Sistemas de archivos

Diego Fernandez Slezak

Departamento de Computación, FCEyN,
Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

Sistemas Operativos, 2do cuatrimestre de 2025

(2) ¿Qué es el proceso de booteo?

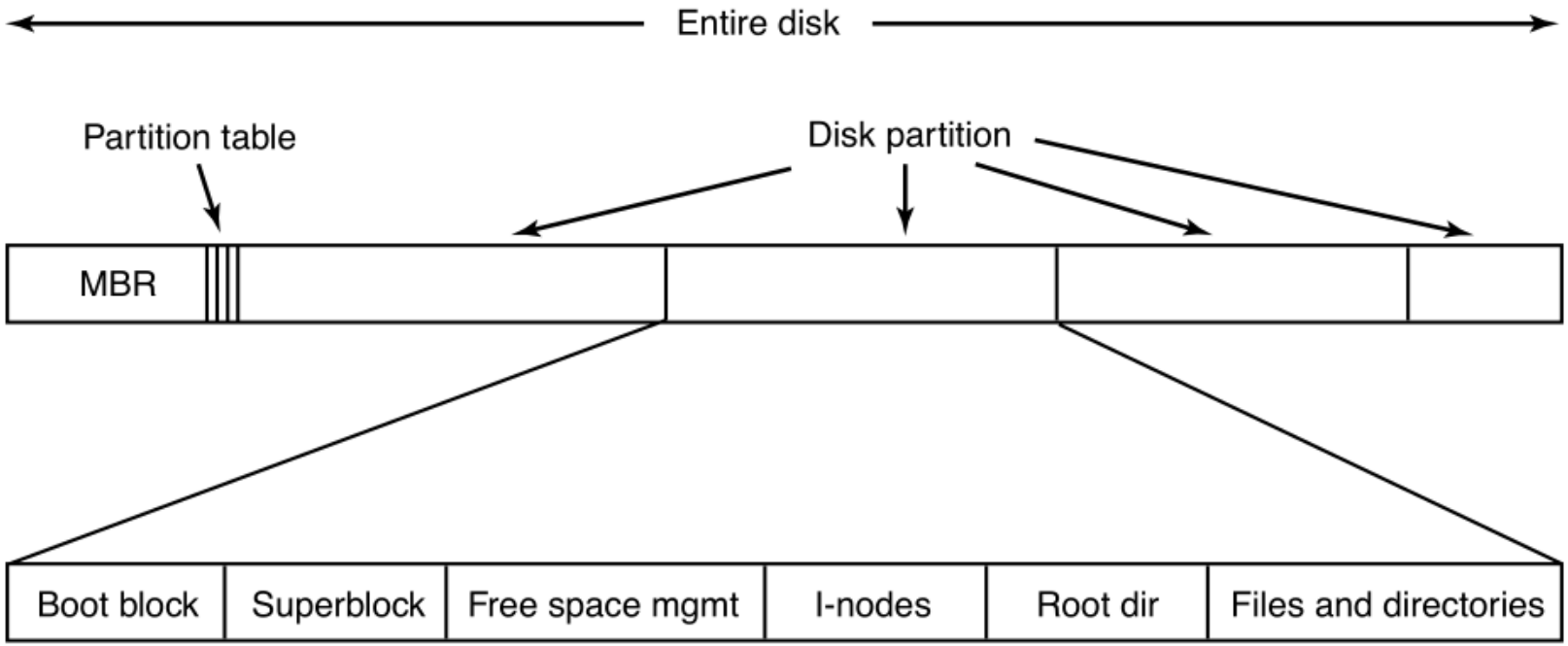
- El proceso de booteo o arranque es la secuencia de eventos que inicia un sistema operativo desde que se enciende el hardware hasta que el sistema está listo para el uso.

(3) Etapas del booteo

- BIOS/UEFI: Inicializa hardware básico.
- Cargador de arranque (ej. GRUB): Selecciona y carga el kernel.
- Kernel: Inicializa el sistema operativo.
- Init/Systemd: Arranca los servicios del sistema.
- Login: Usuario puede iniciar sesión.

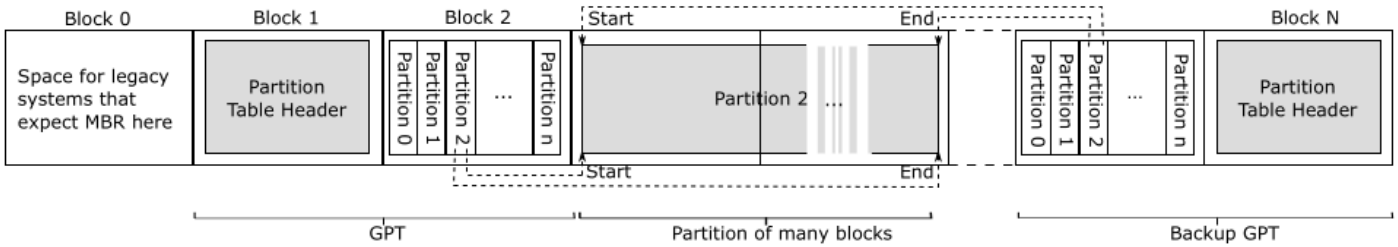
(4) MBR

- Legacy. Es lo que entiende la BIOS (Basic Input-Output System)



