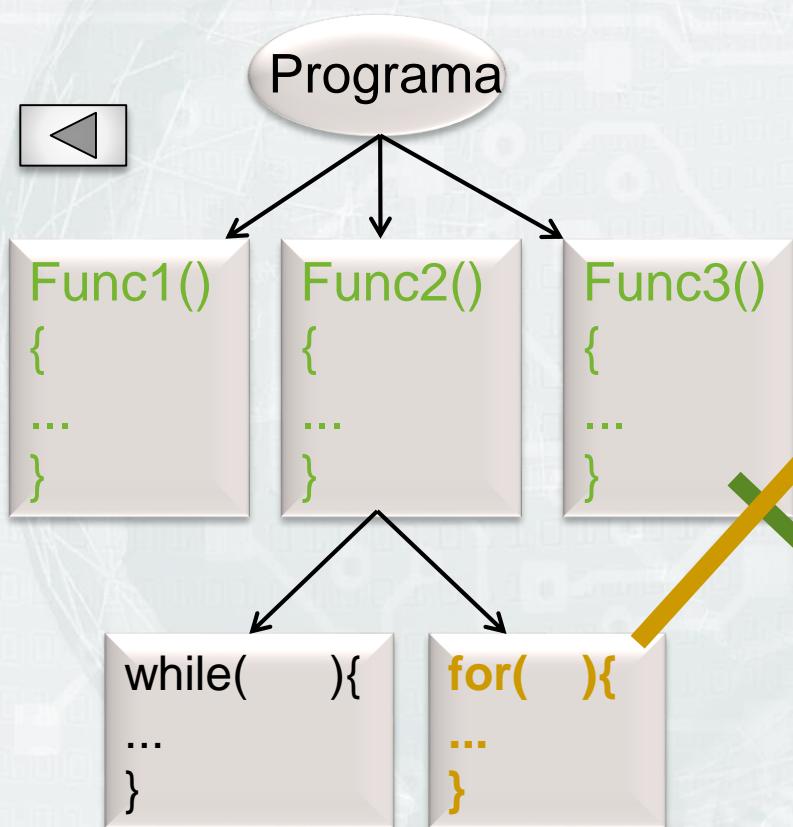
# Estructura de funciones lógica de una aplicación. Ej.: decodificador JPEG



# Paralelismo de datos. Ej: suma de dos vectores

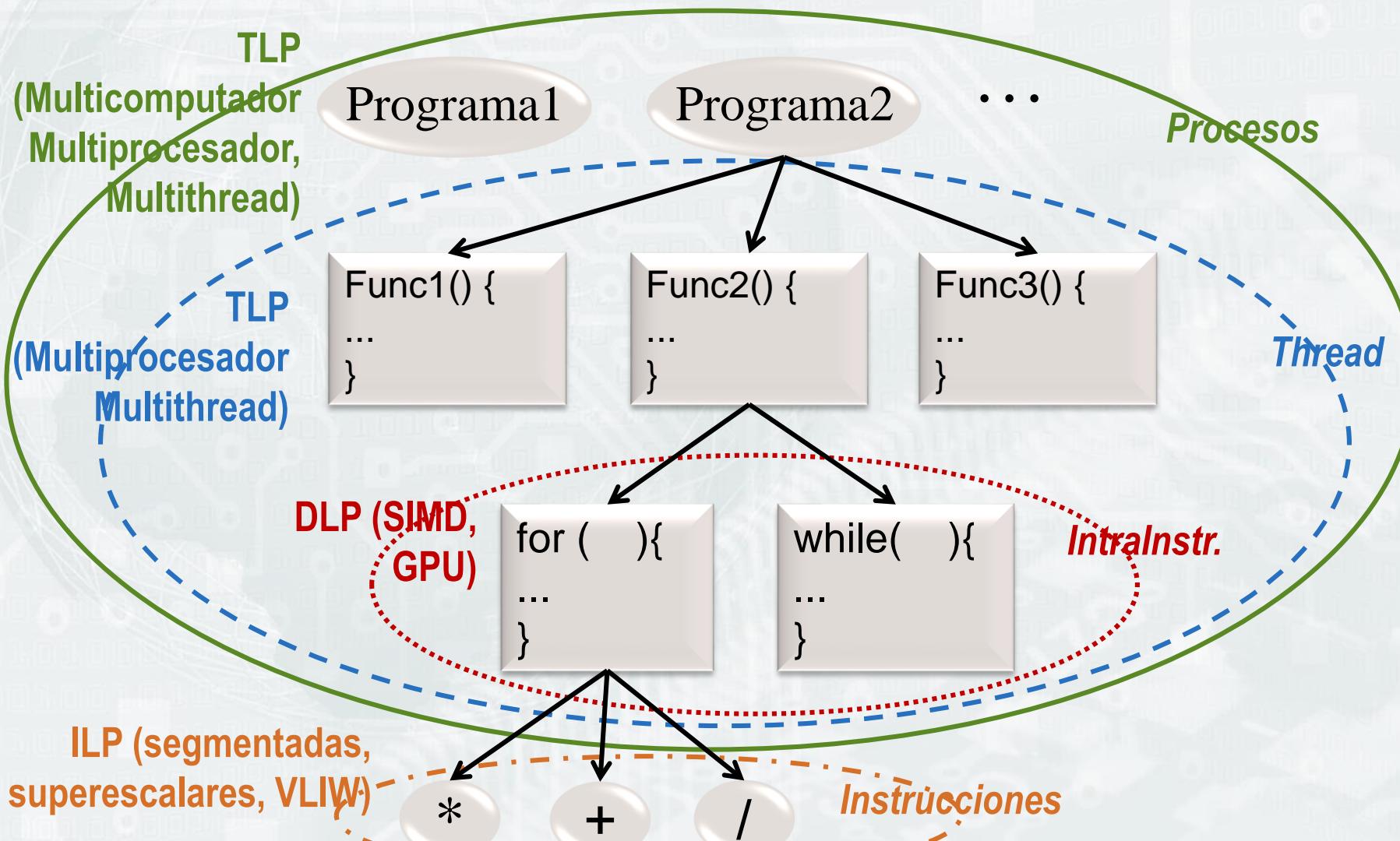


# Paralelismo de datos y paralelismo de tareas en OpenMP (Prácticas 0, 1, 2 y 3)



```
Func1 () { ... }  
Func2 () { ... }  
#pragma omp parallel for  
    for (i=0;i<N;i++) {  
        código para i  
    }  
    ... }  
Func3 () { ... }  
Main () {  
    ... }  
#pragma omp parallel sections  
    { #pragma omp section  
        Func1 ();  
    #pragma omp section  
        Func2 ();  
    #pragma omp section  
        Func3 ();  
    }  
    ... }
```

# Paralelismo implícito (nivel de detección), explícito y arquitecturas paralelas



# Nivel de paralelismo explícito. Unidades en ejecución en un computador

## ➤ Instrucciones

- La unidad de control de un core o procesador gestiona la ejecución de instrucciones por la unidad de procesamiento

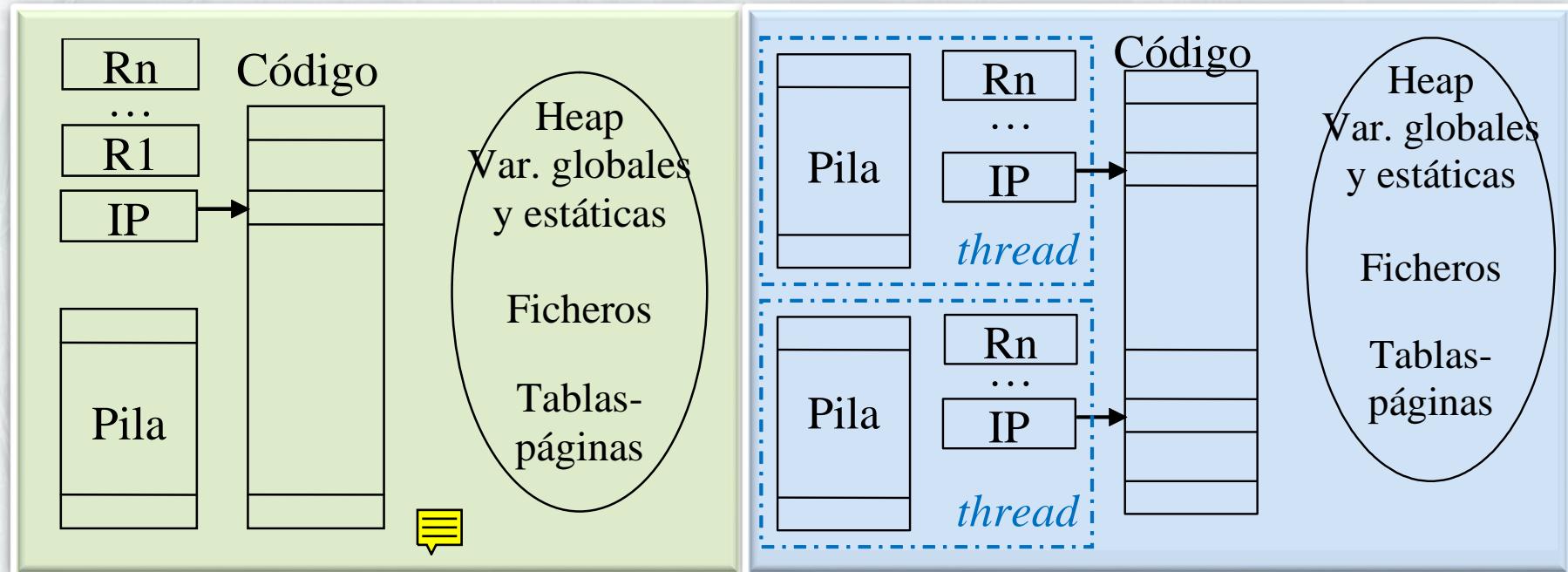
## ➤ *Thread o light process* (concepto del SO)

- Es la menor unidad de ejecución que gestiona el SO
- Menor secuencia de instrucciones que se pueden ejecutar en paralelo o concurrentemente

## ➤ Proceso o *process* (concepto del SO)

- Mayor unidad de ejecución que gestiona el SO
- Un proceso consta de uno o varios thread

# Nivel de parallelismo explícito. Threads versus procesos I



- **Proceso:** comprende el código del programa y todo lo que hace falta para su ejecución:
  - Datos en pila, segmentos (variables globales y estáticas) y en heap
  - Contenido de los registros
  - Tabla de páginas
  - Tabla de ficheros abiertos
- Para comunicar procesos hay que usar llamadas al SO
- Un proceso puede constar de múltiples flujos de instrucciones, llamados **threads** o procesos ligeros. Cada thread tiene:
  - Su propia pila
  - Contenido de los registros, en particular el contador de programa o *instruction pointer* y el puntero de pila o *stack pointer*
- Para comunicar threads de un proceso se usa la memoria que comparten

