Sistemi Operativi

C.d.L. in Informatica (laurea triennale)
Anno Accademico 2023-2024

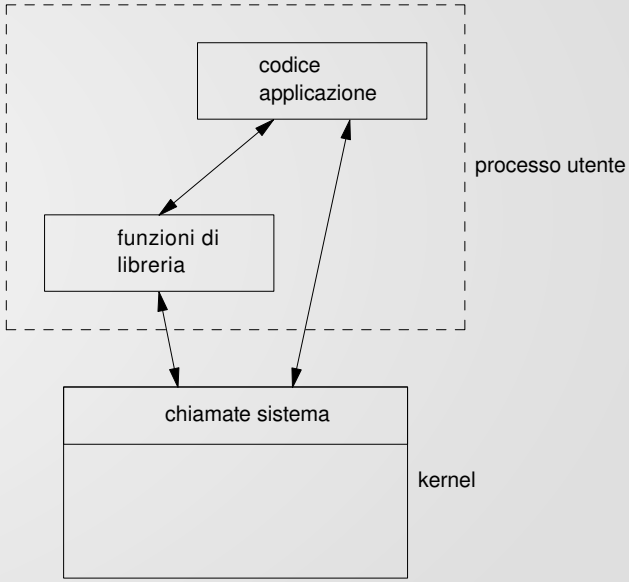
Laboratorio di Sistemi Operativi

Dipartimento di Matematica e Informatica – Catania

Chiamate di Sistema

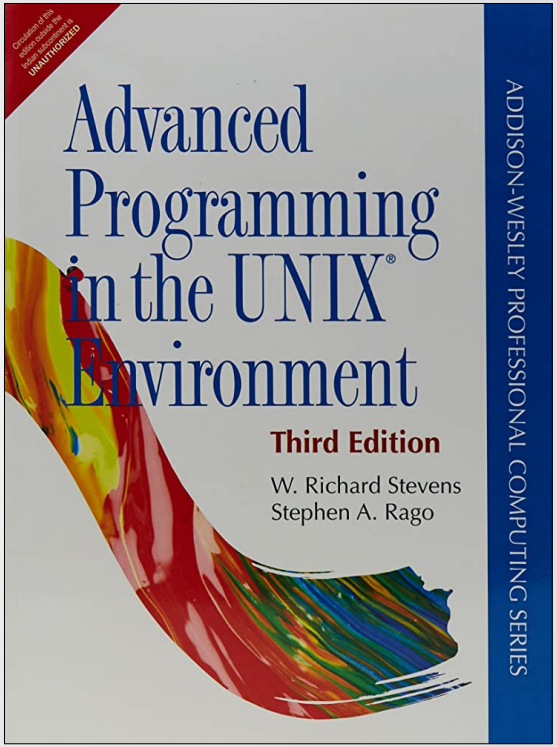
- Nei nostri programmi possiamo impiegare:
  - **chiamate di sistema**: servizi offerti direttamente dal Sistema Operativo (TRAP, modalità kernel)
  - **chiamate di libreria**: funzioni incluse in libreria di sistema (modalità utente)

- nel corso ci occuperemo dei seguenti sotto-sistemi:
  - gestione dei **file system** (file e directory) e dell'**I/O**
  - gestione dei **processi**
  - gestione dei **thread**
  - **comunicazione** e **sincronizzazione** di processi e thread



Materiale di Riferimento

- Manuale di riferimento:
  - ***Advanced Programming in the UNIX Environment*** (terza edizione – 2013) di Stevens e Rago
- è possibile utilizzare qualunque altro testo o risorsa web che tratti l'argomento
- altre valide alternative:
  - ***Programming With POSIX Threads*** di Butenhof
  - ***PThreads Primer:*** ***A Guide to Multithreaded Programming*** di Lewis e Berg



Documentazione

- Le pagine di manuale (**man pages**) UNIX rappresentano la documentazione ufficiale:
  - accessibile da:
    - **shell**: `man` ***`comando-o-funzione`***
      - pacchetto **`manpages-posix-dev`** su Debian/Ubuntu
    - **online:** man.cx , man7.org , …
  - **sezioni**:
    - n.1: comandi utente
    - n.2: chiamate di sistema
    - n.3: librerie di sistema
    - …
    - n.8: comandi di amministrazione
  - casi di omonimia: **`man chown`** *vs.* **`man 3 chown`**

Standard

- L'uso degli **standard** è importante per creare codice che sia **portatile** (previa compilazione) su molteplici piattaforme e architetture.
  - **ISO C**: linguaggio e funzioni di libreria
  - **IEEE POSIX** (Portable Operating System Interface) Std 1003.1 e estensioni:
    - POSIX.1: interfacce di programmazione con sintassi C (sovrapp. con ISO C)
    - POSIX.2: comandi e utilità sulla shell UNIX
    - POSIX.4: estensioni real-time (tra cui i thread)
    - POSIX.7: amministrazione di sistema
- **Supporto**:
  - **GNU/Linux**: alquanto completo (**piattaforma di riferimento** per il laboratorio)
    - con alcune estensioni **GNU** specifiche attive di default
      - → si può forzare lo stardard POSIX con: `#define _POSIX_C_SOURCE 200809L`
  - **Windows**: parziale ma ampliabile con **Windows Subsystem for Linux** (WSL)
  - **MacOS**: alquanto completo

