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

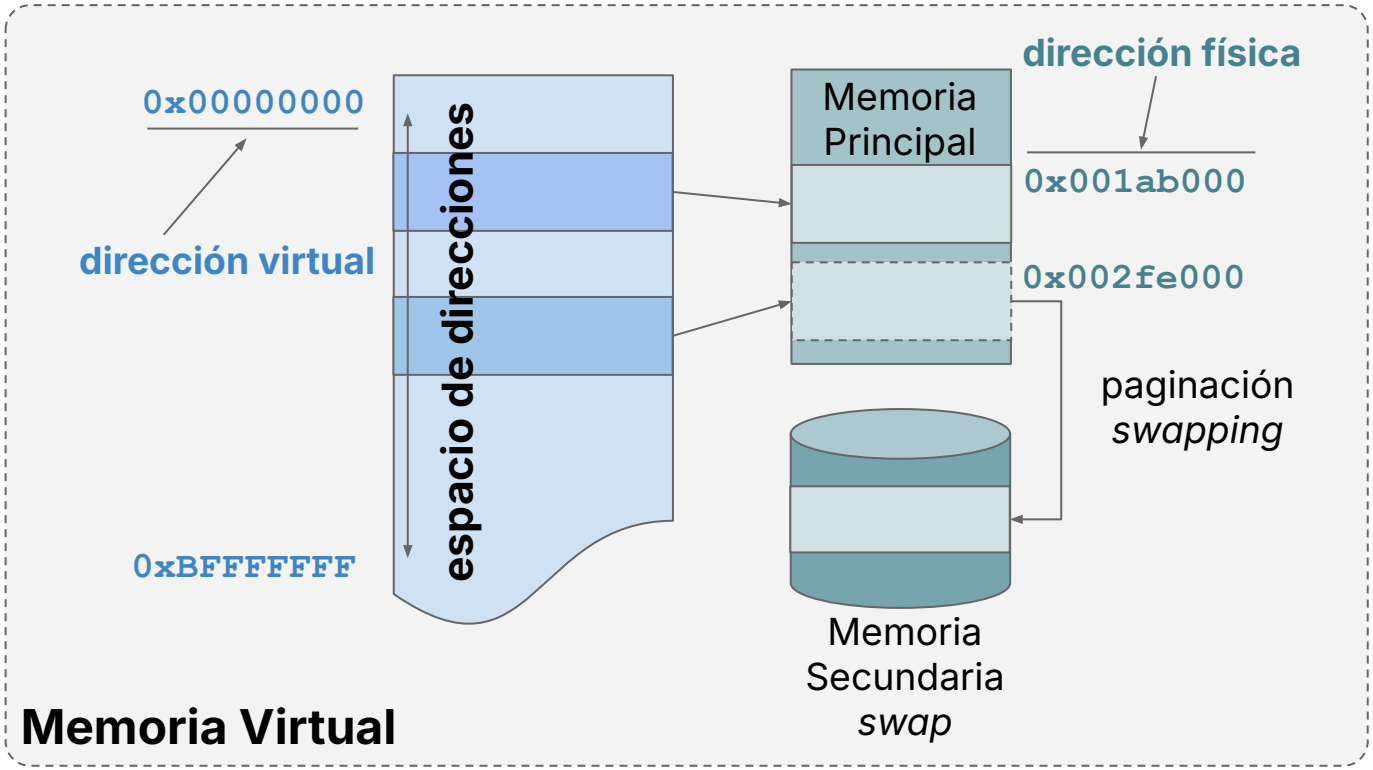
4.4 Gestión de la Memoria Principal

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

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)