(5) GPT

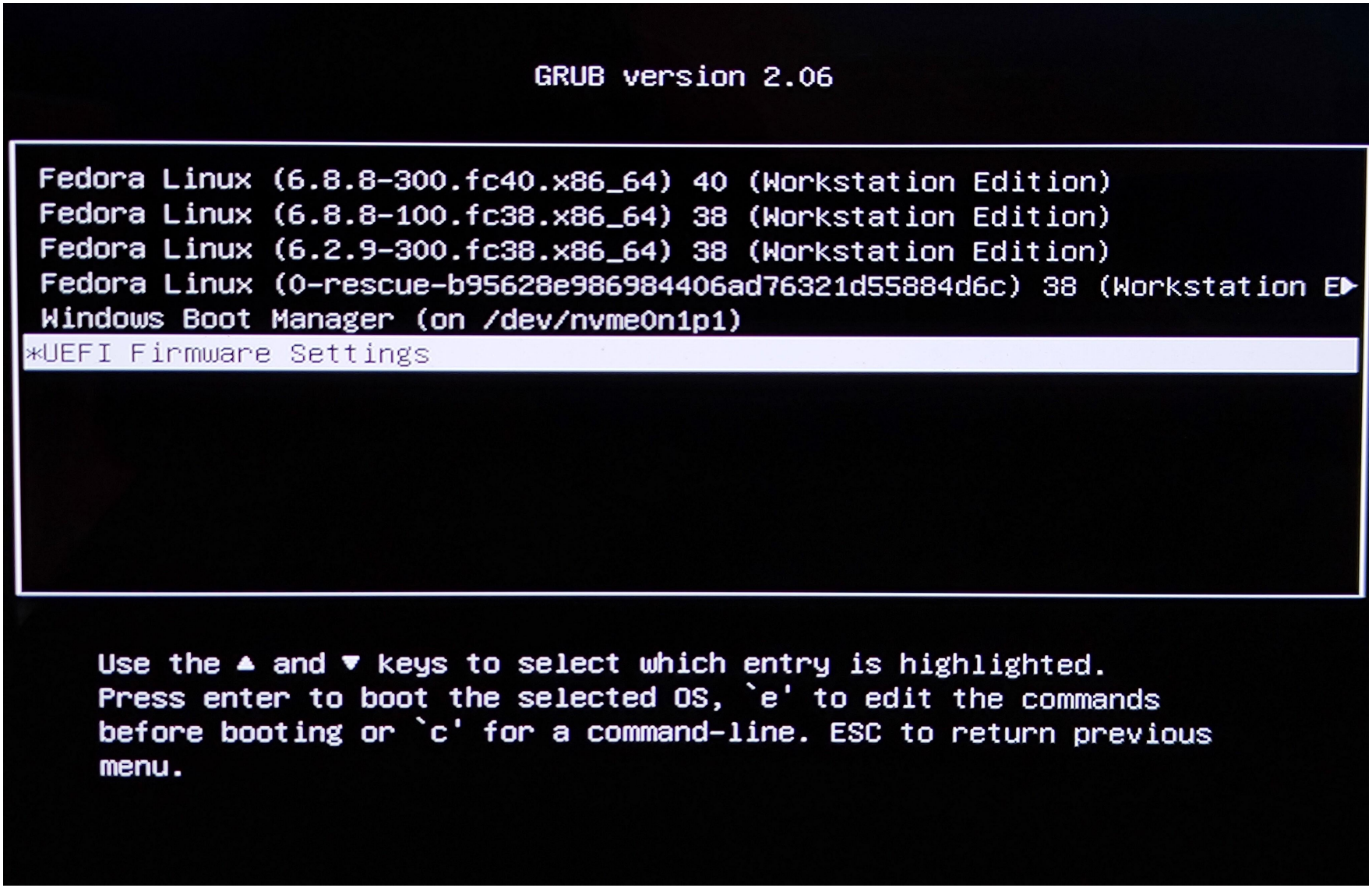
- Utilizado por UEFI (Unified Extensible Firmware Interface)
- Tamaño de particiones mas grandes
- Por defecto, hasta 128 particiones



(6) GRUB (GRand Unified Bootloader)

- GRUB permite elegir entre múltiples sistemas operativos.
- En linux, carga el kernel (comprimido en /boot/vmlinuz*) y le pasa el control.
- Para cargar otro sistema operativo (dual-boot), pasa el control a otro bootloader (chainloading)
- Es ampliamente configurable.

(7) GRUB


GRUB version 2.06
Fedora Linux (6.8.8-300.fc40.x86_64) 40 (Workstation Edition)
Fedora Linux (6.8.8-100.fc38.x86_64) 38 (Workstation Edition)
Fedora Linux (6.2.9-300.fc38.x86_64) 38 (Workstation Edition)
Fedora Linux (0-rescue-b95628e986984406ad76321d55884d6c) 38 (Workstation E
Windows Boot Manager (on /dev/nvme0n1p1)
*UEFI Firmware Settings
Use the ▲ and ▼ keys to select which entry is highlighted.
Press enter to boot the selected OS, `e' to edit the commands
before booting or `c' for a command-line. ESC to return previous
menu.

(8) Archivos

- ¿Qué es un archivo?
- Para nosotros (y para los sistemas operativos como Unix): una secuencia de bytes, sin estructura.
- Se los identifica con un nombre.
- El nombre puede incluir una extensión que podría servir para distinguir el contenido. Por ejemplo:
  - archivo.txt: archivo con contenido de texto
  - archivo.tex: archivo con un fuente de Latex
  - archivo.c: archivo con código fuente en C.