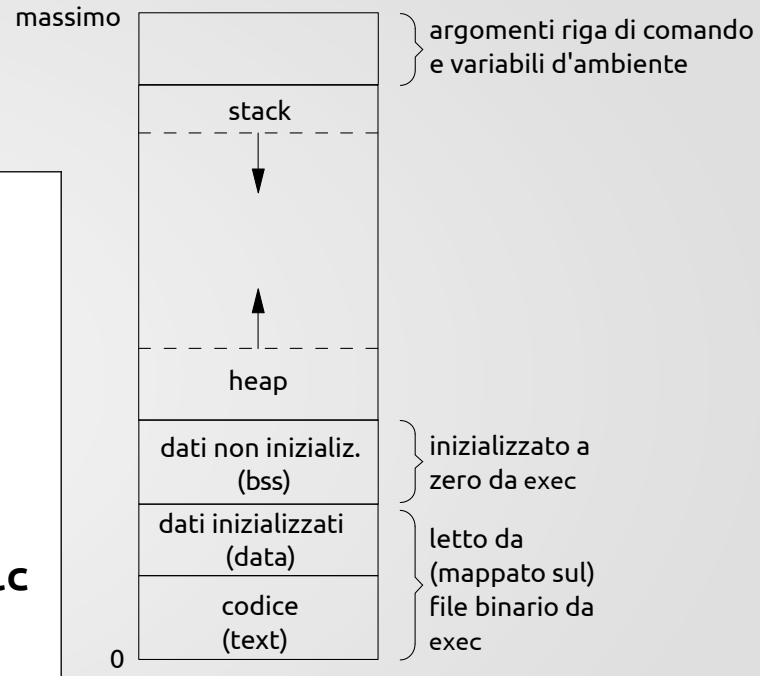
Creazione di Programmi Eseguibili

- Compilazione diretta di un solo sorgente:
  - **`gcc -o` *`nome-eseguibile sorgente.c`***
- compilazione da sorgenti multipli:
  - **`gcc -c` *`file1.c`* `;` `gcc -c` *`file2.c`***
  - **`gcc -o` *`nome-eseguibile file1.o file2.o`***
- linking con librerie: opzione **`-l` *`nome-libreria`***
  - **`gcc -l m -l pthread` *`sorgente.c`***
  - linking statico: opzione aggiuntiva **`-static`**
- specifica dello standard C da utilizzare: opzione **`-std=`**
  - **`gcc -std=c99` *`sorgente.c`***
- per progetti più articolati si può usare **`make`** e un progetto **`makefile`**
  - regole del tipo: **`target` ← `dipendenze / comando`**
  - esempio: **`makefile.sample`**

Spazio di Indirizzamento Virtuale

- **dati inizializzati** (data):
  - `int max = 100;`
- **dati non inizializzati** (bss)
  - `int vector[50];`

```
$ size /usr/bin/gcc /bin/bash
   text    data     bss     dec     hex filename
1028295   10184   15600 1054079  10157f /usr/bin/gcc
$ gcc -o hello hello.c
$ gcc -static -o hello-static hello.c
$ ls -l hello hello-static
-rwxr-xr-x 1 mario mario  15416 26 mag 22.17 hello
-rwxr-xr-x 1 mario mario 733560 26 mag 22.17 hello-static
$ size hello hello-static
   text    data     bss     dec     hex filename
   1310     584       8    1902     76e hello
 619340   20816   22624  662780   a1cfc hello-static
```



Gestione Standard degli Errori

- La maggior parte delle chiamate di sistema segnalano **errori** nell'esecuzione:
  - riportando un **valore di ritorno** anomalo (in genere -1)
  - impostando una **variabile globale** prestabilita:
    - `extern int errno;`
    - dichiarata nell'header `errno.h` (generalmente automaticamente inclusa)

```
#define EPERM           1       /* Operation not permitted */
#define ENOENT          2       /* No such file or directory */
#define ESRCH           3       /* No such process */
#define EINTR           4       /* Interrupted system call */
…
```

    - nota: in caso di successo `errno` non viene resettata!
  - **errori fatali** *vs.* **non fatali** (ad es. `EINTR`, `ENFILE`, `ENOBUFS`, `EAGAIN`, ...)

```
char *strerror(int errnum);
void perror(const char *s);
```

`<string.h>`, `<stdio.h>`

Terminazione del Processo

```
void exit(int status);
int atexit(void (*func)(void));
```

<stdlib.h>

- **exit** termina il processo con ***exit code*** pari a `(status && 0xFF)`
  - convenzione UNIX (quasi universale): "0" = "*tutto ok*", ">0" = "*errore*"
  - costanti apposite per maggiore portatilità: **EXIT_SUCCESS**, **EXIT_FAILURE**
- un processo termina anche quando:
  - il `main` ritorna (si può pensare a qualcosa tipo: `exit(main(argc, argv))`)
  - l'ultimo thread termina
- `exit` termina in "*modo pulito*" il processo:
  - scrivendo eventuali buffer in sospeso (vedi *stream* più avanti)
  - eseguendo eventuali procedure di chiusura registrate con **atexit**
- esempio: **at-exit.c**

Descrittori di File

- Ogni processo può aprire uno o più file ottenendo un intero non negativo detto **descrittore di file** (*file descriptor*) come riferimento
- esistono tre **canali predefiniti** a cui è associato già un descrittore:
  - **standard input** (0)
  - **standard output** (1)
  - **standard error** (2)
  - in **`unistd.h`** sono definite apposite costanti:
    - **`STDIN_FILENO`**, **`STDOUT_FILENO`** e **`STDERR_FILENO`**
  - in esecuzioni dirette in genere sono associati al terminale ma non sempre:
    - **`./my-prog > output-file.txt < input-file.txt`**
    - **`cat input.txt | ./my-prog | sort > output.txt`**

Apertura, Creazione e Chiusura di un File

```
int open(const char *path, int oflag, [ mode_t mode ] );
int creat(const char *path, mode_t mode );
int close(int fd)
```

<fcntl.h>, <unistd.h>

- **open** apre (ed eventualmene crea) un file con percorso **path**
  - **oflag**: intero che può combinare alcuni flag per l'apertura:
    - **O_RDONLY** / **O_WRONLY** / **O_RDWR** (in modo mutuamente esclusivo)
    - **O_APPEND**: ogni scrittura avverrà alla fine del file
    - **O_CREAT**: crea il file se non esiste usando i permessi indicati in **mode**
    - **O_EXCL**: usato con `O_CREAT`, genera un errore se il file esiste già
    - **O_TRUNC**: se il file esiste, viene troncato ad una lunghezza pari a 0
  - ritorna: -1 in caso di errore o il descrittore del file appena aperto (≥0)
- **creat** equivale a: `open(path, O_RDWR | O_CREAT | O_TRUNC, mode)`
- **close** chiude un file aperto

Permessi sugli Oggetti del File-System UNIX

- I permessi sono di triplice natura: **lettura** (R) / **scrittura** (W) / **esecuzione** (X)
- il tipo **`mode_t`** è un intero che codifica una **maschera con permessi** per:
  - **utente proprietario** (USR)
  - **gruppo proprietario** (GRP)
  - **tutti gli altri utenti** (OTH)
- la maschera si può ottenere da costanti definite in **`sys/stat.h`**:

`S_IRUSR`	**`S_IWUSR`**	**`S_IXUSR`**
`S_IRGRP`	**`S_IWGRP`**	**`S_IXGRP`**
`S_IROTH`	**`S_IWOTH`**	**`S_IXOTH`**

- è anche prassi, non raccomandata, utilizzare direttamente la **rappresentazione numerica ottale**: ad esempio: `0640 ≈ S_IRUSR | S_IWUSR | S_IRGRP`
- per le **directory**: X rappresenta il **diritto di attraversamento**

