



# SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos*  
*Universidad Complutense de Madrid*

---

## TEMA 4. Memoria

# Tema 4. Memoria

---

## 4.1 Fundamentos de la Memoria Virtual

- Objetivos
- Espacio de direcciones
- Mecanismos de traducción: Memoria Virtual Paginada

## 4.2 Mapa de Memoria de un Proceso

- Segmentos de Memoria
- Interfaz del Sistema

## 4.3 Caché de Páginas

- Objetivos
- Relación con el VFS y el Sistema de Memoria Virtual

## 4.4 Gestión de la Memoria Principal

- Políticas de Asignación
- Políticas de Reemplazamiento
- Buffering the páginas



# SISTEMAS OPERATIVOS

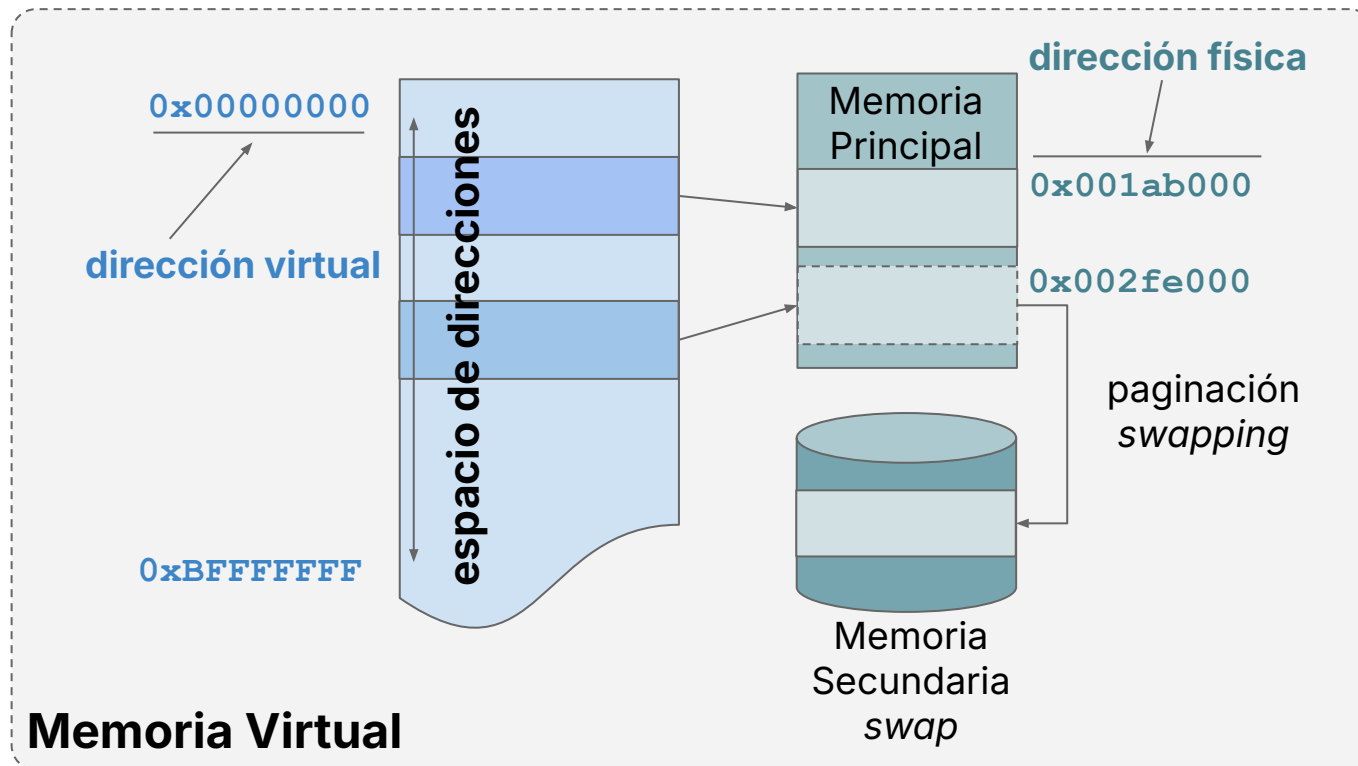
*Grado en Desarrollo de Videojuegos*  
*Universidad Complutense de Madrid*

---

## TEMA 4.1 Fundamentos de la Memoria Virtual

# Memoria Virtual (I)

- La **memoria virtual** es una abstracción que proporciona a los procesos una memoria (**espacio de direcciones**) **lineal**, **grande** y **privado**.
- El sistema gestiona el intercambio de información entre la memoria principal (física) y la secundaria (*swap*, en disco)