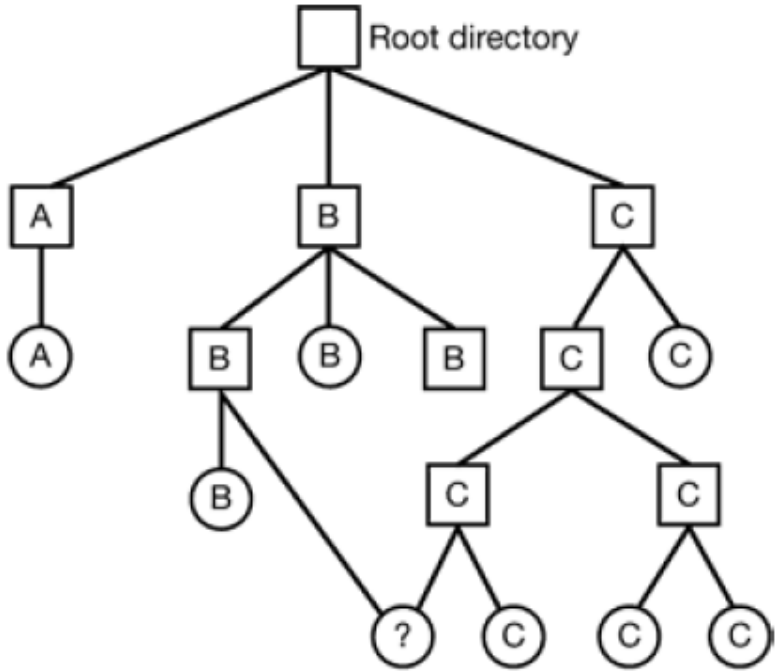
(9) Los sistemas de archivos

- Existe un módulo dentro del kernel encargado de organizar la información en disco: *sistema de archivos* o *file system*.
- Algunos SO soportan sólo uno (ejemplo: DOS sólo soporta FAT),
- ...otros más de uno (Windows soporta FAT, FAT32, NTFS, etc.),
- ... y otros como los Unix modernos suelen venir con soporte para algunos pero mediante módulos dinámicos de kernel se puede hacer que soporten casi cualquiera.
- Otros file systems populares: UFS, FFS, ext2, ext3, ext4, XFS, RaiserFS, ZFS, ISO-9660.
- Existen incluso file systems distribuidos, es decir, file systems donde los datos están distribuidos en varias máquinas en la red. Por ejemplo: NFS, DFS, SMBFS, AFS, CodaFS, etc.

(10) Responsabilidades del FS

- Una de las responsabilidades más elementales es ver cómo se organizan, de manera lógica, los archivos.
  - Interna: como se estructura la información dentro del archivo. E.g. Windows y Unix usan secuencia de bytes. La responsabilidad es del usuario.
  - Externa: cómo se ordenan los archivos. Hoy en día todos los FS soportan el concepto de directorios, lo que hace que la organización sea jerárquica, con forma de árbol.
- Casi todos, además, soportan alguna noción de *link*.
- Un link es un alias, otro nombre para el mismo archivo. Teniendo links la estructura deja de ser arbórea y se vuelve un grafo dirigido propiamente dicho, con ciclos y todo.

(11) Árbol de directorios



(12) Responsabilidades del FS (cont.)

- Además, el FS determina cómo se nombrará a los archivos.
  - Caracteres de separación de directorio.
  - Si tienen o no extensión.
  - Restricciones a la longitud y caracteres permitidos
  - Distinción o no entre mayúsculas y minúsculas.
  - Prefijado o no por el equipo donde se encuentran.
  - Punto de montaje.
- Ejemplos:
  - `/usr/local/etc/apache.conf`
  - `C:\Program Files\Antivirus\Antivirus.exe`
  - `\\SERVIDOR3\Parciales\parcial1.doc`
  - `servidor4:/ejercicios/practica3.pdf`

(13) ¿Qué es el punto de montaje?

- Imaginemos que tengo más de un disco.
- En realidad, más de una unidad de almacenamiento externo.
- Por ejemplo (histórico), una cinta.
- Monto la cinta (es decir, la coloco en el carretel).
  - ¿Cómo me refiero a ella?
  - ¿Cómo sabe el SO que ya está colocada?
- En aquel momento a esta operación se la llamaba *montaje*.
- Y para eso se inventó el comando mount, que le indicaba al SO que la cinta ya estaba colocada, y qué punto del grafo de nombres de archivos íbamos a considerar como la raíz de la cinta.
- Eso permite cosas como `/dispositivos/cintas/cinta1/Fernandez/planilla.ods`.

(14) Responsabilidades del FS (cont.)

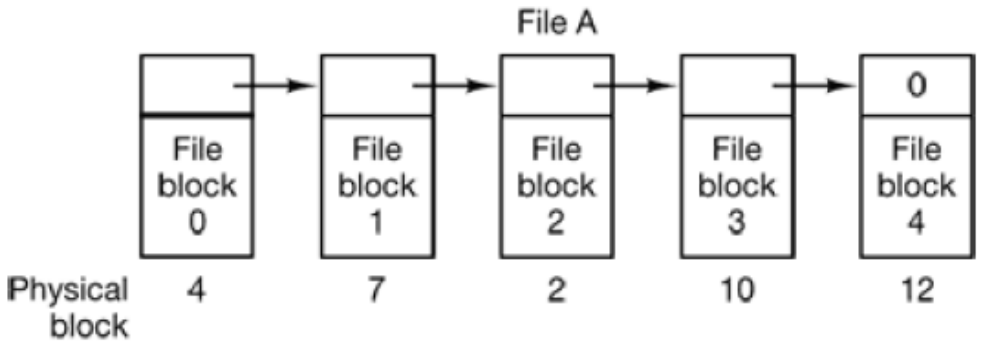
- Más allá de las decisiones que se tomen sobre los puntos anteriores, hay que ver qué pasa tras bambalinas.
- ¿Cómo se representa un archivo? 
- Y dos preguntas relacionadas:
  - ¿Cómo gestiono el espacio libre?
  - ¿Qué hago con los *metadatos*? (ie, los datos sobre los datos: permisos, atributos, etc.).
- Las respuestas a estas preguntas determinan las características del FS, especialmente en cuanto a su rendimiento y confiabilidad.