Maschera di Creazione per i Permessi

- Quando un file (o una cartella) viene creato, la maschera specificata viene combinata con una **maschera di creazione** che inibisce globalmente alcuni permessi per ragioni di **sicurezza**
  - *maschera-effettiva* = *maschera-specificata* & (~ *maschera-creazione*)
- ogni processo ha la propria maschera di creazione che viene ereditata dai figli

```
mode_t umask(mode_t cmask);
```

<sys/stat.h>

- anche la **shell** ha propria maschera di creazione che può essere cambiata con l'omonimo comando (**umask**)
- esempio: **creation-mask.c**

Posizionamento

```
off_t lseek(int fd, off_t offset, int whence);
```

<unistd.h>

- ogni file aperto ha un **file offset** che simula l'accesso sequenziale
  - posto a 0 in apertura se non si è usato `O_APPEND`
  - aggiornato ad ogni operazione
- **`lseek`** posiziona effettua uno spostamento di **`offset`** byte rispetto a **`whence`**:
    - **`SEEK_SET`**: rispetto all'inizio del file
    - **`SEEK_CUR`**: rispetto alla posizione attuale (`offset` può essere negativo)
    - **`SEEK_END`**: rispetto alla fine del file (`offset` può essere negativo)
  - ritorna: -1 in caso di errore o la nuova posizione rispetto all'inizio del file (≥0)
  - non comporta alcuna operazione di I/O e valido solo su file
- ottenere la posizione attuale: `pos = lseek(fd, 0, SEEK_CUR);`
- esempio: **`test-seek-on-stdin.c`**

Lettura e Scrittura

```
ssize_t read(int fd, void *buf, size_t nbytes);
ssize_t write(int fd, const void *buf, size_t nbytes);
                                                    <unistd.h>
```

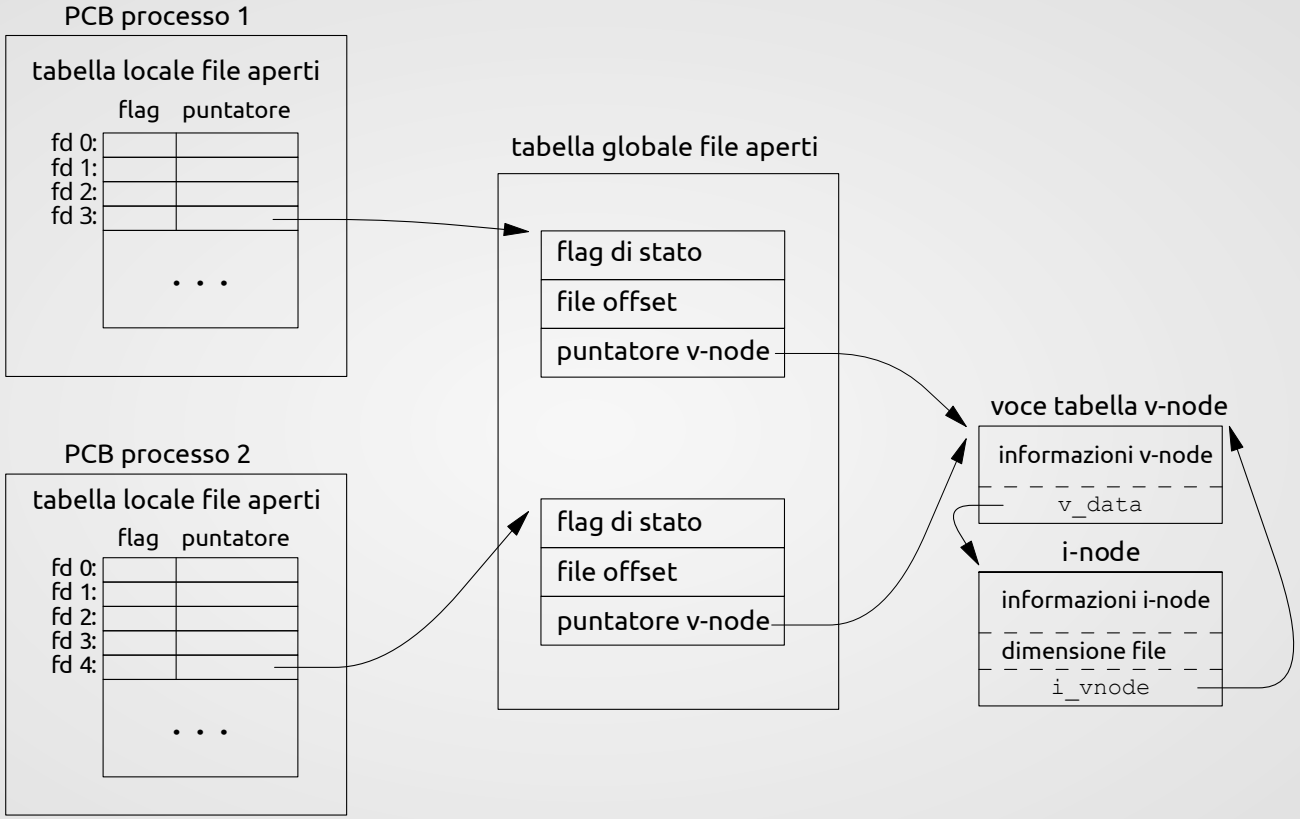
- **`read`** legge **`nbytes`** byte dal descrittore **`fd`** mettendoli su buffer **`buf`**
  - ritorna: -1 in caso di errore, 0 se siamo alla fine del file, altrimenti il numero di byte effettivamente letti (>0)
    - può leggere meno dati se il file sta finendo, se leggendo da terminali, pipe, socket di rete, a causa dei segnali, …
- **`write`** legge **`nbytes`** byte dal buffer **`buf`** e li scrive sul descrittore **`fd`**
  - ritorna: -1 in caso di errore o il numero di byte trasferiti (≥0)
- esempi: **`count.c`**, **`hole.c`**, **`copy.c`**