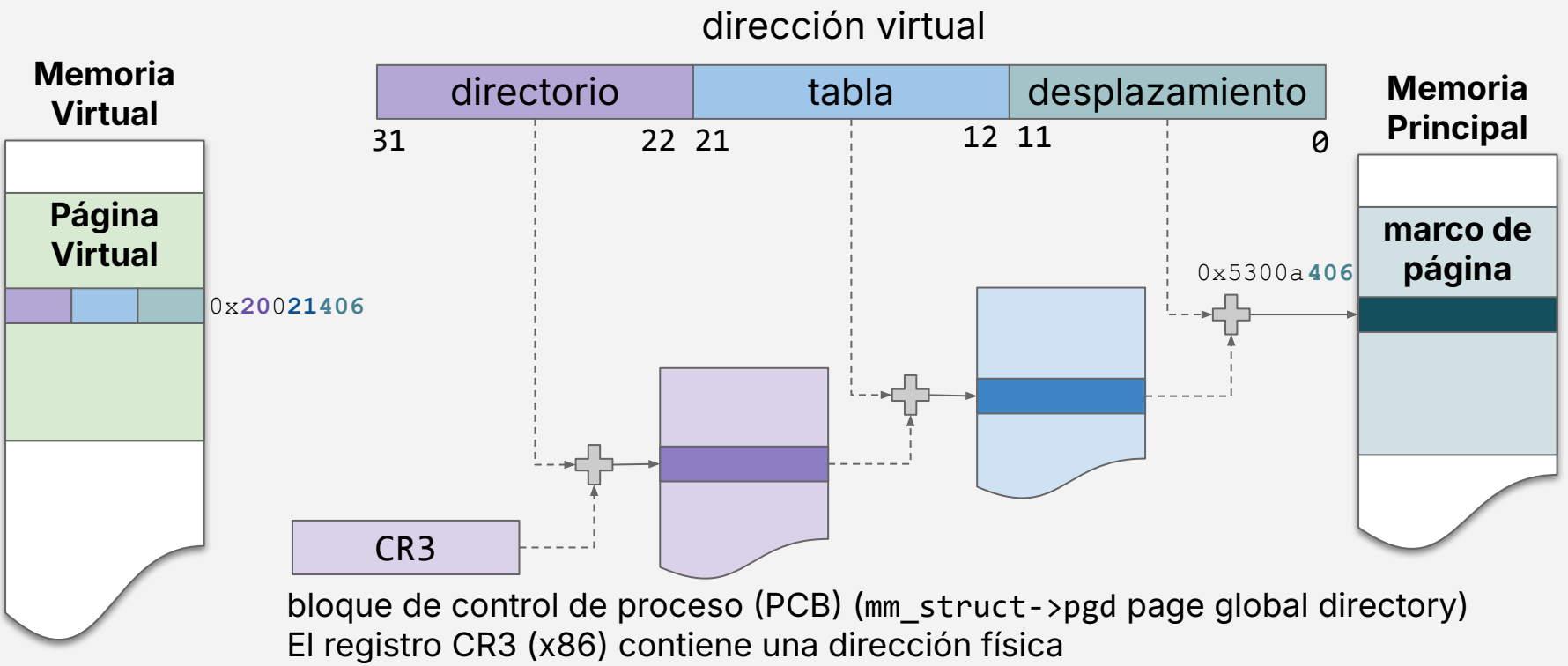
Objetivos de la Memoria Virtual

- **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 diferente 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



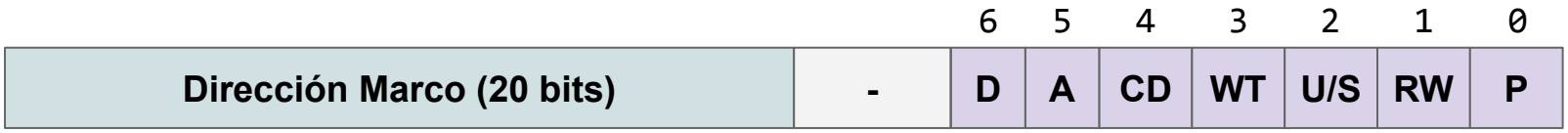
bloque de control de proceso (PCB) (`mm_struct->pgd` page global directory)
El registro CR3 (x86) contiene una dirección física

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`)

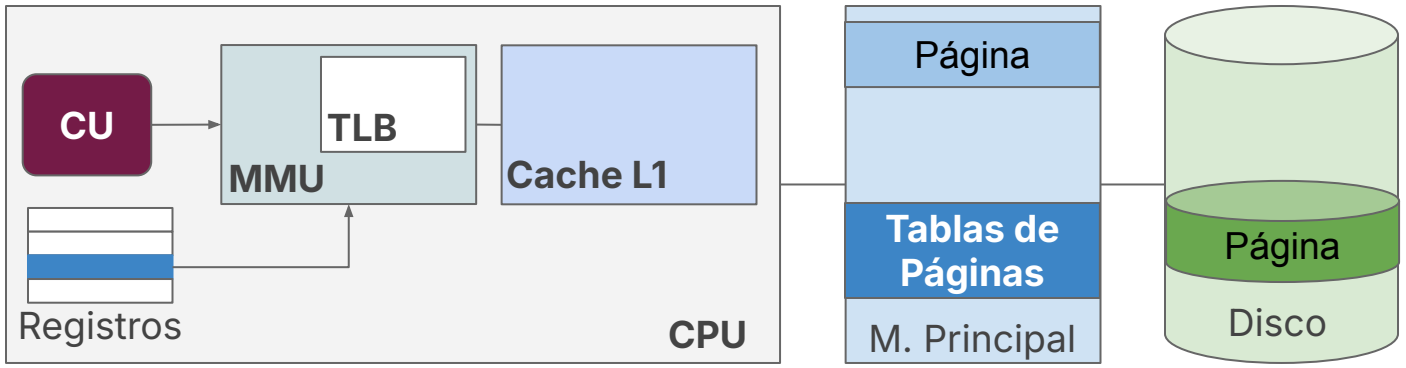


*Nota: El contenido de las tablas de páginas depende de la arquitectura

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**)