(15) Representando archivos

- Lo primero que hay que entender es que para el FS un archivo es una lista de bloques + metadata.
- La forma más sencilla de representarlos es poner a los bloques contiguos en el disco.
- Las lecturas son insuperablemente rápidas, pero...
  - ¿Qué pasa si el archivo crece y no tengo más espacio?
  - ¿Qué hago con la fragmentación?
- Nadie usa este esquema en FS de lectoescritura.

(16) El paso obvio

- El paso obvio es usar una lista enlazada de bloques.
- Esto soluciona ambos problemas, pero:
  - Si bien las lecturas consecutivas son razonablemente rápidas, las lecturas aleatorias son muy lentas.
  - Además, desperdicio espacio de cada bloque indicando dónde está el siguiente.



(17) Vuelta de tuerca

- Hay una vuelta de tuerca que se le puede dar a este problema.
- Tengo una tabla que por cada bloque me dice en qué bloque está el siguiente elemento de la lista.
- Ejemplo. El archivo A está en los bloques 1, 2, 5, 7 y 9, el archivo B en los bloques 4, 3 y 8.

Bloque	Siguiente
0	vacío
1	2
2	5
3	8
4	3
5	7
6	vacío
7	9
8	-1
9	-1

(18) FAT

- FAT usa este método.

FAT32	Description
0x?0000000	Cluster libre
0x?0000001	Reservado
0x?0000002 - 0x?FFFFFEF	Clusters de datos
0x?FFFFFF0 - 0x?FFFFFF5	Reservado
0x?FFFFFF6	Reservado
0x?FFFFFF7	Cluster con sector malo
0x?FFFFFF8 - 0x?FFFFFFF	Último cluster en archivo (EOC).

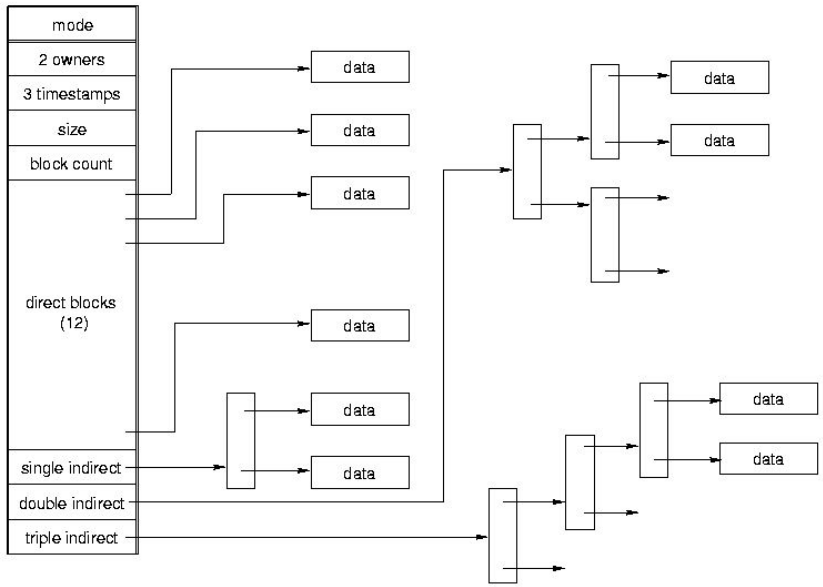
- Soluciona ambos problemas, porque no desperdicio espacio del bloque y porque al tener en memoria todos los bloques que necesito puedo leerlos fuera de orden y no es tan ineficiente para las lecturas no secuenciales.
- Sin embargo, tengo que tener toda la tabla en memoria.
- Puede ser inmanejable para discos grandes.
- Además, única tabla: mucha contención.
- Por otra parte, es poco robusto: si el sistema cae, la tabla estaba en memoria.
- FAT tiene otras limitaciones: no maneja seguridad.

(19) Y... nodos

- La solución Unix son los *inodos*.
- Cada archivo tiene uno.
- En las primeras entradas hay atributos (tamaño, permisos, etc.).
- Luego están las direcciones de algunos bloques, directamente. Esto permite acceder rápidamente a archivos pequeños (si pensamos en bloques de disco de 8 KB, esto permite hasta 96 KB).
- Sigue una entrada que apunta a un bloque llamados *single indirect block*. En este bloque hay punteros a bloques de datos. Eso sirve para archivos de hasta 16 MB.
- A continuación una entrada llamada *double indirect block*, que apunta a una tabla de *single indirect blocks*. Con eso se cubren archivos de hasta 32 GB.
- Le sigue un *triple indirect block*, que apunta a un bloque de *double indirect blocks*. Eso cubre hasta 70 TB.

(20) inodos (cont.)

- Permite tener en memoria sólo las tablas correspondientes a los archivos abiertos.
- Una tabla por archivo $\rightarrow$ mucha menos contención.
- Consistencia: sólo están en memoria las listas correspondientes a los archivos abiertos.