# Memoria Virtual (II)

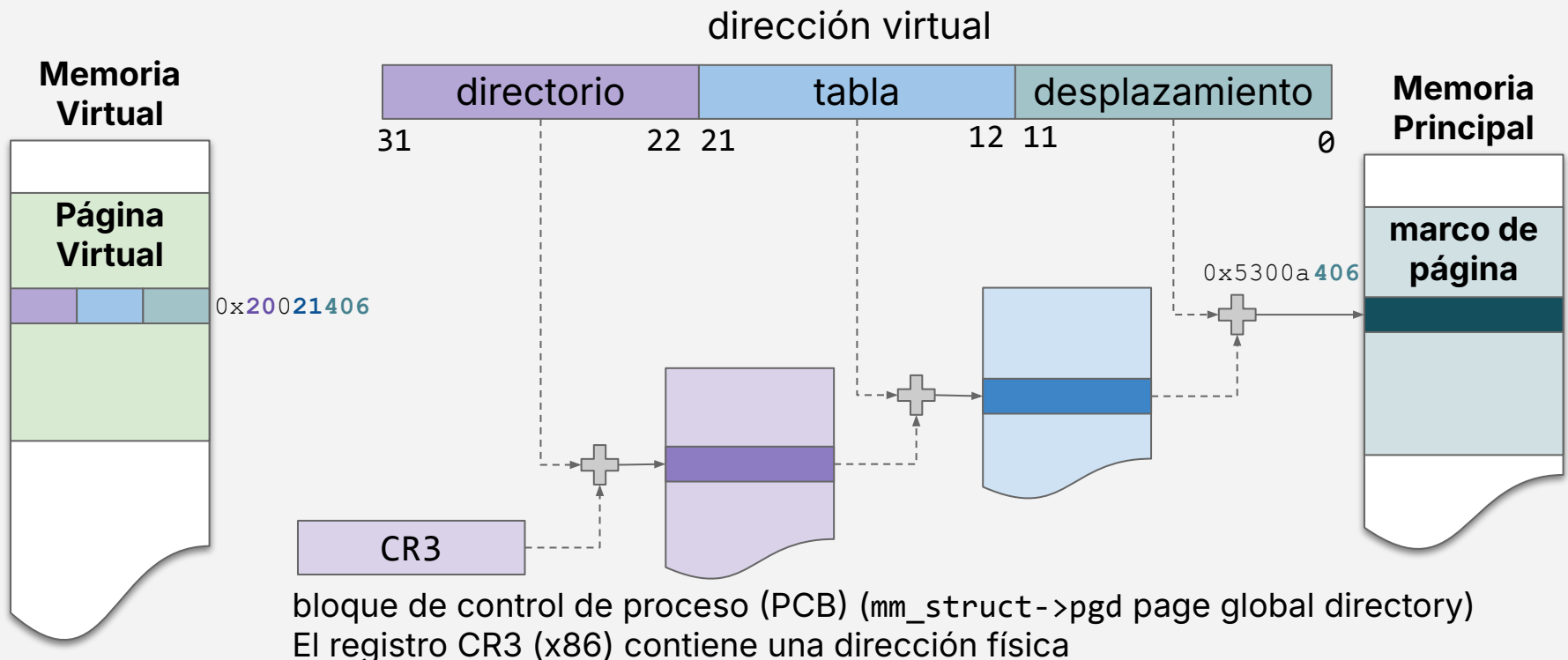
## Objetivos de la Memoria Virtual

- **Sobresuscripción.** Memoria principal *aparente* mayor que la disponible
  - Ejecutar procesos que usan (individualmente o de forma agregada) más memoria de la disponible
- **Multiprogramación.** Ejecución aislada de varios procesos (*y el kernel*)
  - El espacio de direcciones de cada proceso está separado
  - Los procesos solo pueden acceder a las regiones asignadas por el SO
  - Debe permitir que los procesos compartan regiones de memoria (ej. librerías compartidas)
- **Reubicación.** Simplifica el desarrollo de software permitiendo que los programas se pueden cargar en cualquier posición
  - No es necesario recompilar o modificar el código para diferentes perfiles de memoria
  - Varios procesos pueden coexistir sin colisionar

# Memoria Virtual Paginada (I)

- La **memoria virtual** se divide en secciones de tamaño fijo (**página**)
- El **rango contiguo** de direcciones virtuales de la página se traduce en un rango contiguo de direcciones físicas del mismo tamaño (**marco de página**).
- **Tabla de páginas** estructura que contiene la asignación de direcciones virtuales a físicas del proceso. Tiene **varios niveles de traducción** para ahorrar tamaño

**Ejemplo:** Arquitectura x86 de 32 bits. Dos niveles de traducción Directorio y Tabla de páginas



# Memoria Virtual Paginada (II)

## Entradas de la tabla de páginas

Contenidos para x86 ([asm/pgtable\\_types.h](#))\*

- **Dirección del marco de página** de memoria (o del siguiente nivel)
- **Presencia (P)**: si la página está en memoria principal
- **Modificada (D)**: si los contenidos de la página han cambiado
- **Protección**: indica si la página se puede escribir (RW) y ejecutar ([NX, No eXecute](#))
- **Acceso (A)**: la página ha sido usada (política de reemplazamiento)
- **Usuario (U/S)**: Nivel de privilegio para acceder a la página (usuario/supervisor)
- **Caché**: Si la página almacena en la caché de la CPU (CD, Cache Disable) y si se activa el modo *write-through* (WT)

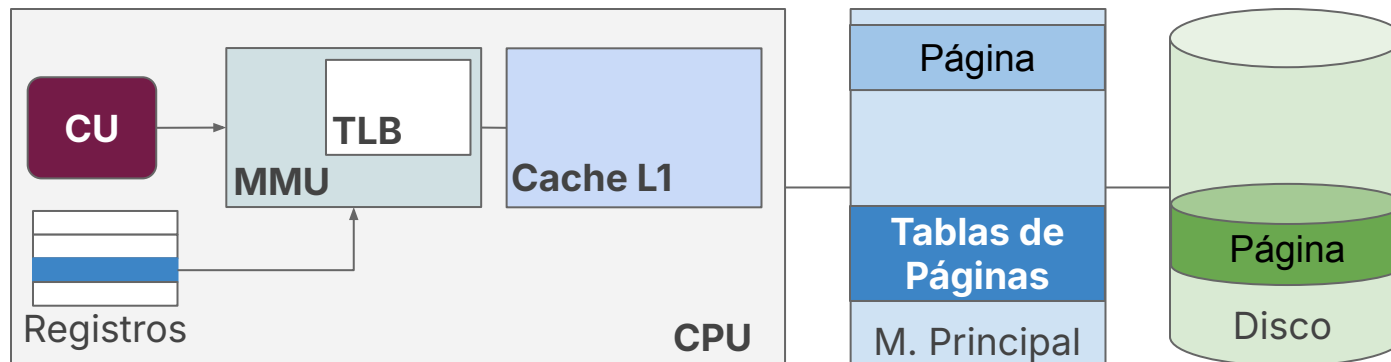
		6	5	4	3	2	1	0
Dirección Marco (20 bits)	-	D	A	CD	WT	U/S	RW	P

\***Nota**: El contenido de las tablas de páginas depende de la arquitectura

# Memoria Virtual Paginada (III)

La traducción de las direcciones virtuales se realiza con el soporte de la **unidad de gestión de memoria** (*Memory Management Unit*, **MMU**):