Efficienza dell'I/O su File

dimens. buffer	CPU utente (s)	CPU kernel (s)	clock time (s)	interazioni
1	20,03	117,50	138,73	516.581.760
2	9,69	58,76	68,60	258.290.880
4	4,60	36,47	41,27	129.145.440
8	2,47	15,44	18,38	64.572.720
16	1,07	7,93	9,38	32.286.360
32	0,56	4,51	8,82	16.143.180
64	0,34	2,72	8,66	8.071.590
128	0,34	1,84	8,69	4.035.795
256	0,15	1,30	8,69	2.017.898
512	0,09	0,95	8,63	1.008.949
1.024	0,02	0,78	8,58	504.475
2.048	0,04	0,66	8,68	252.238
4.096	0,03	0,58	8,62	126.119
8.192	0,00	0,54	8,52	63.060
16.384	0,01	0,56	8,69	31.530
32.768	0,00	0,56	8,51	15.765
65.536	0,01	0,56	9,12	7.883
131.072	0,00	0,58	9,08	3.942
262.144	0,00	0,60	8,70	1.971
524.288	0,01	0,58	8,58	986

Condivisione di File e Strutture Dati di Supporto

- La gestione dei file del Sistema Operativo richiede diverse **strutture dati**:



Letture e Scritture Atomiche

- Ragionando in uno scenario **multi-processo/multi-thread**:
  - ogni voce della tabella globale ha il proprio file offset
  - lo stesso file può essere aperto da più processi
  - i thread condividono la tabella locale del processo e quindi i file offset
- esempio: **accodamento concorrente** di dati (log file)
  - multi-processo: i file offset potrebbero non sempre puntare alla fine
    - il flag `O_APPEND` garantisce che ogni scrittura avvenga alla fine del file
- esempio: **letture e scritture concorrenti** ad **accesso diretto** sullo stesso file
  - multi-thread: ci possono essere corse critiche interlacciando lseek/read-write
    - è possibile rendere atomiche tali operazioni:

```
ssize_t pread(int fd, void *buf, size_t nbytes, off_t offset);
ssize_t pwrite(int fd, const void *buf, size_t nbytes, off_t offset);
```

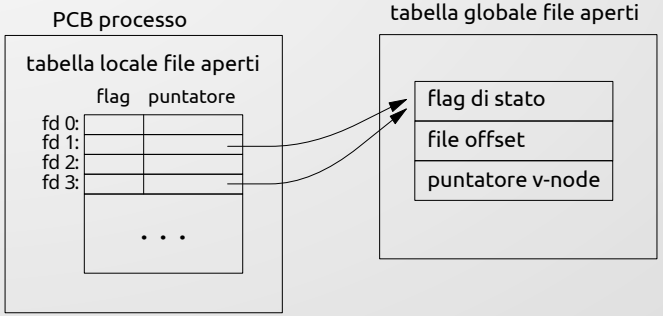
<unistd.h>

Duplicazione dei Descrittori di File

```
int dup(int fd);
int dup2(int fd, int fd2);
```

<unistd.h>

- **dup** duplica una voce della tabella locale usando la prima voce libera
- **dup2** duplica la voce **fd** usando la voce occupata da **fd2**
  - **fd2** viene chiusa se usata
  - è una **operazione atomica**
- utilizzabili per manipolare i **canali input/output/error standard** in un processo
- esempio: **redirect.c**



Cache del Disco

- Il Sistema Operativo usa la RAM libera come **cache del disco**, anche in **scrittura**
  - ritarda le scritture per ragioni di efficienza (in genere per massimo 30 s)
  - questo può creare problemi indesiderati
- è sempre possibile forzare la mano al S.O. tramite:
  - **flag `O_SYNC`** in fase di apertura di un file
  - **chiamate di sistema** per forzare la scrittura:
    - ritornano solo a scrittura avvenuta

```
int fsync(int fd);
void sync(void);
```

<unistd.h>

  - omonimo comando della **shell**: **`sync`**

I/O Bufferizzato

- Lo standard ISO C fornisce una libreria per l'I/O bufferizzato basato su **stream**
  - cerca di ridurre il numero di chiamate di sistema **`read`** e **`write`**
  - tipo di riferimento: **`FILE *`**
  - stream predefiniti: **`stdin`**, **`stdout`** e **`stderr`**
- esistono vari tipi di buffering:
  - **fully buffered**: in genere usato per i file
  - **line buffered**: in genere usato per i terminali interattivi (`stdin` e `stdout`)
  - **unbuffered**: in genere usato per lo standard error (`stderr`)
- è sempre possibile forzare **scritture pendenti** nel buffer con **`fflush`**
  - questo non assicura la scrittura su disco: vedi **cache**

Apertura e Chiusura di Stream

```
FILE *fopen(const char *pathname, const char *type);
FILE *fdopen(int fd, const char *type);
int fclose(FILE *fp);
```

<stdio.h>

- **fopen** e **fdopen** creano uno stream aprendo un file specificato o già aperto
  - **type**: specifica la modalità di apertura usando una stringa
    - **r** – apertura in sola lettura (O_RDONLY)
    - **r+** – apertura in lettura e scrittura (O_RDWR)
    - **w** – creazione/troncatura per scrittura (O_WRONLY | O_CREAT | O_TRUNC)
    - **w+** – creazione/troncatura per lettura/scrittura (O_RDWR | O_CREAT | O_TRUNC)
    - **a** – creazione/apertura in accodamento (O_WRONLY | O_CREAT | O_APPEND)
  - ritorna: NULL in caso di errore o lo stream creato
  - **type** in **fdopen** deve essere coerente con la modalità di apertura di **fd**
- **fclose** chiude lo stream e svuota il buffer

Lettura e Scrittura sugli Stream per Caratteri

```
int fgetc(FILE *fp);
int fputc(int c, FILE *fp);
int ferror(FILE *fp);
int feof(FILE *fp);
```

<stdio.h>

- **fgetc** legge un carattere dallo stream
  - ritorna: **EOF** (-1) in caso di errore o fine file, oppure il carattere appena letto (inserito in un `int`)
    - se interessati, bisogna usare **ferror** e **feof** per disambiguare
- **fputc** scrive un carattere sullo stream
- il loro uso è reso efficiente dal buffering
- esempi: **copy-stream.c**, **streams-and-buffering.c**

Lettura e Scrittura sugli Stream per Righe

```
char *fgets(char *buf, int n, FILE *fp);
int fputs(const char *str, FILE *fp);
```

<stdio.h>

- **fgets** legge una riga dallo stream **fd** e lo scrive come stringa su **buf** di **n** byte
  - una riga termina con un ritorno a capo (`'\n'`) o dalla fine del file
  - vengono effettivamente trasferiti al più `(n-1)` byte (ritorno a capo incluso)
  - ritorna: `NULL` in caso di fine-file/errore o buf in caso di successo
- **fputs** scrive la stringa in **buf** sullo stream **fp**
  - ritorna: **EOF** in caso di errore, un valore non-negativo in caso di successo
- esempio: **my-cat.c**

```
int fprintf(FILE *fp, const char *format, ...);
int fscanf(FILE *fp, const char *format, ...);
```