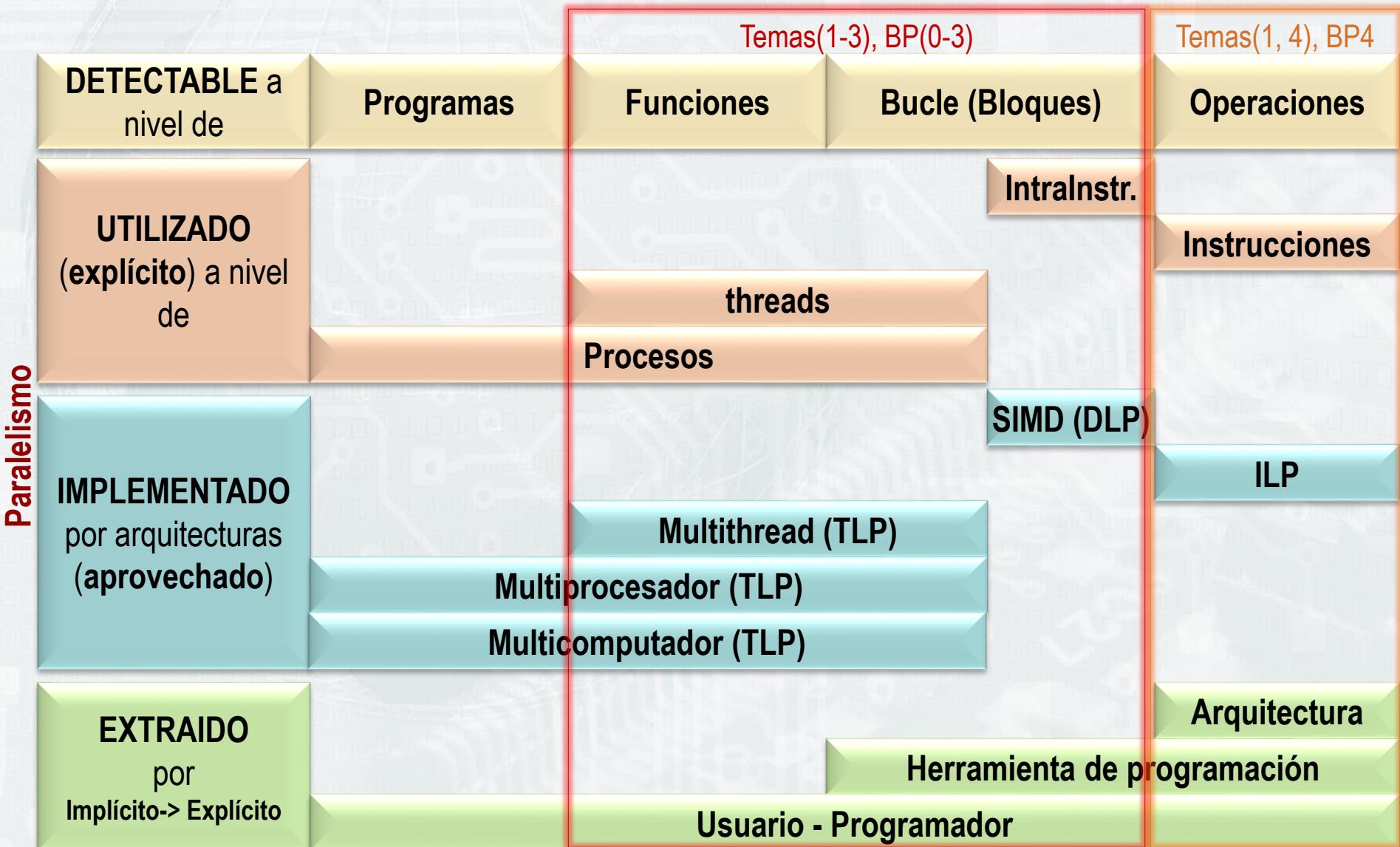
grano

# Nivel de parallelismo explícito. Threads versus procesos II



# Detección, utilización, implementación y extracción del paralelismo

niveles



# Para ampliar .....

## ➤ Páginas Web:

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Instruction-level\\_parallelism](http://en.wikipedia.org/wiki/Instruction-level_parallelism)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_dependency](https://en.wikipedia.org/wiki/Data_dependency)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Task\\_parallelism](http://en.wikipedia.org/wiki/Task_parallelism)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_parallelism](http://en.wikipedia.org/wiki/Data_parallelism)

2º curso / 2º cuatr.

Grados en  
Ing. Informática

# Arquitectura de Computadores

## Tema 1

## Arquitecturas Paralelas: Clasificación y Prestaciones

Material elaborado por Mancia Anguita

Profesores: Mancia Anguita, Maribel García y Christian Morillas



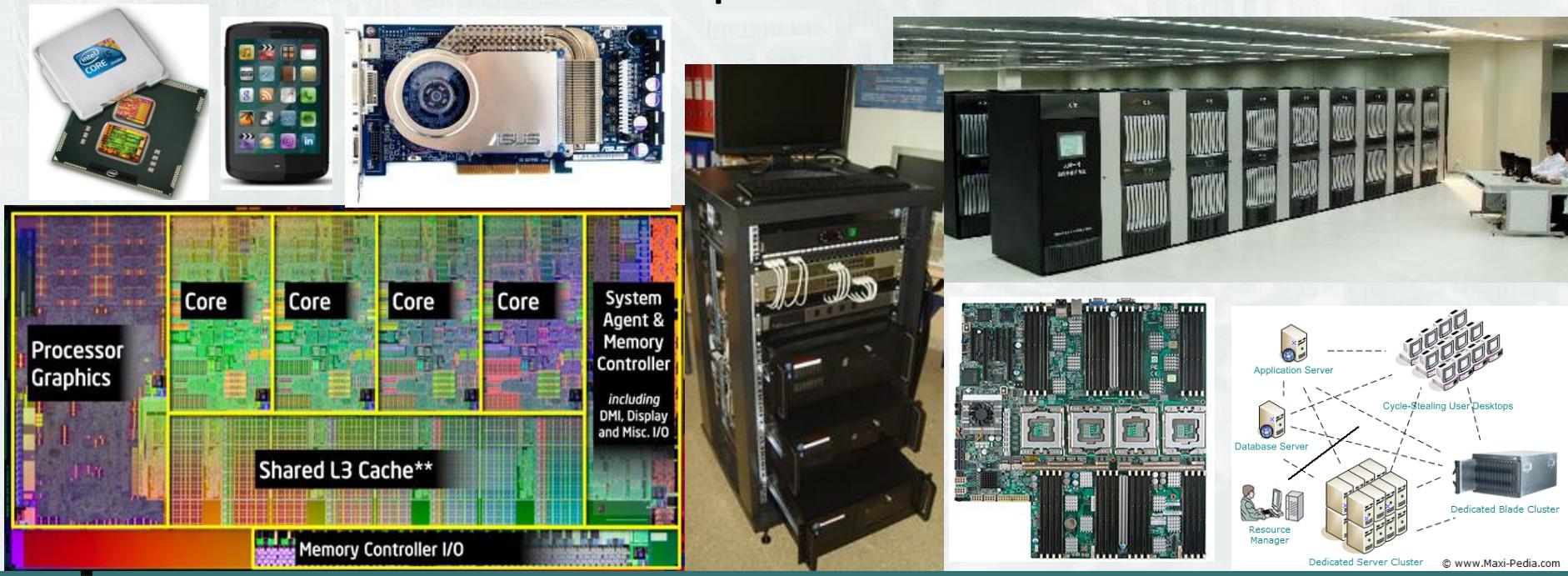
UNIVERSIDAD  
DE GRANADA



**ICAR**  
INGENIERÍA DE COMPUTADORES,  
AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA

# Lecciones

- Lección 1. Clasificación del paralelismo implícito en una aplicación
- Lección 2. Clasificación de arquitecturas paralelas
- Lección 3. Evaluación de prestaciones



# Objetivos Lección 2

- Distinguir entre procesamiento o computación paralela y distribuida.
- Clasificar los computadores según segmento del mercado.
- Distinguir entre las diferentes clases de arquitecturas de la clasificación de Flynn.
- Diferenciar un multiprocesador de un multicomputador.
- Distinguir entre NUMA y SMP.
- Distinguir entre arquitecturas DLP, ILP y TLP.
- Distinguir entre arquitecturas TLP con una instancia de SO y TLP con varias instancias de SO.

# Bibliografía

## ➤ Fundamental

- Secciones 1.3, 7.3 y 7.2.2. 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>

# Contenidos

- Lección 1. Clasificación del paralelismo implícito en una aplicación
- Lección 2. Clasificación de arquitecturas paralelas
  - Computación paralela y computación distribuida
  - Clasificaciones de arquitecturas y sistemas paralelos
  - Nota histórica
- Lección 3. Evaluación de prestaciones

# Computación paralela – Computación distribuida

Distributed Computing Environment from FOLDOC

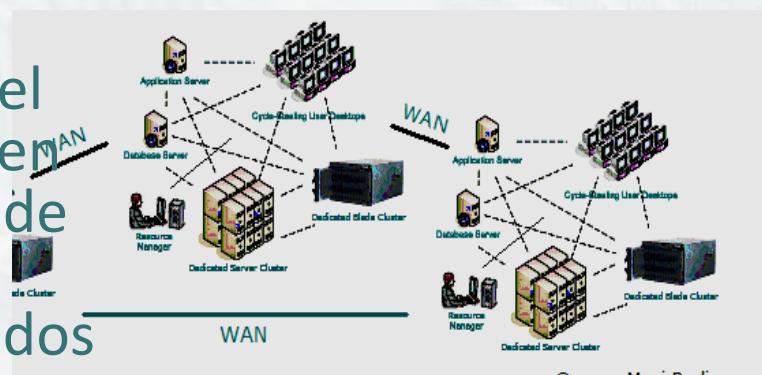
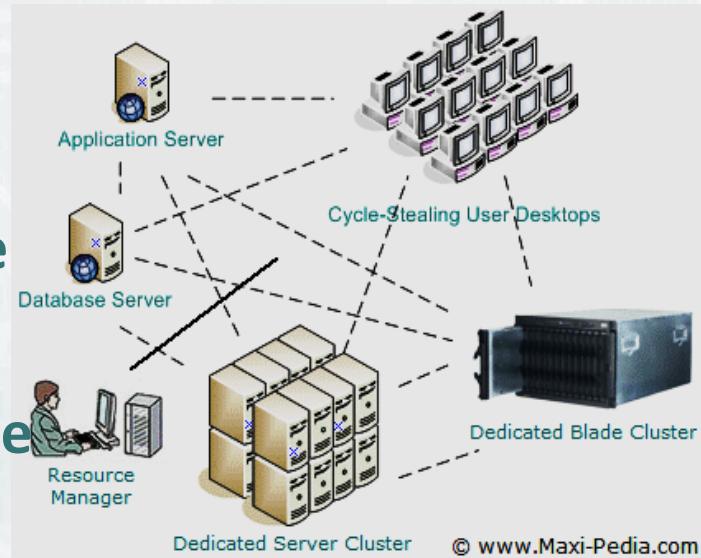
- Computación paralela (se estudia en AC)
  - Estudia los aspectos hardware y software relacionados con el *desarrollo y ejecución de aplicaciones* en un sistema de cómputo compuesto por **múltiples cores/procesadores/computadores** que es visto externamente como una **unidad autónoma** (multicores, multiprocesadores, multicamputadores, cluster)
- Computación distribuida
  - Estudia los aspectos hardware y software relacionados con el *desarrollo y ejecución de aplicaciones* en un **sistema distribuido**; es decir, en una **colección de recursos autónomos** (PC, servidores -de datos, software, ...-, supercomputadores ..., bases de datos distribuidas, sistemas de ficheros distribuidos, llamadas a procedimientos remotos) situados en **distintas localizaciones físicas** (peer-to-peer o P2P, cliente –servidor, n-tier, ...)



© www.Maxi-Pedia.com

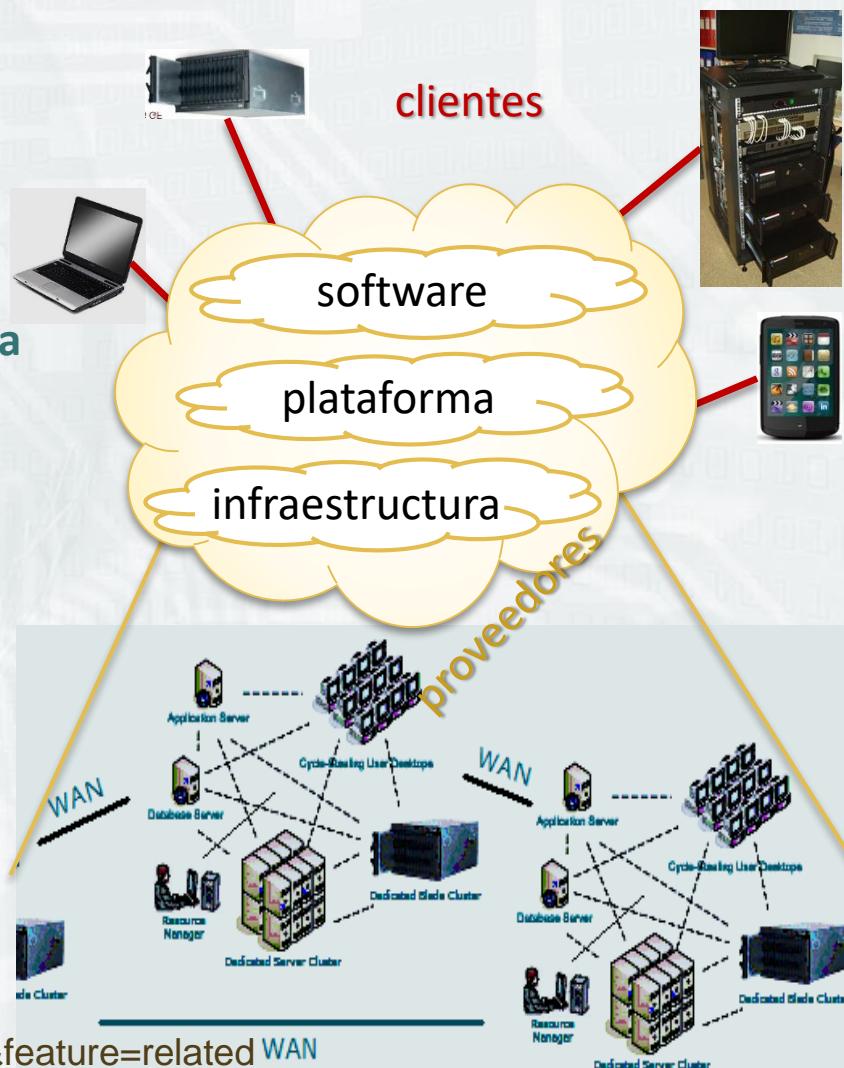
# Computación distribuida a gran escala: Computación grid