- Realiza las **indirecciones necesarias** en los niveles de paginación.
- Comprueba, en cada nivel, la **presencia** y **modos de acceso**. En caso de fallo de página o acceso no permitido genera una excepción.
- **Caché** para acelerar la traducción (*Translation Lookaside Buffer*, **TLB**)

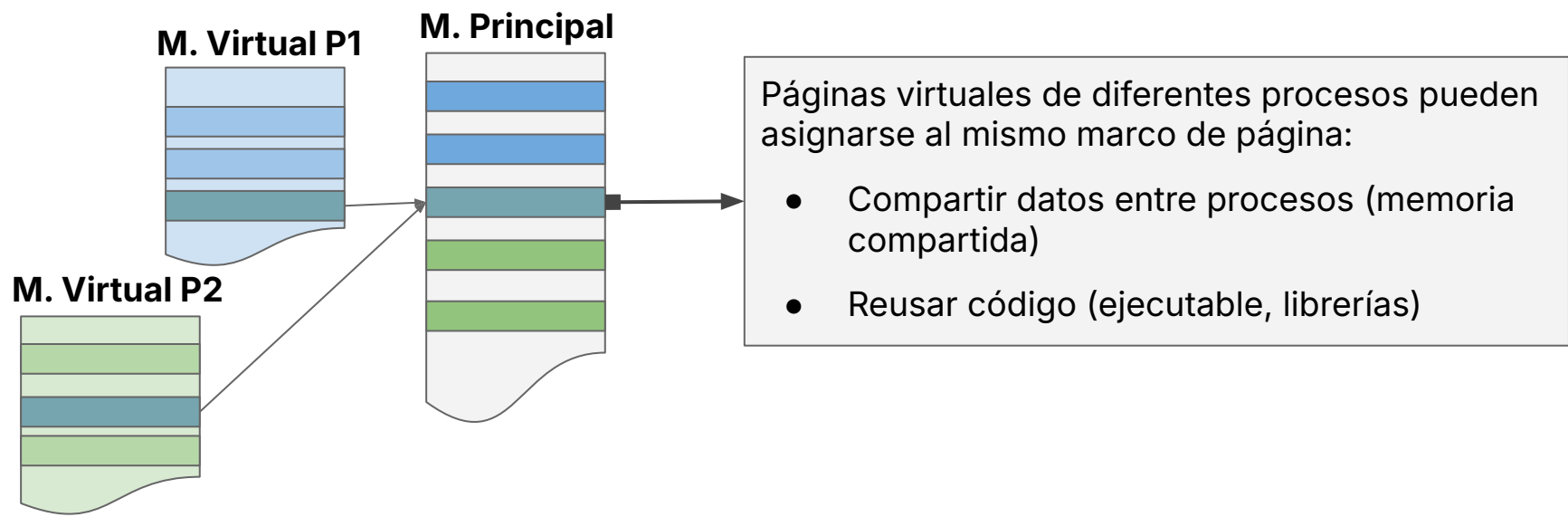




# Memoria Virtual Paginada (IV)

El **Sistema Operativo** se encarga de:

- Gestionar las **excepciones** generadas por la MMU
  - Asignar **nuevas páginas** de memoria. Las páginas se reservan bajo demanda (*demand paging*) cuando se leen o escriben por primera vez.
  - **Traer** la página de la **memoria secundaria**
  - Terminar el proceso (**SIGSEV**). Acceso no válido (permiso) a memoria.
- Mantener las **tablas de páginas** actualizadas
- **Configurar la MMU** para cada proceso (ej. CR3 o limpiar la TLB)
- Configurar el **acceso compartido** a páginas de memoria



# Memoria Virtual Paginada (V)

## Tamaño de Página

- **Fragmentación Interna.** Páginas más pequeñas producen menor fragmentación (memoria asignada > memoria requerida)
- **Número de Páginas.** Páginas más pequeñas producen más páginas de memoria que gestionar:
  - Tablas de páginas mayores.
  - Menor efectividad de la TLB
- **Transferencias con Memoria Secundaria.** La transferencia de páginas pequeñas es menos eficiente (requiere potencialmente más operaciones e interrupciones)

## Tamaño de Página en Linux (x86)

- Tamaño de página por defecto es de 4KB (comando, `getconf PAGE_SIZE`)
- **Transparent Huge Pages.** Combina páginas de 4KB en páginas de 2MB (512 páginas contiguas).
  - Comportamiento por defecto (configurable con `madvice(2) - MADV_HUGEPAGE`)
  - `khugepaged` proceso del kernel que trata de combinar las páginas
- **Huge Pages.** Linux reserva un pool de páginas de 2MB ó 1GB (CPU `pdpe1gb`) que las aplicaciones pueden solicitar (p.ej. máquinas virtuales, bases de datos...)



# SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos*  
*Universidad Complutense de Madrid*

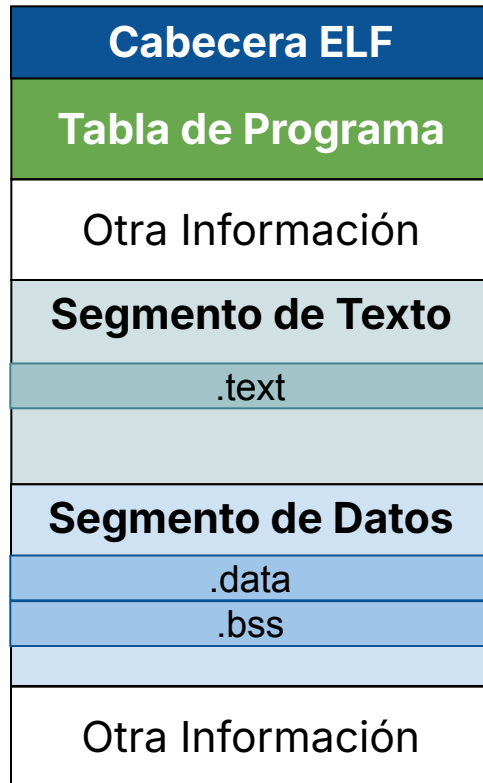
---

## TEMA 4.2 Mapa de Memoria de un Proceso

# Mapa de Memoria de un Proceso(I)

Un **programa** es un conjunto de instrucciones máquina y datos, almacenados en una **imagen ejecutable en disco** (entidad pasiva)

*ELF: Executable & Linking Format*



Información para cargar las diferentes partes (secciones) del programa en memoria.