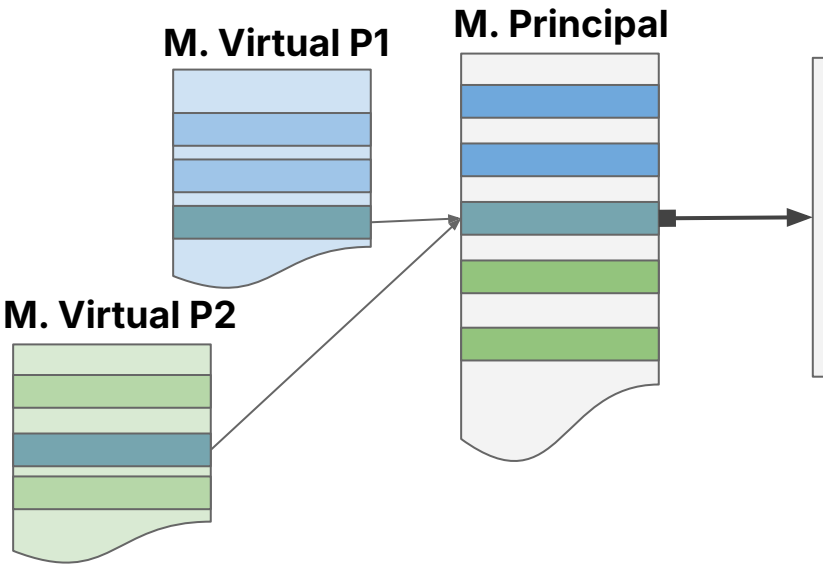
Memoria Virtual Paginada (IV)

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)

directorio de la cpu que indica dónde está el directorio global

- Configurar el **acceso compartido** a páginas de memoria



Páginas virtuales de diferentes procesos pueden asignarse al mismo marco de página:

- Compartir datos entre procesos (memoria compartida)
- Reusar código (ejecutable, librerías)

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.** Las trasferencia de páginas pequeñas es menos eficiente (requiere potencialmente más operaciones e interrupciones)

Tamaño de Página en Linux (x86)

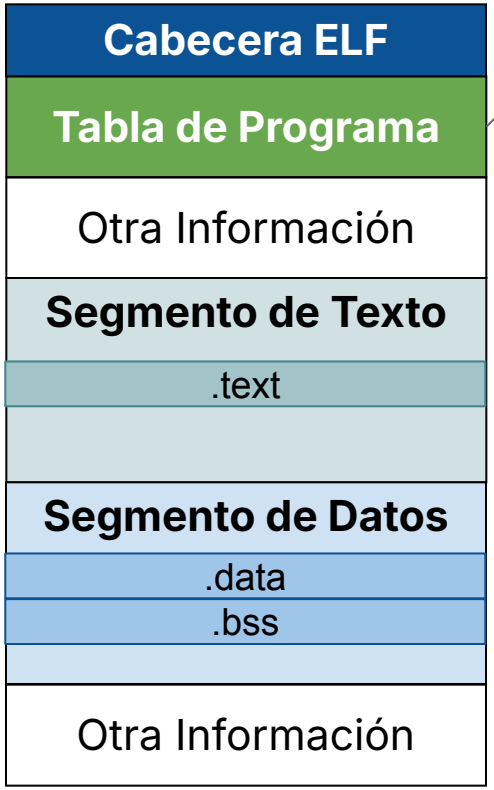
- Tamaño de página por defecto es de 4KB (comando, `getconf PAGE_SIZE`)
- ***Transparent Huge Pages***. Combina páginas de 4KB en páginas de 2MB (512 páginas contiguas).
  - Comportamiento por defecto (configurable con madvise(2) - `MADV_HUGEPAGE`)
  - khugepaged proceso del kernel que trata de combinar 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...)