<stdio.h>

Lettura e Scrittura sugli Stream per Blocchi

```
size_t fread(void *ptr, size_t size, size_t nobj, FILE *fp);
size_t fwrite(const void *ptr, size_t size, size_t nobj, FILE *fp);
```

<stdio.h>

- **fread** e **fwrite**, rispettivamente, leggono e scrivono **nobj** record, ciascuno di dimensione **size** byte, sullo stream **fp** dal buffer **buf**
  - ritorna: il numero di record effettivamente trasferiti
    - può riportare meno di `nobj` record: fine file o errore

funzione	CPU utente (s)	CPU kernel (s)	clock time(s)
read & write con buffer ottimale	0,05	0,29	3,18
fgets & fputs	2,27	0,30	3,49
fgetc & fputc	8,16	0,40	10,18
read & write un byte alla volta	134,61	249,94	394,95

Posizionamento sugli Stream

```
int fseek(FILE *fp, long offset, int whence);
int fseeko(FILE *fp, off_t offset, int whence);
long ftell(FILE *fp);
off_t ftello(FILE *fp);
void rewind(FILE *fp);
```

<stdio.h>

- **fseek** e **fseeko** spostano il file offset sullo stream
  - parametri coerenti con `lseek`
- **ftell** e **ftello** riporta direttamente l'attuale file offset associato allo stream
- le **varianti *o** sono suggerite per implementazioni recenti a supporto di grandi file

Raccolta Informazioni sugli Oggetti del File-System

```
int stat(const char *pathname, struct stat *buf );
int fstat(int fd, struct stat *buf );
int lstat(const char *pathname, struct stat *buf );
```

<sys/stat.h>, <sys/types.h>

- **stat** (e vantianti) riporta in **buf** (tipo **stat**) informazioni sull'oggetto riferito
  - **lstat** evita di attraversare i link simbolici
- alcune informazioni che possiamo trovare nella struttura:
  - **st_mode**: informazioni sui permessi di accesso e sul tipo di file
  - **st_uid**, **st_gid**: l'UID dell'utente proprietario e il GID del gruppo proprietario
  - **st_atime**, **st_ctime**, **st_mtime**: il momento (data e orario) dell'ultimo accesso, ultima modifica globale (attributi o contenuto), ultima modifica al contenuto
  - **st_ino**: l'*i-number*, ovvero il numero dell'i-node
  - **st_nlink**: il numero di hardlink all'i-node
  - **st_size**: la dimensione del file in byte

Raccolta Informazioni sugli Oggetti del File-System

- il campo **`st_mode`** può essere ispezionato in vari modi:
  - la **maschera dei permessi** può essere isolata con: `(st_mode & 0777)`
  - i flag che denotano il **tipo** di oggetto tramite alcune predicati (macro):
    - **`S_ISREG()`**: è un file regolare?
    - **`S_ISDIR()`**: controllo per directory?
    - **`S_ISBLK()`**: è un dispositivo speciale a blocchi?
    - **`S_ISCHR()`**: è un dispositivo speciale a caratteri?
    - **`S_ISLNK()`**: controllo per link simbolico?
- i **timestamp** (`time_t`) sono interi che possono essere localizzati al fuso predefinito (**`localtime`**) e convertiti in stringa (**`asctime`**) con :

```
printf("ultimo accesso: %s\n",asctime(localtime(&(buf.st_atime))));
```

- ulteriori dettagli sull'**utente** e **gruppo** proprietario si possono ottenere usando **`getpwuid`** e **`getgrgid`** a partire dai rispettivi dai campi **`st_uid`** e **`st_gid`**
- esempio: **`stat.c`**

Gestione Directory

```
int mkdir(const char *pathname, mode_t mode);
int rmdir(const char *pathname);
int chdir(const char *pathname);
char *getcwd(char *buf, size_t size);
```

<sys/stat.h>, <unistd.h>

- **mkdir** crea una cartella con maschera dei permessi **mode**
  - viene applicata anche qui la maschera di **umask**
  - ritorna: -1 in caso di errore, 0 altrimenti
- **rmdir** cancella una directory
  - deve essere vuota (nessun effetto ricorsivo)
  - ritorna: -1 in caso di errore, 0 altrimenti
- **chdir** cambia la ***current working directory*** del processo chiamante
- **getcwd** la riporta nel buffer **buf** di dimensione **size**

Gestione Directory

```
DIR *opendir(const char *pathname);
struct dirent *readdir(DIR *dp);
void rewinddir(DIR *dp);
long telldir(DIR *dp);
void seekdir(DIR *dp, long loc);
int closedir(DIR *dp);
```

<dirent.h>

- **opendir** apre uno ***directory stream*** (**DIR ***) per la lettura di una directory
  - ritorna: NULL in caso di errore, altrimenti il puntatore all stream creato
- **readdir** legge il prossimo record (**struct dirent ***) dallo stream
  - ritorna: NULL in caso di errore o file elenco, altrimenti il puntatore al record
  - contenuto del record: in numero di i-node **d_ino** e il nome **d_name**
- si possono fare accessi diretti usando **rewinddir**, **telldir** e **seekdir**
- esempio: **list-dir.c**

Gestione dei Link Simbolici e Fisici

```
int link(const char *existingpath, const char *newpath);
int unlink(const char *pathname);
int remove(const char *pathname);
int rename(const char *oldname, const char *newname);
int symlink(const char *actualpath, const char *sympath);
ssize_t readlink(const char*pathname, char *buf, size_t bufsize);
```

<unistd.h>, <stdlib.h>

- **link** crea un link fisico di un file esistente; **unlink** lo rimuove
- **remove** funziona usa **unlink** su file e **rmdir** su cartelle (vuote)
- **rename** rinomina file e directory
- **symlink** crea un link simbolico a file e cartelle
- **readlink** legge il percorso interno di un link simbolico e lo scrive su **buf**
- esempio: **move.c**

Varie ed Eventuali su File

```
int truncate(const char *path, off_t length);
int ftruncate(int fildes, off_t length);
int chmod(const char *path, mode_t mode);
int chown(const char *path, uid_t owner, gid_t group);
```