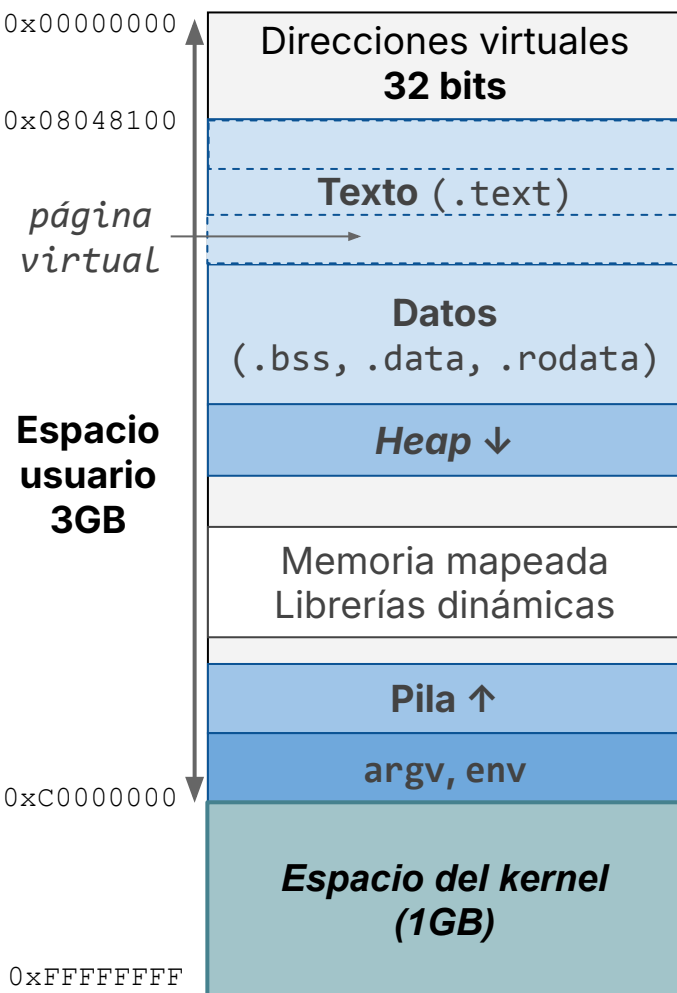
Tipo	Offset	Tamaño	Dir. Virtual	Tamaño	Flags
LOAD	0x02dd0	0x0258	0x03dd0	0x0268	R W -
Secciones: .data, .bss, ...					

Algunas secciones importantes de un ejecutable:

**Sección**    **Propósito**

.text	Instrucciones
.rodata	Constantes (p.ej. cadenas literales)
.data	Variables globales o static, inicializadas
.bss	Variables globales o static, sin inicializar