(21) Implementación de directorios

- ¿Cómo se implementa el árbol de directorios?
- Se reserva un inodo como entrada al *root directory*.
- Por cada archivo o directorio dentro del directorio hay una entrada.
- Dentro del bloque se guarda una lista de (inodos, nombre de archivo/directorio).
- En algunos casos, cuando los directorios son grandes, conviene pensarlos como una tabla de hash más que como una lista lineal de nombres, para facilitar las búsquedas.
- A veces esto se hace a mano, en la capa de software de aplicación.
- ¿Y dónde están los inodos?

(22) inodos - archivos y directorios

File descriptor (inode):

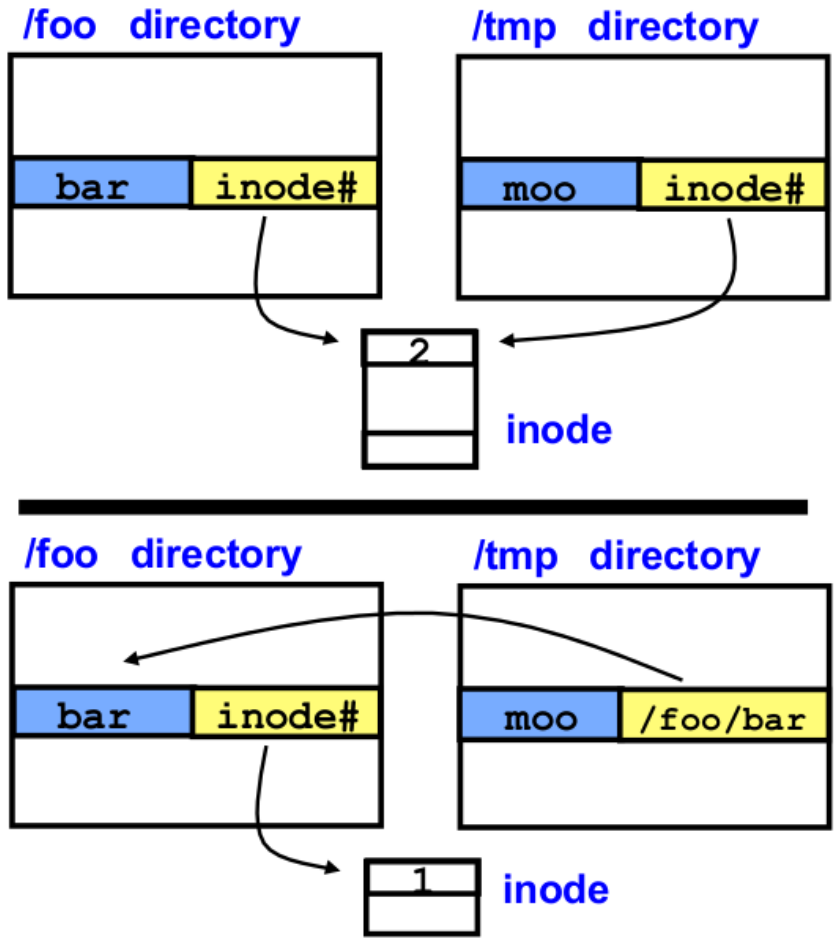
ulong links;
uid_t uid;
gid_t gid;
ulong size;
time_t access_time;
time_t modified_time;
addr_t blocklist…;

Directory file:

Filename	inode#
Filename	inode#
REALLYLONGFILENAME	
inode#	Filename
inode#	Short inode#

(23) inodos - links

- `ln /foo/bar /tmp/moo`
- `ln -s /foo/bar /tmp/moo`



(24) Atributos

- Cuando se habla de *metadata* en general se incluyen los inodos (o la estructura de datos que sea que use el FS) pero además otra información.
- Por ejemplo:
  - Permisos (default y ACLs).
  - Tamaños.
  - Propietario/s.
  - Fechas de creación, modificación, acceso.
  - Bit de archivado.
  - Tipo de archivo (regular, dispositivo virtual, pipe, etc.).
  - Flags.
  - Conteo de referencias.
  - CRC o similar.

(25) Manejo del espacio libre

- Otro problema es cómo manejar el espacio libre.
- Una técnica posible es utilizar un mapa de bits empaquetado, donde los bits en 1 significan libre.
- Así, si una palabra tiene todos 0 puedo saltearla por completo con una única comparación.
- Pero requiere tener el vector en memoria, y eso no está bueno.
- También podemos tener una lista enlazada de bloques libres.
- En general se clusteriza. Es decir, si un bloque de disco puede contener n punteros a otros bloques, los primeros $n-1$ indican bloques libres y el último es el puntero al siguiente nodo de la lista.
- Un refinamiento consiste en que cada nodo de la lista indique, además del puntero, cuántos bloques libres consecutivos hay a partir de él.

(26) Caché

- Una manera de mejorar el rendimiento es mediante la introducción de un *caché*. 
- Ie, una copia en memoria de bloques del disco.
- Se maneja de manera muy similar a las páginas.
- De hecho, los SO modernos manejan un caché unificado para ambas, ya que si no, al mapearse archivos en memoria, tendríamos dos copias de lo mismo.
- Un efecto muy interesante del caché es que puede grabar las páginas de manera ordenada, de manera tal que el administrador de E/S pueda planificar más eficientemente la escritura. 
- A veces, las aplicaciones pueden configurarse para hacer escritura *sincrónica*, es decir, escribiendo en disco inmediatamente.
- Esto es mucho más lento.