<unistd.h>, <sys/stat.h>

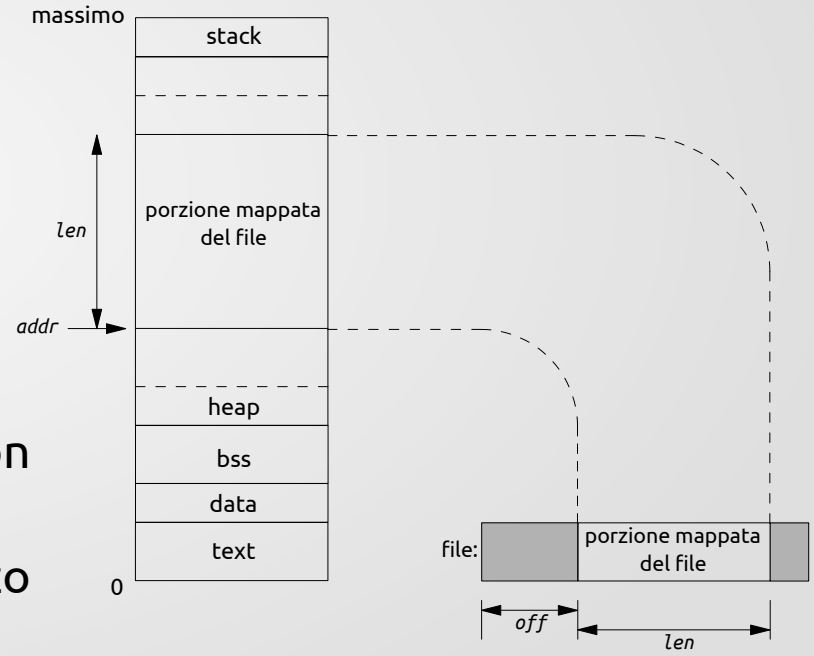
- **truncate** e **ftruncate** troncano un file esistente alla dimensione specificata
  - può anche aumentare la dimensione dei file (vedi ***hole***)
- **chmod** cambia la maschera dei permessi di un oggetto sul file-system
- **chown** cambia l'utente proprietario e il gruppo proprietario specificati tramite i rispettivi identificativi numerici
  - su Linux e altri sistemi UNIX (non tutti), solo l'amministratore può usare chown

Mappatura dei File

```
void *mmap(void *addr, size_t len, int prot, int flag, int fd, off_t off);
```

<sys/mman.h>

- **mmap** mappa una porzione (definita da **off** e **len**) del file aperto dal descrittore **fd** sull'indirizzo virtuale **addr** abilitando i permessi **prot** sulle relative pagine
  - se **addr** è NULL il Sistema Operativo trova un indirizzo idoneo
  - **prot** è una combinazione di **PROT_READ**, **PROT_WRITE** e **PROT_EXEC**
  - **flag**:
    - **MAP_SHARED**: scritture applicate sul file e condivise con altri processi
    - **MAP_PRIVATE**: scritture private (*CoW*) e non persistenti
  - ritorna: **MAP_FAILED** in caso di errore, l'indirizzo di mappatura altrimenti



Mappatura dei File

```
int msync(void *addr, size_t len, int flag);
int munmap(void *addr, size_t len);
```

<sys/mman.h>

- **msync** forza il Sistema Operativo a scrivere su disco eventuali modifiche in sospeso nell'area mappata specificata da **addr** e **len**
  - **flag**:
    - **MS_ASYNC**: richiesta asincrona
    - **MS_SYNC**: richiesta sincrona (bloccante)
- **munmap** annulla la mappatura del file, salvando le eventuali modifiche in caso di mappatura condivisa (MAP_SHARED)
  - effetti comunque applicati alla terminazione del processo
- esempi: **mmap-read.c**, **mmap-copy.c**, **mmap-reverse.c**

Creazione di Processi

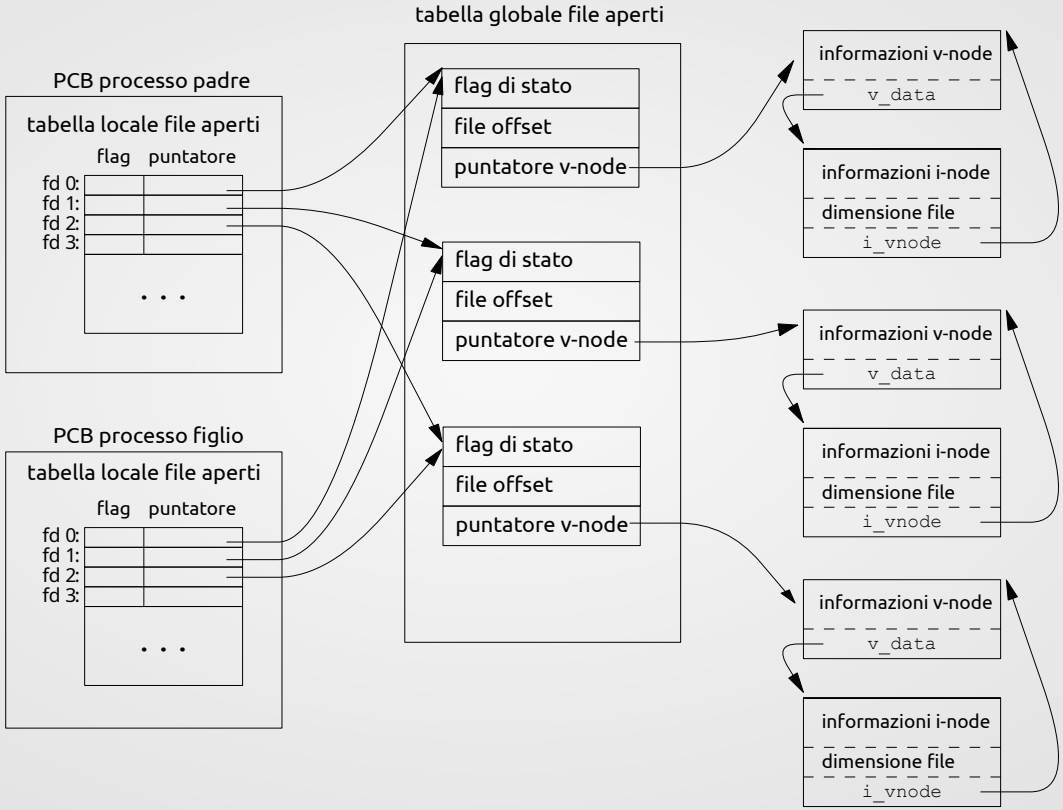
```
pid_t getpid(void);
pid_t getppid(void);
pid_t fork(void);
```