# Mapa de Memoria de un Proceso(II)

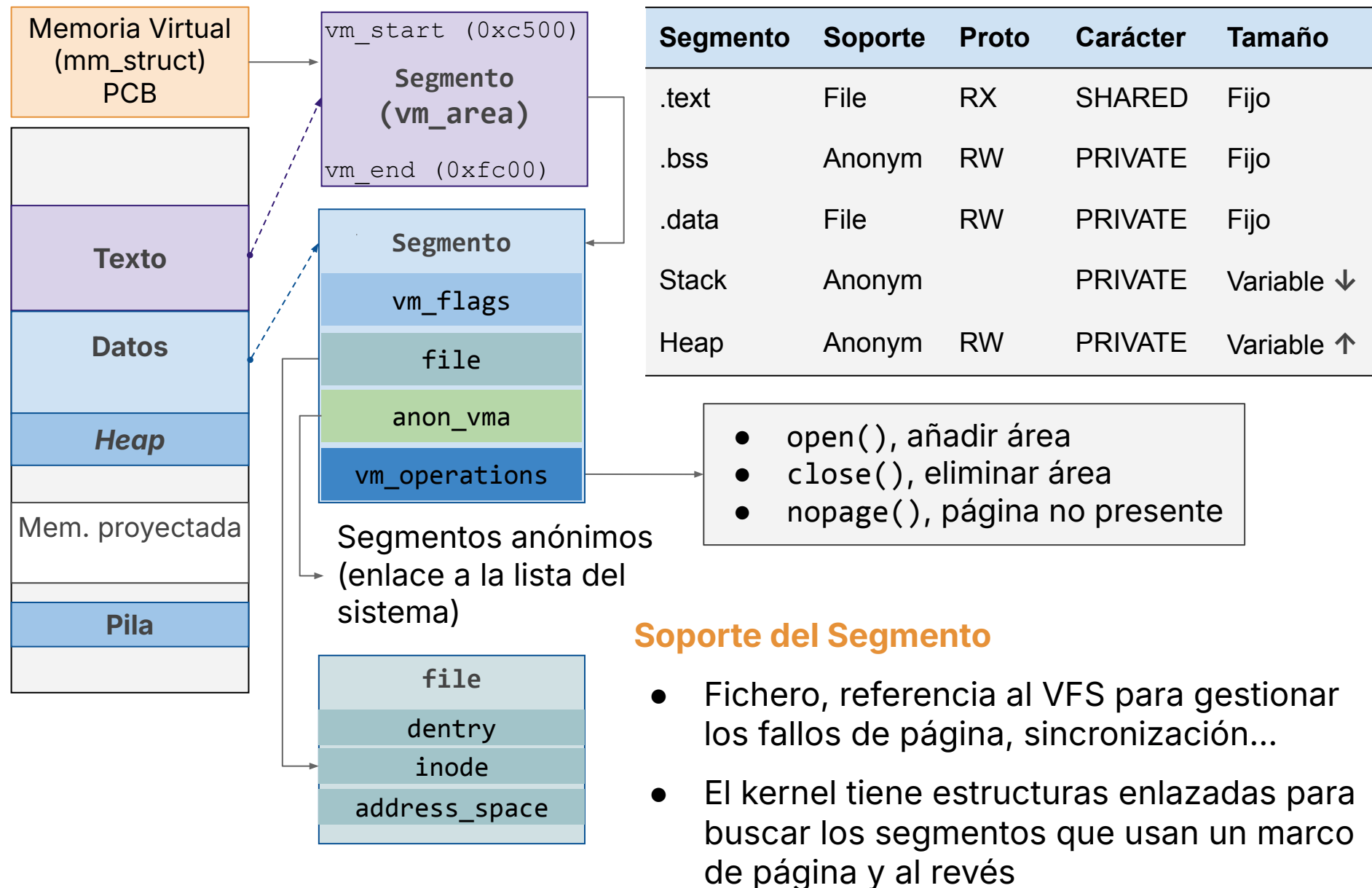


## Segmentos de Memoria (*maps*)

- Área de memoria contigua con varias páginas de memoria virtual (`vm_area_struct`)
- Las páginas tienen los mismos permisos (RW, NX) y son del mismo tipo
- Tipos:
  - Respaldadas por fichero
  - Anónimas (heap, stack, memoria dinámica)
  - Privadas accesibles únicamente por el proceso
  - Compartidas accesibles por otros procesos.

- Código y estructuras de datos del kernel. Compartido por todos los procesos
- Sólo accesible en modo privilegiado (bit U/S de la tabla de páginas)
- Tablas de páginas separadas (usuario, kernel) - Meltdown - [Kernel Page Table Isolation \(KPTI\)](#)

# Mapa de Memoria de un Proceso(III)



# Mapa de Memoria de un Proceso(IV)

## Interfaz del Sistema (CLI)

- Los segmentos de un proceso se pueden consultar en `/proc/<pid>/maps`. Muestra el contenido de la lista de `vm_area_struct`. Ver [proc\\_pid\\_maps\(5\)](#)
- El comando `ps` puede mostrar el uso de memoria del proceso:
  - **RSS (Resident Set Size)** KB. Páginas en memoria principal. No incluye memoria secundaria o sin inicializar. Las páginas compartidas se cuentan para cada proceso que las referencia.
  - **VSZ (Virtual Memory Size)** KB. Memoria virtual del proceso incluye librerías dinámicas y ficheros proyectados en memoria.

### Ejemplo: Segmentos de memoria virtual de un proceso

vm_start	-	vm_end	flag	offset	ma:mi	inode	respaldo (path)
557bfb1c5000	-	557bfb1fc000	r--p	00000000	fe:02	56408195	/usr/bin/bash
557bfb1fc000	-	557bfb2ce000	r-xp	00037000	fe:02	56408195	/usr/bin/bash
557bfb2ce000	-	557bfb312000	r--p	00109000	fe:02	56408195	/usr/bin/bash
557bfb312000	-	557bfb318000	r--p	0014d000	fe:02	56408195	/usr/bin/bash
557bfb318000	-	557bfb321000	rw-p	00153000	fe:02	56408195	/usr/bin/bash
557bfb321000	-	557bfb32c000	rw-p	00000000	00:00	0	
557c11c2b000	-	557c11e08000	rw-p	00000000	00:00	0	[heap]

Segmento .text con código de bash

Segmentos anónimos

r,w = read, write  
x = exec  
s = shared  
p = private (cow)

# Mapa de Memoria de un Proceso(V)

## Interfaz del Sistema (API)

- Llamadas que modifican la memoria virtual de un proceso
  - **fork(2)**. Crea un nuevo proceso copiando las páginas de memoria virtual del padre (Copy-On-Write)
  - **execve(2)**. Carga un nuevo ejecutable reemplazando el espacio de direcciones
  - **brk(2)**. Mueve la localización del *program break* (justo al final del segmento de datos), aumentando/disminuyendo el heap del proceso.
  - **mmap(2)/munmap(2)/mremap(2)**. Crea/destruye/redimensiona un segmento de diferentes tipos.

**Nota:** `malloc(3)` internamente usa `brk(2)` y `mmap(2)` según la cantidad de memoria solicitada (`MMAP_THRESHOLD`).



# Mapa de Memoria de un Proceso(V)

## Interfaz del Sistema (API)

```
void *mmap(void *addr,
           size_t length,
           int prot,           // PROT_EXEC, PROT_READ, PROT_WRITE
           int flags,         // MAP_SHARED, MAP_PRIVATE, MAP_ANON
           int fd,             // Proyección de fichero
           off_t offset);
int munmap (void * addr , size_t len);
```

- `addr, len`: indicación de la dirección de memoria virtual de comienzo del segmento de `len` bytes. Normalmente NULL. El kernel elige la dirección alineada al tamaño de página.
  - `munmap`, elimina las regiones mapeadas entre `addr` y `addr + len`
- `MAP_SHARED` el segmento es visible a otros procesos y se actualiza el fichero de respaldo (si lo hay). `MAP_PRIVATE` tiene el comportamiento opuesto
- `MAP_ANON`. Región de memoria sin fichero de respaldo
- `fd, offset`. La región contiene los datos del fichero a proyectar. `prot` tiene que ser consistente con el modo de apertura del fichero.
- `MAP_HUGETLB, MAP_HUGE_2MB, MAP_HUGE_1GB` (Linux). Selecciona hugepages para el segmento

# Mapa de Memoria de un Proceso(VI)

## Interfaz del Sistema (API)

```
int msync (void * addr , size_t len , int flags)
```

- Planifica la actualización de los ficheros de respaldo de los segmentos MAP\_SHARED entre addr y addr + len. addr debe estar alineado al tamaño de página.
- Los flags permiten modificar el modo de actualización:
  - MS\_SYNC: bloquea el proceso hasta que se complete la operación
  - MS\_ASYNC: actualiza la caché de páginas y planifica la escritura a disco. Retorna inmediatamente.
  - MS\_INVALIDATE: se invalidan otros segmentos respaldados por el mismo fichero para que se carguen de nuevo en el siguiente acceso.
- **Nota:** Debe sincronizarse las páginas respaldadas por fichero y modificadas antes de llamar a la función munmap(2).



# SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos*  
*Universidad Complutense de Madrid*

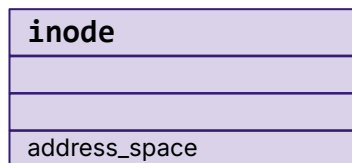
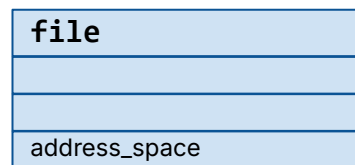
---

## TEMA 4.3 Caché de Páginas

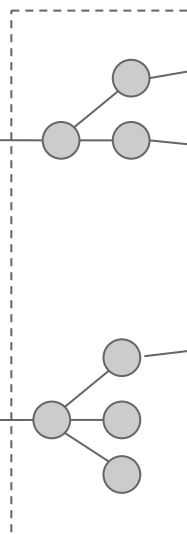
# Caché de Páginas (I)

- Mecanismo para **acelerar las lecturas y escrituras** de disco:
  - **E/S de ficheros** (`read(2)`, `write(2)`)
  - **E/S dispositivos en modo bloque** (originalmente *buffer cache*)
- Integrado con todo el sistema de **memoria virtual**:
  - Proyección de ficheros (`mmap(2)`)
  - **Páginas anónimas** en el área de intercambio (swap)
  - Sistemas de ficheros en memoria, pipes...
- Permite usar **políticas comunes** para la **gestión de memoria principal**

Ficheros (E/S, mmap)



Dispositivos Bloque



**Árboles de Páginas**

Páginas cacheadas  
para ese fichero/inode

**Marcos de Página**  
(struct page)



Memoria Principal

# Caché de Páginas (II)

- El núcleo incluye **mecanismos de búsqueda** para:
  - Localizar todos los segmentos de memoria virtual a los que corresponde un marco de página (p.ej. invalidar el segmento en todos los procesos que lo mapean)
  - Localizar los bloques de memoria a partir del fichero y desplazamiento
- El núcleo es el responsable de mantener las páginas de la caché y los datos en cada dispositivo. Eventos de **sincronización**:
  - Periódica (e.g. cada 30s)
  - Llamadas al sistema p.ej. `msync(2)`
  - Número de páginas modificadas (*dirty*)
  - Falta de páginas de memoria (reemplazamiento)
- `open(2)` permite modificar el comportamiento de las escrituras de un fichero:
  - **O\_DIRECT**: Evitar la escrituras en la caché de páginas, p.ej. caché en el espacio de usuario.
  - **O\_SYNC**: Bloquear las operaciones de escritura hasta que los datos se han transferido al disco.



# SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos*  
*Universidad Complutense de Madrid*

---

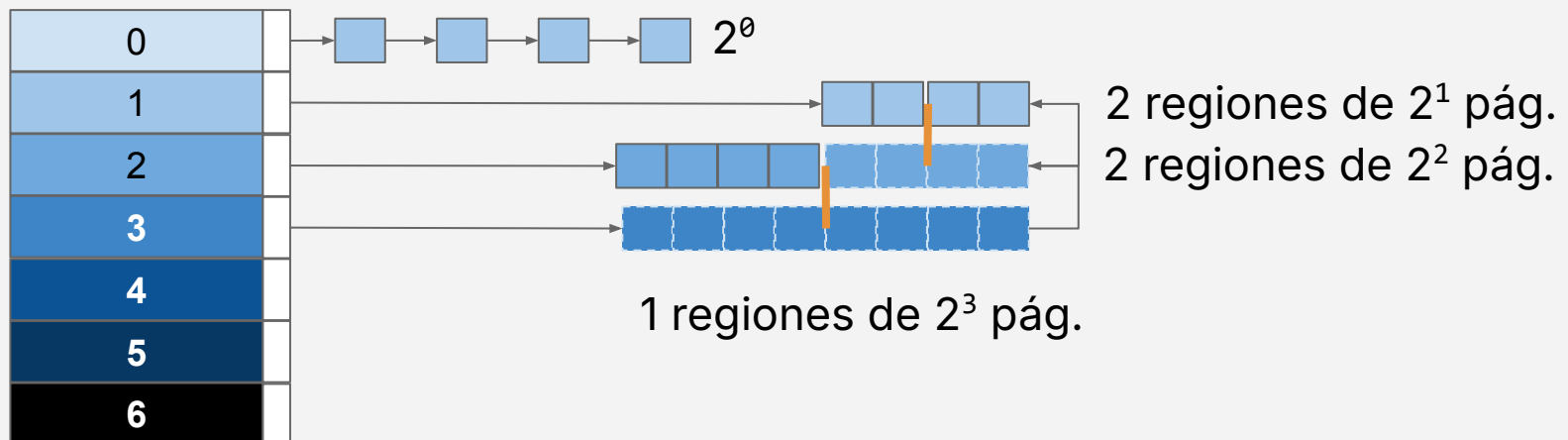
## TEMA 4.4 Gestión de la Memoria Principal

# Gestión de la Memoria Principal (I)

## Asignación de Marcos de Página

- En un sistema de memoria virtual paginada el sistema de asignación es responsable de buscar **marcos de páginas libres para un nuevo segmento**.
- El algoritmo más común en este caso es *Binary Buddy*
  - Los marcos se organizan en listas de  $2^{\text{ORDEN}}$  marcos contiguos
  - Cuando no hay una región de ORDEN adecuado
    - Se busca una región de  $\text{ORDEN}' > \text{ORDEN}$
    - Se divide en dos compañeros (*buddies*,  $\text{ORDEN}' - 1$ ) asignando uno y colocando el otro en la lista de regiones libres.