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, ...`					

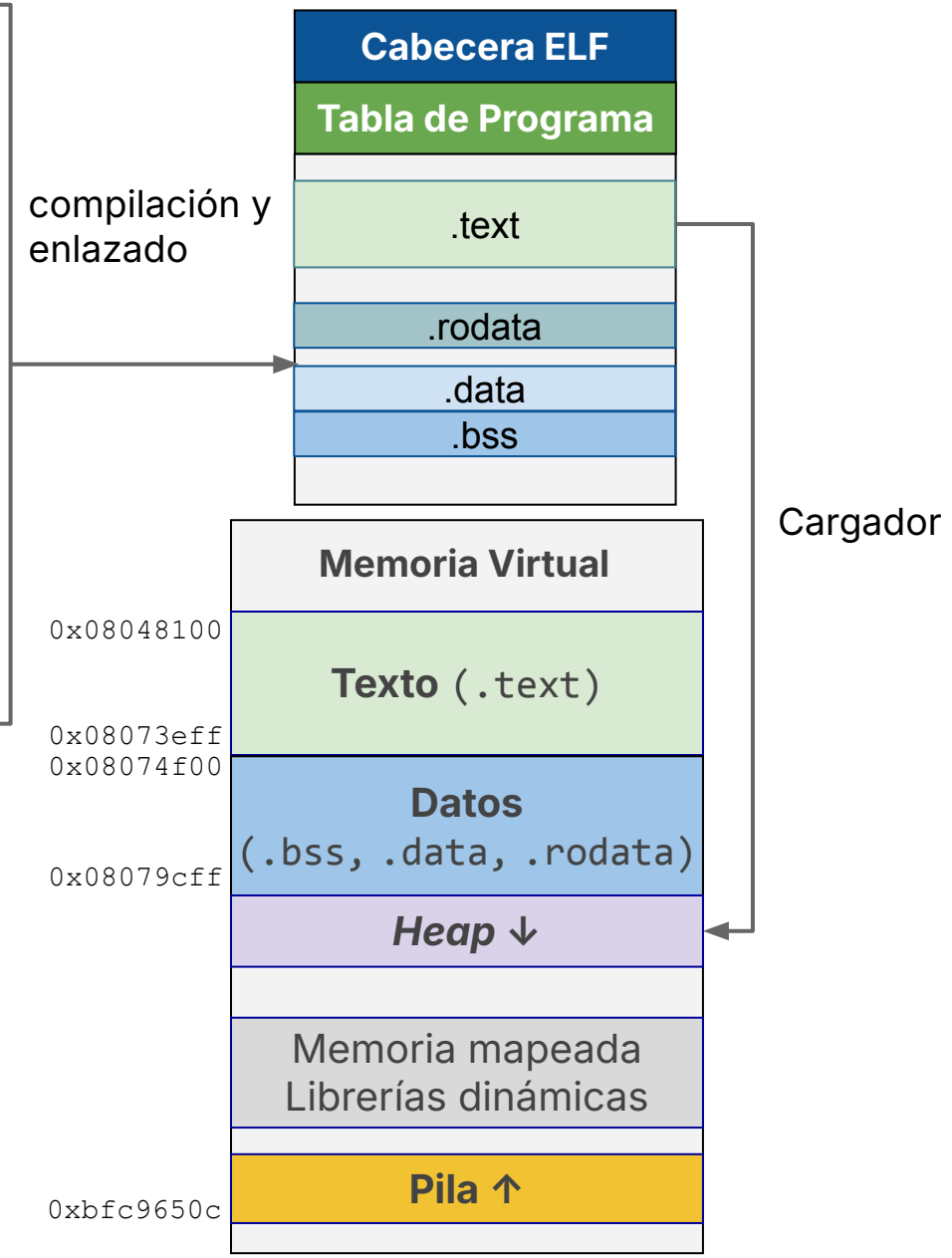
Algunas secciones importantes de un ejecutable:

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

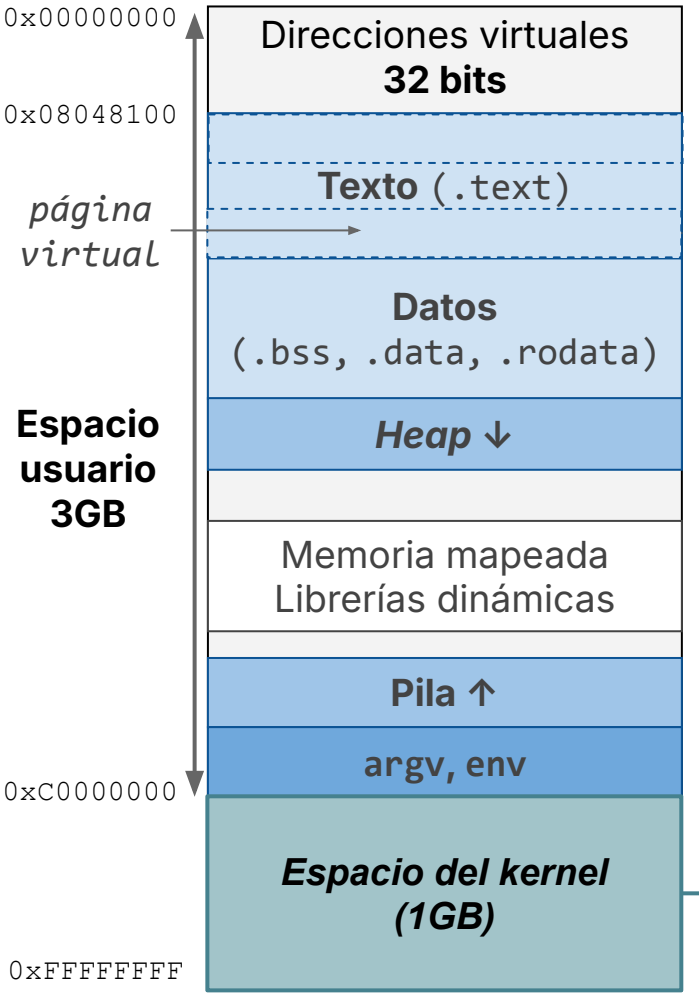
Mapa de Memoria de un Proceso(I)

```c
int numero = 21; //.data

int resultado; //.bss

const char *msg = "Resultado:\n"; //.rodata

int main(void) {
    static int factor = 2; //.data

    //.text
    resultado = numero * factor;
    printf("%s", msg);
    return 0;
}
```

