Práctica 4: Procesos y Sincronización

LIN - Curso 2019-2020

J.C. Sáez
High Performance Computing Division ArTeCs Group
Universidad Complutense de Madrid

Contenido

Contenido

Práctica 4: Procesos y Sincronización

Objetivos

- Familiarizarse con:
  - Uso de mecanismos de sincronización en el kernel Linux
  - Implementación de tuberías para comunicación entre procesos
  - Manejo de buffers circulares en el kernel
    - `struct kfifo`

Contenido

Tuberías (I)

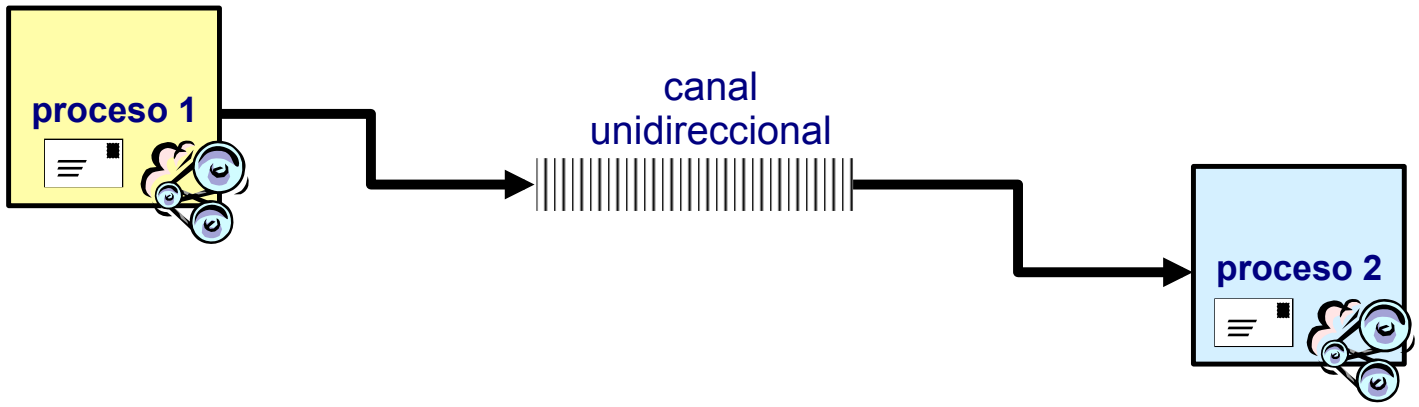
- Mecanismo de **comunicación y sincronización** entre procesos
  - Transferencia de datos entre distintos espacios de direcciones
  - Sincronización tipo productor/consumidor
- Dos tipos de tubería:
  1. Sin nombre: pipe
  2. Con nombre: FIFO

Tuberías (II)

Características

- Mecanismo con capacidad de almacenamiento
- Flujo de datos unidireccional (Proceso A $\rightarrow$ Proceso B)
- Dos extremos:
  - extremo de escritura (envío)
  - extremo de lectura (recepción)
- Los extremos se manejan como si fueran ficheros:
  1. Obtener descriptor
  2. Enviar con `write()`/ Recibir con `read()`
  3. Cerrar extremo de lectura o escritura con `close()`

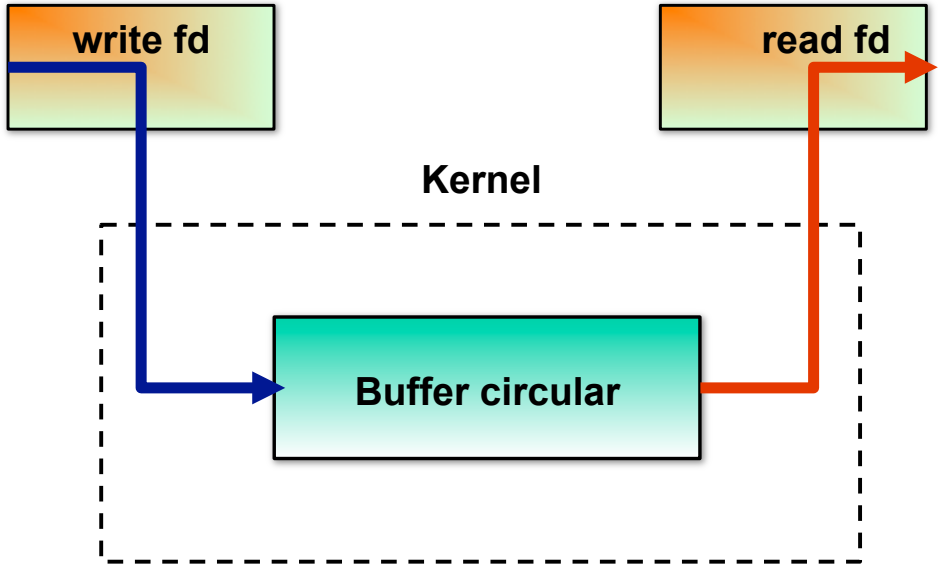
Tuberías (III)



