

Grupo ARCOS

**uc3m** | Universidad **Carlos III** de Madrid

# Tema 5

## Jerarquía de Memoria

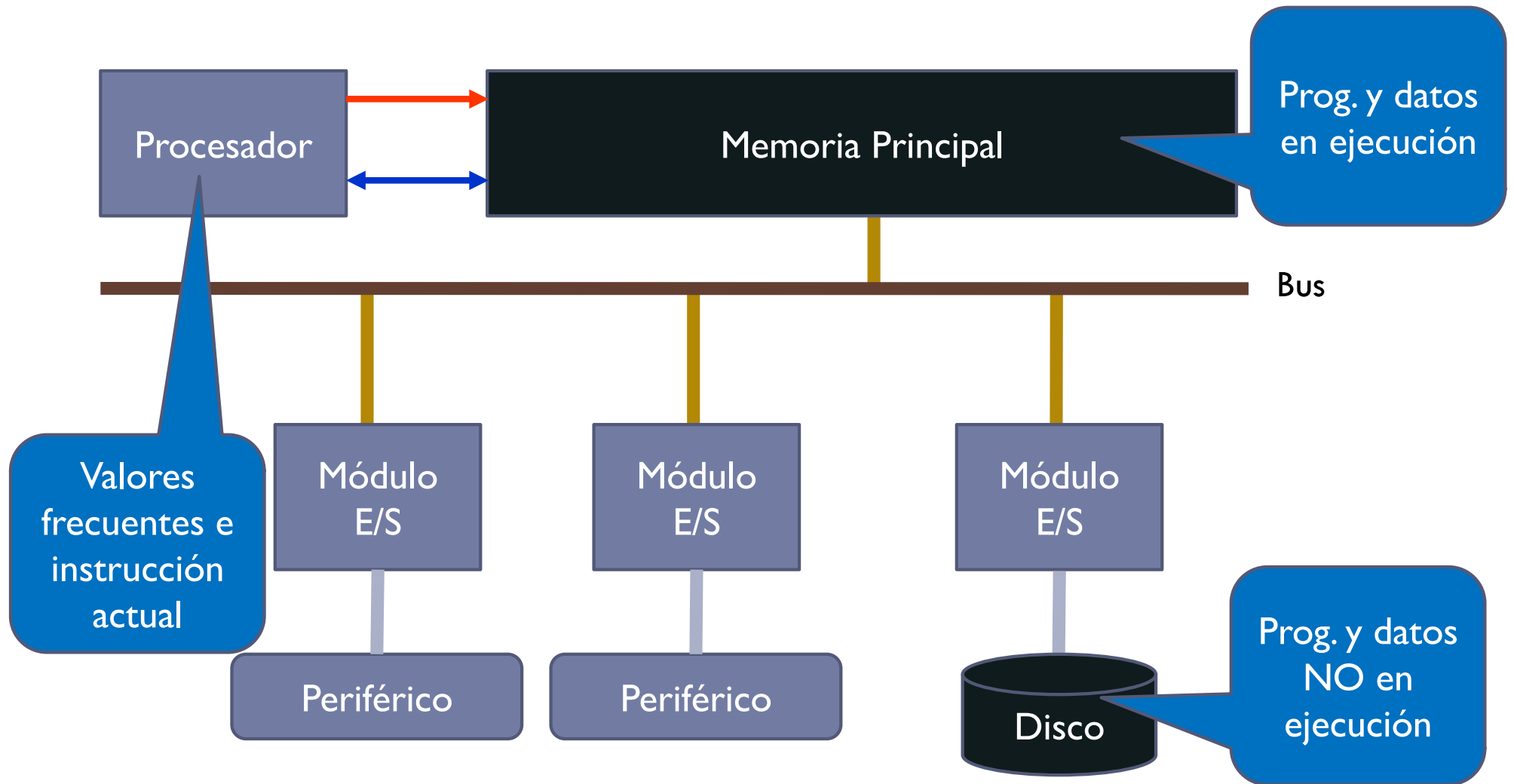
Estructura de Computadores  
Grado en Ingeniería Informática



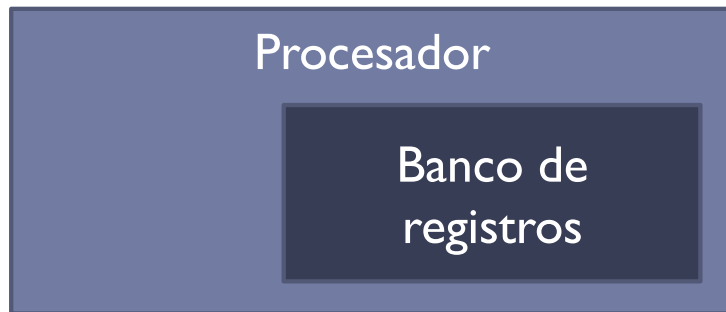
# Contenidos

1. Tipos de memoria
2. Jerarquía de memoria
3. Memoria principal
4. Memoria caché
5. Memoria virtual

# Visión general del computador



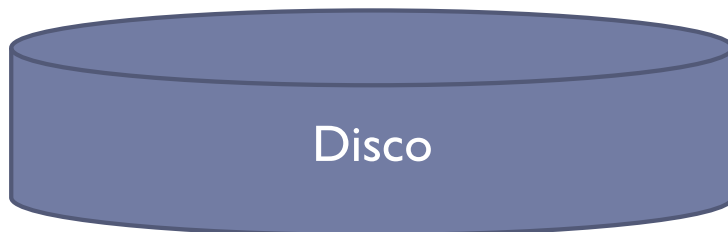
# Tipos de memoria (hasta el momento)



- Almacena pocos datos
- Tiempo de acceso a un registro: orden de ns.



- Más capacidad (GB).
- Tiempo de acceso: 40-100 ns.
  - 1 acceso a memoria = muchos ciclos de reloj

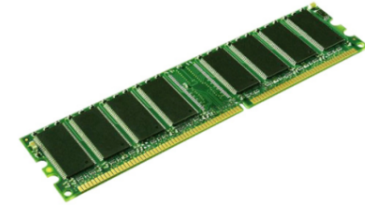


- Capacidad de almacenamiento casi ilimitada.
- Tiempo de acceso lento: orden de milisegundos

# Distintos tipos de dispositivos físicos

- ▶ **Memorias semiconductoras**

- ▶ Circuitos electrónicos
- ▶ Ej.: RAM, ROM y Flash



- ▶ **Memorias magnéticas**

- ▶ Información sobre una superficie magnetizada
- ▶ Ej.: Discos duros y cintas



- ▶ **Memorias ópticas**

- ▶ Información grabada con un láser que genera pequeñas perforaciones sobre una superficie
- ▶ Ej.: CD, DVD y blu-ray

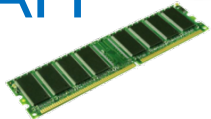


# ¿Dónde se encuentra?

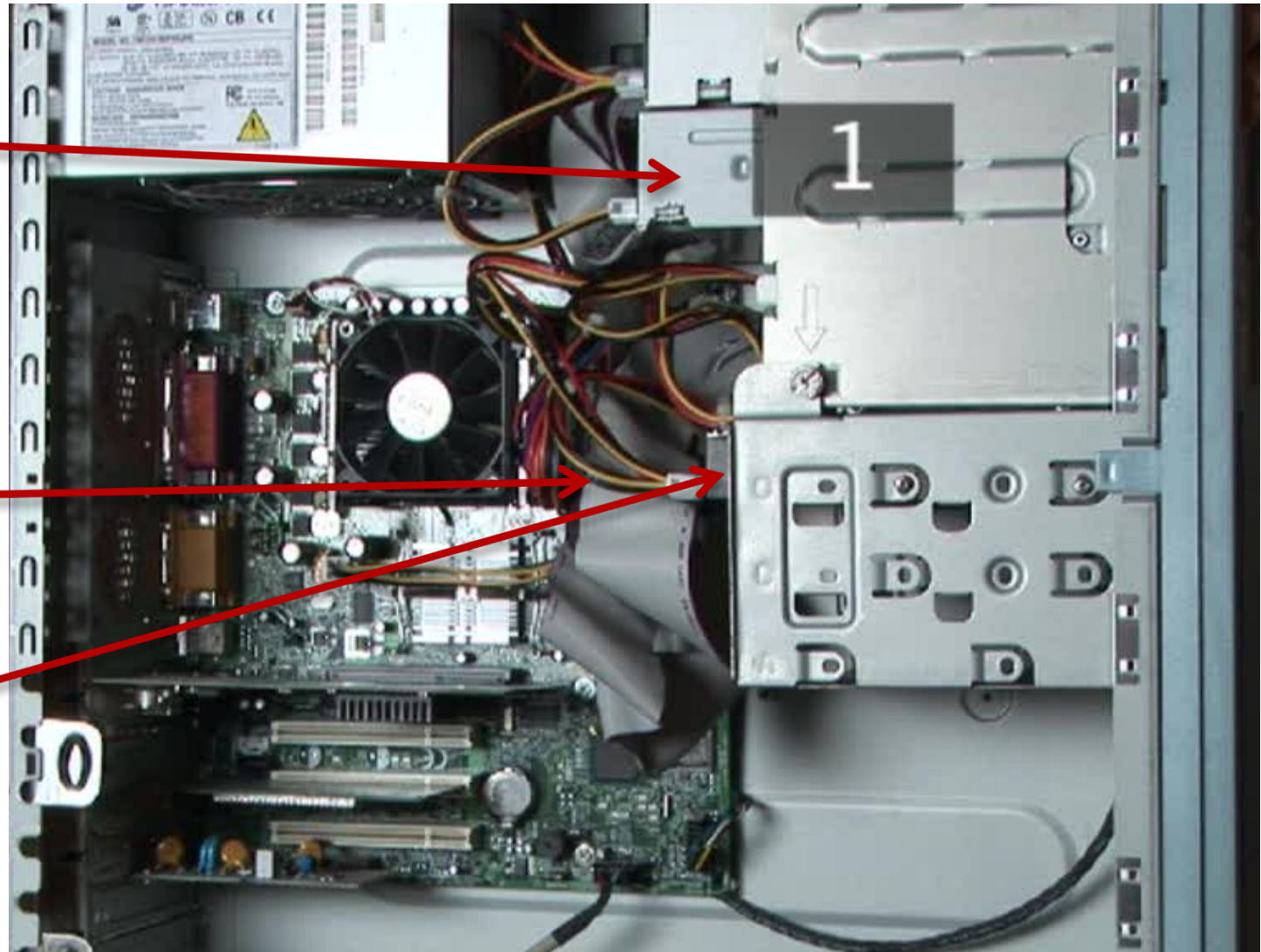
CD-ROM/  
DVD-ROM/  
BluRay/.