compilación y enlazado



Mapa de Memoria de un Proceso(I)

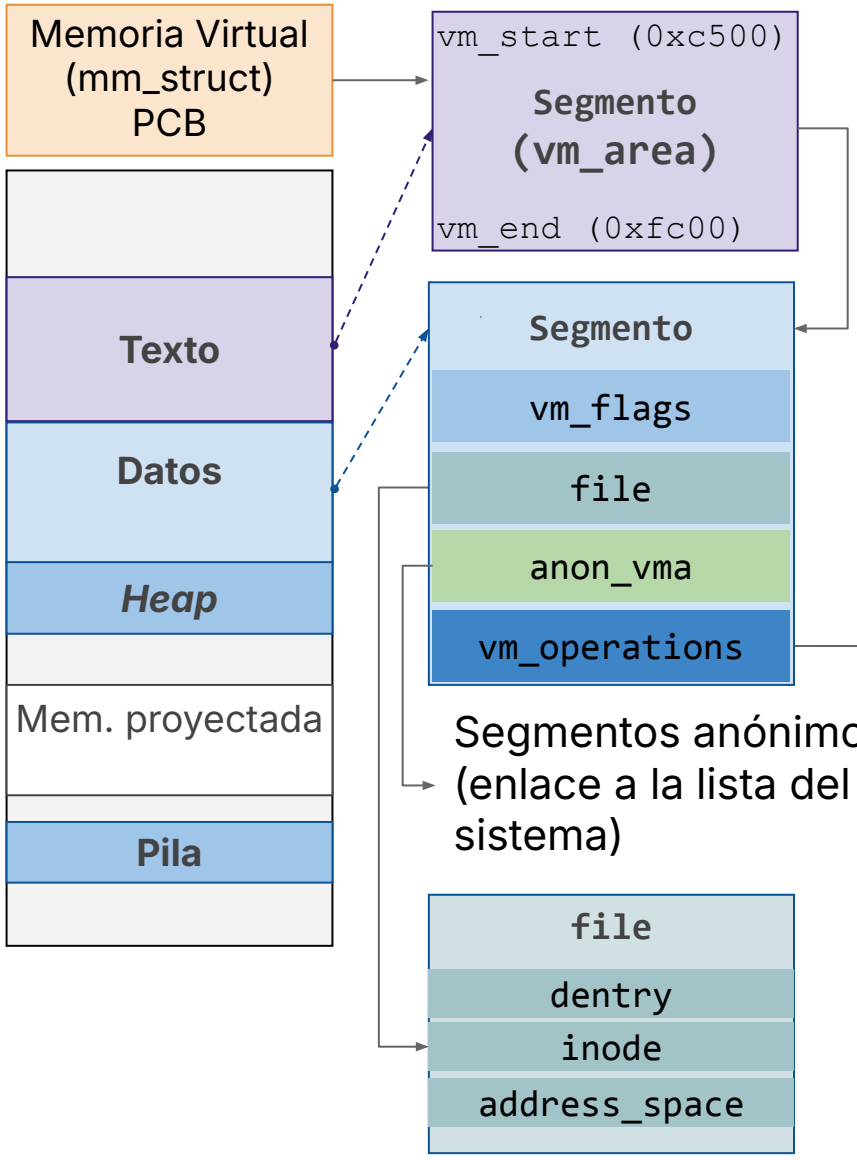


Segmentos de Memoria (*maps*)

- 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(II)



Segmento	Soporte	Proto	Carácter	Tamaño
.text	File	RX	SHARED	Fijo
.bss	Anonym	RW	PRIVATE	Fijo
.data	File	RW	PRIVATE	Fijo
Stack	Anonym		PRIVATE	Variable ↓
Heap	Anonym	RW	PRIVATE	Variable ↑

- `open()`, añadir área
- `close()`, eliminar área
- `nopage()`, página no presente