- Los datos escritos en la tubería se conservan hasta el momento en que son leídos, y luego desaparecen
- El orden de lectura/escritura es *first-in first out* (FIFO)
- No está permitida la operación de posicionamiento aleatorio (`lseek()`)

Tuberías (IV)

- A pesar de que los extremos las tuberías se manejan como si fueran ficheros, los datos no se almacenan en disco
- El SO emplea habitualmente un buffer circular para implementarlo
  - Región de memoria del kernel usada como almacenamiento intermedio



Tuberías sin nombre (*pipes*)

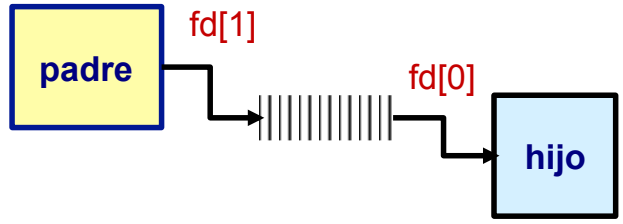
- Un *pipe anónimo* se crea con la llamada al sistema `pipe()` que devuelve un par de descriptores de fichero

```
int pipe(int fildes[2]);
```

- Identificación: dos descriptores
  1. Para lectura: fildes[0] → read()
  2. Para escritura: fildes[1] → write()
- Compartido por el proceso que lo crea y los hijos de éste, gracias al mecanismo de herencia de ficheros a través de `fork()`
- El *pipe* se destruye cuando todos los procesos que tienen acceso al mismo cierran su actividad con él (llamada close() o finalización del proceso)

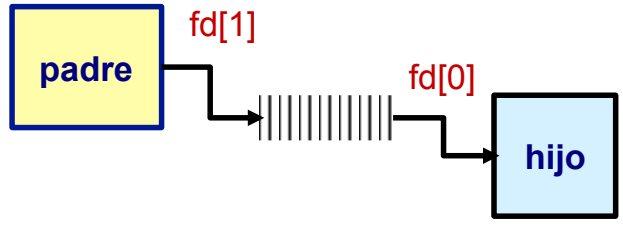
Tuberías sin nombre (*pipes*)

```
int fd[2];
pid_t pid;
pipe(fd);

if ((pid=fork())>0) {
  close(fd[0]);
  while ( ...haya datos ... ) {
    write(fd[1], ... );
  }
  close(fd[1]);
} else if (pid==0){
  close(fd[1]);
  while (read(fd[0], ... )>0) {
    ... usar los datos...
  }
  close(fd[0]);
  exit (0);
}
... El padre continua ...
```



Tuberías sin nombre (*pipes*)

```
int fd[2];
pid_t pid;
pipe(fd);

if ((pid=fork())>0) {
  close(fd[0]);
  while ( ...haya datos ... ) {
    write(fd[1], ... );
  }
  close(fd[1]);
} else if (pid==0){
  close(fd[1]);
  while (read(fd[0], ... )>0) {
    ... usar los datos...
  }
  close(fd[0]);
  exit (0);
}
... El padre continua ...
```



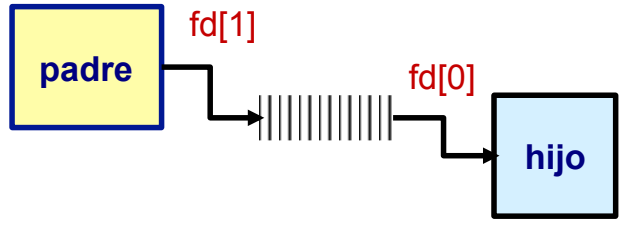
Padre: cierra extremo lectura

Padre: envía datos (escritura)