(27) Consistencia

- ¿Qué pasa si se corta la energía eléctrica antes de que se graben a disco los cambios?
- Los datos se pierden. Por eso se provee el system call fsync(), para indicarle al SO que queremos que las cosas se graben sí o sí. Es decir, que grabe las páginas "sucias" del caché.
- Sin embargo, el sistema podría interrumpirse en cualquier momento.
- La alternativa más tradicional consiste en proveer un programa que restaura la consistencia del FS. En Unix se llama fsck.
- Básicamente, recorre todo el disco y por cada bloque cuenta cuántos inodos le apuntan y cuántas veces aparece referenciado en la lista de bloques libres. Dependiendo de los valores de esos contadores se toman acciones correctivas, cuando se puede.

(28) Consistencia (cont.)

- La idea es agregarle al FS un bit que indique apagado normal.
- Si cuando el sistema levanta ese bit no está prendido, algo sucedió y se debe correr fsck.
- El problema es que eso toma mucho tiempo y el sistema no puede operar normalmente hasta que este proceso termine.
- Hay algunas alternativas para evitar eso, total o parcialmente.
- Una se llama *soft updates*: se trata de rastrear las dependencias en los cambios de la metadata para grabar sólo cuando hace falta.
- Sigue haciendo falta una recorrida por la lista de bloques libres, pero se puede hacer mientras el sistema está funcionando.
- Otra: *journaling*. 

(29) Journaling

- Algunos FS, como ReiserFS, ZFS, ext3, NTFS, etc. llevan un *log* o *journal*.
- Ie, un registro de los cambios que habría que hacer.
- Eso se graba en un buffer circular. Cuando se baja el caché a disco, se actualiza una marca indicando qué cambios ya se reflejaron.
- Si el buffer se llena, se baja el caché a disco.
- Hay un impacto en performance pero es bajo porque:
  - Este registro se escribe en bloques consecutivos, y una escritura secuencial es mucho más rápida que una aleatoria.
  - Los FS que no hacen journal escriben a disco inmediatamente los cambios en la metadata, para evitar daños mayores en los archivos.
- Cuando el sistema levanta, se aplican los cambios aún no aplicados. Esto es mucho más rápido que recorrer todo el disco.

(30) Características avanzadas

- Otras cosas que puede incluir un FS avanzado:
- Cuotas de disco:
  - Idea: limitar cuánto espacio puede utilizar cada usuario.
  - Notar: puede ser difícil de implementar. No alcanza con poner un contador simple en el write() porque puede haber escrituras concurrentes.
- Encripción:
  - ¿Cómo/dónde guardo la clave?
  - Por ejemplo, CFS y EFS.
- Snapshots:
  - Son "fotos" del disco en determinado momento.
  - Se hacen instáneamente.
  - El SO sólo duplica los archivos que se modifican.
  - Muy bueno para hacer copias de seguridad.

(31) Características avanzadas (cont.)

- Manejo de RAID por software.
  - Desventaja: más lento.
  - Ventaja: mayor control.
  - Independencia de proveedor.
  - A veces, nuevos niveles de redundancia (por ejemplo, ZFS).
- Compresión.

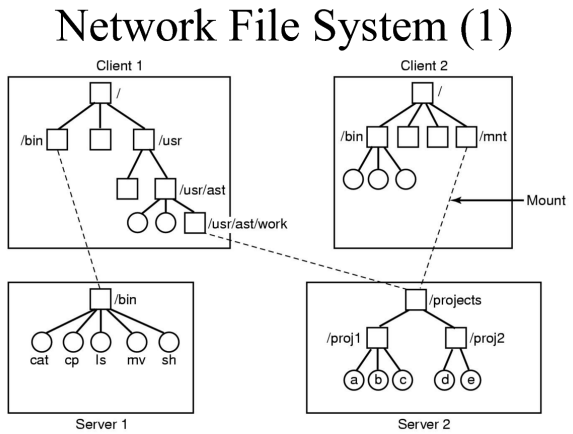
(32) Performance

- Muchos factores impactan en el rendimiento:
- Tecnología de disco.
- Política de scheduling de E/S.
- Tamaños de bloque.
- Cachés del SO.
- Cachés de las controladoras.
- Manejo general de locking en el kernel.
- FS
  - Journaling vs. softupdates. La batalla continua...
  - Ver por ejemplo; `http://www.usenix.org/event/usenix2000/general/full_papers/seltzer/seltzer_html/`
- ¿Hasta el último nanosegundo de performace? Tal vez pueda sacrificar un poco en pos de mantenibilidad o robustez.