- Computación distribuida baja escala
  - Estudia los aspectos relacionados con el *desarrollo y ejecución de aplicaciones* en una colección de recursos autónomos **de un dominio administrativo** situados en **distintas localizaciones físicas** conectados a través de **infraestructura de red local**
- Computación grid
  - Estudia los aspectos relacionados con el *desarrollo y ejecución de aplicaciones* en una colección de recursos autónomos **de múltiples dominios administrativos geográficamente distribuidos** conectados con **infraestructura de telecomunicaciones**



# Computación distribuida a gran escala: Computación nube o *cloud*

- Computación *cloud*
  - Comprende los aspectos relacionados con el desarrollo y ejecución de aplicaciones en un **sistema cloud**
- Sistema *cloud*
  - Ofrece **servicios de infraestructura, plataforma y/o software**, por los que se paga cuando se necesitan (*pay-per-use*) y a los que se accede típicamente a través de una **interfaz (web) de auto-servicio**
  - Consta de **recursos virtuales** que
    - son una **abstracción** de los recursos físicos
    - parecen **ilimitados en número y capacidad** y son reclutados/liberados de forma **inmediata** sin interacción con el proveedor
    - soportan el acceso de múltiples clientes (**multi-tenant**)
    - están conectados con métodos **estándar independientes de la plataforma de acceso.**



Para ampliar:<http://www.youtube.com/watch?v=SgujalzkwrE&feature=related> [WAN](http://soa-eda.blogspot.com/2010/05/cloud-computing-explained.html)  
<http://soa-eda.blogspot.com/2010/05/cloud-computing-explained.html>

# Contenidos

- Lección 1. Clasificación del paralelismo implícito en una aplicación
- Lección 2. Clasificación de arquitecturas paralelas
  - Computación paralela y computación distribuida
  - **Clasificaciones de arquitecturas y sistemas paralelos**
  - Nota histórica
- Lección 3. Evaluación de prestaciones

# Criterios de clasificación de computadores

## → Comercial

- Segmento del mercado
  - embebidos, servidores gama baja ...
- Educación, investigación (también usados por fabricantes y vendedores)
- Flujos de instrucciones y flujos de datos: clasificación de Flynn (1972)
- Sistema de memoria
- Flujos de instrucciones (propuesta de clasificación de arquitecturas con múltiples flujos de instrucciones)
- Nivel del paralelismo aprovechado (propuesta de clasif.)

# Segmento del mercado



## MATERIAS DEL GRADO

Sistemas de Cómputo de Altas Prestaciones (IC.SCAP)

Estructura y Arquitectura de Computadores (R.EAC)

Sistemas de Cómputo para Aplicaciones Específicas (IC.SCAE)

# Clasificación de Computadores según segmento

**Externo (*desktop, laptop, server, cluster ...*)**  
- R.EAC, IC.SCAP

Para todo tipo de aplicaciones:

- Oficina, entretenimiento, ...
- Procesamiento de transacciones o OLTP, sistemas de soporte de decisiones o DSS, e-commerce, ...
- Científicas ( medicina, biología, predicción del tiempo, etc.) y animación (películas animadas, efectos especiales, etc.), ...

**Empotrado (oculto) - IC.SCAE**

Aplicaciones de propósito específico

- Videojuegos, teléfonos, coches, electrodomésticos, ...

Restricciones típicas:

- Consumo de potencia, precio, tamaño reducidos
- Tiempo real

# Criterios de clasificación de computadores

## ➤ Comercial

### ➤ Segmento del mercado

- embebidos, servidores gama baja ...

→ Educación, investigación (también usados por fabricantes y vendedores)

- Flujos de instrucciones y flujos de datos (clasificación de Flynn 1972)
- Sistema de memoria
- flujos de instrucciones (propuesta de clasificación de arquitecturas con múltiples flujos de instrucciones)
- Nivel del paralelismo aprovechado (propuesta de clasif.)

# Clasificación de Flynn de arquitecturas, 1972 (Flujo instr./flujo de datos)

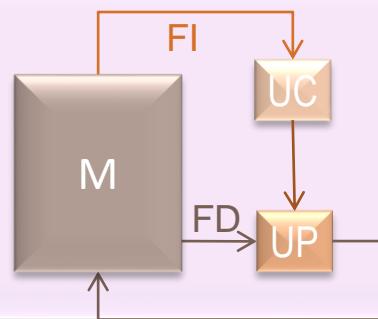
Clasifica-  
ción de  
Flynn

Único(Sing)

flujo de Instrucciones

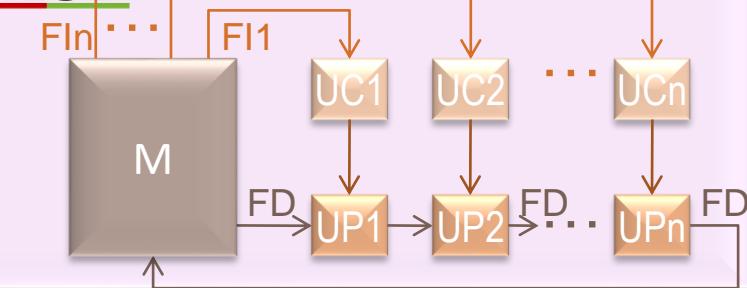
Único (*Single*)

**SISD**  
(Un núcleo  
procesador)



Múltiple

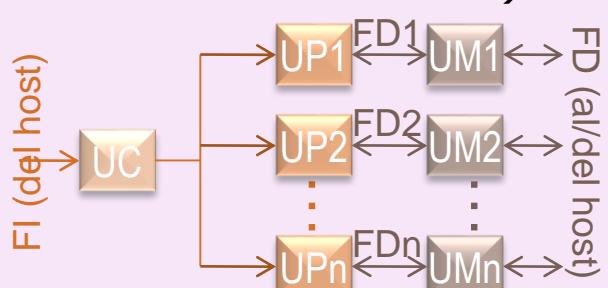
**MISD**



flujo de Datos

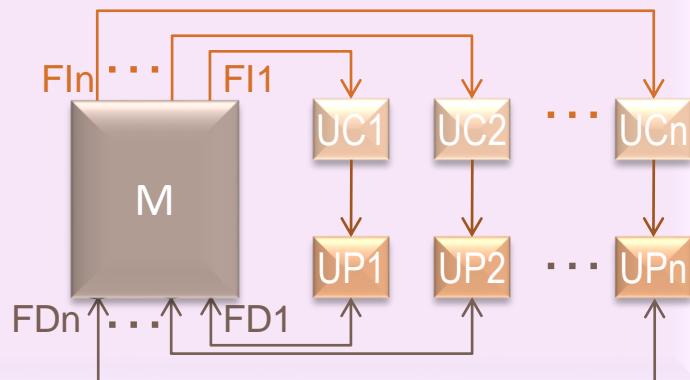
Múltiple

**SIMD**  
(GPU, Procesadores matriciales,  
unidades SIMD o SWAR)



vector

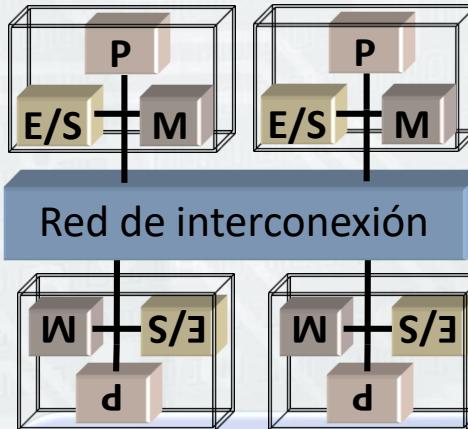
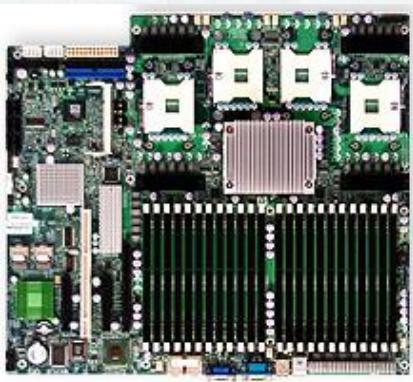
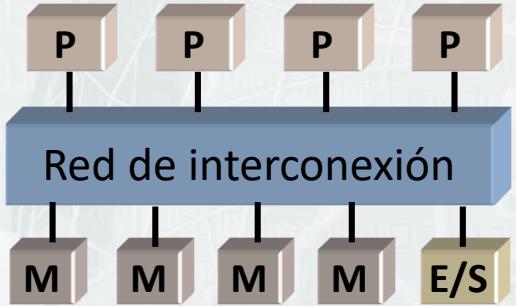
**MIMD**(multicores, multipro-  
cesadores, multicamputadores)



# Criterios de clasificación de computadores

- Comercial
    - Segmento del mercado
      - embebidos, servidores gama baja ...
  - Educación, investigación: también usados por fabricantes y vendedores
    - Flujos de instrucciones y flujos de datos (clasificación de Flynn 1972)
- Sistema de memoria
- Flujos de instrucciones (propuesta de clasificación de arquitecturas con múltiples flujos de instrucciones)
  - Nivel del paralelismo aprovechado (propuesta de clasif.)

# Clasificación de Computadores Paralelos MIMD según el sistema de memoria



## Multiprocesadores

Todos los procesadores  
comparten el **mismo espacio**  
**de direcciones**

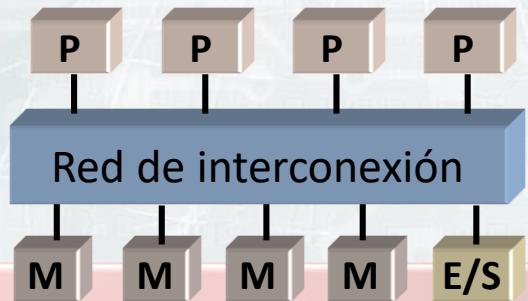
El programador NO necesita  
conocer dónde están  
almacenados los datos

## Multicomputadores

Cada procesador tiene su  
**espacio de direcciones**  
**propio**

El programador necesita  
conocer dónde están  
almacenados los datos

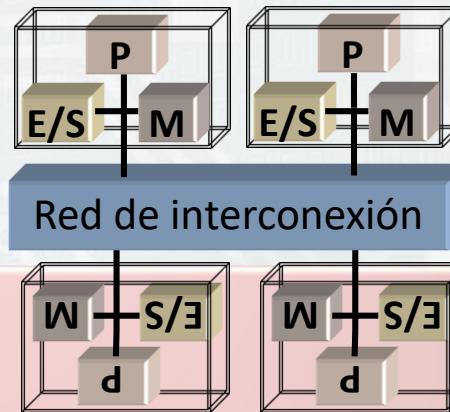
# Comparativa SMP (Symmetric Multi-Processor) y multicomputadores I



Multiprocesador con memoria centralizada (SMP)

Mayor latencia - Poco escalable

Comunicación implícita mediante variables compartidas. Datos no duplicados en memoria principal

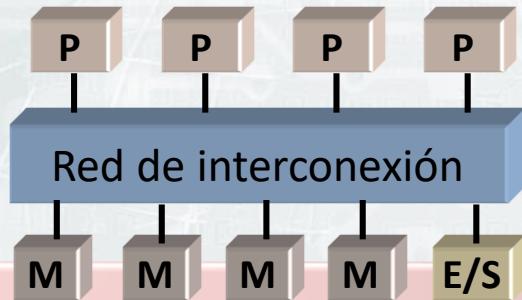


Multicomputador

Menor latencia – Más escalable

Comunicación explícita mediante software para paso de mensajes (*send/receive*). Datos duplicados en memoria principal, copia datos

# Comparativa SMP (Symmetric Multi-Processor) y multicomputadores II

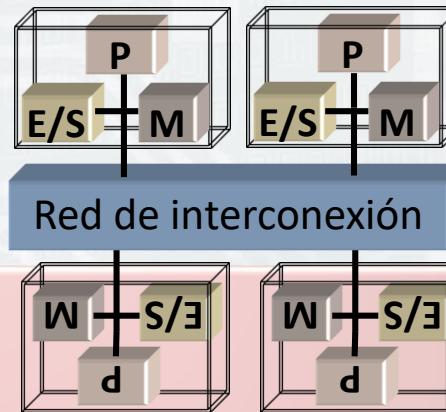


Multiprocesador con memoria centralizada (SMP)