Padre: cierra extremo escritura

Tuberías sin nombre (*pipes*)

```
int fd[2];
pid_t pid;
pipe(fd);

if ((pid=fork())>0) {
  close(fd[0]);
  while ( ...haya datos ... ) {
    write(fd[1], ... );
  }
  close(fd[1]);
} else if (pid==0){
  close(fd[1]);
  while (read(fd[0], ... )>0) {
    ... usar los datos...
  }
  close(fd[0]);
  exit (0);
}
... El padre continua ...
```



Padre: cierra extremo lectura

Padre: envía datos (escritura)

Padre: cierra extremo escritura

Hijo: cierra extremo escritura

Hijo: recibe datos (lectura)

Hijo: cierra extremo lectura

Tuberías con nombre (*FIFOs*)

- Un FIFO es un fichero especial en UNIX:
  - Tubería que tiene presencia en el sistema de ficheros
- Tres mecanismos para crear un FIFO
  1. Comando `mkfifo`
  2. Llamada al sistema `mknod()` con argumento `S_IFIFO`
  3. Función de librería `mkfifo()`

terminal

```
kernel@debian:~$ mkfifo /var/tmp/ficheroFIFO
kernel@debian:~$ stat /var/tmp/ficheroFIFO
  File: «/var/tmp/ficheroFIFO»
  Size: 0           Blocks: 0          IO Block: 4096   `fifo'
Device: 801h/2049d  Inode: 91502       Links: 1
Access: (0644/prw-r--r--)  Uid: ( 1000/ kernel)   Gid: ( 1000/ kernel)
Access: 2014-11-17 14:35:53.000000000 +0100
Modify: 2014-11-17 14:35:53.000000000 +0100
Change: 2014-11-17 14:35:53.000000000 +0100
```

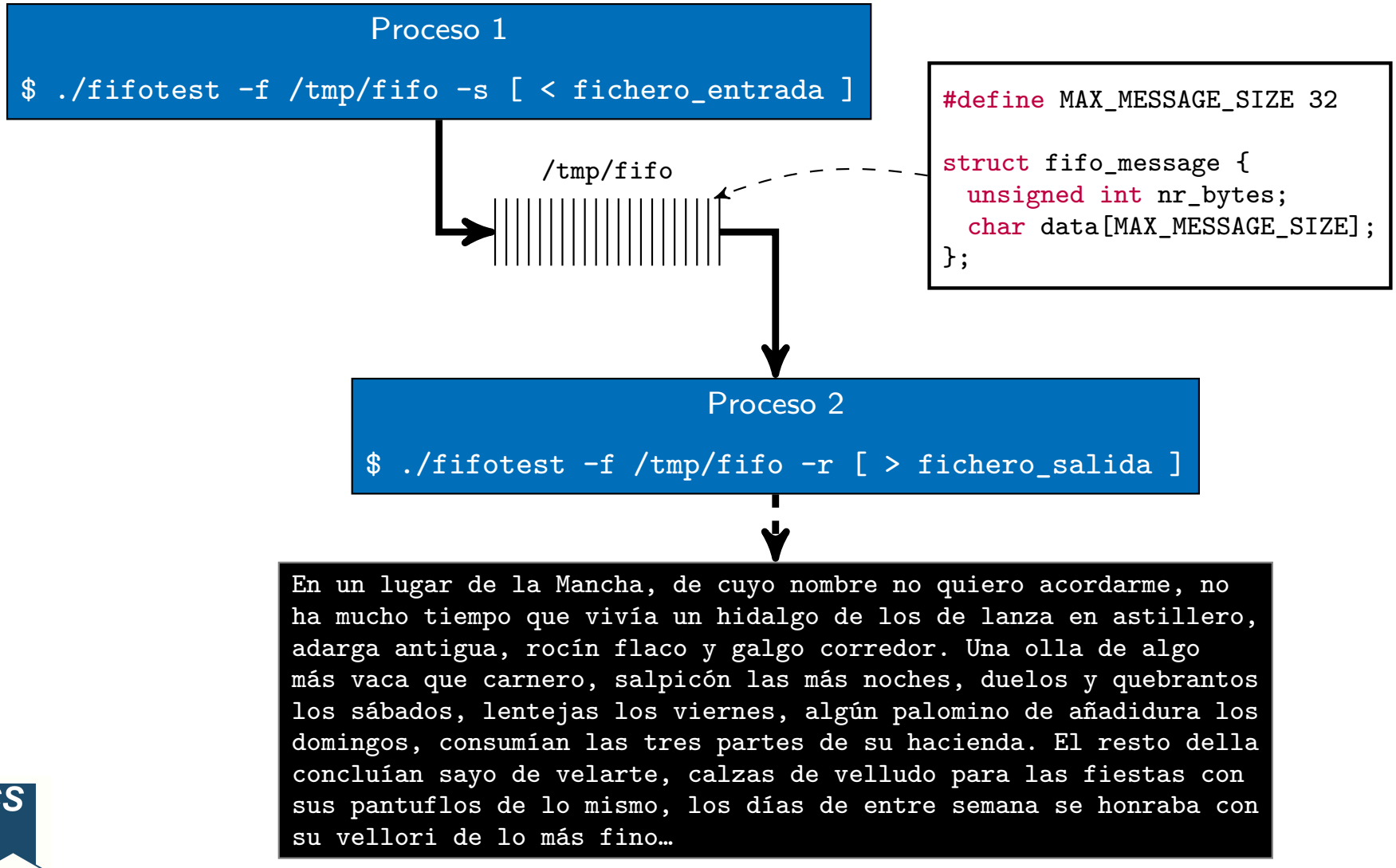
Tuberías con nombre (*FIFOs*)