(33) NFS

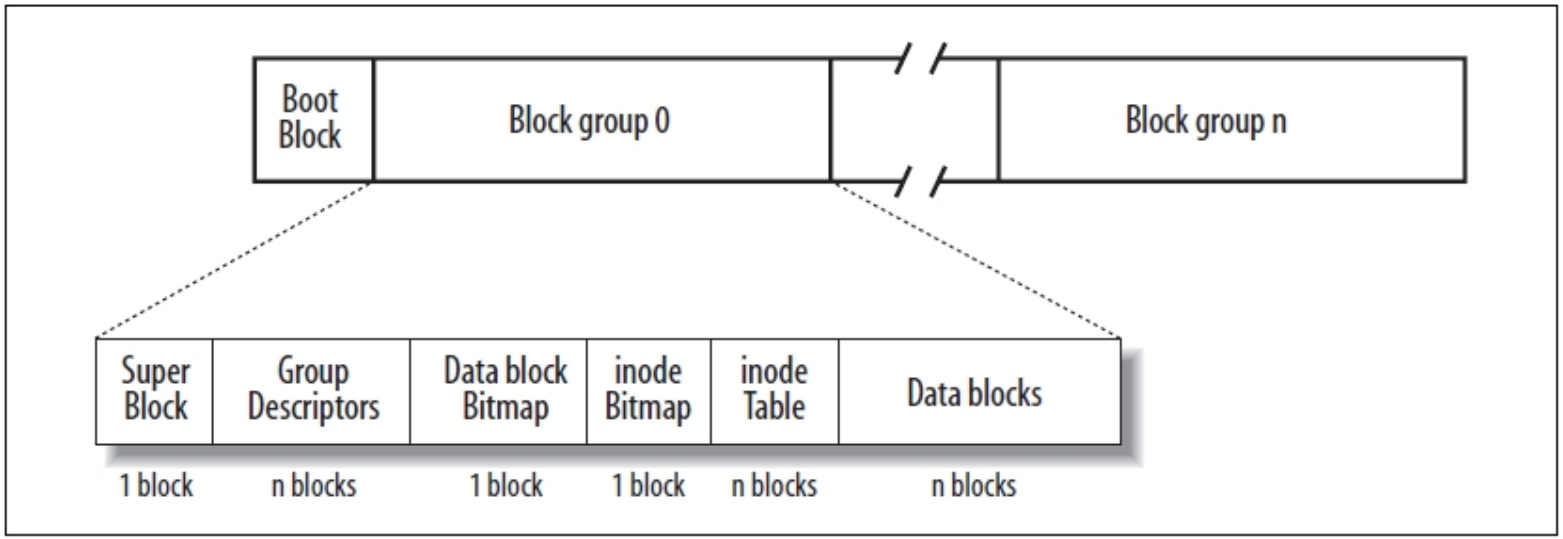
- El *Network File System* es un protocolo que permite acceder a FS remotos como si fueran locales, utilizando RPC.
- La idea es que un FS remoto se monta en algún punto del sistema local y las aplicaciones acceden a archivos de ahí, sin saber que son remotos.
- Para poder soportar esto, los SO incorporan una capa llamada *Virtual File System*.
- Esta capa tiene *vnodes* por cada archivo abiertos. Se corresponden con inodos, si el archivo es local. Si es remoto, se almacena otra información.
- Así, los pedidos de E/S que llegan al VFS son despachados al FS real, o al *cliente de NFS*, que maneja el protocolo de red necesario.
- Si bien del lado del cliente es necesario un módulo de kernel, del lado del server alcanza con un programa común y corriente.

(34) NFS (cont.)



- Otros FS distribuidos funcionan de manera similar (en cuanto a su integración con el kernel).
- Notar que, desde cierto punto de vista, NFS no es 100 % distribuido, ya que todos los datos de un mismo "directorio" deben vivir físicamente en el mismo lugar.
- Hay FS 100 % distribuidos, como AFS o Coda.
- Han tenido un éxito relativo.

(35) Estructura de FS Ext2



- El superbloque (superblock) contiene metadatos críticos del sistema de archivos tales como información acerca del tamaño, cantidad de espacio libre y donde se encuentra los datos. Si el superbloque es dañado, y su información se pierde, no podría determinar que partes del sistema de archivos contiene información.

(36) Ext2 - superbloque

Type	Field	Description
__le32	s_inodes_count	Total number of inodes
__le32	s_blocks_count	Filesystem size in blocks
__le32	s_r_blocks_count	Number of reserved blocks
__le32	s_free_blocks_count	Free blocks counter
__le32	s_free_inodes_count	Free inodes counter
__le32	s_first_data_block	Number of first useful block (always 1)
__le32	s_log_block_size	Block size
__le32	s_log_frag_size	Fragment size
__le32	s_blocks_per_group	Number of blocks per group
__le32	s_frags_per_group	Number of fragments per group
__le32	s_inodes_per_group	Number of inodes per group
__le32	s_mtime	Time of last mount operation
__le32	s_wtime	Time of last write operation
__le16	s_mnt_count	Mount operations counter
__le16	s_max_mnt_count	Number of mount operations before check
__le16	s_magic	Magic signature
__le16	s_state	Status flag
__le16	s_errors	Behavior when detecting errors
__le16	s_minor_rev_level	Minor revision level
__le32	s_lastcheck	Time of last check
__le32	s_checkinterval	Time between checks

(37) Ext2 - superbloque (cont.)

__le32	s_creator_os	OS where filesystem was created
__le32	s_rev_level	Revision level of the filesystem
__le16	s_def_resuid	Default UID for reserved blocks
__le16	s_def_resgid	Default user group ID for reserved blocks
__le32	s_first_ino	Number of first nonreserved inode
__le16	s_inode_size	Size of on-disk inode structure
__le16	s_block_group_nr	Block group number of this superblock
__le32	s_feature_compat	Compatible features bitmap
__le32	s_feature_incompat	Incompatible features bitmap
__le32	s_feature_ro_compat	Read-only compatible features bitmap
__u8 [16]	s_uuid	128-bit filesystem identifier
char [16]	s_volume_name	Volume name
char [64]	s_last_mounted	Pathname of last mount point
__le32	s_algorithm_usage_bitmap	Used for compression
__u8	s_prealloc_blocks	Number of blocks to preallocate
__u8	s_prealloc_dir_blocks	Number of blocks to preallocate for directories
__u16	s_padding1	Alignment to word
__u32 [204]	s_reserved	Nulls to pad out 1,024 bytes