Soporte del Segmento

- Fichero, referencia al VFS para gestionar los fallos de página, sincronización...
- El kernel tiene estructuras enlazadas para buscar los segmentos que usan un marco de página y al revés

Mapa de Memoria de un Proceso(III)

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`.
- 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

Mapa de Memoria de un Proceso(IV)

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)
```

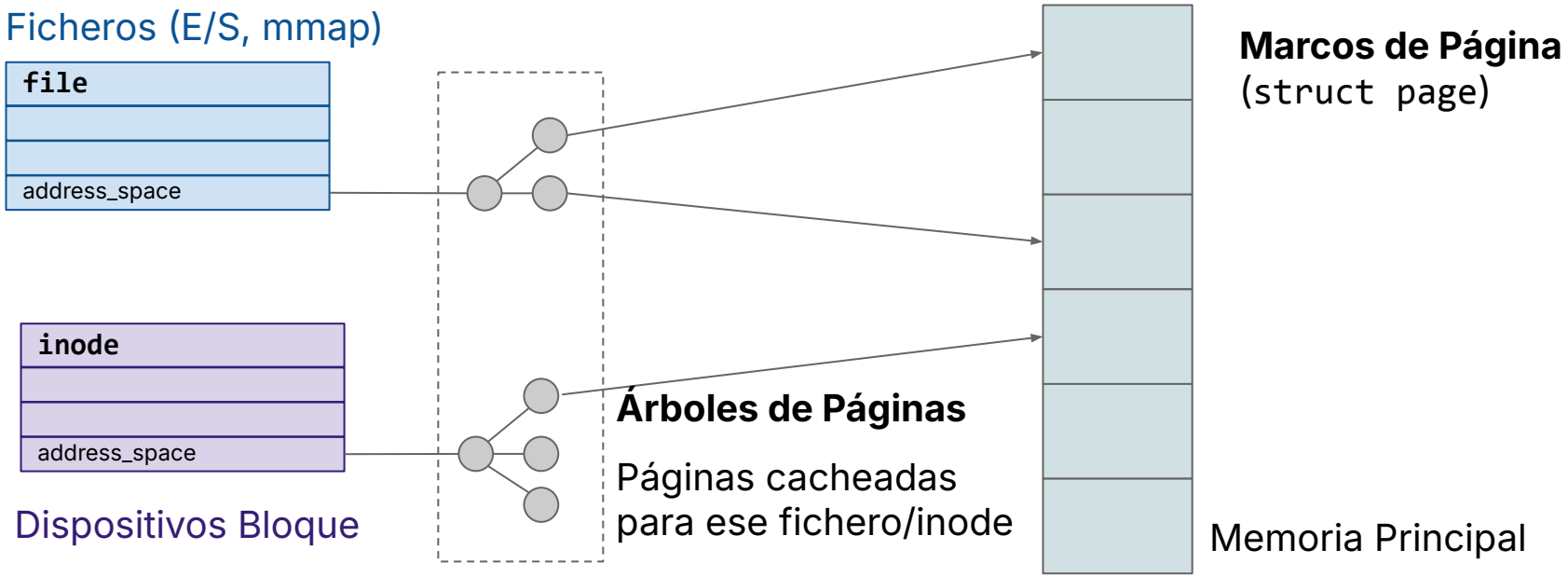
- Planifica la actualización de los ficheros de respaldo de los segmentos MAP_SHARED entre `addr` y `addr + len`. `addr` debe estar alineado al tamaño de página.
- Los flags permiten modificar el modo de actualización:
  - `MS_SYNC`: bloquea el proceso hasta que se complete la operación
  - `MS_ASYNC`: 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)`.

antes de hacer unmap hay que sincronizar!!

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**



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)