Memoria  
RAM



Disco duro



# Principales características

- ▶ **Permanencia de los datos**
  - ▶ Volátiles: RAM
  - ▶ No volátiles: ROM, Flash,
- ▶ **Tipos de operaciones**
  - ▶ Memoria de lectura y escritura (RAM)
  - ▶ Memoria se solo lectura (ROM)
- ▶ **Organización**
  - ▶ Unidad de almacenamiento: bits, palabras, bloques, ...
  - ▶ Modo de acceso:
    - ▶ Secuencial (cinta magnética),
    - ▶ Aleatorio (RAM): se puede acceder en cualquier orden. Mismo tiempo de acceso
- ▶ **Prestaciones**
  - ▶ Tiempo de acceso: tiempo entre presentar dirección y obtener un dato
  - ▶ Ancho de banda o Velocidad de transferencia: cantidad de datos accedidos por unidad de tiempo
- ▶ **Otras**
  - ▶ Capacidad: cantidad de datos que es posible almacenar
  - ▶ Coste: precio por unidad de dato almacenable

# Unidades de tamaño

- ▶ Normalmente se expresa en octetos o bytes:

- ▶ byte            1 byte = 8 bits
- ▶ kilobyte      1 KB = 1.024 bytes       $2^{10}$  bytes
- ▶ megabyte     1 MB = 1.024 KB             $2^{20}$  bytes
- ▶ gigabyte      1 GB = 1.024 MB             $2^{30}$  bytes
- ▶ terabyte      1 TB = 1.024 GB             $2^{40}$  bytes
- ▶ petabyte      1 PB = 1.024 TB             $2^{50}$  bytes
- ▶ exabyte       1 EB = 1.024 PB             $2^{60}$  bytes
- ▶ zettabyte     1 ZB = 1.024 EB             $2^{70}$  bytes
- ▶ yottabyte     1 YB = 1.024 ZB             $2^{80}$  bytes

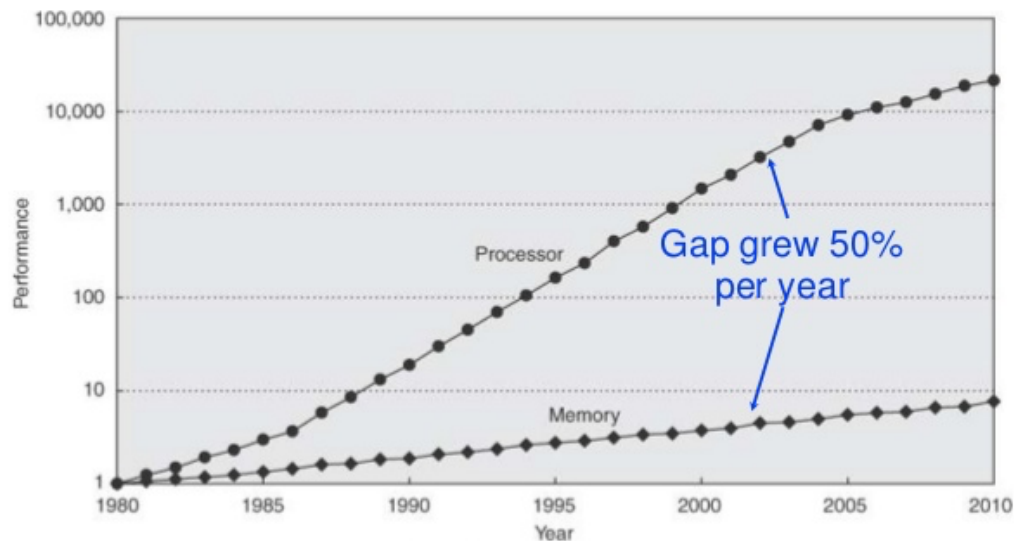


# Unidades de tamaño (cuidado)

- ▶ En **comunicación** se suele usar el kilobit y no el kilobyte (**1 Kb** <> **1 KB**) y potencias de 10
  - ▶ 1 Kb = 1.000 bits
  - ▶ 1 KB = 1.000 bytes
- ▶ En **almacenamiento (discos duros)** algunos fabricantes no utilizan potencias de dos, sino potencias de 10:
  - ▶ kilobyte    1 KB = 1.000 bytes     $10^3$  bytes
  - ▶ megabyte   1 MB = 1.000 KB         $10^6$  bytes
  - ▶ gigabyte    1 GB = 1.000 MB         $10^9$  bytes
  - ▶ terabyte    1 TB = 1.000 GB         $10^{12}$  bytes
  - ▶ .....

# Evolución del rendimiento

- ▶ Procesadores
  - ▶ 1980-2000: Incremento medio del 60% anual.
- ▶ Memorias DRAM
  - ▶ 1980-2000: Incremento medio del 7% anual.
- ▶ La distancia entre memoria y procesador es mayor cada año



Source: Computer Architecture, A Quantitative Approach by John L. Hennessy and David A. Patterson

# Número de accesos a memoria

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

- ¿Cuántos accesos a memoria se generan en este fragmento de memoria?

# Número de accesos a memoria

```
int i;
int s = 0;
for (i=0; i < 1000; i++)
    s = s + i;
i=0;

                                li    $t0, 0    // s
                                li    $t1, 0    // i
                                li    $t2, 1000
bucle: bge    $t1, $t2, fin
        add    $t0, $t0, $t1
        addi   $t1, $t1, 1
        b      bucle
fin:    li     $t1, 0
```

# Número de accesos a memoria

```
int i;
int s = 0;
for (i=0; i < 1000; i++)
    s = s + i;
i=0;

li    $t0, 0    // s
li    $t1, 0    // i
li    $t2, 1000
bucle: bge    $t1, $t2, fin
      add    $t0, $t0, $t1
      addi   $t1, $t1, 1
      b      bucle
fin:   li    $t1, 0
```

**Solución:**  $3 + 4 \times 1000 + 1 + 1 = 4005$

# Número de accesos a memoria

```
int i;
int s = 0;
for (i=0; i < 1000; i++)
    s = s + i;
i=0;

li    $t0, 0    // s
li    $t1, 0    // i
li    $t2, 1000
bucle: bgt    $t1, $t2, fin
      add    $t0, $t0, $t1
      addi   $t1, $t1, 1
      b      bucle
fin:   li    $t1, 1
```

**Solución:**  $3 + 4 \times 1000 + 1 + 1 = 4005$

Con una memoria de 60 ns el tiempo total sería 240300 ns

Un procesador típico dedicaría más del 98% de su tiempo a esperar datos de memoria

# Número de accesos a memoria

```
int v[1000]; // global

int i;
for (i=0; i < 1000; i++)
    v[i] = 0;
```

# Número de accesos a memoria

```
int v[1000]; // global      .data:
                               v: .space 4000

int i;
for (i=0; i < 1000; i++)    .text:
    v[i] = 0;               li    $t0, 0      // i
                               li    $t1, 0      // i de v
                               li    $t2, 1000   // componentes
bucle: bge    $t0, $t2, fin
                               sw     $0, v($t1)
                               addi   $t0, $t0, 1
                               addi   $t1, $t1, 4
                               b       bucle
fin:
```



# Número de accesos a memoria

```
int v[1000]; // global      .data:
                               v: .space 4000

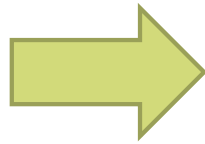
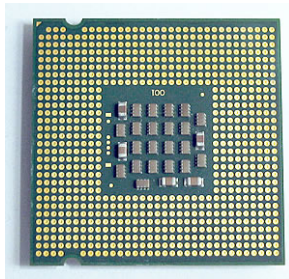
int i;
for (i=0; i < 1000; i++)    .text:
    v[i] = 0;               li    $t0, 0      // i
                               li    $t1, 0      // i de v
                               li    $t2, 1000   // componentes
bucle: bgt    $t0, $t2, fin
                               sw     $0, v($t1)
                               addi   $t0, $t0, 1
                               addi   $t1, $t1, 4
                               b       bucle
```

**Solución:**  $3 + 5 \times 1000 + 1 + 1000$  (acceso adicional de sw) =  
**6004**

# Contenidos

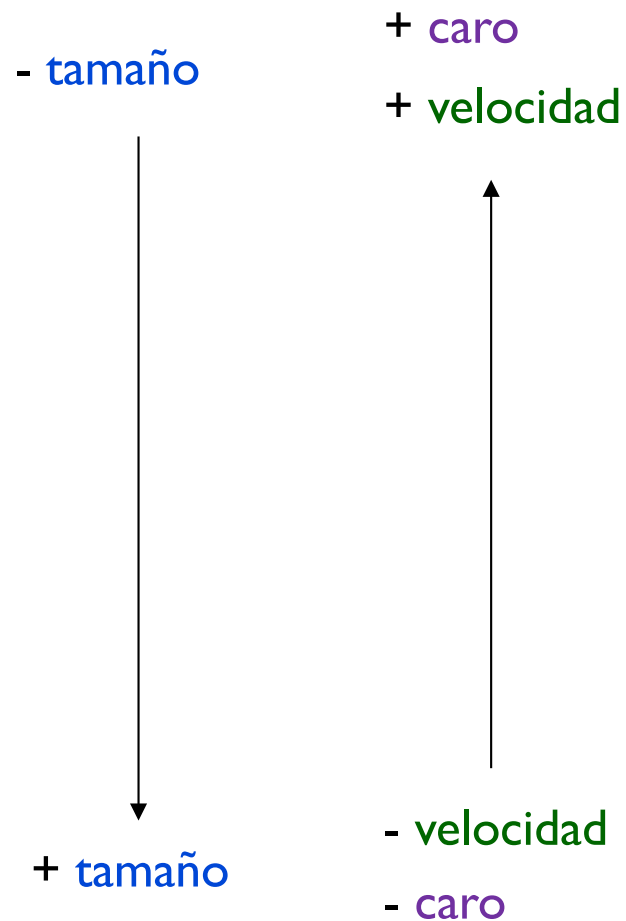
1. Tipos e memoria
2. Jerarquía de memoria
3. Memoria principal
4. Memoria caché
5. Memoria virtual