- Cualquier proceso con los permisos apropiados puede solicitar la apertura mediante `open()`
  - Los procesos que se comunican no tienen por qué estar relacionados jerárquicamente entre sí
- **Comportamiento `open()`**
  - El modo de apertura al invocar `open()` (lectura o escritura) determina el extremo de la tubería al que se accede
  - La apertura de un FIFO en modo lectura bloquea al proceso hasta que otro proceso haya abierto su extremo de escritura (y viceversa)
    - Sincronización tipo *rendezvous*

Tuberías con nombre (*FIFOs*)

- **Comportamiento `read()`**
  - La lectura de un FIFO sin datos ocasiona el bloqueo del proceso que la solicita
  - El intento de leer de un FIFO vacío cuyo extremo de escritura ha sido cerrado devuelve el valor 0 (EOF)
- **Comportamiento `write()`**
  - La escritura en un FIFO cuya capacidad está completa ocasiona el bloqueo del proceso que la solicita.
  - Al escribir en un FIFO cuyo extremo de lectura ha sido cerrado:
    1. `write()` devuelve un error (valor -1)
    2. El SO envía una señal (SIGPIPE) al proceso cuya acción por defecto es terminar su ejecución

Ejemplo: programa `fifotest`



Ejemplo: programa `fifotest`

```
/* Lee datos de la entrada estandar y los envía por un FIFO encapsulados en
     estructura "fifo_message" */
static void fifo_send (const char* path_fifo) {
  struct fifo_message message;
  int fd_fifo=0;
  int bytes=0,wbytes=0;
  const int size=sizeof(struct fifo_message);

  fd_fifo=open(path_fifo,O_WRONLY);

  ...

  while((bytes=read(0,message.data,MAX_MESSAGE_SIZE))>0) {
    message.nr_bytes=bytes;
    wbytes=write(fd_fifo,&message,size);

    ... Tratamiento errores write ...
 }

  ...

  close(fd_fifo);
}
```

Ejemplo: programa `fifotest`

```
/* Recibe un conjunto de registros "fifo_message" a través de un FIFO y e
     imprime su contenido por pantalla */
static void fifo_receive (const char* path_fifo) {
  struct fifo_message message;
  int fd_fifo=0;
  int bytes=0,wbytes=0;
  const int size=sizeof(struct fifo_message);

  fd_fifo=open(path_fifo,O_RDONLY);

  ...

  while((bytes=read(fd_fifo,&message,size))==size) {
    /* Write to stdout */
    wbytes=write(1,message.data,message.nr_bytes);

    ... Tratamiento errores write ...
 }
    ...

  close(fd_fifo);
}
```

Ejemplo: programa `fifotest`

terminal 1

```
kernel@debian:~/FifoTest$ mkfifo /tmp/fifo
kernel@debian:~/FifoTest$ ./fifotest -f /tmp/fifo -s < test.txt
kernel@debian:~/FifoTest$
```

terminal 2

```
kernel@debian:~/FifoTest$ ./fifotest -f /tmp/fifo -r
En un lugar de la Mancha, de cuyo nombre no quiero acordarme, no ha mucho tiempo
que vivía un hidalgo de los de lanza en astillero, adarga antigua, rocín flaco y
galgo corredor. Una olla de algo más vaca que carnero, salpicón las más noches,
duelos y quebrantos los sábados, lentejas los viernes, algún palomino de añadidura
los domingos, consumían las tres partes de su hacienda. El resto della concluían
sayo de velarte, calzas de velludo para las fiestas con sus pantuflos de lo mismo,
los días de entre semana se honraba con su vellori de lo más fino. Tenía en su casa
una ama que pasaba de los cuarenta, y una sobrina que no llegaba a los veinte, y
un mozo de campo y plaza, que así ensillaba el rocín como tomaba la podadera...
kernel@debian:~/FifoTest$
```