<unistd.h>

- **getpid** e **getppid** ritornano, rispettivamente, il ***process id*** (PID) del processo chiamante e del processo padre
- **fork** duplica il processo chiamante
  - **ritorna**:
    - nel padre: -1 in caso di errore, il PID del processo figlio appena creato altrimenti
    - nel figlio: il valore 0
- un processo figlio, rimasto **orfano**, viene comunque adottato
- esempi: **fork.c**, **fork-buffer-glitch.c**, **multi-fork.c**

Fork e Tabelle dei File Aperti

- Il processo padre e quello figlio condividono le voci della **tabella globale dei file** aperti e quindi i **flag di apertura** e i **file offset**:



Coordinamento Semplice tra Processi

```
pid_t wait(int *statloc);
pid_t waitpid(pid_t pid, int *statloc, int options);
```

<sys/wait.h>

- **wait** e **waitpid** permettono al padre può bloccarsi in attesa della terminazione di, rispettivamente, un qualunque figlio o uno specifico indicandone il **pid**
  - **statloc**, se diverso da NULL, deve puntare ad un intero su cui sarà scritto l'**exit status** del figlio appena terminato:
    - **exit code** nella parte bassa (estraibile con la macro **WEXITSTATUS**)
    - vari flag ispezionalibili sul motivo esatto dell'uscita
  - **options** può specificare modalità particolari che possiamo ignorare (0)
  - ritornano: -1 in caso di errore, il PID del figlio altrimenti
- un figlio rimane nello stato di **zombie/defunct** se termina prima del padre: quest'ultimo può, potenzialmente, richiederne l'exit status con wait/waitpid
- esempio: **multi-fork-with-wait.c**

Esecuzione di un Programma

```
int execl(const char *pathname, const char *arg0, …, (char *)0);
int execv(const char *pathname, char *const argv[]);
int execlp(const char *pathname, const char *arg0, …, (char *)0);
int execvp(const char *pathname, char *const argv[]);
```

<unistd.h>

- una chiamata **exec*** esegue il programma specificato da **pathname** su una lista di argomenti **arg*** usando il processo chiamante come ambiente
  - la variante **execl** passa gli argomenti come parametri della funzione con l'obbligatoria sentinella `(char *)0`
  - la variante **execv** usa un vettore di stringhe con una sentinella nell'ultimo slot
- le **varianti *p**, su pathname non assoluti, ricercano l'eseguibile nei percorsi previsti nella variabile d'ambiente **PATH**
  - ritorna: -1 in caso di errore, altrimenti... **non torna!**
- esempi: **exec.c**, **nano-shell.c**

Esecuzione per Interpretazione e Esecuzione Semplificata

- Sui sistemi UNIX un **file testuale** può essere reso eseguibile per **interpretazione**
  - deve avere l'apposito flag/**permesso di esecuzione** (x) attivo
  - deve specificare nella **prima riga** l'interprete da usare
    - convenzione: **`#! interprete [eventuali argomenti]`**
      - molto usato:
        - `#! /usr/bin/bash`
        - `#! /usr/bin/python3`
        - `#! /usr/bin/perl`
        - …
  - gestito direttamente dal kernel
- per eseguire un comando in un sotto-processo si può anche usare **`system`**: tramite `fork`/`waitpid`/`exec` esegue una **shell** a cui viene passata la richiesta

```
int system(const char *cmdstring);
```

<stdlib.h>

  - esempio: `system("comando argomento1 argomento2 > output.txt");`

Segnali

- Usati dal sistema per notificare ai processi **eventi** di varia natura
  - reazioni: **ignorare**, **terminare** o **eseguire** una procedura apposita
- segnali principali:
  - **hangup** + (`SIGHUP`): perdita del terminale locale/remoto
  - **interrupt** + (`SIGINT`): interruzione interattiva da terminale (`CTRL+C`)
  - **termination** + (`SIGTERM`): richiesta di terminazione
  - **kill** x (`SIGKILL`): interruzione forzata
  - **illegal instruction** x (`SIGILL`), **segment. violation** x (`SIGSEGV`), … : errori fatali
  - **child death** * (`SIGCHLD`): figlio terminato
  - …

+: porta alla terminazione ma è ignorabile/gestibile

x: porta inevitabilmente alla terminazione

*: non implica terminazione (ignorato)

Invio Segnali

```
int kill(pid_t pid, int signo);
int raise(int signo);
```

<signal.h>

- **kill** invia un segnale, con codice **signo**, al processo di identificativo **pid**
  - diversamente da quanto suggerito dal nome, serve ad inviare un qualunque segnale
  - deve essere un nostro processo o dobbiamo usare i diritti di amministratore
- **raise** invia un segnale al processo chiamante stesso

I POSIX Thread (a.k.a. Pthread)

- Forniscono una **interfaccia standard** per interagire con le varie implementazioni disponibili sui sistemi POSIX compatibili
- **identificativo** di un thread
  - tipo: **`pthread_t`** (intero non negativo)
  - univoco solo nel contesto del processo contenitore
  - significato specifico alla piattaforma (intero, puntatore, …)
  - incapsulamento tramite funzioni elementari:

```
pthread_t pthread_self(pvoid);
int pthread_equal(pthread_t tid1, pthread_t tid2);
```

`<pthread.h>`

- oltre all'inclusione dell'header **`pthread.h`**, è necessario effettuare il **linking** all'apposita libreria:
  - **`gcc -l pthread -o eseguibile`** ***`sorgente.c`***

Creazione Thread

```
int pthread_create(pthread_t *tidp, const pthread_attr_t *attr,
  void *(*thread_func)(void *), void *thread_arg);
```

<pthread.h>

- **pthread_create** crea un nuovo thread che eseguirà la funzione **thread_func** con argomento **thread_arg**:
  - prototipo standard: **void *_funzione_(void *_argomento_) { /* corpo funz. */ }**
  - **stack** dedicato creato automaticamente
  - identificativo del thread depositato su ***tidp**
  - attributi particolari opzionali in **attr** (vedremo dopo): al momento NULL
  - ritorna: 0 in caso di successo, il codice d'errore (>0) altrimenti
    - questa è una **convenzione** delle funzioni in pthread: non usa **errno**
- esempio: **thread-ids.c**

Coordinamento Semplice tra Thread

```
void pthread_exit(void *rval_ptr);
int pthread_join(pthread_t thread, void **rval_ptr);
```