- Los procesos pueden evitar la caché de páginas usando la opción **`O_DIRECT`** de la llamada `open(2)`, p.ej. caché en el espacio de usuario.

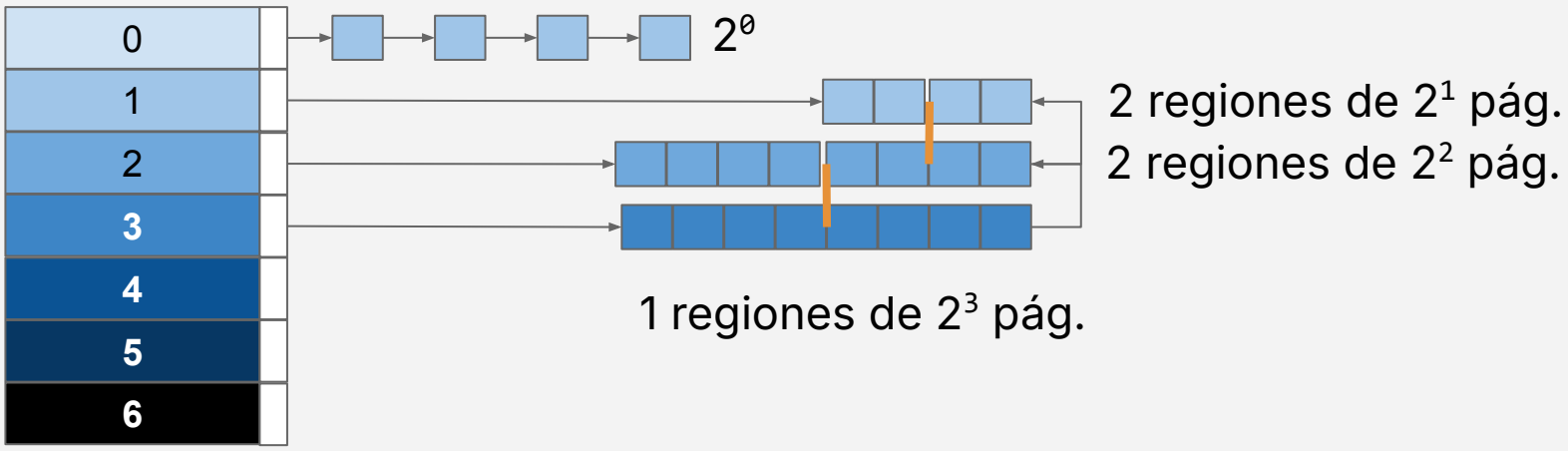
TEMA 4.4 Gestión de la Memoria Principal

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 $2^{\texttt{ORDEN}}$ marcos contiguos
  - Cuando no hay una región de `ORDEN` adecuado
    - Se busca una región de `ORDEN'` > `ORDEN`
    - Se divide en dos compañeros (*buddies*, `ORDEN'-1`) asignando uno y colocando el otro en la lista de regiones libres.

Ejemplo: Solicitud de una sección de 2 páginas contiguas (`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

Gestión de la Memoria Principal (III)

Política de Reemplazamiento. FIFO

- **Criterio:** Página que lleva más tiempo residente en memoria principal
- Implementación sencilla
- Las páginas más longevas pueden seguir en uso activo

Ejemplo:

- Memoria física con 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	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

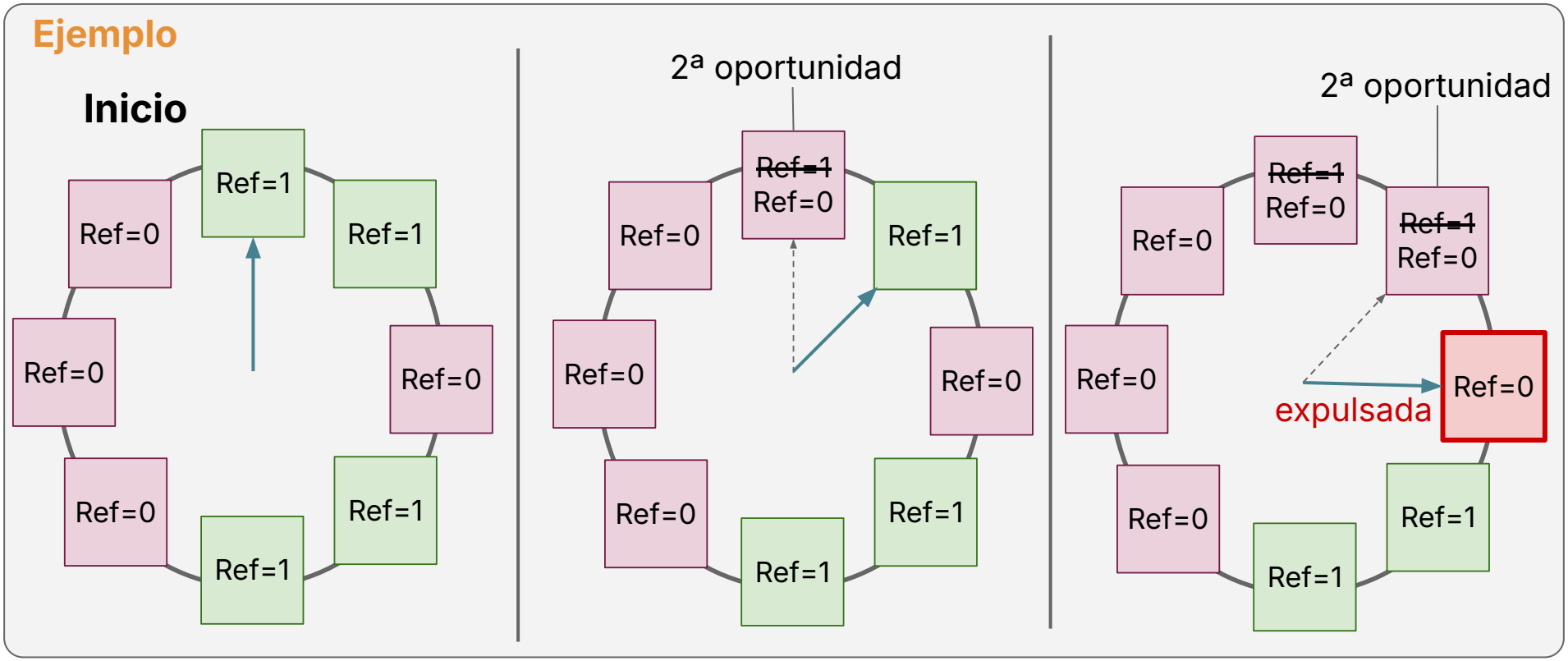