Necesita implementar primitivas de sincronización

Distribución código y datos entre procesadores: no necesaria

Programación, generalmente, más sencilla



Multicomputador

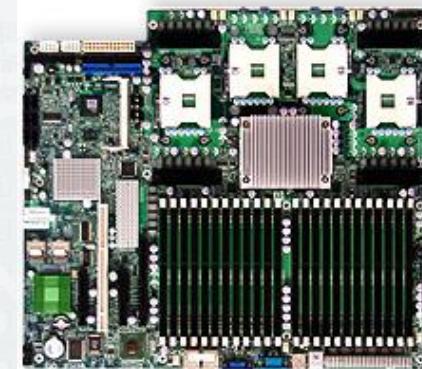
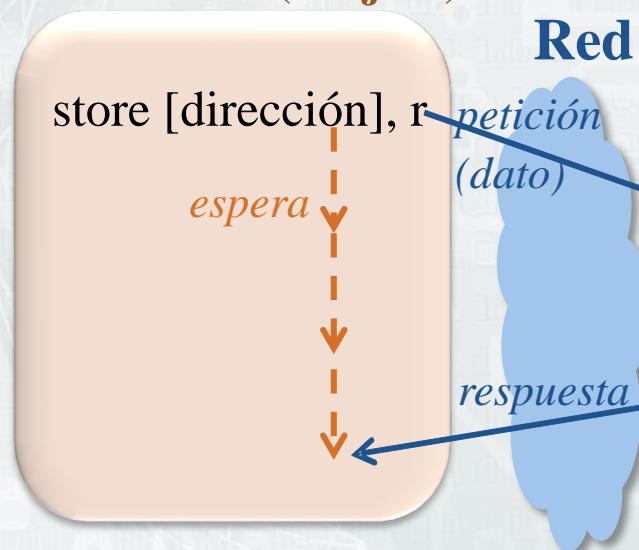
Sincronización mediante software de comunicación

Distribución código y datos entre procesadores: necesaria=> herramientas program. más sofisticadas

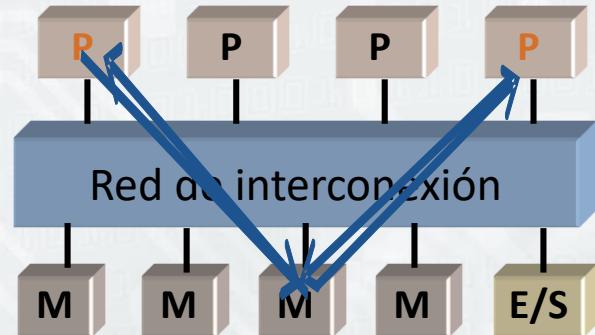
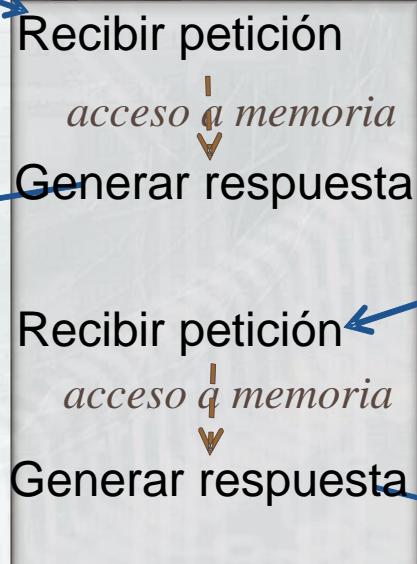
Programación generalmente más difícil

# Comunicación uno-a-uno en un multiprocesador

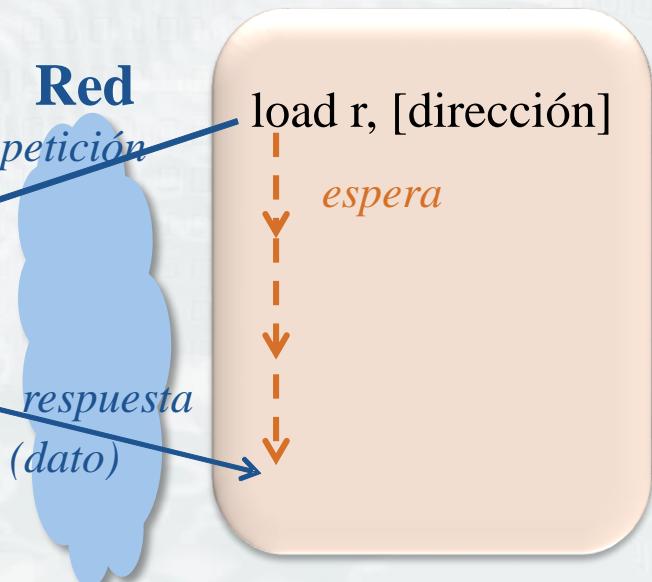
## Nodo fuente (Flujo 1)



Memoria



## Nodo destino (Flujo 2)



# Comunicación uno-a-uno en un multiprocesador

Secuencial	Paralelo	
... <b>A=valor;</b> ... copia= <b>A</b> ; ...	<b>F1</b> ... <b>A=valor;</b> ...	<b>F2</b> ... copia= <b>A</b> ; ...

**F1** es el flujo de instrucciones productor del dato (envía el dato)  
**F2** es el flujo de instr. consumidor del dato (recibe el dato)

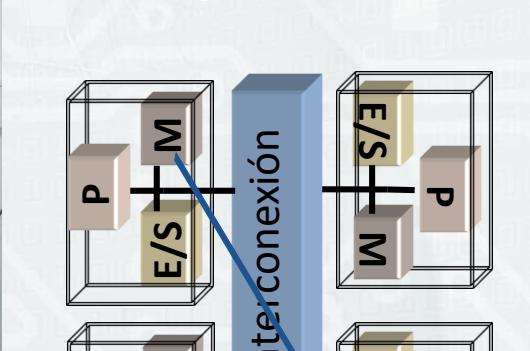
- Se debe garantizar que el flujo de instrucciones consumidor del dato lea la variable compartida (A) cuando el productor haya escrito en la variable el dato

## Paralelo multiproc. ( $K=0$ )

<b>F1</b>	<b>F2</b>
... <b>A=valor;</b> <b>K=1;</b> ...	... <b>while (K==0) { };</b> copia= <b>A</b> ; ...

NOTA: La programación paralela de multiprocesadores se estudia en AC

# Comunicación uno-a-uno en multicomputador (*receive* bloqueante)



## Nodo fuente (Flujo 1)

send(dest,dat,size)  
*continúa ejecución*

copia datos a buffer

Datos

Red

## Nodo destino (Flujo 2)

receive(fuen,dat,size)  
*espera*

datos a memoria  
usuario

*continúa ejecución*

tiempo

# Comunicación uno-a-uno en un multicomputador

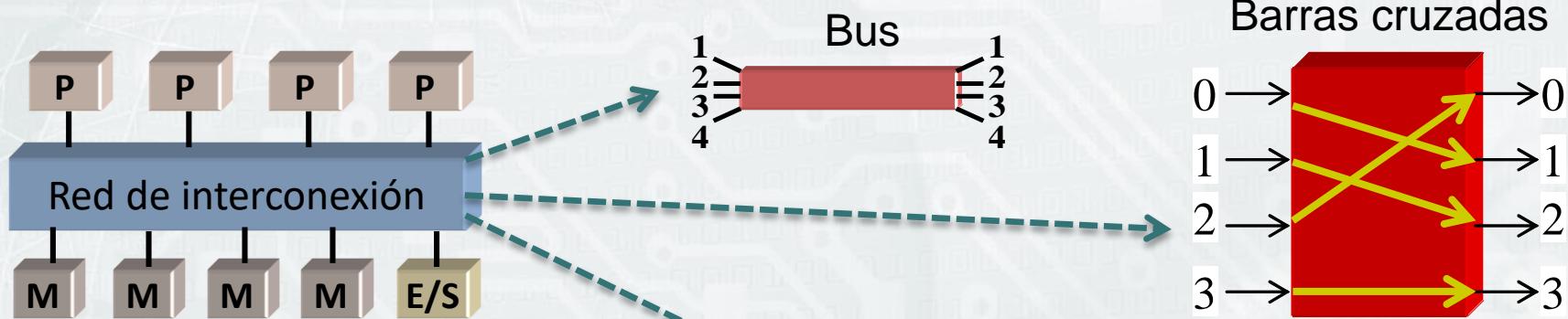
Secuencial	Paralelo	
... <b>A=valor;</b> ... <b>copia=A;</b> ...	<u>F1</u> ... <b>A=valor;</b> ...	<u>F2</u> ... <b>copia=A;</b> ...

**F1** es el flujo de instrucciones productor del dato (envía el dato)  
**F2** es el flujo de instr. consumidor del dato (recibe el dato)

Paralelo multicomputador (size = 4 byte)	
<u>F1</u> ... send(F2, valor, 4); ...	<u>F2</u> ... receive(F1,copia,4); ...

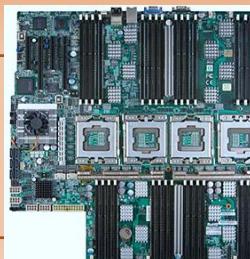
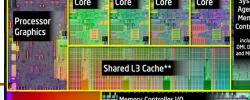
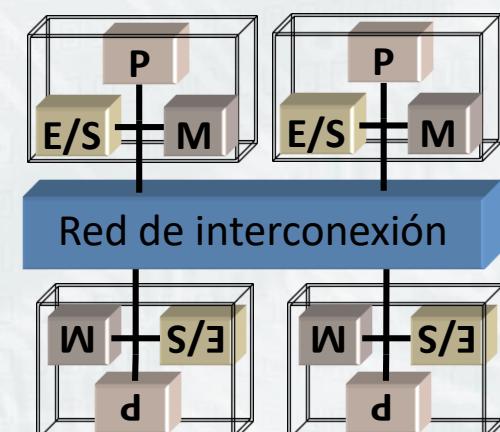
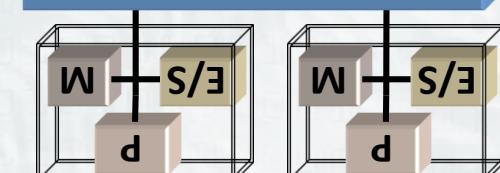
NOTA: La programación paralela de multicomputadores se estudia en la asignatura: Arquitecturas y Computación de Altas Prestaciones (IC.SCAP.ACAP – Especialidad (IC), Materia (SCAP), Asignatura (ACAP))

# Incremento de escalabilidad en multiprocesadores y red de interconexión



- Incremento escalabilidad multiprocesadores:
  - Aumentar cache del procesador
  - Usar redes de menor latencia y mayor ancho de banda que un bus (jerarquía de buses, barras cruzadas, multietapa)
  - Distribuir físicamente los módulos de memoria entre los procesadores (pero se sigue compartiendo espacio de direcciones)

# Clasificación completa de computadores según el sistema de memoria

Multi-computadores Memoria no compartida	NORMA <i>No Remote Memory Access</i>	ej. cluster, red de computadores	Memoria físicamente distribuida	+ +	Nivel de empaquetamiento y conexión
	NUMA <i>Non-Uniform Memory Access</i>	CC-NUMA			
Multi-procesadores Memoria compartida Un único espacio de direcciones	UMA <i>Uniform Memory Access</i>	SMP <i>Symmetric MultiProcessor</i>	Memoria físicamente centralizada	- -	Escalabilidad
		 	 		

# Criterios de clasificación de computadores

- Comercial
    - Segmento del mercado
      - embebidos, servidores gama baja ...
  - Educación, investigación: también usados por fabricantes y vendedores
    - Flujos de instrucciones y flujos de datos (clasificación de Flynn 1972)
    - Sistema de memoria
    - Flujos de instrucciones (propuesta de clasificación de arquitecturas con múltiples flujos de instrucciones)
- Nivel del paralelismo aprovechado (propuesta de clasif.)