**Ejemplo:** Solicitud de una sección de 2 páginas contiguas ( $\text{ORDEN} = 1$ )



# Gestión de la Memoria Principal (II)

## Política de Reemplazamiento

- Cuando no hay marcos libres en memoria principal, determina qué marco de página debe liberarse para alojar una nueva página.
- **Objetivo:** minimizar los fallos de página, eliminando las páginas que no se volverán a usar.
- **Retención:** Determinadas páginas de memoria no se pueden reemplazar (p.ej. kernel del SO).
  - Las aplicaciones tiene acceso con la llamada `mlock(2)`
  - Casos de uso: tiempo real y seguridad
- **Ámbito:**
  - **Local:** Sólo puede reemplazarse un marco asignado al proceso que causa fallo.
  - **Global:** Puede reemplazarse cualquier marco
- **Algoritmos:** FIFO, Reloj, LRU



Ref	a	b	g	a	d	e	a	b	a	d	e	g	d	e
0	$a_1$	a	a	a	a	$e_6$	e	e	e	e	e	e	$d_{13}$	d
1		$b_2$	b	b	b	b	$a_7$	a	a	a	a	a	a	$e_{14}$
2			$g_3$	g	g	g	g	$b_8$	b	b	b	b	b	b
3					$d_5$	d	d	d	d	d	d	$g_{12}$	g	g

10 fallos

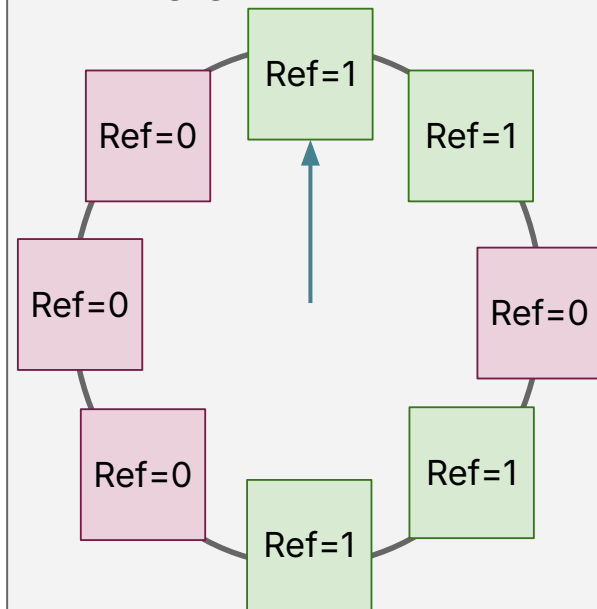
# Gestión de la Memoria Principal (IV)

## Política de Reemplazamiento. Reloj (o 2ª oportunidad)

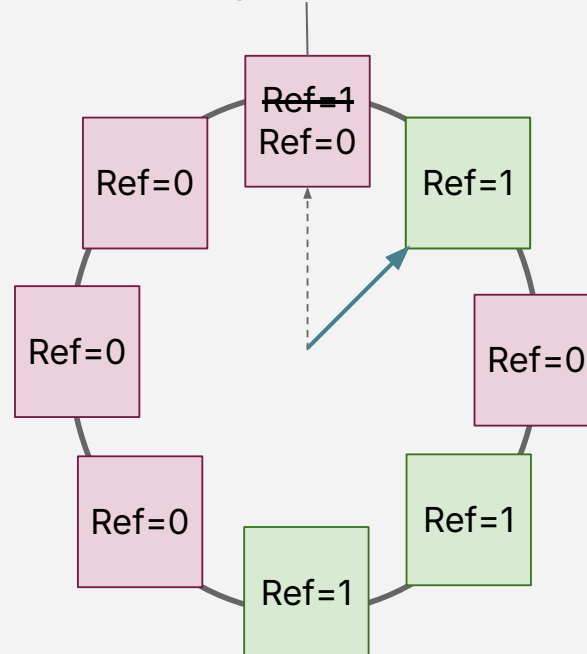
- **Criterio:** FIFO y uso del flag de acceso a la página (Ref)
  - Si la página a reemplazar (*first-in*) no se ha accedido (Ref=0) se reemplaza
  - Si el bit está activo (Ref=1) se borra el flag y se pasa al final de la lista.
- Implementación basada en una cola circular.

### Ejemplo

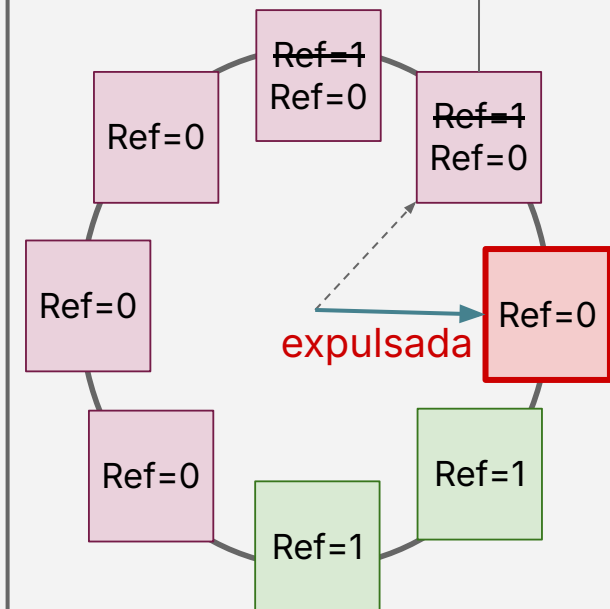
#### Inicio



#### 2ª oportunidad



#### 2ª oportunidad



# Gestión de la Memoria Principal (V)

- Memoria física con 4 marcos de página
- Referencias:  $a\ b\ g\ a\ d\ e\ a\ b\ a\ d\ e\ g\ d\ e$

# Gestión de la Memoria Principal (VI)

## Política de Reemplazamiento. LRU

- **Criterio:** Página residente que fue accedida hace más tiempo
- **Principio de localidad.** Una referencia de memoria probablemente volverá a repetirse en el futuro próximo.
- Mecanismo para registrar las referencias a la página muy difícil de implementar
- **Linux LRU** se implementa con dos colas de páginas (vmstat(1) active/inactive)
  - Páginas activas. Usa el mecanismo del reloj con el flag de acceso de la TP.
  - Páginas inactivas. Usa un algoritmo FIFO