Contenido

Ejercicios

Ejercicio 1

- Estudiar la implementación del módulo `ProdCons1`
  - Módulo del kernel que gestiona un buffer circular acotado de enteros
  - El módulo exporta entrada `/proc/prodcons`
    - Insertar al final del buffer: `$ echo 7 > /proc/prodcons`
    - Extraer primer elemento del buffer: `$ cat /proc/prodcons`
  - Las operaciones de inserción/eliminación del buffer tienen la semántica productor/consumidor
    1. Un proceso que inserta en buffer lleno se bloquea
    2. Proceso que consume de buffer vacío se queda bloqueado

Ejercicio 1: ProdCons1

terminal

```
kernel@debian:~/ProdCons1$ echo 4 > /proc/prodcons
kernel@debian:~/ProdCons1$ echo 5 > /proc/prodcons
kernel@debian:~/ProdCons1$ echo 6 > /proc/prodcons
kernel@debian:~/ProdCons1$ cat /proc/prodcons
4
kernel@debian:~/ProdCons1$ cat /proc/prodcons
5
kernel@debian:~/ProdCons1$ cat /proc/prodcons
6
kernel@debian:~/ProdCons1$ cat /proc/prodcons
<<proceso se queda bloqueado>>
```

Ejercicio 2: ProdCons2

Ejercicio 2

- Estudiar la implementación del módulo `ProdCons2`
  - Variante de `ProdCons1` donde los semáforos se utilizan como colas de espera
  - Los semáforos se deben usar de esta forma en la parte B de la práctica

Contenido

Práctica

Dos partes:

- **(Parte A)** Implementación *SMP-safe* de la Práctica 1 usando *spin locks*
  - Se ha de garantizar exclusión mutua entre las distintas regiones de código que acceden a la lista enlazada de enteros (estructura compartida)
  - No es posible invocar funciones bloqueantes como `vmalloc()` dentro de `spin_lock()` y `spin_unlock()`
  - Hacer pruebas de acceso concurrente a la lista enlazada mediante un *script* lanzado desde varios terminales
    - Entregar script(s) usado(s)
- **(Parte B)** Implementación de un FIFO mediante una entrada /proc
  - El módulo implementará 4 operaciones de la entrada /proc: `read()`, `write()`, `open()`, `release()`
  - Sincronización gestionada mediante semáforos

Parte B: Implementación

Recursos para la implementación

- Buffer circular de bytes (`struct kfifo`)
  - Almacenamiento temporal asociado al FIFO
  - Al crear el buffer, establecer que tamaño máximo sea 64 bytes
- Dos contadores para registrar el número de procesos que han abierto el FIFO para lectura y escritura, respectivamente
- Un "mutex" para proteger el buffer y los contadores
  - Usaremos un semáforo inicializado a 1 para emular el mutex
  - Mutex también asociado a las "variables condición"
- Dos "variables condición"
  - Una para bloquear al productor y otra para bloquear al consumidor
  - Para emular cada variable condición se usará:
    1. Semáforo inicializado a 0 (cola de espera)
    2. Contador que registra número de procesos esperando (0 ó 1)

Parte B: Implementación

Variables globales (`fifoproc.c`)

```
struct kfifo cbuffer;   /* Buffer circular */
int prod_count = 0;     /* Número de procesos que abrieron la entrada
    /proc para escritura (productores) */
int cons_count = 0;     /* Número de procesos que abrieron la entrada
    /proc para lectura (consumidores) */
struct semaphore mtx;       /* para garantizar Exclusión Mutua */
struct semaphore sem_prod; /* cola de espera para productor(es) */
struct semaphore sem_cons; /* cola de espera para consumidor(es) */
int nr_prod_waiting=0; /* Número de procesos productores esperando */
int nr_cons_waiting=0; /* Número de procesos consumidores esperando */
```