# ¿Cómo sería el sistema de memoria ideal?



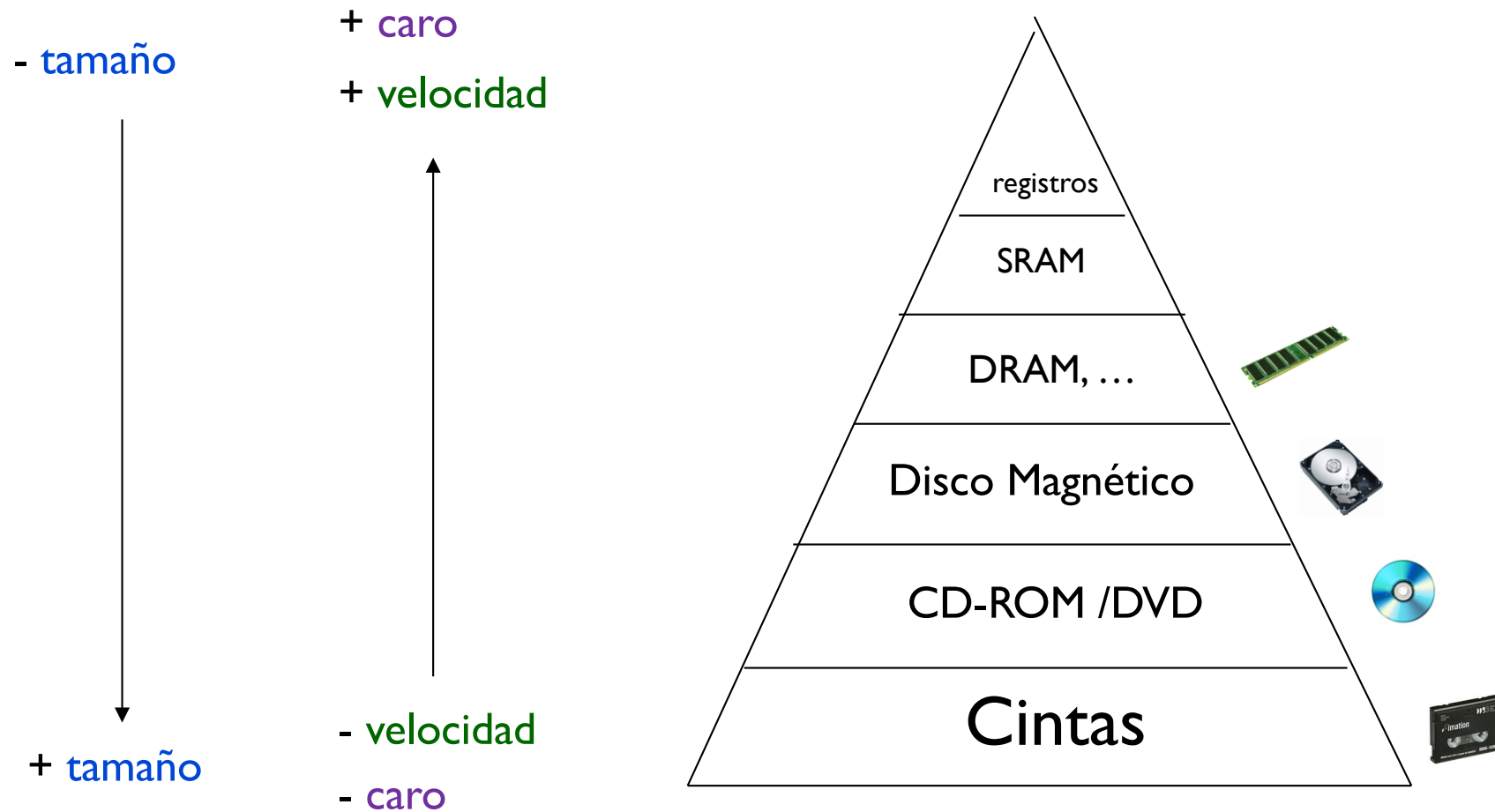
- ▶ Minimiza tiempo de acceso
- ▶ Maximiza la capacidad
- ▶ Minimiza el coste

# Realidad



- ▶ Objetivos **incompatibles** entre si:
  - ▶ + velocidad ➡ - tamaño
- ▶ Se usan distintos tipos de memoria:
  - ▶ DRAM, Disco Duro, ...
- ▶ Se organizan los distintos tipos de memoria por velocidad de acceso:
  - ▶ **Jerarquía de memoria**

# Jerarquía de memoria



# Uso de la jerarquía de memoria: diferentes tiempos de acceso

- ▶ T. acceso a registro

- ▶ ~1 ns

La biblioteca de la UC3M...

- ▶ T. acceso a SRAM

- ▶ ~2-5 ns

La biblioteca de la UPC...

- ▶ T. acceso a DRAM

- ▶ ~70-100 ns

Una biblioteca en Florida...

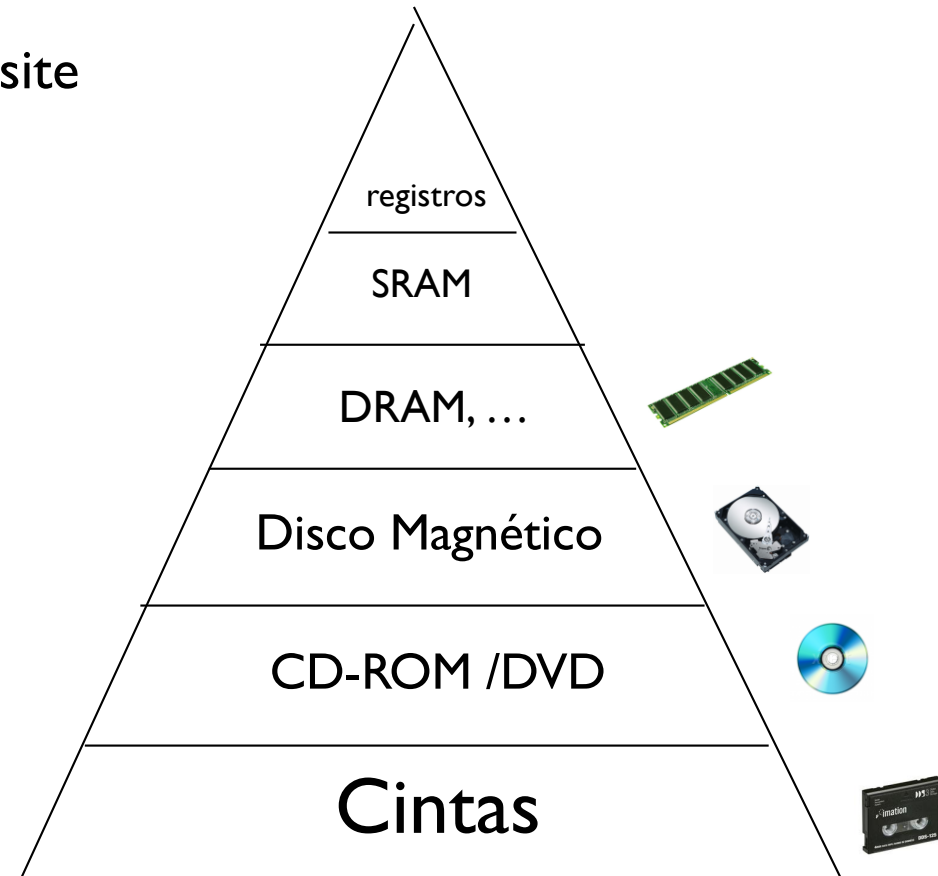
# Comparación

Technology	Bytes per Access (typ.)	Latency per Access	Cost per Megabyte <sup>a</sup>	Energy per Access
On-chip Cache	10	100 of picoseconds	\$1–100	1 nJ
Off-chip Cache	100	Nanoseconds	\$1–10	10–100 nJ
DRAM	1000 (internally fetched)	10–100 nanoseconds	\$0.1	1–100 nJ (per device)
Disk	1000	Milliseconds	\$0.001	100–1000 mJ

Memory Systems  
Cache, DRAM, Disk  
Bruce Jacob, Spencer Ng, David Wang  
Elsevier

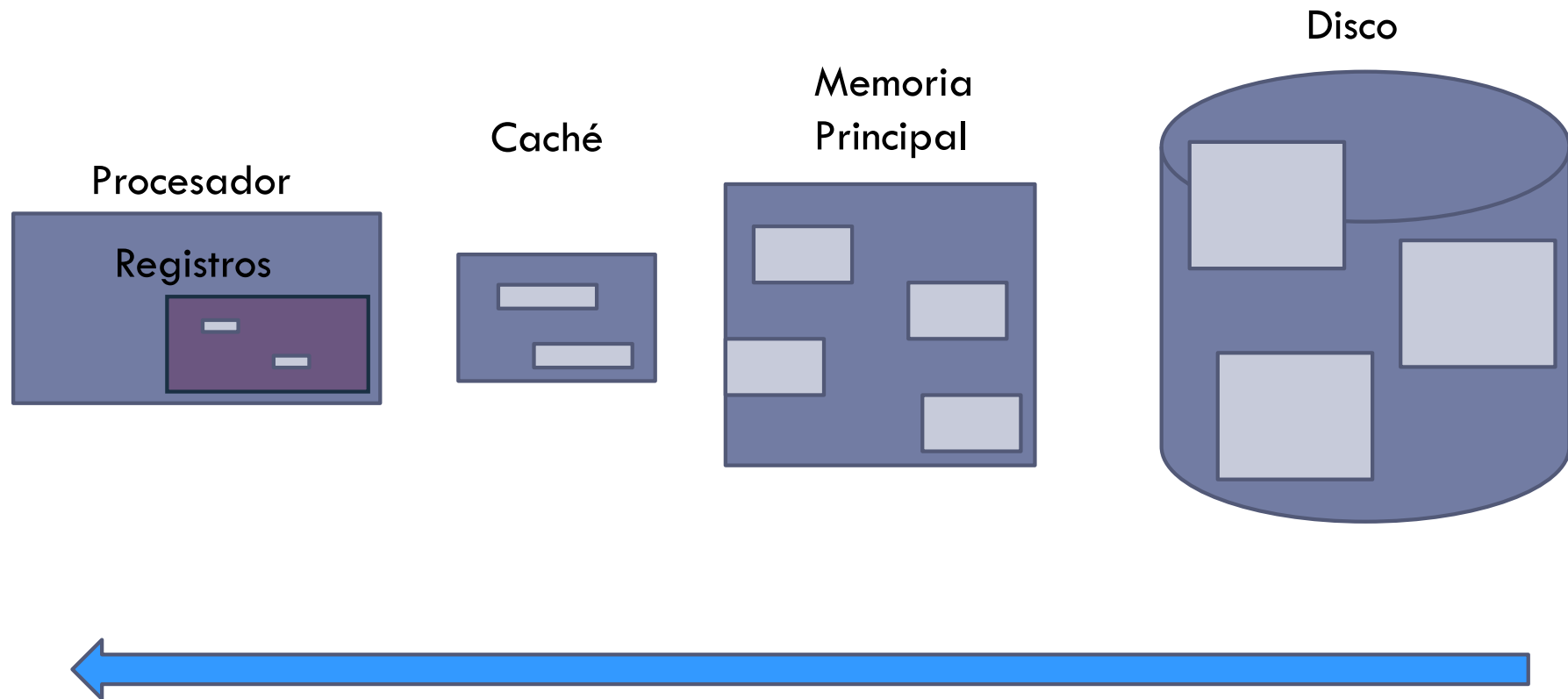
# Uso de la jerarquía de memoria

- ▶ Solo en memoria lo que se necesite en un instante dado.
- ▶ Si no está, se copia de un nivel a otro la porción necesaria:
  - ▶ Ej.: cargar un programa en RAM
- ▶ Cuando no se necesite, se borra la copia realizada.
- ▶ El comportamiento de los accesos lo favorece:
  - ▶ Proximidad de referencias