# Arquitecturas con DLP, ILP y TLP (thread=flujo de control o de instrucciones)

Arq. con **DLP**  
(*Data Level Parallelism*)

Trabajo extra  
Ejecutan las **operaciones** de una instrucción **concurr.** o en **paralelo**

Unidades funcionales vectoriales o SIMD (SWAR)

Arq. con **ILP**  
(*Instruction Level Parallelism*)

Temas(1, 4), BP4  
Ejecutan múltiples **instrucciones** **concurr.** o en **paralelo**

Cores escalares segmentados, superescalares o VLIW/EPIC

Arq. con **TLP** (*Thread Level Parallelism*) explícito y **una** instancia de SO

Temas(1-3), BP(0-3)

Ejecutan múltiples **flujos de instrucciones** **concurr.** o en **paralelo**

Cores que modifican la arquit. escalar segmentada, superescalar o VLIW/EPIC para ejecutar threads **concurr.** o en **paralelo**

Multi-procesadores: ejecutan threads en **paralelo** en un computador con múltiples cores (incluye **multicore**)

Arq. con **TLP** explícito y **múltiples** instancias SO

IC.SCAP

Ejec. múltiples **flujos de instr.** en **paralelo**

Multi-computadores : ejecutan threads en **paralelo** en un sistema con **múltiples** computadores

# Contenidos

- Lección 1. Clasificación del paralelismo implícito en una aplicación
- Lección 2. Clasificación de arquitecturas paralelas
  - Computación paralela y computación distribuida
  - Clasificaciones de arquitecturas y sistemas paralelos
  - Nota histórica
- Lección 3. Evaluación de prestaciones

# Nota histórica. DLP y ILP

## ➤ DLP (*Data Level Parallelism*)

Trabajo optional

### ➤ Unidades funcionales (o de ejecución) SIMD (o multimedia)

- **1989** ([Intel i860](#)). **1991** (motorola M88110). **1993** (repertorio MAX en HP PA : PA7100LC). **1995** (repertorio VIS en Sun Sparc: Ultra I). **1997** (repertorio MMX en Intel x86: Pentium MMX). **1999** (repertorio SSE en Intel x86: Pentium III; repertorio Altivec en IBM Power: PowerPC 8000)

## ➤ ILP (*Instruction Level Parallelism*) :

TEMA 4

### ➤ Procesadores/cores segmentados

- **1961** ([IBM 7030](#)). **1982** (chip Intel i286, Motorola 68020). **1986** (chip MIPS R2000). **1987** (chip AMD Am29000). **1988** (chip Sun Sparc)...

### ➤ Procesadores con múltiples unidades funcionales

- **1967** (IBM 360/91) ...

### ➤ Procesadores/cores superescalares

- **1989** (chip Intel 960CA (3)). **1990**: (chip IBM Power1 (4)). **1992**: (chips DEC α21064 (2/4), HP PA 7100 (2/2), Sun SuperSparc (3/5)). **1993**: (Pentium(2/3)) **1995**: (Pentium Pro (3/7)) ...

### ➤ Procesadores/cores VLIW

- **1990** ([chip Intel i860 \(2\)](#)).**1997** ([chip DSP TMS320C6x \(8\)](#)). **2001** (chip Intel Itanium)...

NOTA: Destacado en *cursiva* las primeras implementaciones y en [color](#) más claro los chip de propósito específico

# Nota histórica. TLP (*Thread Level Parallelism*)

## ➤ TLP explícito con una instancia de SO:

TEMA 3

- Multithread grano fino (FGMT)
  - **1975** (*Denelcor HEP*). **2005** (chip Sun UltraSPARC T1) ...
- Multithread grano grueso (CGMT)
  - **1990** (*MIT Alewife*). **2000** (chip IBM PowerPC RS64 IV (2)). **2006** (chip Intel Itanium Montecito (2)) ...
- Multithread simultánea (SMT)
  - **2002** (chip Intel Pentium 4/Xeon Hyper-Threading). **2004** (chip IBM Power5) ...
- Multiprocesadores en un chip (CMP) o multicores
  - **2001** (chip IBM Power4). **2004** (chip Sun UltraSPARC IV). **2006** (chip Intel Core Duo).  
**2008** (chip Intel Celeron Dual-core) ...
- Multiprocesadores
  - **1962** (*Burroughs D825 - red barras cruzadas*). **1966** (*UNIVAC 1108 - red bus*). **1985** (*IBM RP3 - red multietapa*). **1996** (*SGI Origin 2000 -CC-NUMA, red estática+multietapa*) .**2006** (*SGI Altix 4000*) ...

## ➤ TLP explícito con múltiples instancias del SO (multicomputadores) IC.SCAP

- **1985** (*Intel iPSC1 - i286+red estática con Ethernet*) ... cualquier cluster

NOTA: Destacado en *cursiva* las primeras implementaciones y en **color** más claro los chip de propósito específico

2º curso / 2º cuatr.

Grados en  
Ing. Informática

# Arquitectura de Computadores

## Tema 1

# Arquitecturas Paralelas: Clasificación y Prestaciones

Material elaborado por Mancia Anguita

Profesores: Mancia Anguita, Maribel García y Christian Morillas



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA



**ICAR**  
INGENIERÍA DE COMPUTADORES,  
AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA

# 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
  - Ganancia en prestaciones
  - Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)

# 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
- Calcular ganancia en prestaciones/velocidad
- 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>

# Contenido

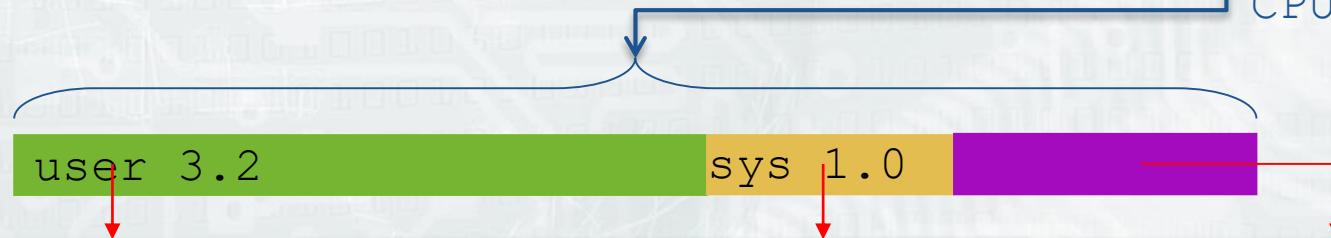
- Lección 1. Clasificación del paralelismo implícito en una aplicación
- Lección 2. Clasificación de arquitecturas paralelas
- Lección 3. Evaluación de prestaciones de una arquitectura
  - **Medidas usuales para evaluar prestaciones**
    - Tiempo de respuesta
    - Productividad
  - Ganancia en prestaciones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

# 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 instrucciones
  - elapsed  $\geq CPU\ time$
- Con múltiples flujos de instrucciones
  - elapsed  $< CPU\ time$ , elapsed  $\geq CPU\ time / \text{nº flujos control}$

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

Elapsed  $\geq$   
CPU time



**Tiempo de CPU de usuario** (Tiempo en ejecución en espacio de usuario)

**Tiempo de CPU de sistema**  
(Tiempo en el nivel del kernel del SO)

**Tiempo** asociado a las esperas debidas a I/O o asociados a la ejecución de otros programas.

Comando **time** en Unix:

3.2u 1.0s 5.4

3.2+1.0 es el **78%** del tiempo transcurrido (5.4)

# Algunas alternativas para obtener tiempos

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

La resolución depende de la plataforma

# Tiempo de CPU

```
...
for (i=0; i<N; i++) {
    v3[i]=v1[i]+v2[i];
}
...

```

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

$$T_{CPU} = NI \times \frac{1}{IPC} \times T_{ciclo}$$

$$T_{CPU} = \frac{\text{Nº ciclos}}{\text{código}} \times T_{ciclo}$$

$$T_{CPU} = \left[ \sum_i NI_i \times CPI_i \right] \times T_{ciclo}$$

$$T_{CPU} = NI \times \left( \frac{\sum_i NI_i \times CPI_i}{NI} \right) \times T_{ciclo}$$

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

.L7:

... ; rax=0, rbx=8N  
 movsd v1(%rax), %xmm0  
 addsd v2(%rax), %xmm0  
 movsd %xmm0, v3(%rax)  
 addq \$8, %rax  
 cmpq %rbx, %rax  
 jne .L7  
 ...

$i$	$NI_i$	$CPI_i$
movsd m,r	2N	4
movsd r,m	N	5
addsd m,r	N	1
addq i,r	N	1
cmp r,r	N	1
jne	N	1
<b>6N</b>		

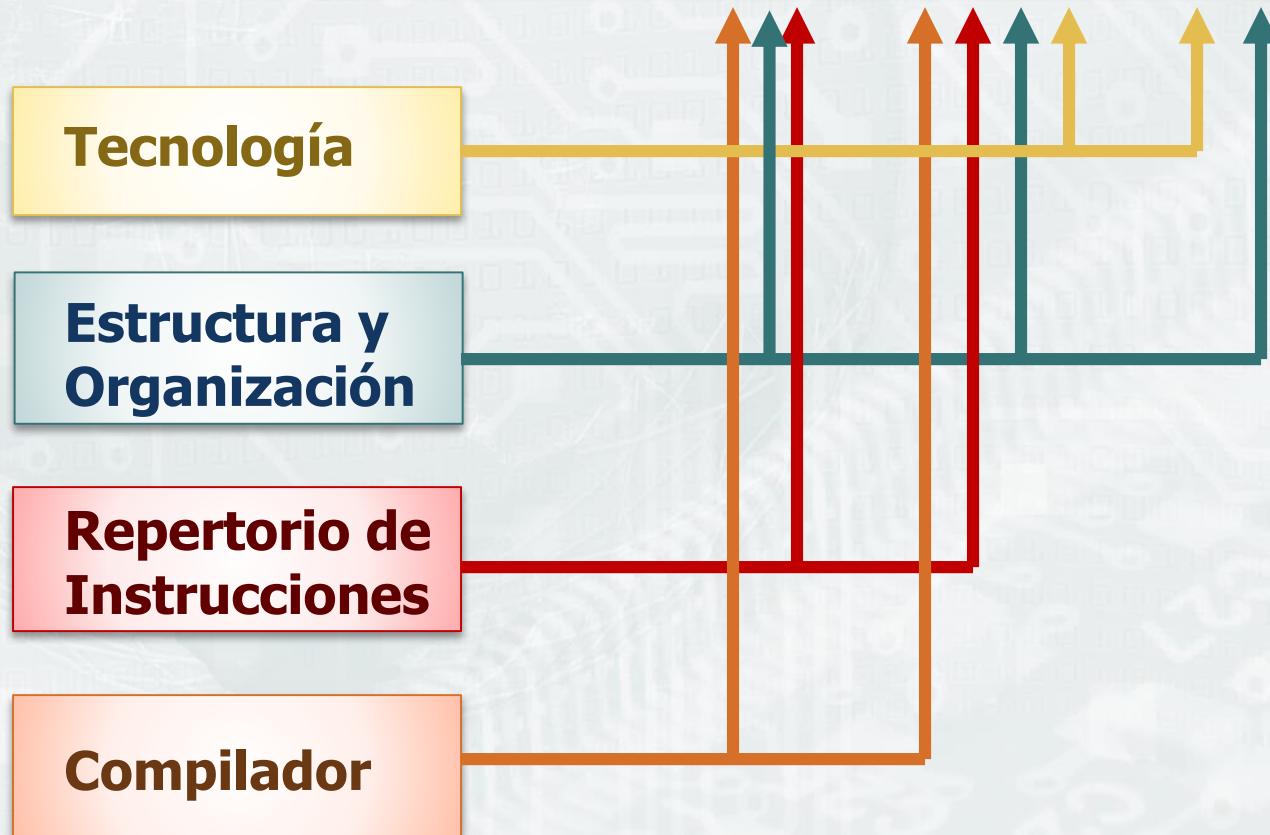
$$T_{ciclo} = 1/F$$

Para  $N = 10^3$  y  $F = 100\text{MHz}$  ( $\Rightarrow T_{ciclo} = 10^{-8}\text{seg./ciclo}$ ):

$$\begin{aligned} T_{CPU} &\approx \left[ 6N \times \left( \frac{2N \times 4 + N \times 5 + 3N \times 1}{6N} \right) \right] \times T_{ciclo} \\ &= 10^3 \times 16 \text{ ciclos/código} \times 10^{-8}\text{seg./ciclo} \\ &= 16 \times 10^{-5}\text{seg./código} \end{aligned}$$

# Tiempo de CPU

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



# MIPS y MFLOPS

- Millones de instrucciones por segundo (MIPS):

$$\text{MIPS} = \frac{\text{NI}}{T_{CPU} \times 10^6}$$

$$\text{MIPS} = \frac{\text{NI}}{\text{NI} \times \text{CPI} \times T_{ciclo} \times 10^6} = \frac{\text{F}}{\text{CPI} \times 10^6}$$

- Depende del repertorio de instrucciones (difícil la comparación de máquinas con repertorios distintos)
- Puede variar inversamente con las prestaciones (mayor valor de MIPS corresponde a peores prestaciones)
- Millones de operaciones punto flotante por segundo (MFLOPS):

$$MFLOPS = \frac{n^o FP}{T_{CPU} \times 10^6}$$

# MIPS y FLOPS

```
...
for (i=0; i<N; i++) {
    y[i]=a*x[i]+y[i];
}
...
```

## -O2

```
;r12=&x,r13=&y,rax=0,rbp=N,xmm1=a
.L6:
    movsd (%r12,%rax,8), %xmm0
    mulsd %xmm1, %xmm0
    addsd (%r13,%rax,8), %xmm0
    movsd %xmm0, (%r13,%rax,8)
    addq $1, %rax
    cmpl %eax, %ebp
    jg .L6
```

$$T(N=2^{26}) = 0.182 \text{ seg.}$$

$$\begin{aligned} GIPS &= \frac{NI}{T_{CPU} \times 10^9} = \frac{N \times 7}{0.182 \times 10^9} \\ &= \frac{2^{26} \times 7}{0.182 \times 10^9} \approx 2.58 \text{ GIPS} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GFLOPS &= \frac{n^o FP}{T_{CPU} \times 10^9} = \frac{N \times 2}{0.182 \times 10^9} \\ &= \frac{2^{26} \times 2}{0.182 \times 10^9} \approx 0.737 \text{ GFLOPS} \end{aligned}$$