<pthread.h>

- **`pthread_exit`** termina il thread chiamante
  - equivale ad un **`return`** dalla funzione principale del thread
  - il processo rimane attivo finché c'è un thread o qualcuno chiama **`exit`**
  - il valore **`rval_ptr`** codifica il ***return value*** del thread (contenuto libero)
- **`pthread_join`** attende la terminazione di uno specifico thread (simile a **`wait`**)
  - diventa importante conservare il ***thread id*** ottenuto da `pthread_create`
  - *return value* del thread appena terminato depositato in **`*rval_ptr`**
  - ritorna: 0 in caso di successo, il codice d'errore (>0) altrimenti
- esempi: **`multi-thread-join.c`**, **`thread-memory-glitch.c`**

Dati Condivisi tra Thread e Corse Critiche

- Tutti i thread di un processo condividono virtualmente tutti i dati ma bisogna comunque rispettare lo ***scoping*** imposto dal linguaggio
  - **variabili globali**: può sfuggire di controllo, poco elegante... sconsigliato!!!

```
int shared_value; // variabile globale

void thread_function(void *) {
     …
     shared_value++;  // riferimento alla variabile globale condivisa
     …
}
```

  - usare l'unico **argomento** passabile per riferirirsi al dato condiviso
    - e se ho più dati?!
  - **incapsulare dati** (condivisi e non) in una struttura da passare come argomento
- ovviamente possono sorgere problemi di concorrenza (***race condition***)...
- esempio: **`thread-conc-problem.c`**

Mutex Lock

```
int pthread_mutex_init(pthread_mutex_t *mutex, pthread_mutexattr_t *attr);
int pthread_mutex_destroy(pthread_mutex_t *mutex);
int pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mutex);
int pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mutex);
int pthread_mutex_trylock(pthread_mutex_t *mutex);
```

<pthread.h>

- la struttura **pthread_mutex_t** va usata da tutti i thread come riferimento al lock
- **pthread_mutex_init** inizializza dinamicamente **mutex** con eventuali attributi **attr** (non approfondiremo e pertanto passeremo sempre NULL)
  - per inizializzare istanze statiche si può usare **PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER**
- **pthread_mutex_destroy** distrugge eventuali allocazioni dinamiche in mutex
- **pthread_mutex_lock** e **phtread_mutex_unlock** acquisiscono e rilasciano il lock
- **pthread_mutex_trylock** è non bloccante e ritorna subito con **EBUSY** se non riesce
- esempio: **thread-conc-problem-fixed-with-mutex.c**

Semafori Numerici

```
int sem_init(sem_t *sem, int pshared, unsigned int value);
int sem_destroy(sem_t *sem);
int sem_wait(sem_t *sem);
int sem_post(sem_t *sem);
int sem_trywait(sem_t *sem);
```

<semaphore.h>

- la struttura dati di riferimento è **sem_t**
- **sem_init** inizializza il semaforo sem con il valore iniziale value
  - **pshared** dichiara il tipo di utilizzatori per adattare il meccanismo di sincronizzazione:
    - **PTHREAD_PROCESS_PRIVATE (0)**: tra thread dello stresso processo
    - **PTHREAD_PROCESS_SHARED (1)**: tra processi distinti tramite memoria condivisa
- **sem_wait** decrementa il semaforo dove **sem_trywait** lo fa senza bloccarsi
- **sem_post** incrementa il semaforo
- esempio: **thread-prod-cons-with-sem.c**

Lock per Lettori/Scrittori

```
int pthread_rwlock_init(pthread_rwlock_t *rwlock, pthread_rwlockattr_t *attr);
int pthread_rwlock_destroy(pthread_rwlock_t *rwlock);
int pthread_rwlock_rdlock(pthread_rwlock_t *rwlock);
int pthread_rwlock_wrlock(pthread_rwlock_t *rwlock);
int pthread_rwlock_unlock(pthread_rwlock_t *rwlock);
int pthread_rwlock_tryrdlock(pthread_rwlock_t *rwlock);
int pthread_rwlock_trywrlock(pthread_rwlock_t *rwlock);
```

<pthread.h>

- la struttura di riferimento è **pthread_rwlock_t**
- **pthread_rwlock_{init,destroy}** sono simili agli analoghi visti prima per i mutex
  - anche qui per le istanze statiche esiste **PTHREAD_RWLOCK_INITIALIZER**
- **pthread_rwlock_[try]{rd|wr}lock** acquisiscono il lock condiviso o esclusivo
- **pthread_rwlock_unlock** rilascia il lock precedentemente acquisito
- esempi: **thread-number-set-with-rwlock.c**, **thread-safe-number-set-with-rwlock.c**

Variabili Condizione dei Monitor

```
int pthread_cond_init(pthread_cond_t *cond, const pthread_condattr_t *attr);
int pthread_cond_destroy(pthread_cond_t *cond);
int pthread_cond_wait(pthread_cond_t *cond, pthread_mutex_t *mutex);
int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cond);
int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cond);
```

<pthread.h>

- la struttura di riferimento è **pthread_cond_t**
- l'uso è sempre contestuale ad un mutex lock **già** acquisito (come nei monitor)
- **pthread_cond_{init,destroy}** crea e distrugge una variabile condizione
  - anche qui per le istanze statiche esiste **PTHREAD_COND_INITIALIZER**
- **pthread_cond_wait** si blocca il chiamante sulla variabile condizione cond
- **pthread_cond_{signal,broadcast}** risvegliano uno o più thread bloccati
  - la condizione di blocco va **sempre** ricontrollata alla ripresa!
- esempio: **thread-safe-number-queue-as-monitor.c**

Barriere

```
int pthread_barrier_init(pthread_barrier_t *barrier,
  const pthread_barrierattr_t *attr, unsigned int count);
int pthread_barrier_destroy(pthread_barrier_t *barrier);
int pthread_barrier_wait(pthread_barrier_t *barrier);
```

<pthread.h>

- la struttura di riferimento è **pthread_barrier_t**
- **pthread_barrier_init** crea una barriera per **count** thread
- **pthread_barrier_wait** diventa bloccante per il chiamante finché non si raggiunge la soglia prestabilita di thread bloccati
  - ritorna: 0 o PTHREAD_BARRIER_SERIAL_THREAD a sblocco avvenuto, o errore (>0)
    - solo un thread riceverà **PTHREAD_BARRIER_SERIAL_THREAD** (-1): può essere usato come coordinatore per le fasi successive
- la barriera è **riutilizzabile** ma mantenendo il numero di thread
- esempi: **thread-barrier.c**, **thread-sort-with-barrier.c**