# Idea de la jerarquía de memoria



# Diseño de la jerarquía de memoria

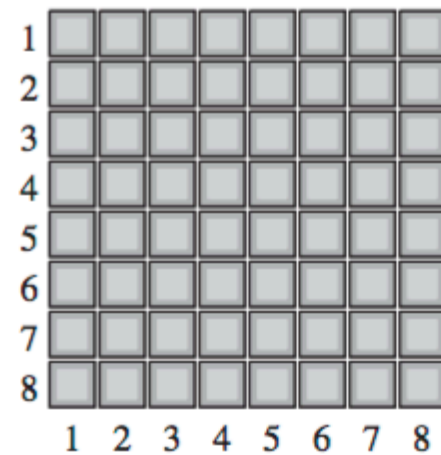
- ▶ El diseño de la jerarquía de memoria es crucial en procesadores multicore
- ▶ El ancho de banda crece con el número de cores
  - ▶ Un Intel Core i7 genera dos accesos a memoria por core y por ciclo de reloj
  - ▶ Con 4 cores y 3.2 GHz de frecuencia de reloj
    - ▶ 25.6 billones de accesos a datos de 64 bit/segundo +
    - ▶ 12.8 billones de accesos de 128 bits para instrucciones =
    - ▶ = 409.6 GB/s
  - ▶ Una memoria DRAM solo ofrece un 6% (25GB/s)
  - ▶ Se requiere:
    - ▶ Memorias multi puerto
    - ▶ Niveles de memoria caché

# Memorias de semiconductores

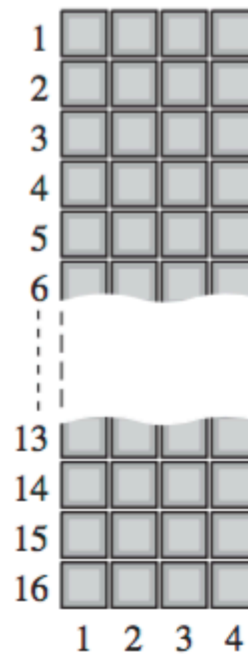
- ▶ **Memoria de solo lectura (ROM)**
  - ▶ No necesita alimentación
  - ▶ Persistente
  - ▶ Ejemplo de uso: BIOS
- ▶ **Memoria de lectura/escritura (RAM)**
  - ▶ Necesita alimentación
  - ▶ No persistente
  - ▶ Más rápida que la ROM
  - ▶ Ejemplo de uso: memoria principal

# Matriz de memoria semiconductor

- Cada **celda** almacena un 1 o un 0



(a) Matriz  $8 \times 8$



(b) Matriz  $16 \times 4$

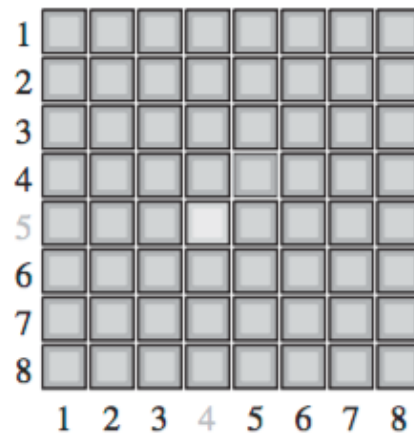


(c) Matriz  $64 \times 1$

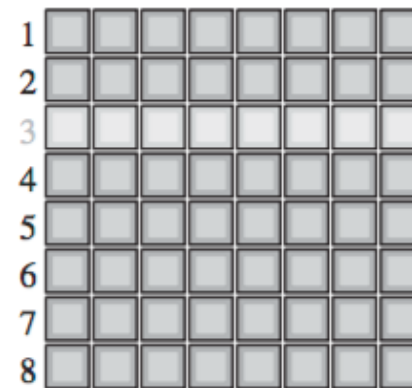
Fundamentos de Sistemas Digitales  
Thomas L. Floyd

# Direcciones y capacidad

- Dirección: posición de una unidad de datos en la matriz de memoria



(a) La dirección del bit gris claro es fila 5, columna 4.

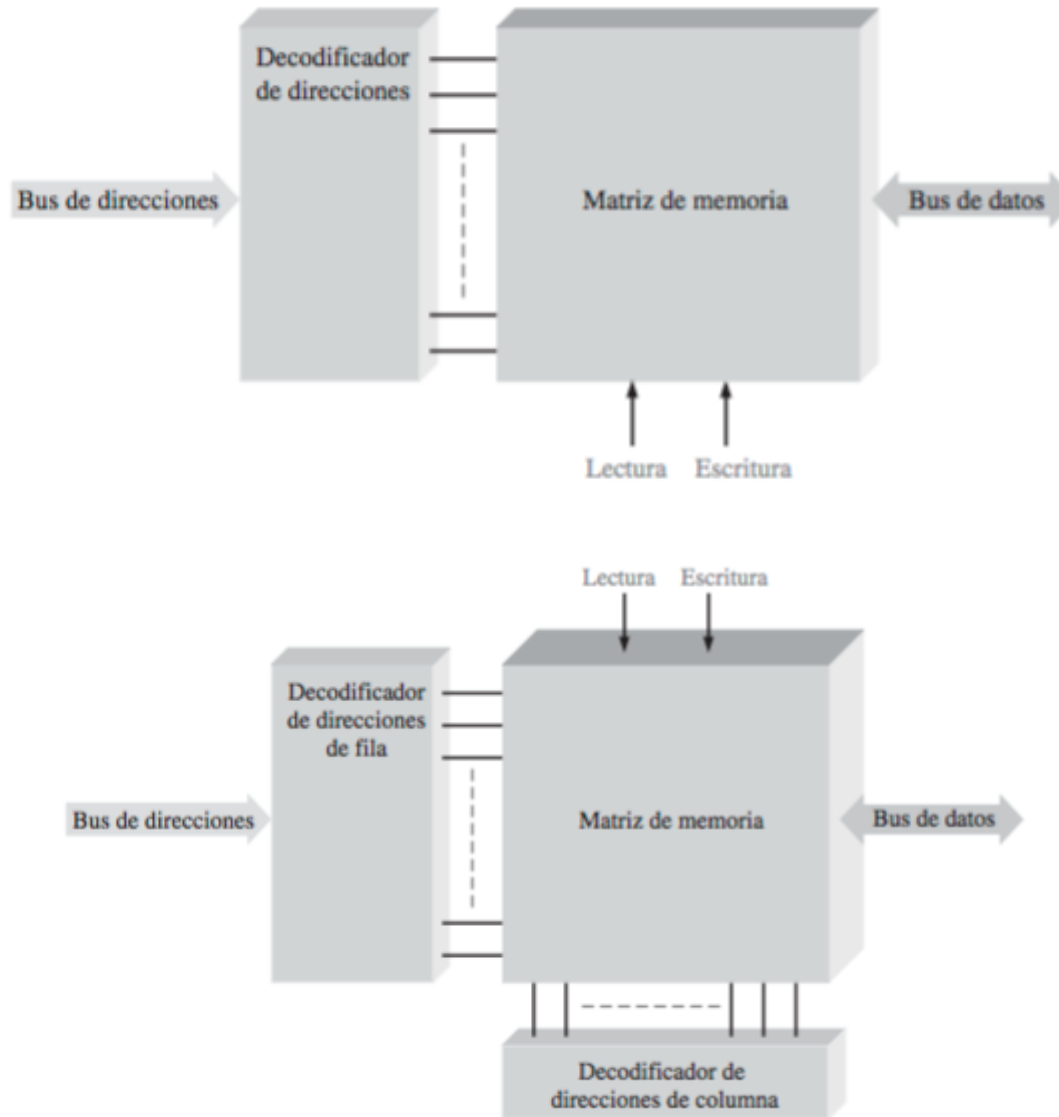


(b) La dirección del byte gris claro es la fila 3.

Fundamentos de Sistemas Digitales  
Thomas L. Floyd

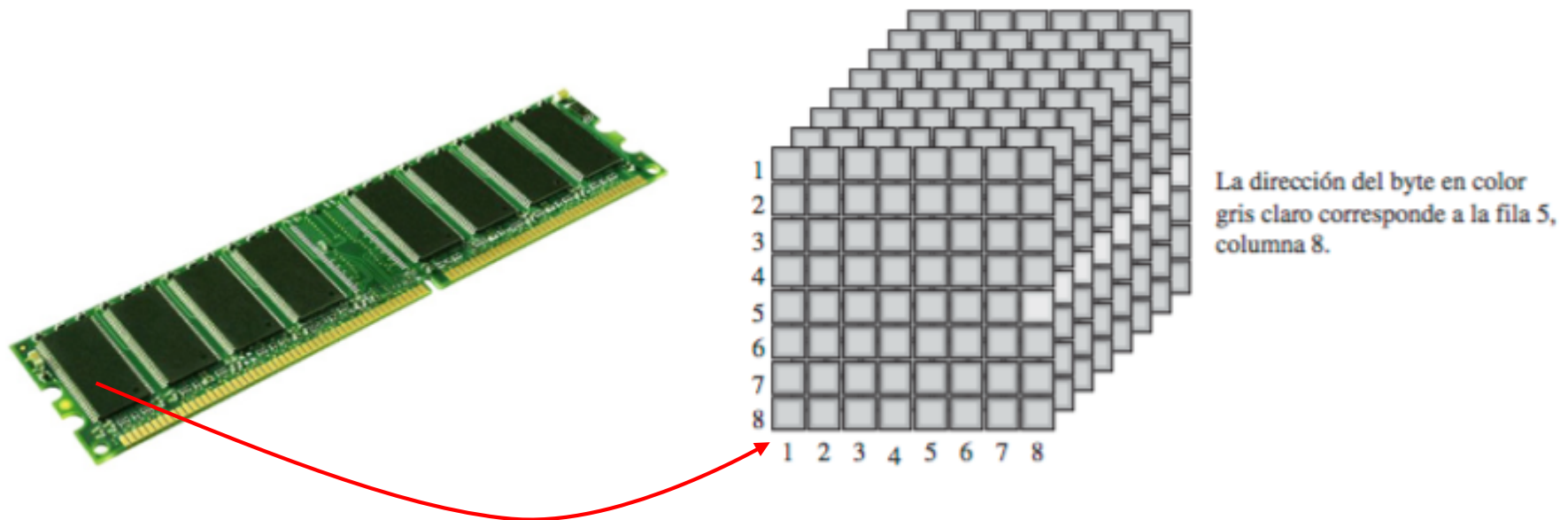
- Capacidad: número total de unidades de datos que se pueden almacenar