**Ejemplo:** 4 marcos de página. Referencias: *a b g a d e a b a d e g d e*

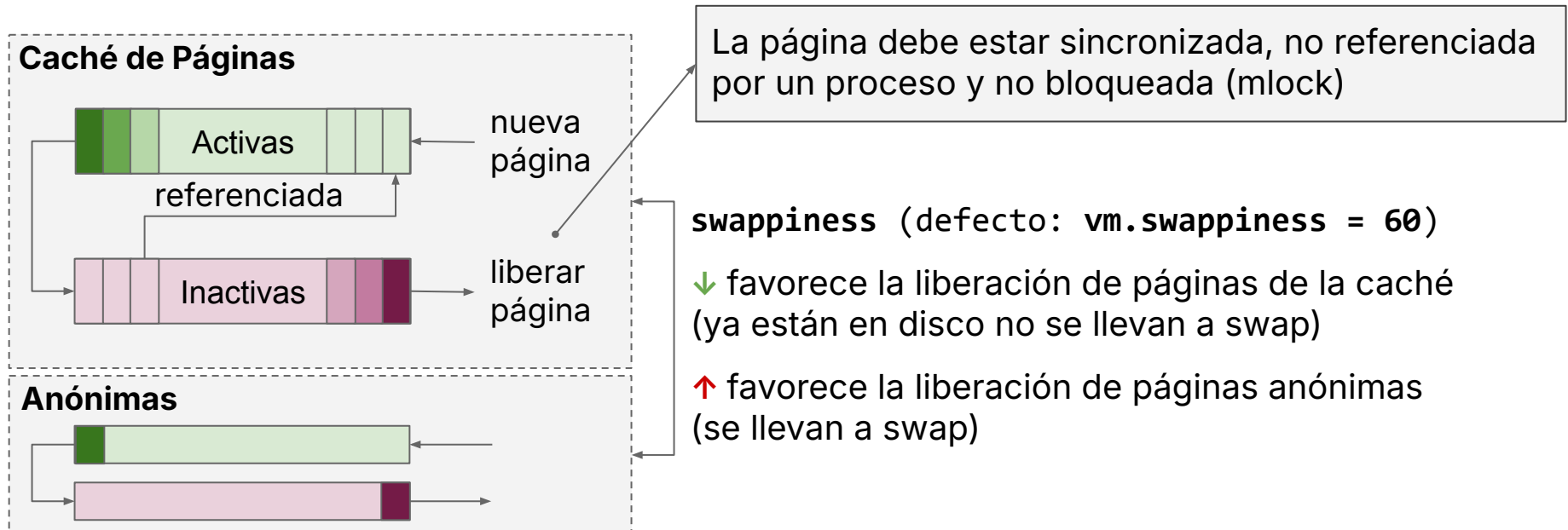
Ref	a	b	g	a	d	e	a	b	a	d	e	g	d	e
0	<i>a</i> <sub>1</sub>	a	a	<i>a</i> <sub>4</sub>	a	a	<i>a</i> <sub>7</sub>	a	<i>a</i> <sub>9</sub>	a	a	a	a	a
1		<i>b</i> <sub>2</sub>	b	b	<i>b</i>	<i>e</i> <sub>6</sub>	e	e	e	e	<i>e</i> <sub>11</sub>	e	e	<i>e</i> <sub>14</sub>
2			<i>g</i> <sub>3</sub>	g	g	g	<i>g</i>	<i>b</i> <sub>8</sub>	b	b	<i>b</i>	<i>g</i> <sub>12</sub>	g	g
3					<i>d</i> <sub>5</sub>	d	d	d	d	<i>d</i> <sub>10</sub>	d	d	<i>d</i> <sub>13</sub>	d

7 fallos

# Gestión de la Memoria Principal (VI)

## Page Buffering

- Los páginas de memoria no referenciadas no se eliminan directamente. Se mantienen como páginas *reclamables* (páginas inactiva)
- Si la página vuelve a referenciarse se mueve a la cola de páginas activa evitando que se elimine.
- Demonio de paginación (kswapd en Linux) actúa en función de umbrales de uso
  - Ejecuta la política de reemplazo para liberar marcos de página de memoria
  - Libera páginas anónimas (swap-out) o de la caché de páginas



# Gestión de la Memoria Principal (VII)

## Out-of-Memory (OOM) Killer

- Mecanismo del núcleo usado cuando no se pueden satisfacer las peticiones de asignación de memoria (incluso después de reclamar páginas)
- Para recuperar el sistema se termina un **proceso malo** (*badness*) que liberará la memoria, usando una heurística que considera (según versión del kernel):
  - **Tamaño de memoria residente (RSS)** (↑)
  - **Tiempo que el proceso ha estado en ejecución** (↑)
  - **Número de hijos del proceso** (↑)
  - **Nice del proceso** (↑) (se preservan los procesos más prioritarios)
- Cada proceso en la PCB incluye los siguiente atributos `proc_pid_oom_score(5)`:
  - **oom\_score**: Procesos con mayor puntuación serán seleccionados antes por el OOM killer
  - **oom\_score\_adj**: Permite al administrador ajustar la puntuación para el OOM [-1000, 1000] según la importancia del proceso. Ver comando `choom(1)`

```
> choom -p $$  
pid 7748's current OOM score: 666  
pid 7748's current OOM score adjust value: 0
```

# Gestión de la Memoria Principal (VIII)

\$ free

	total	used	free	shared	buff/cache	available
Mem:	32430644	4520676	26305888	999572	3028180	27909968
Swap:	16777212	0	16777212			

\$ cat /proc/meminfo

```
MemTotal:      32430644 kB
MemFree:       26361972 kB
MemAvailable:  27965488 kB
Buffers:       237912 kB
Cached:        2672568 kB
SwapCached:    0 kB
Active:        3469572 kB
Inactive:      1253544 kB
Active(anon):  2805132 kB
Inactive(anon): 0 kB
Active(file):   664440 kB
Inactive(file): 1253544 kB
Unevictable:   813624 kB
```

Memoria para E/S de **dispositivos en bloque**.  
(en la caché de páginas)

Memoria en la **caché de páginas (ficheros)**,  
puede liberarse sin E/S (clean)

Estadísticas de la **política LRU**:

- **file**: caché de páginas
- **anon**: páginas anónimas

Otros comandos para obtener **información de la memoria virtual** : vmstat, swapon, pmap, ps y top