10 fallos

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



Gestión de la Memoria Principal (V)

Ejemplo:

- Memoria física con 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	↓a_0	↓a_0	↓a_0	↓a_1	↓a_1	a_0	a_0	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_0	a_0	a_0
1		b_0	b_0	b_0	b_0	↓b_0	e_0	e_0	e_0	e_0	e_0	e_1	e_0	e_0	e_1
2			g_0	g_0	g_0	g_0	↓g_0	↓g_0	b_0	b_0	b_0	b_0	g_0	g_0	g_0
3					d_0	d_0	d_0	d_0	↓d_0	↓d_0	↓d_1	↓d_1	↓d_0	↓d_1	↓d_1

7 fallos

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*

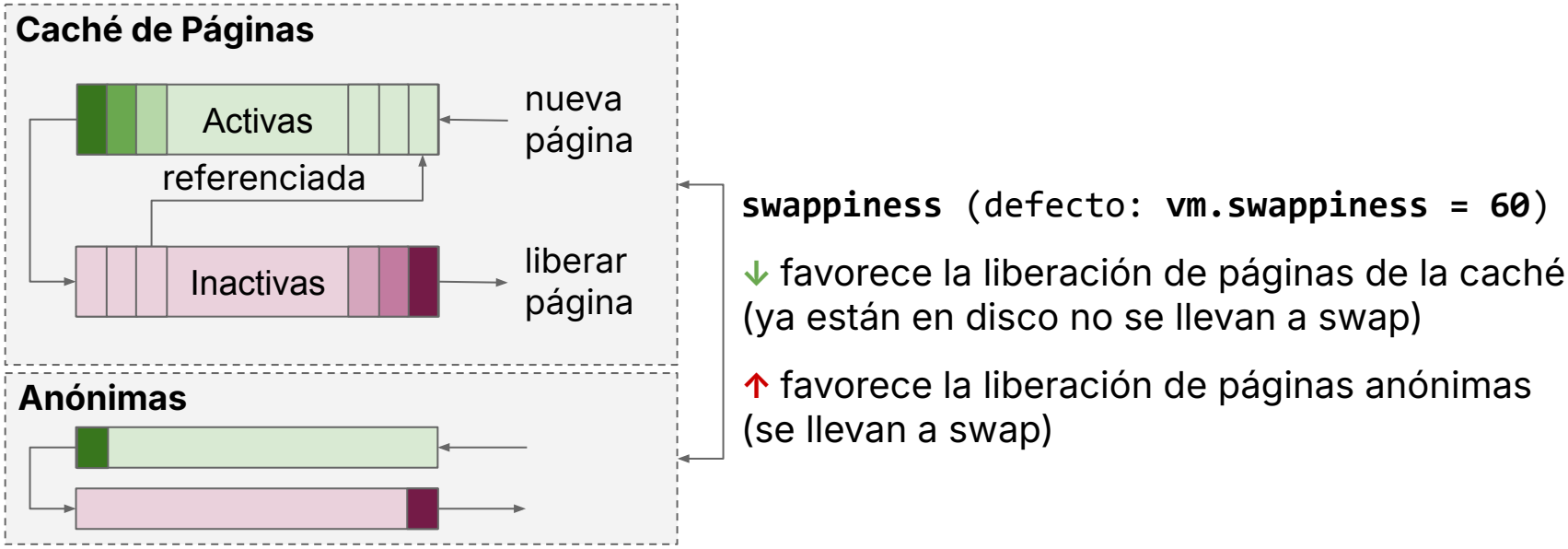
Ref	a	b	g	a	d	e	a	b	a	d	e	g	d	e
0	a_1	a	a	a_4	a	a	a_7	a	a_9	a	a	a	a	a
1		b_2	b	b	b	e_6	e	e	e	e	e_{11}	e	e	e_{14}
2			g_3	g	g	g	g	b_8	b	b	b	g_{12}	g	g
3					d_5	d	d	d	d	d_{10}	d	d	d_{13}	d

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)

```
$ 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)**

Estadísticas de la **política LRU**:

- file de la caché de páginas
- anon páginas anónimas

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