# Tipos de direccionamientos

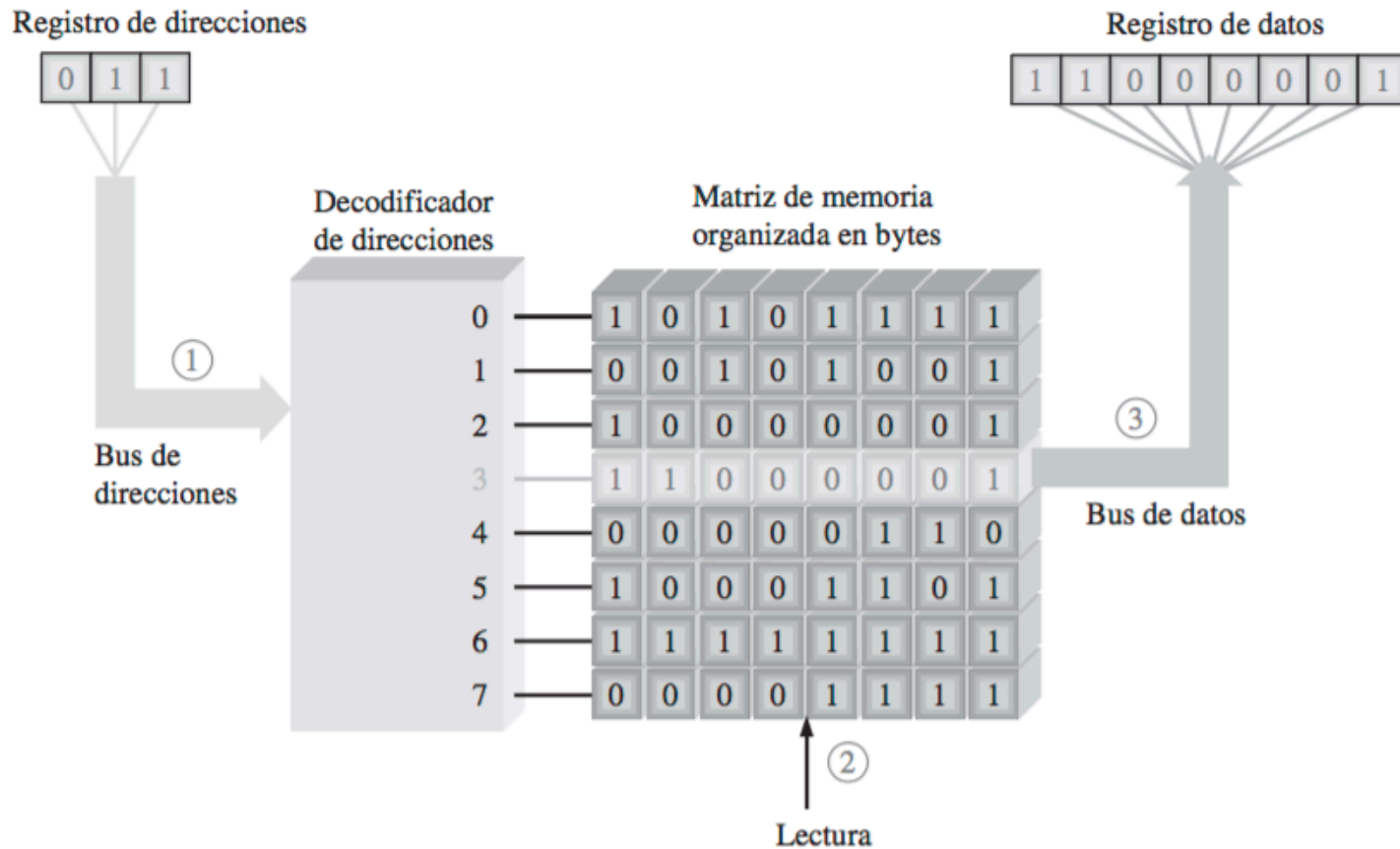


Fundamentos de Sistemas Digitales  
Thomas L. Floyd

# Ejemplo de organización



# Operación de lectura



Fundamentos de Sistemas Digitales  
Thomas L. Floyd

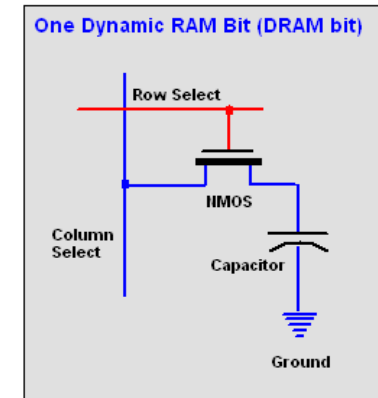


# Memoria RAM (memorias de acceso aleatorio)

From Computer Desktop Encyclopedia  
© 2005 The Computer Language Co. Inc.

## ▶ RAM dinámica (DRAM)

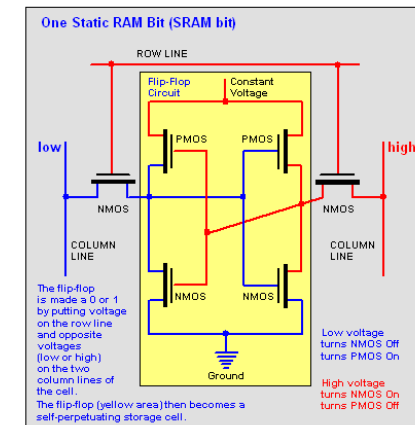
- ▶ Almacena bits como carga en condensadores.
- ▶ Tiende a descargarse: necesita refrescos periódicos.
  - ▶ Ventaja: construcción más simple, **más almacenamiento**, más económica
  - ▶ Inconveniente: necesita circuitería de refresco, **más lenta**.
    - 2%-3% de los ciclos de reloj consume el refresco
  - ▶ Utilizada en memorias principales



From Computer Desktop Encyclopedia  
© 2005 The Computer Language Co. Inc.

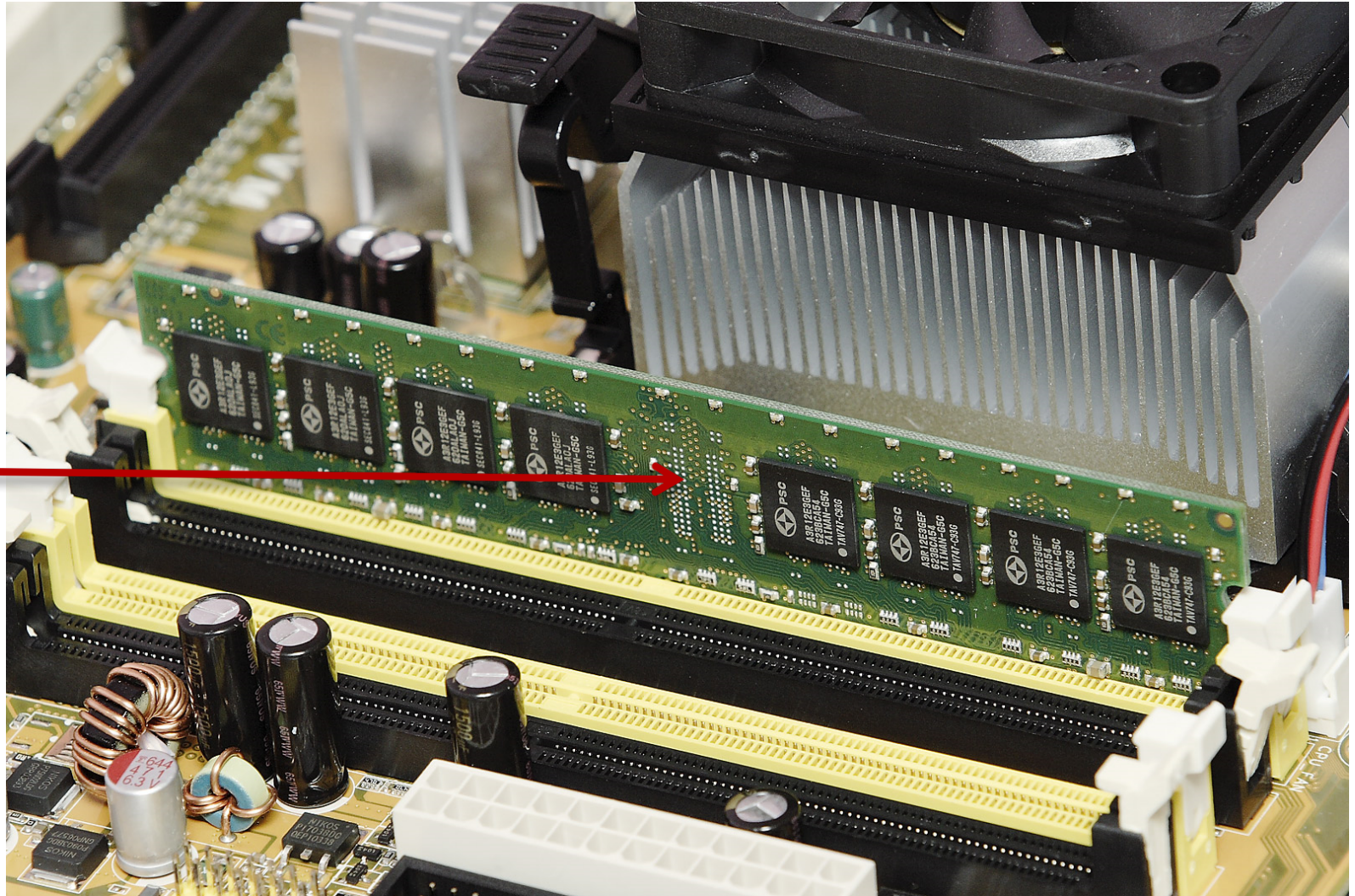
## ▶ RAM estática (SRAM)

- ▶ Almacena bits como interruptores en *on* y *off*.
- ▶ Tiende a no descargarse: **no** necesita refresco.
  - ▶ Ventaja: No necesita circuitería de refresco, **más rápida**.
  - ▶ Inconveniente: Construcción compleja, **menos almacenamiento**, más cara.
  - ▶ Utilizada en memorias cachés