## -O3

```
;r12=&x,r13=&y,rax=0,rbp=N/2,xmm1=a
.L7:
    movapd (%r12), %xmm0
    addq $1, %rax
    addq $16, %r12
    addq $16, %r13
    mulpd %xmm1, %xmm0
    addpd -16(%r13), %xmm0
    movaps %xmm0, -16(%r13)
    cmpl %ebp, %eax
    jb .L7
```

$$T(N=2^{26}) = 0.178 \text{ seg.}$$

$$\begin{aligned} GIPS &= \frac{NI}{T_{CPU} \times 10^9} = \frac{(N/2) \times 9}{0.178 \times 10^9} \\ &= \frac{2^{25} \times 9}{0.178 \times 10^9} \approx 1.7 \text{ GIPS} \end{aligned}$$

$$GFLOPS = \frac{2^{26} \times 2}{0.178 \times 10^9} \approx 0.754 \text{ GFLOPS}$$

# 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
  - **Ganancia en prestaciones al realizar una mejora**
  - Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)

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

Si se incrementan las prestaciones de un sistema, el incremento en prestaciones (velocidad) que se consigue en la nueva situación,  $p$ , con respecto a la previa (**sistema base**,  $b$ ) se expresa mediante la ganancia en prestaciones o *speed-up*,  $S$

$$S = \frac{V_p}{V_b} = \frac{T_b}{T_p}$$

$$S = \frac{T_{CPU}^b}{T_{CPU}^p} = \frac{NI^b \times CPI^b \times T_{ciclo}^b}{NI^p \times CPI^p \times T_{ciclo}^p}$$

$V_b$  Velocidad de la máquina base

$V_p$  Velocidad de la máquina mejorada (un factor  $p$  en uno de sus componentes)

$T_b$  Tiempo de ejecución en la máquina base

$T_p$  Tiempo de ejecución en la máquina mejorada

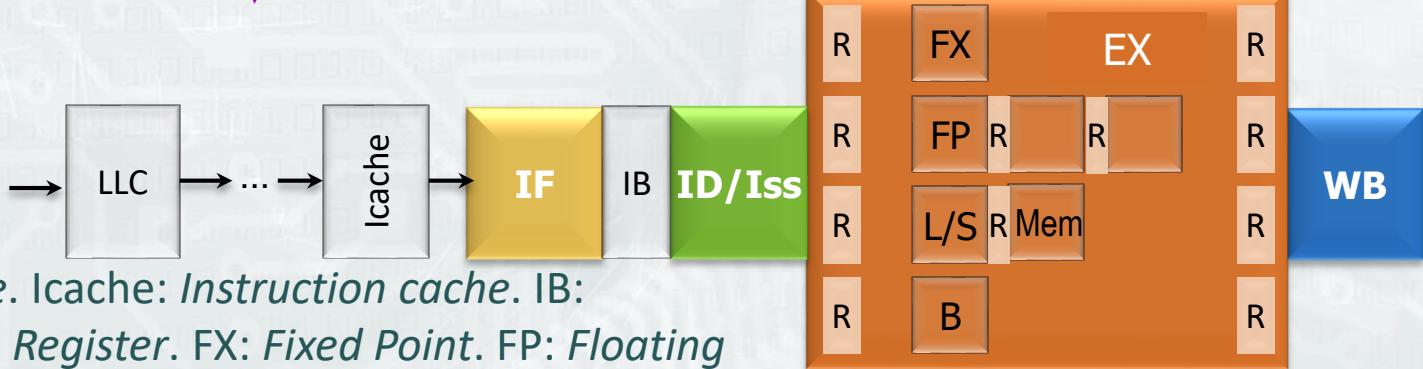
# Arquitecturas con paralelismo a nivel de instrucción (ILP)

Nota Histórica

Escalar  
segmentada



VLIW y  
superescalar



LLC: *Last Level Cache*. Icache: *Instruction cache*. IB:

*Instruction Buffer*. R: *Register*. FX: *Fixed Point*. FP: *Floating*

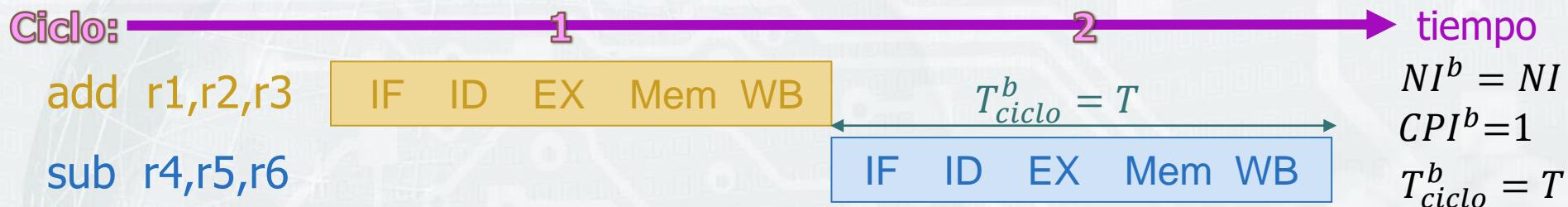
*Point*. L/S: *(memory) Load/Store*. B: *Branch*

<https://webriscv.dii.unisi.it/>

- Etapa de captación de instrucciones (*Instruction Fetch*)
- Etapa de decodificación de instrucciones y emisión a unidades funcionales (*Instruction Decode/Instruction Issue*) (incluye captura de "operандos" de los registros de la arquitectura)
- Etapas de ejecución (*Execution*). Etapa de acceso a memoria (*Memory*)
- Etapa de almacenamiento de resultados en registros de la arquitectura (*Write-Back*)

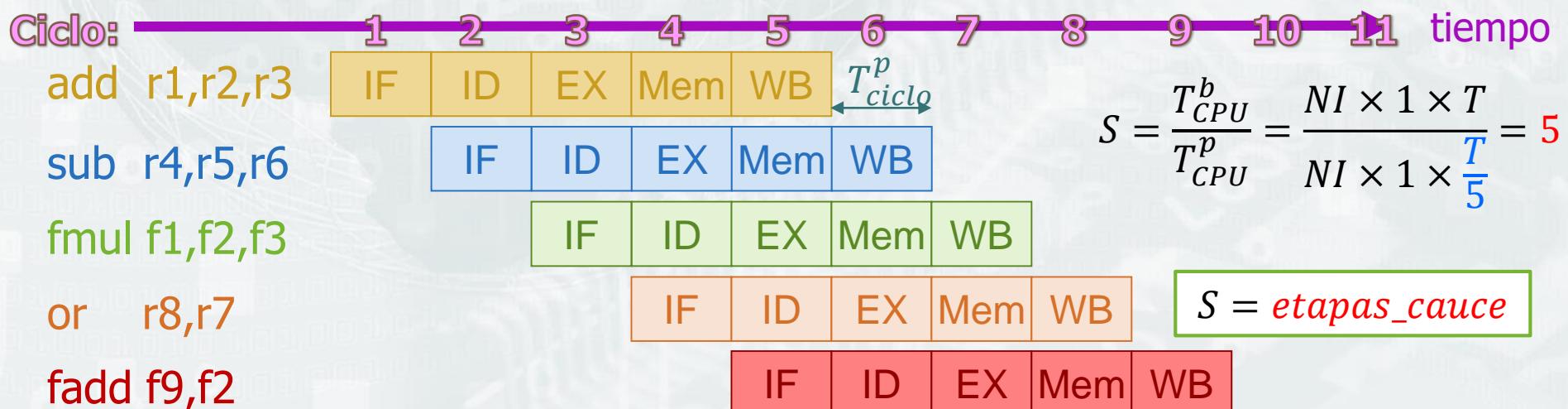
# Mejora en un núcleo de procesamiento: segmentación

Nota Histórica



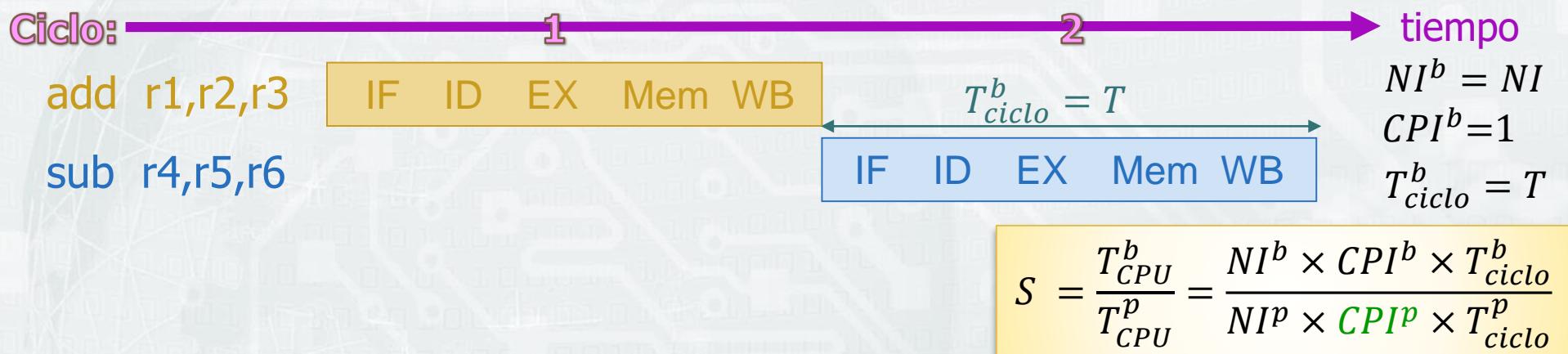
$$S = \frac{T_{CPU}^b}{T_{CPU}^p} = \frac{NI^b \times CPI^b \times T_{ciclo}^b}{NI^p \times CPI^p \times T_{ciclo}^p}$$

Núcleo segmentado en 5 etapas:

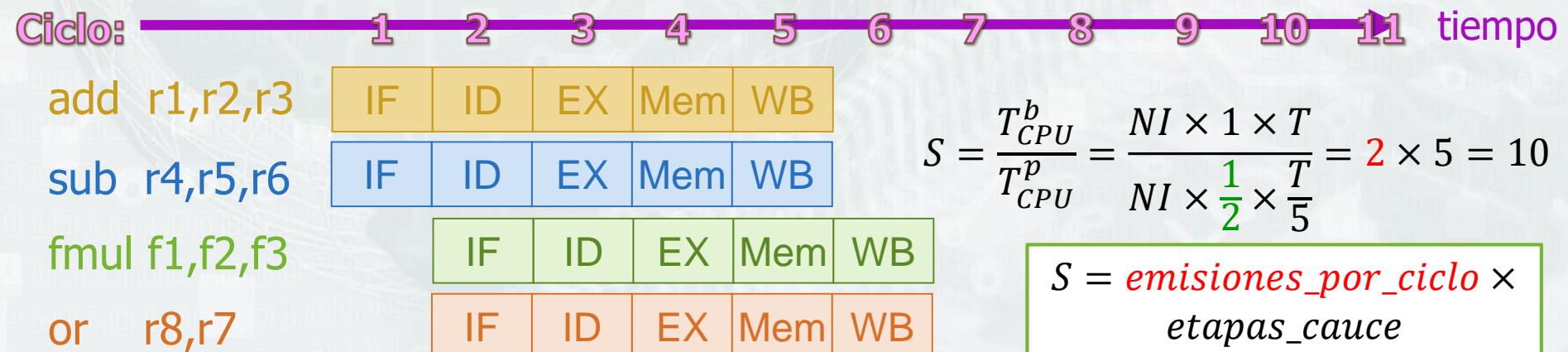


# Mejora en un núcleo de procesamiento: operación superscalar

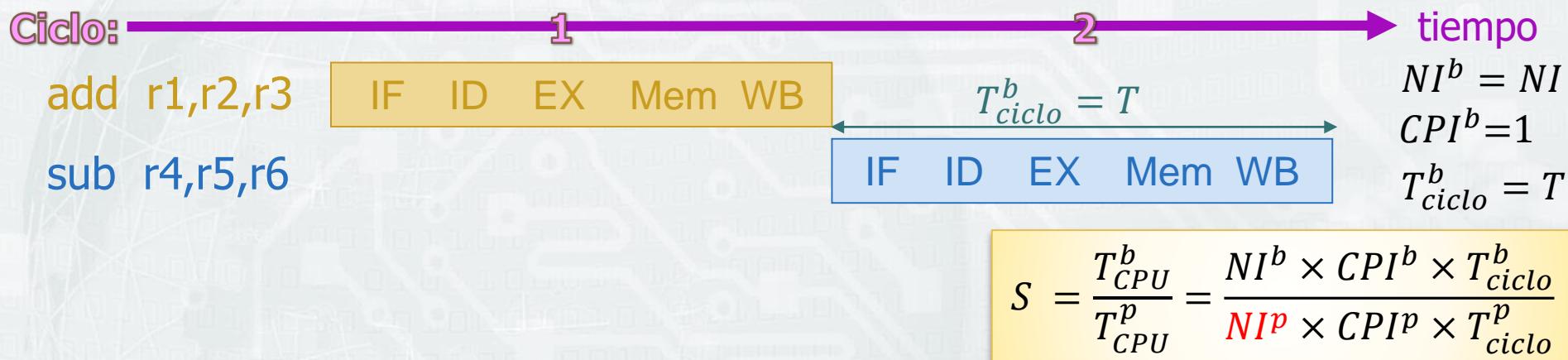
Nota Histórica



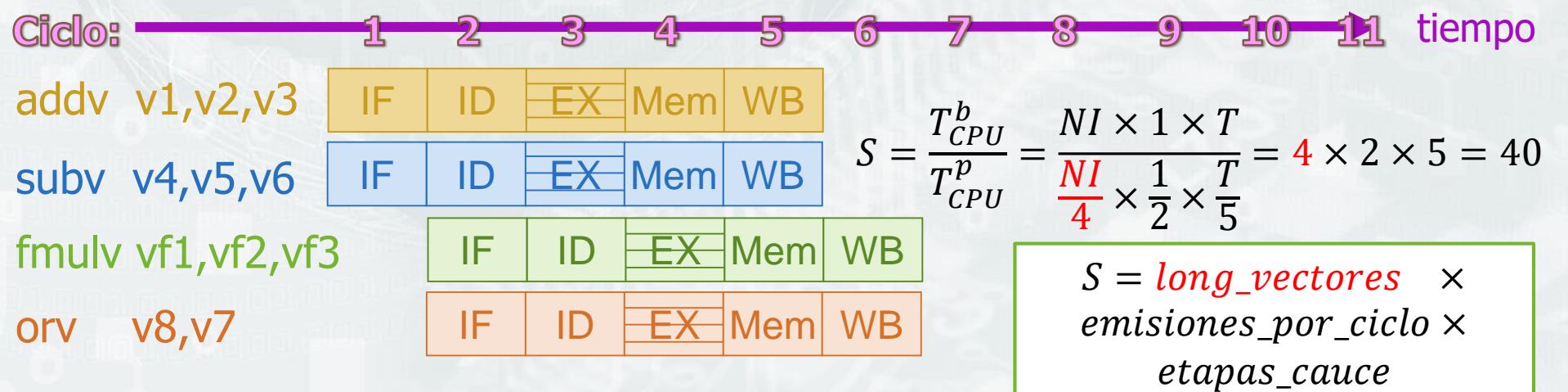
Núcleo superescalar con 2 emisiones por ciclo y 5 etapas:



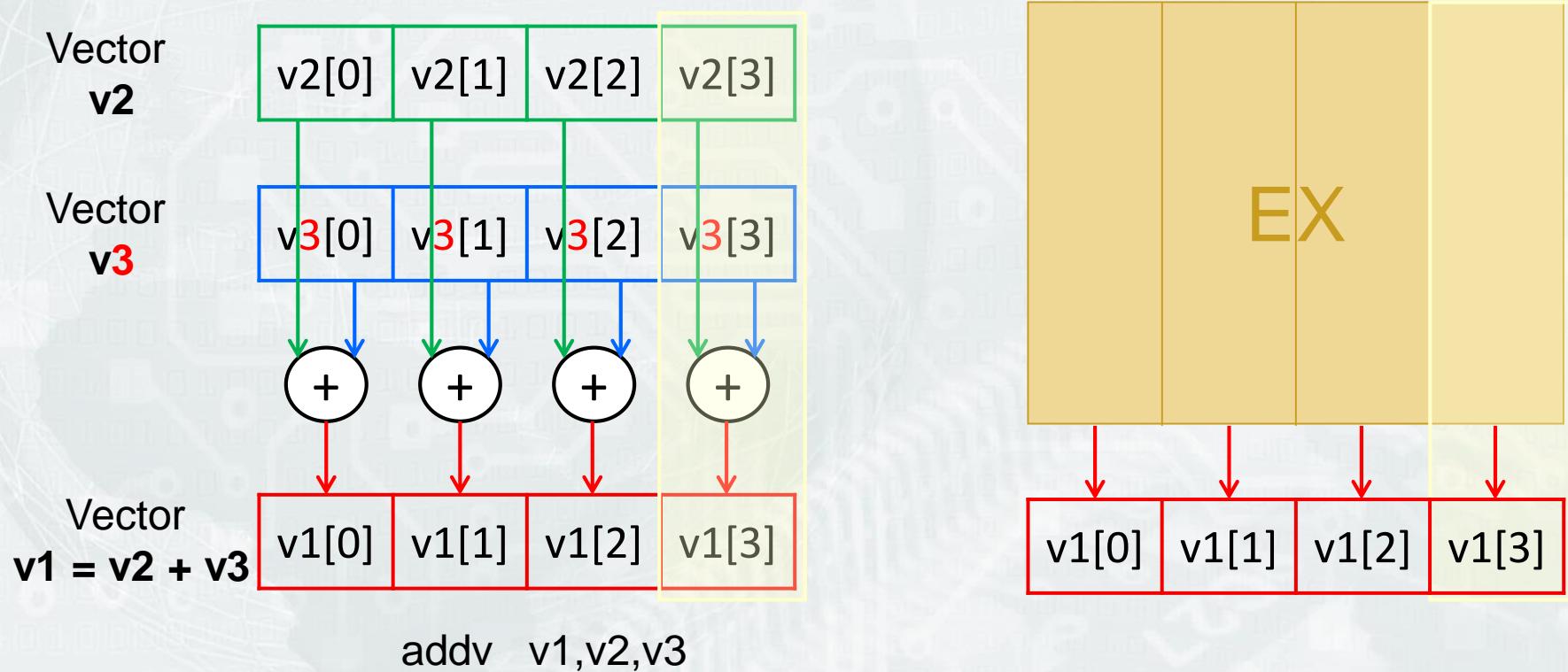
# Mejora en un núcleo de procesamiento: unidades funcionales SIMD



Núcleo superescalar con 2 emisiones por ciclo y 5 etapas, y  
unidades funcionales SIMD (vectoriales) que procesan **vectores de 4 componentes**  
(suponemos el mejor caso: el código genera sólo instrucciones que operan con vectores de 4 comp)



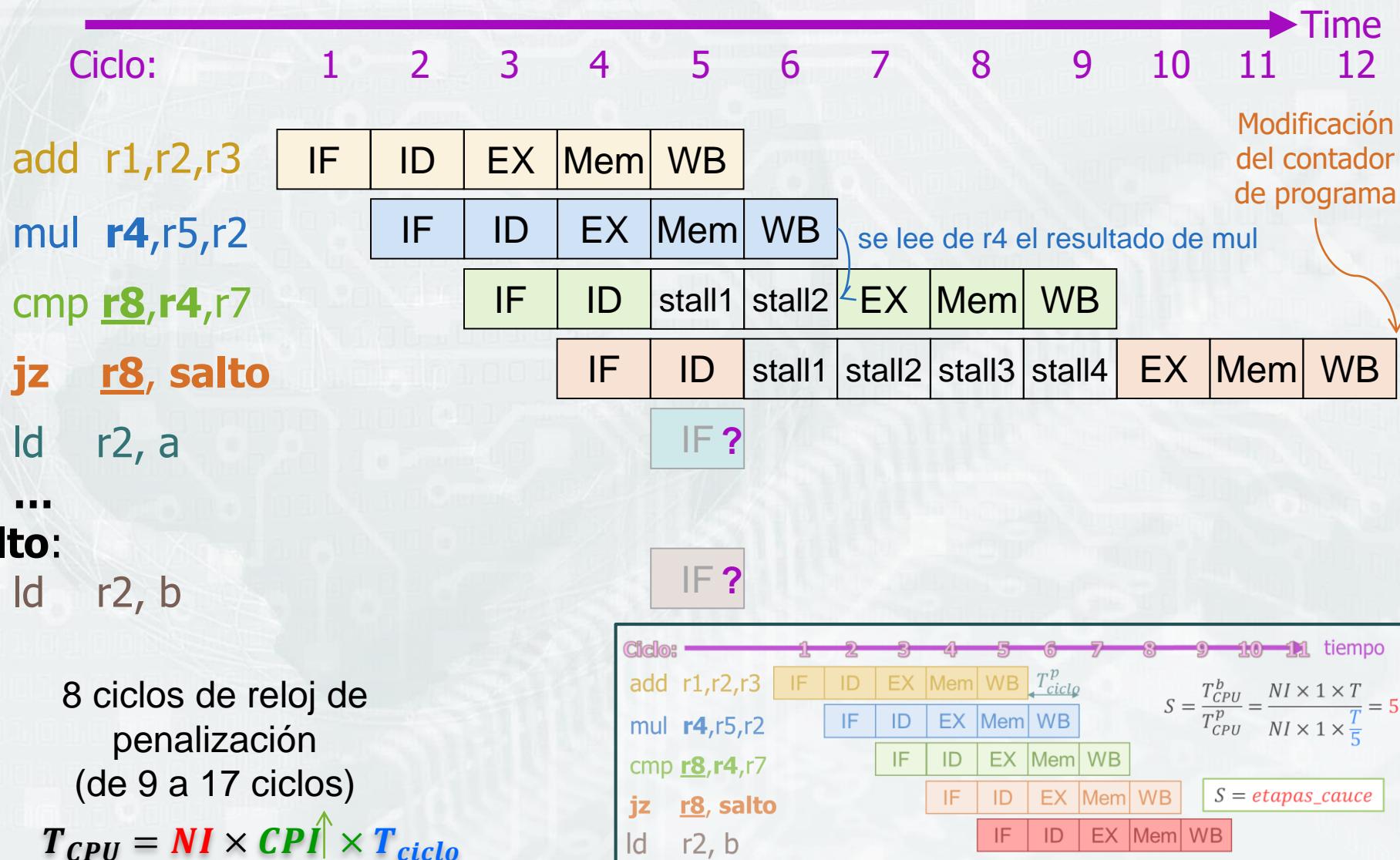
# Paralelismo de datos. Ej: suma de dos vectores



# ¿Qué impide que se pueda obtener la ganancia en velocidad pico?

- Riesgos:
  - Datos
  - Control
  - Estructurales
- Accesos a memoria (debido a la jerarquía)

# Riesgos (*hazards*): de datos, de control



# Riesgos (*hazards*): de datos, de control

Ciclo: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 **13** 14 15 16

add r1,r2,r3      IF ID EX Mem WB

mul r4,r5,r2      IF ID EX Mem WB

IF ID EX Mem WB

IF ID EX Mem WB

cmp r8,r4,r7      IF ID EX Mem WB

nop

nop

jz r8, salto

nop

nop

nop

nop

ld r2, a

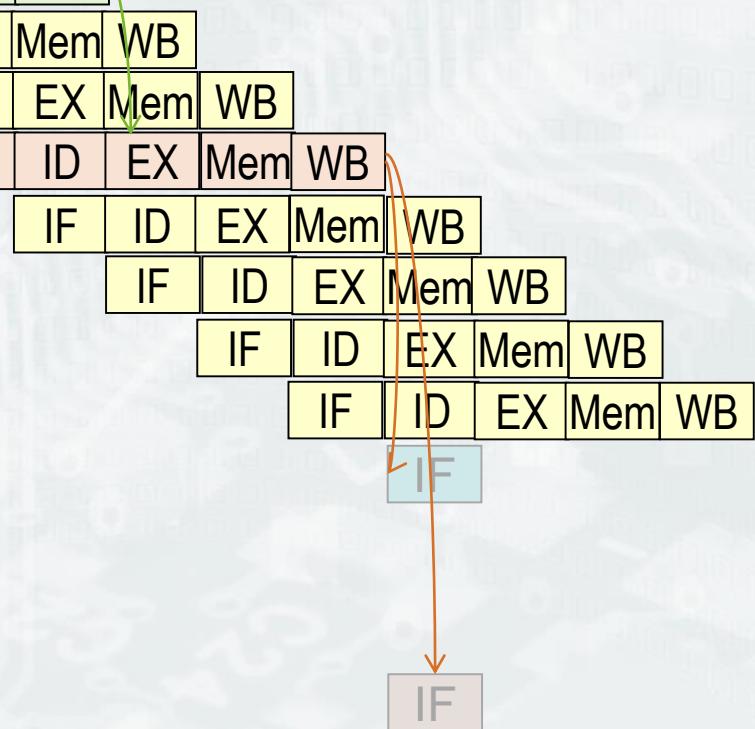
...