(38) Ext2 - Group Descriptor

Type	Field	Description
__le32	bg_block_bitmap	Block number of block bitmap
__le32	bg_inode_bitmap	Block number of inode bitmap
__le32	bg_inode_table	Block number of first inode table block
__le16	bg_free_blocks_count	Number of free blocks in the group
__le16	bg_free_inodes_count	Number of free inodes in the group
__le16	bg_used_dirs_count	Number of directories in the group
__le16	bg_pad	Alignment to word
__le32 [3]	bg_reserved	Nulls to pad out 24 bytes

(39) Ext2 - Inode

Type	Field	Description
__le16	i_mode	File type and access rights
__le16	i_uid	Owner identifier
__le32	i_size	File length in bytes
__le32	i_atime	Time of last file access
__le32	i_ctime	Time that inode last changed
__le32	i_mtime	Time that file contents last changed
__le32	i_dtime	Time of file deletion
__le16	i_gid	User group identifier
__le16	i_links_count	Hard links counter
__le32	i_blocks	Number of data blocks of the file
__le32	i_flags	File flags
union	osd1	Specific operating system information
__le32 [EXT2_N_BLOCKS]	i_block	Pointers to data blocks
__le32	i_generation	File version (used when the file is accessed by a network filesystem)
__le32	i_file_acl	File access control list
__le32	i_dir_acl	Directory access control list
__le32	i_faddr	Fragment address
union	osd2	Specific operating system information

(40) Algunos números - Ext2

- Supongamos una particion Ext2 de 8GB, con bloques de 4KB.
- El bloque de bitmap de datos (4KB) describe 32K bloques de datos (es decir, 128 MB).
- Entonces, como mucho se requieren 64 grupos de bloques.
- Más info: Libro *Undestanding the Linux Kernel - 3rd edition*

(41) ¿Qué es LVM?

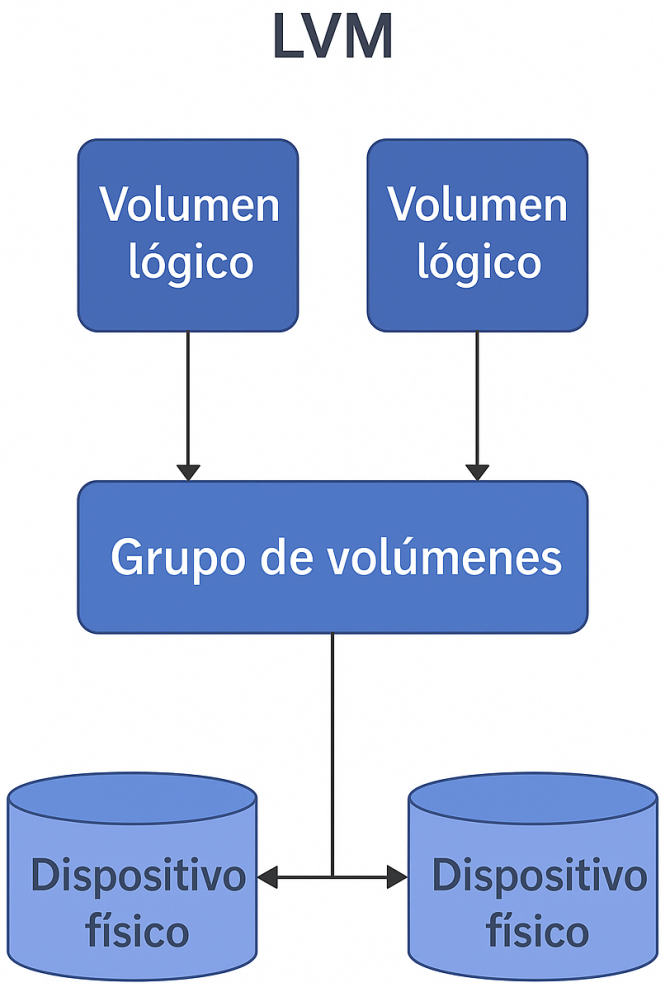
- LVM es un sistema de administración de volúmenes lógicos que proporciona mayor flexibilidad en la gestión del almacenamiento.

(42) Ventajas de LVM

- Redimensionar particiones fácilmente.
- Crear snapshots.
- Mejor uso del espacio en disco.
- Se puede realizar las operaciones en caliente, sin necesidad de downtime.

(43) Componentes de LVM

- **Physical Volume (PV)**: Disco o partición física.
- **Volume Group (VG)**: Agrupación de PVs.
- **Logical Volume (LV)**: Volumen lógico dentro de un VG.



(44) LVM

- Ejemplo de uso

```
Crear un volumen fisico
sudo pvcreate /dev/sdb1

Crear un grupo de volumenes
sudo vgcreate mi_vg /dev/sdb1

Crear un volumen logico
sudo lvcreate -L 10G -n mi_lv mi_vg

Crear el Filesystem y montarlo
sudo mkfs.ext4 /dev/mi_vg/mi_lv
sudo mount /dev/mi_vg/mi_lv /mnt

Para consultas
pvdisplay, vgdisplay, lvdisplay
```

(45) Dónde estamos

- Vimos
  - Booteo
  - Responsabilidades del FS.
  - Punto de montaje.
  - Representación de archivos.
  - Manejo del espacio libre.
  - FAT, inodos.
  - Atributos.
  - Directorios.
  - Caché.
  - Consistencia, journaling.
  - Características avanzadas.
  - NFS, VFS.
  - Ext2
  - Logical Volume Management (LVM)