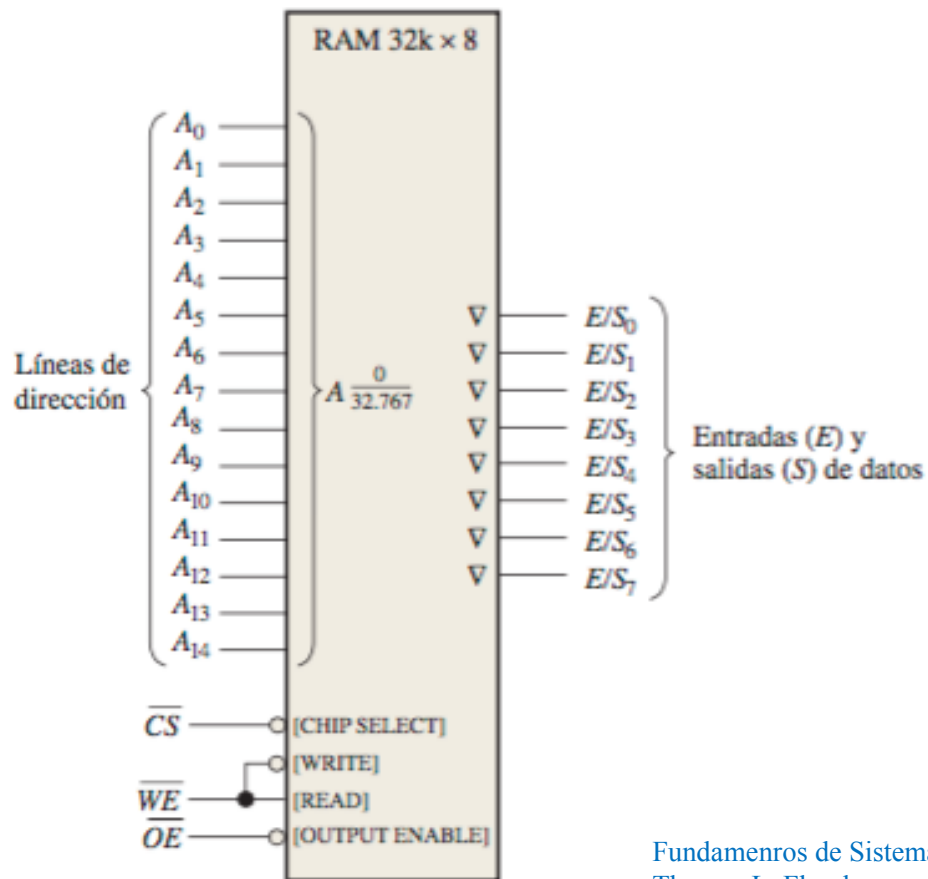


# ¿Dónde se encuentra la memoria DRAM?

Memoria  
DRAM

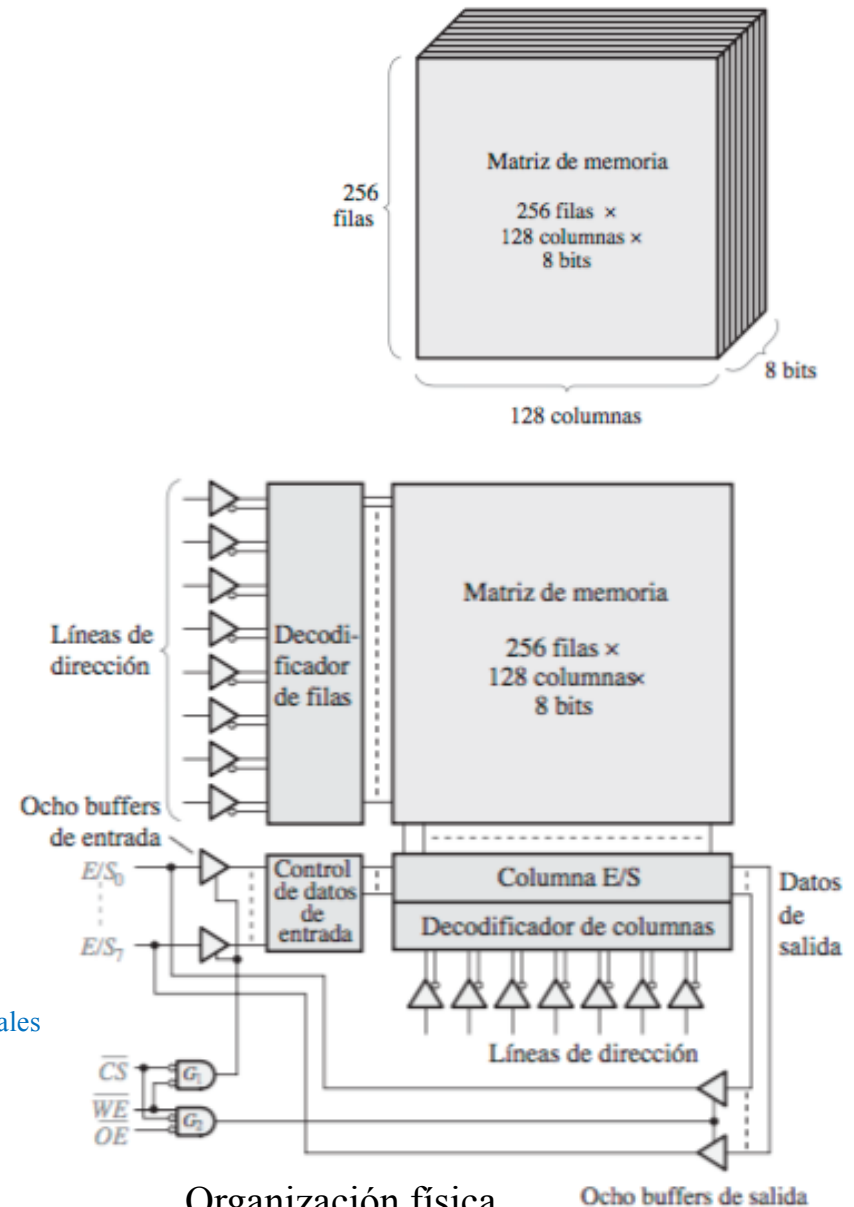


# Ejemplo de memoria SRAM



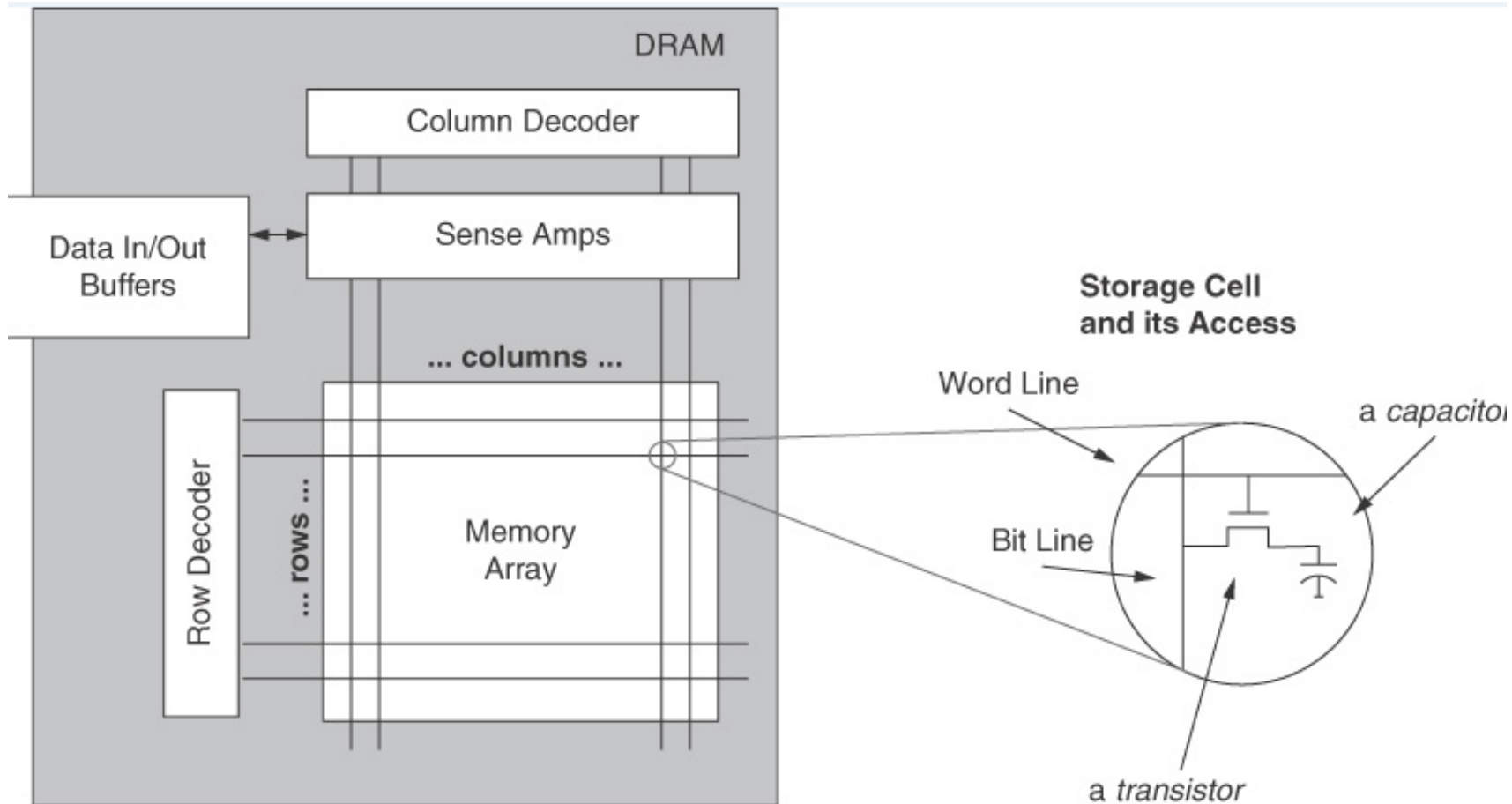
Organización lógica

Fundamentos de Sistemas Digitales  
Thomas L. Floyd



Organización física

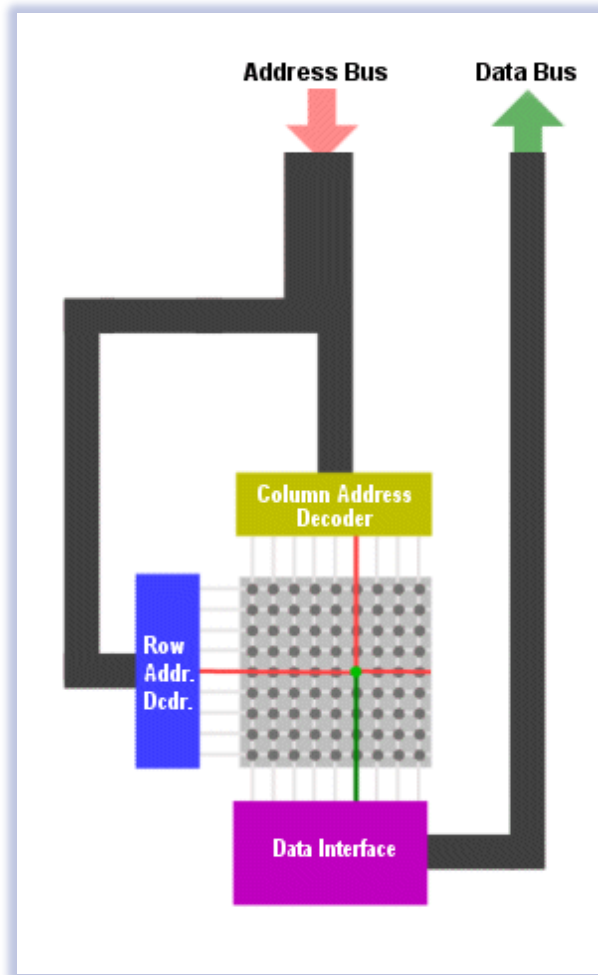
# Estructura de una memoria DRAM



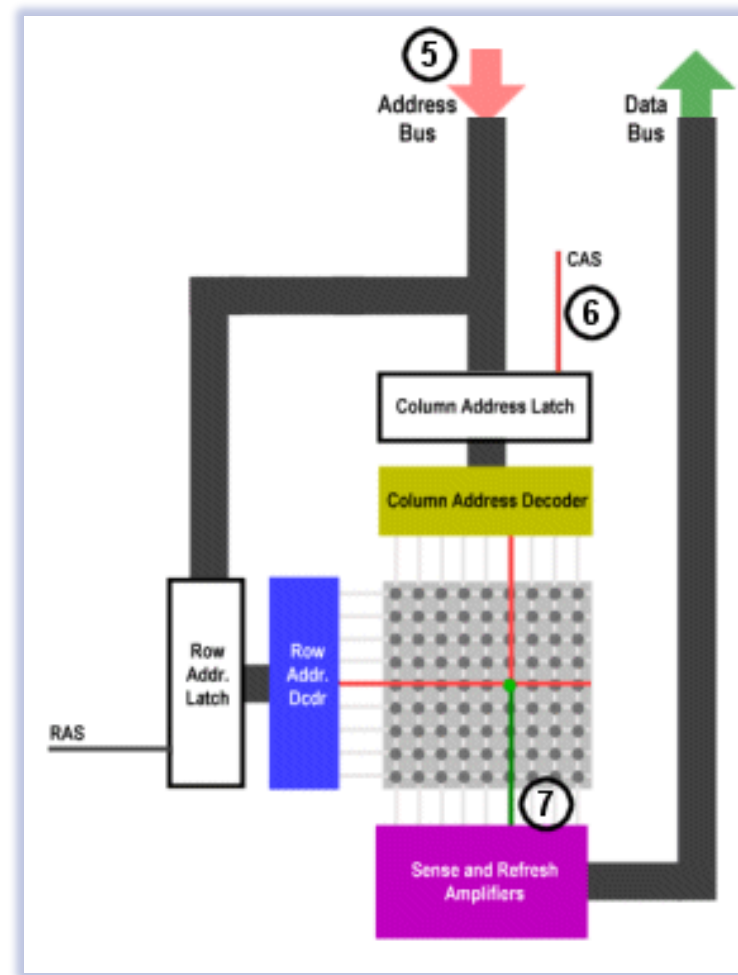
Memory Systems  
Cache, DRAM, Disk  
Bruce Jacob, Spencer Ng, David  
Wang  
Elsevier



# Multiplexación de direcciones en DRAM

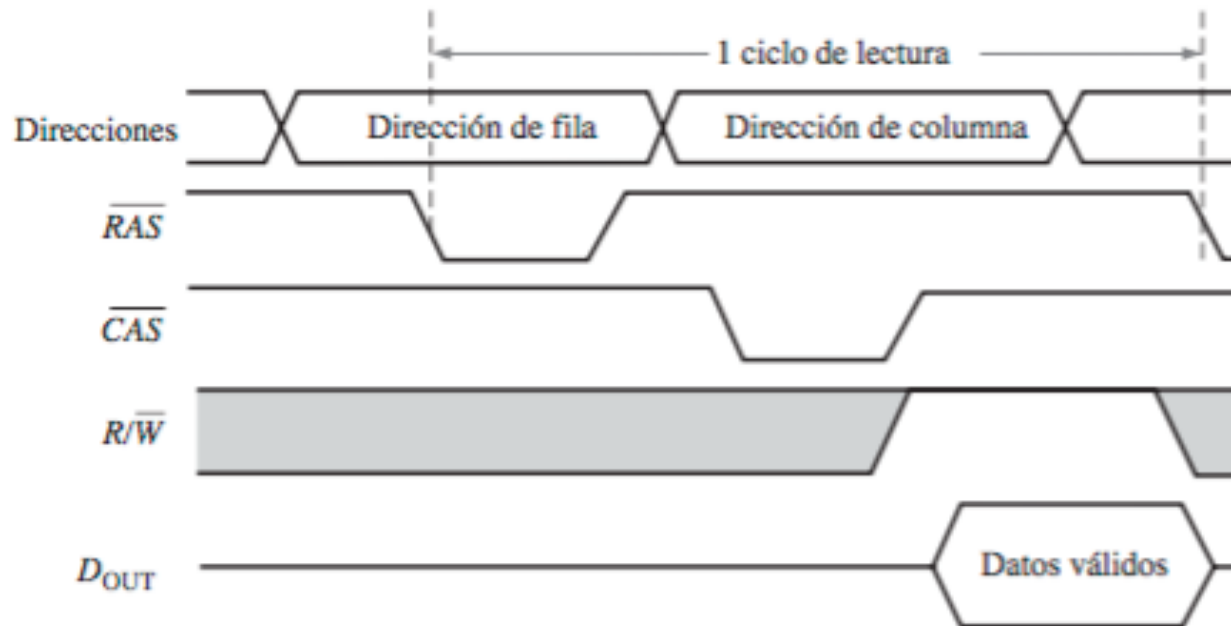


Direccionamiento  
por fila/columna



Direccionamiento  
por fila/columna con CAS/RAS

# Operación de lectura con CAS/RAS



# Ciclos de refresco

- ▶ Una DRAM almacena un bit en un condensador
- ▶ Esta carga se degrada con el tiempo y la temperatura
- ▶ Necesario refrescar cada bit
- ▶ Tipicamente una DRAM se debe refrescar cada pocos milisegundos
- ▶ Una operación de lectura refresca toda las direcciones de una fila