**salto:**

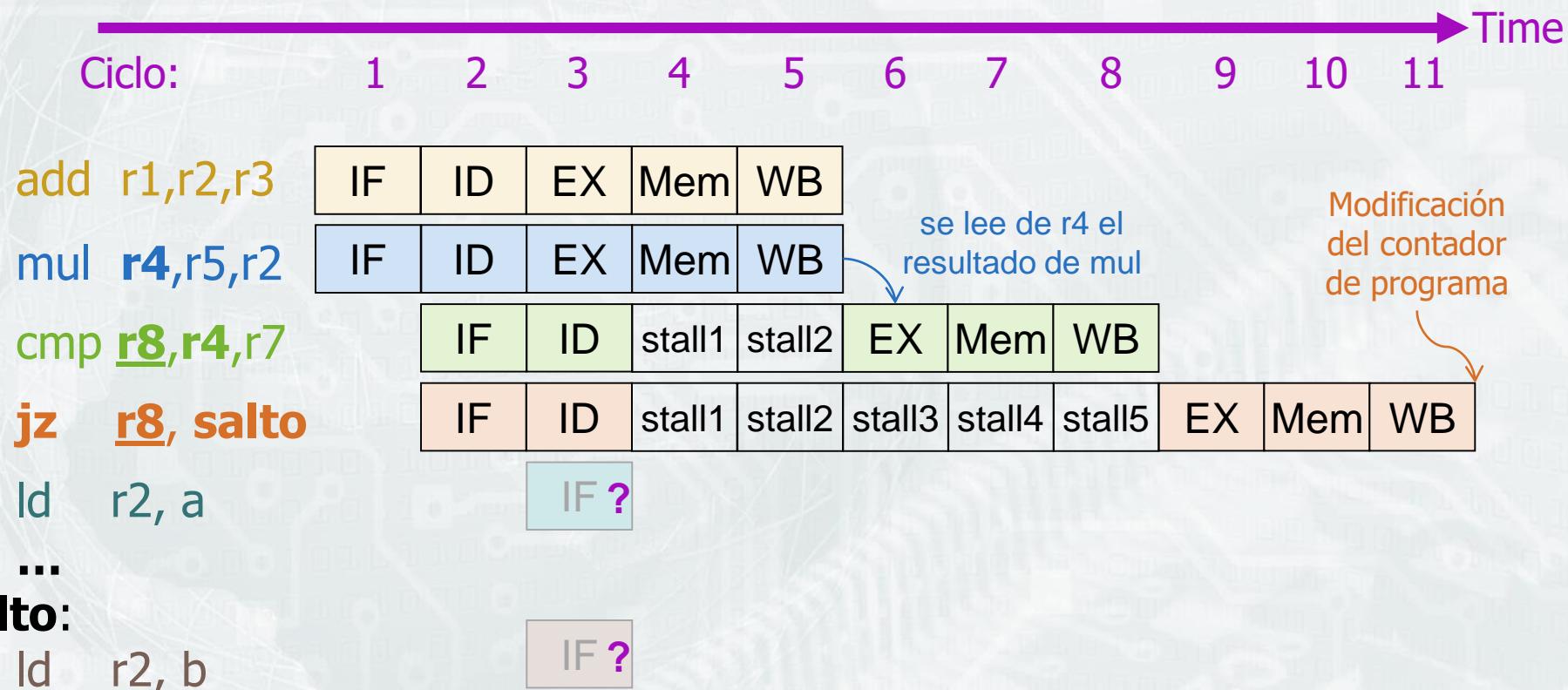
ld r2, b

En un núcleo que no evita problemas por dependencias, el compilador o el programador en ensamblador debe evitarlos (ver instrucciones **nop**)

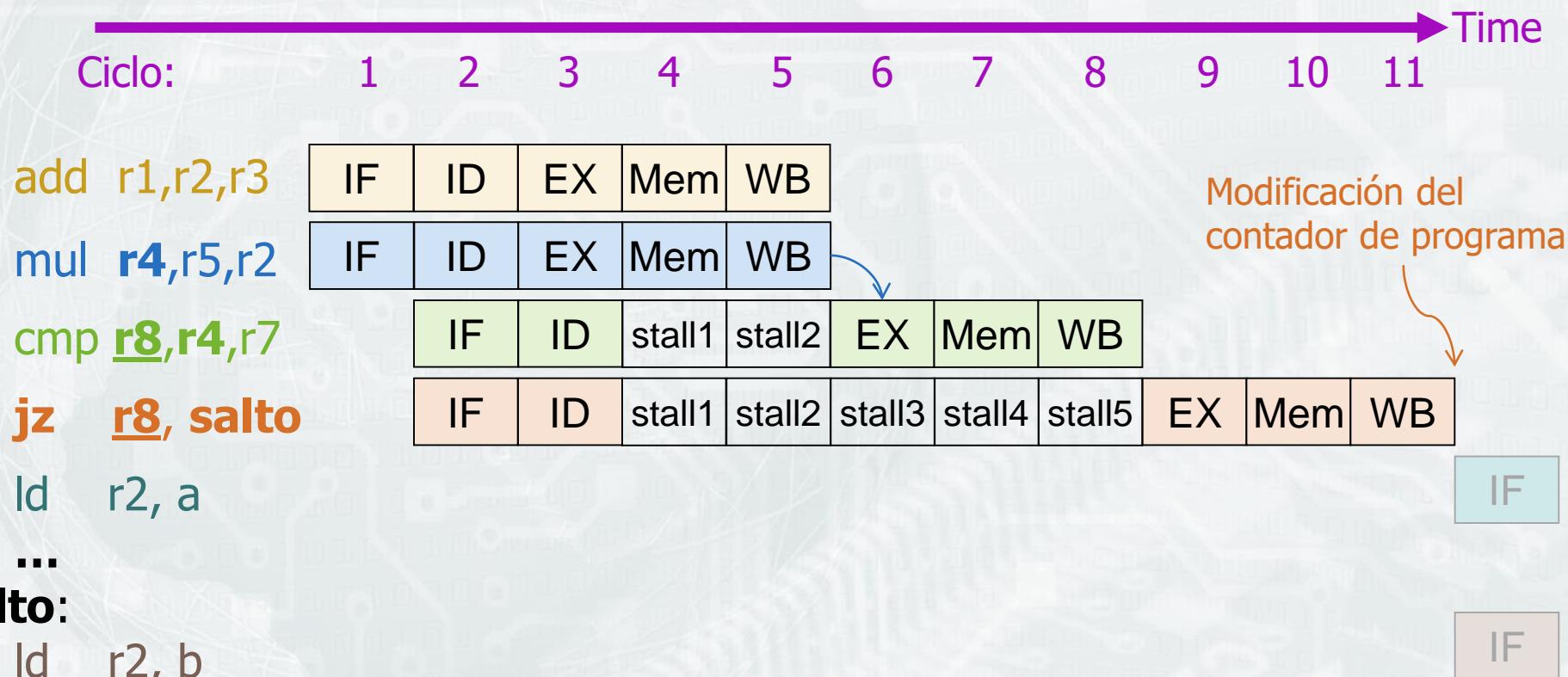
8 ciclos de reloj de penalización  
(de 9 a 17 ciclos)



# Riesgos (*hazards*): de datos, de control

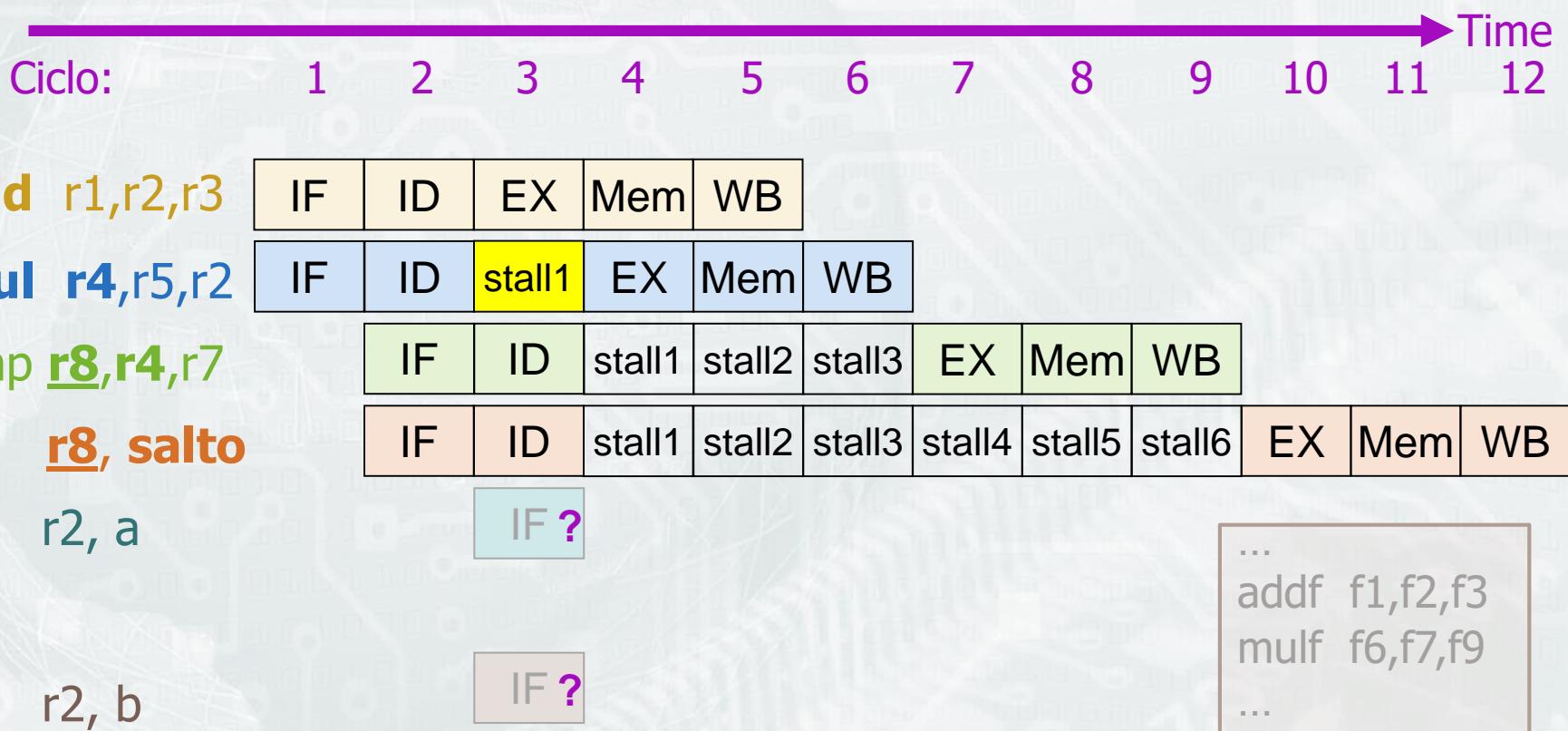


# Riesgos (*hazards*): de datos, de control



9 ciclos de reloj de penalización  
(de 7 a 16)

# Riesgos (*hazards*): de datos, de control, estructural



10 ciclos de reloj de  
penalización  
(de 7 a 17 ciclos)

add y mul usan la misma unidad funcional

# 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:

$$S = \frac{V_p}{V_b} = \frac{T_b}{T_p} \leq \frac{1}{f + \frac{1-f}{p}} = \frac{p}{1 + f(p-1)}$$

$$\xrightarrow{p \rightarrow \infty} \frac{1}{f}$$
$$\xrightarrow{f \rightarrow 0} p$$

$$\begin{array}{c} f \\ \longleftrightarrow \\ T_p \end{array} \quad \frac{T_b}{fT_b}$$
$$\begin{array}{c} 1-f \\ \longleftrightarrow \\ T_b \end{array} \quad \frac{T_b}{T_b/p}$$

donde  $f$  es la fracción del tiempo de ejecución del sistema base (i.e. de la máquina sin la mejora) durante el que no se usa dicha 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

$$\begin{array}{c} f \\ \longleftrightarrow \\ T_b \end{array} \quad \begin{array}{c} f \\ \longleftrightarrow \\ T_p \end{array}$$

$$S = \frac{T_b}{T_p} = \frac{1}{0.75 + \frac{0.25}{2}} \approx 1.14$$

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

# 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
  - Ganancia en prestaciones al realizar una mejora
  - **Conjunto de programas de prueba (*Benchmark*)**

# 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
  - Ej. SPEC CPU2017 (<https://www.spec.org/>): enteros (gcc, perlbench),
- Aplicaciones diseñadas
  - Predicción de tiempo, dinámica de fluidos, animación etc. (p. ej. SPEC2017).