- ▶ Una DRAM utiliza ciclos de refresco

# Velocidad de las memorias DRAM

Production year	Chip size	DRAM Type	Slowest DRAM (ns)	Fastest DRAM (ns)	Column access strobe (CAS)/ data transfer time (ns)	Cycle time (ns)
1980	64K bit	DRAM	180	150	75	250
1983	256K bit	DRAM	150	120	50	220
1986	1M bit	DRAM	120	100	25	190
1989	4M bit	DRAM	100	80	20	165
1992	16M bit	DRAM	80	60	15	120
1996	64M bit	SDRAM	70	50	12	110
1998	128M bit	SDRAM	70	50	10	100
2000	256M bit	DDR1	65	45	7	90
2002	512M bit	DDR1	60	40	5	80
2004	1G bit	DDR2	55	35	5	70
2006	2G bit	DDR2	50	30	2.5	60
2010	4G bit	DDR3	36	28	1	37
2012	8G bit	DDR3	30	24	0.5	31

**Figure 2.13** Times of fast and slow DRAMs vary with each generation. (Cycle time is defined on page 95.) Perfor-

Patterson y Hennesy



# Tipos de memoria RAM

## ▶ DRAM

### ▶ FPM

(Fast Page mode)

### ▶ EDO

(Extended Data Output)

## ▶ SDRAM

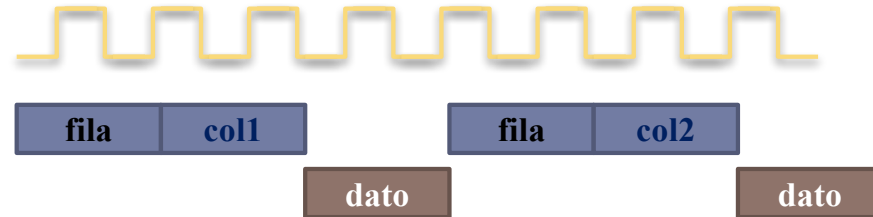
### ▶ DDR

### ▶ DDR2

reloj

dir.

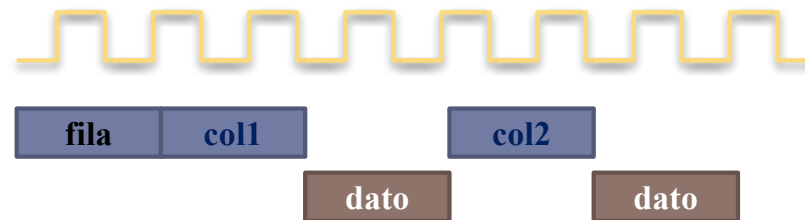
datos



reloj

dir.

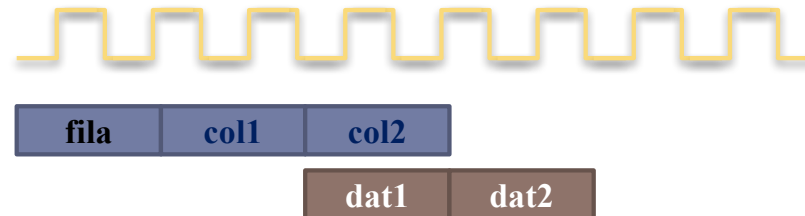
datos



reloj

dir.

datos



# Tipos de memoria RAM

## ► DRAM

► EDO

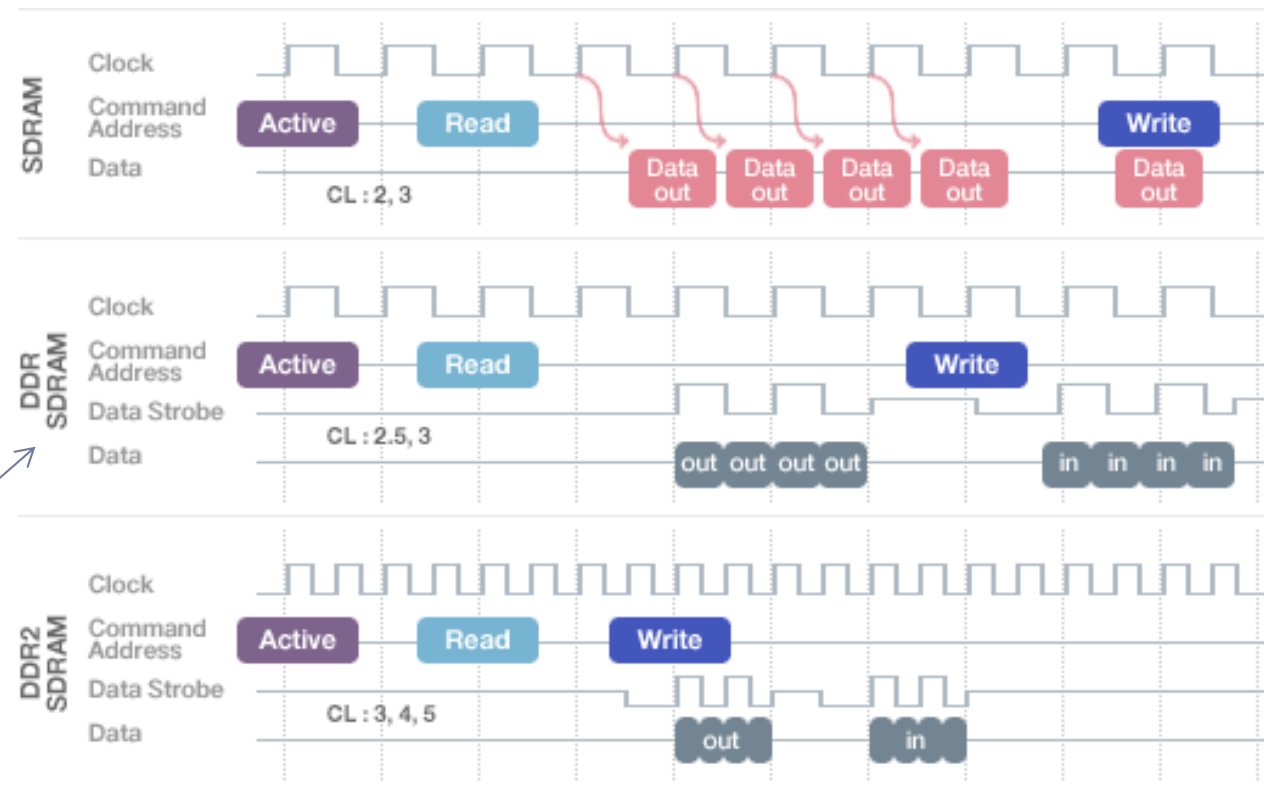
► FPM

## ► SDRAM

► DDR

► DDR2

(double data rate)



SDRAM (Synchronous DRAM): sincronizadas con el reloj del sistema

# Tipos de memoria DDR

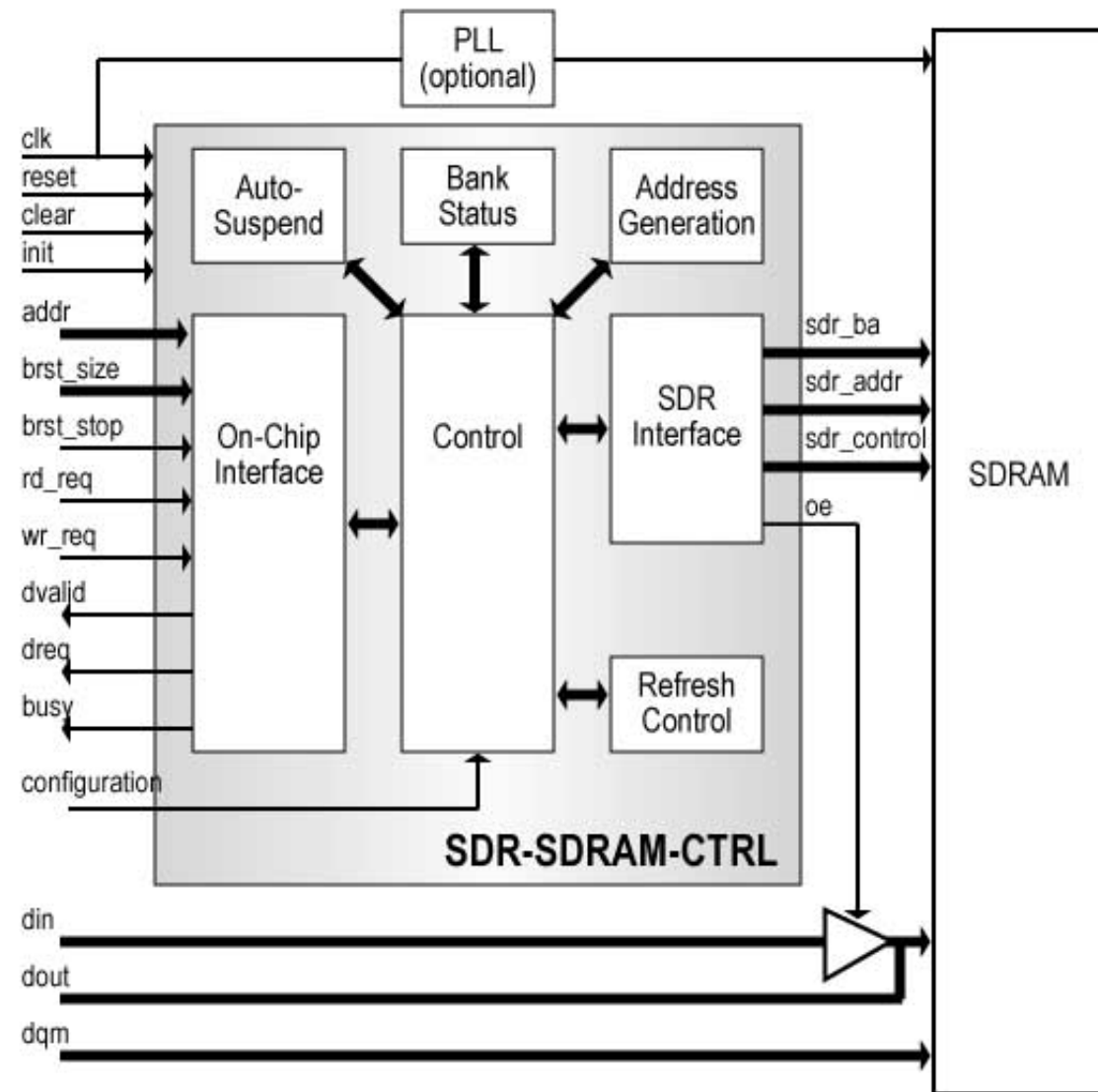
Standard	Clock rate (MHz)	M transfers per second	DRAM name	MB/sec /DIMM	DIMM name
DDR	133	266	DDR266	2128	PC2100
DDR	150	300	DDR300	2400	PC2400
DDR	200	400	DDR400	3200	PC3200
DDR2	266	533	DDR2-533	4264	PC4300
DDR2	333	667	DDR2-667	5336	PC5300
DDR2	400	800	DDR2-800	6400	PC6400
DDR3	533	1066	DDR3-1066	8528	PC8500
DDR3	666	1333	DDR3-1333	10,664	PC10700
DDR3	800	1600	DDR3-1600	12,800	PC12800
DDR4	1066–1600	2133–3200	DDR4-3200	17,056–25,600	PC25600

**Figure 2.14** Clock rates, bandwidth, and names of DDR DRAMS and DIMMs in 2010. Note the numerical relation-

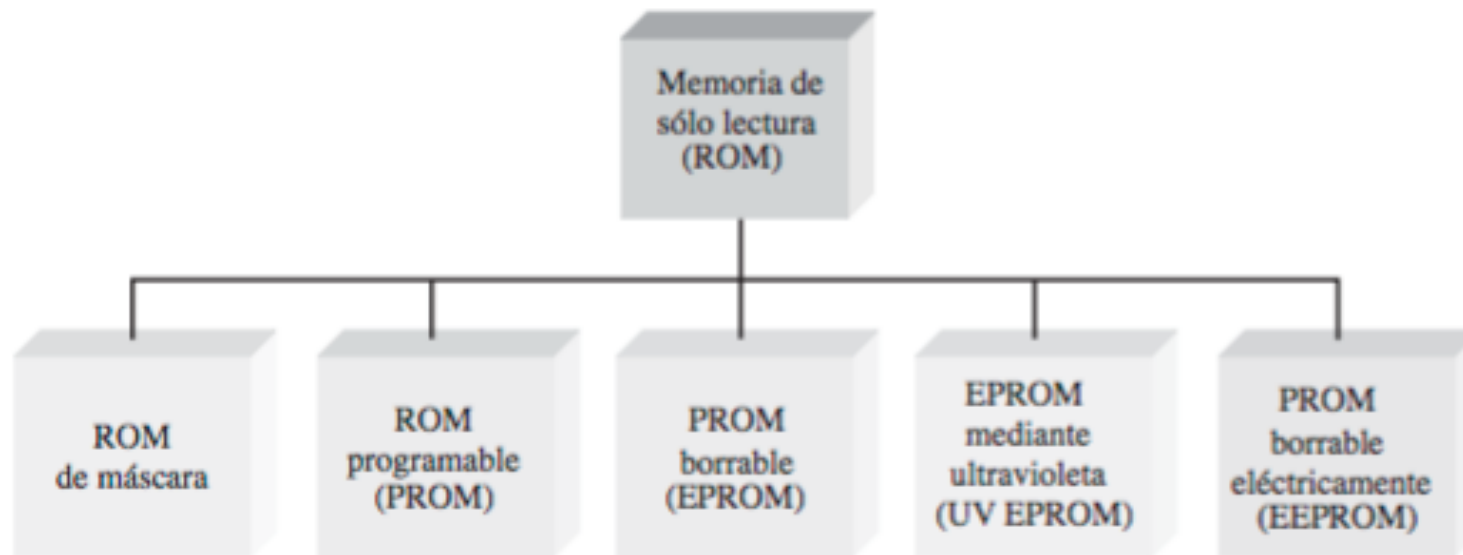
Patterson y Hennesy

# Controlador de memoria DRAM

- ▶ Controlador se encarga del refresco y particularidades de la DRAM
- ▶ Oculta todo esto al procesador y le ofrece una interfaz simple
  - ▶ Procesador **no** dependiente de la tecnología de la memoria



# Memorias ROM



Fundamentos de Sistemas Digitales  
Thomas L. Floyd