Parte B: Implementación

Funciones a implementar (`fifoproc.c`)

```
/* Funciones de inicialización y descarga del módulo */
int init_module(void);
void cleanup_module(void);

/* Se invoca al hacer open() de entrada /proc */
static int fifoproc_open(struct inode *, struct file *);

/* Se invoca al hacer close() de entrada /proc */
static int fifoproc_release(struct inode *, struct file *);

/* Se invoca al hacer read() de entrada /proc */
static ssize_t fifoproc_read(struct file *, char *, size_t, loff_t *);

/* Se invoca al hacer write() de entrada /proc */
static ssize_t fifoproc_write(struct file *, const char *, size_t,
    loff_t *);
```

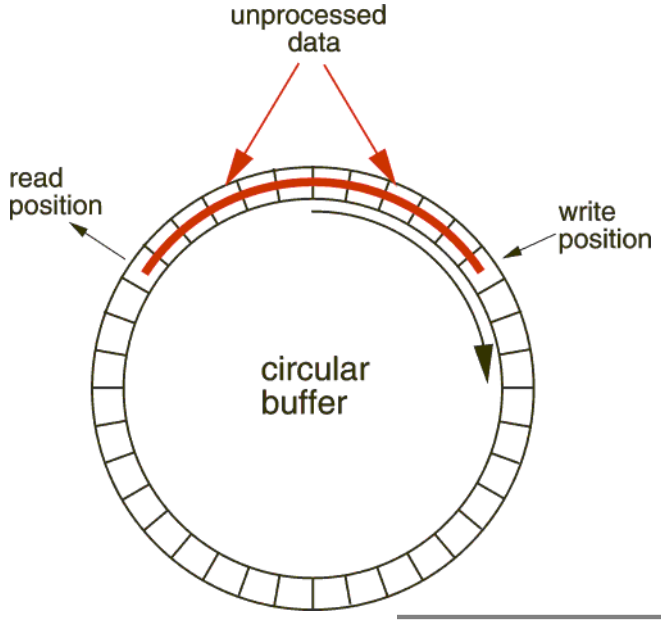
Parte B: Productor y consumidor

- Se puede distinguir entre *productor* y *consumidor* consultando el campo `f_mode` de la estructura `struct file`

```
static int fifoproc_open(struct inode *inode, struct file *file)
{
    ...
    if (file->f_mode & FMODE_READ)
    {
        /* Un consumidor abrió el FIFO */
        ...
    } else{
        /* Un productor abrió el FIFO */
        ...
    }
    ...
}
```

Parte B: Buffer circular

- El tipo de datos `struct kfifo` del kernel implementa **buffer circular de bytes**
  - Puede usarse para almacenar datos de cualquier tipo (e.g., entero → 4 bytes)
  - Las inserciones en el buffer circular se realizan siempre al final
  - La cabeza del buffer (*head*) es el extremo de lectura, por donde se extraen los elementos



Parte B: *struct kfifo* (I)

- `#include <linux/kfifo.h>`
- Inicialización:
  1. Declarar variable ⇒ `struct kfifo <nombre>;`
  2. Inicializar estructura con `kfifo_alloc()`
     - Memoria debe liberarse con `kfifo_free()`

Función/Macro	Descripción
`kfifo_alloc(pk,size,gfp_mask)`[1]	Inicializa kfifo y reserva memoria para almacenamiento interno. `size` ha de ser potencia de 2. Pasar `GFP_KERNEL` como tercer parámetro.
`kfifo_free(pk)`	Libera memoria asociada al fifo
`kfifo_len(pk)`	Devuelve número de elementos en kfifo
`kfifo_avail(pk)`	Devuelve número de huecos libres en kfifo
`kfifo_size(pk)`	Devuelve capacidad máxima de kfifo
`kfifo_is_full(pk)`	Devuelve !=0 si fifo lleno, 0 e.o.c.
`kfifo_is_empty(pk)`	Devuelve !=0 si fifo vacío, 0 e.o.c.

[1] `pk` ha de ser un puntero a `struct kfifo` (valor por referencia).

Parte B: *struct kfifo* (II)

- Operaciones de inserción/eliminación múltiple

Función/Macro	Descripción
`kfifo_in(pk,from,n)`	Inserta `n` elementos (bytes) en kfifo. Los bytes se leen del buffer pasado como parámetro (`void* from`).
`kfifo_out(pk,to,n)`	Elimina `n` elementos (bytes) del kfifo. Los bytes eliminados se copian en el buffer pasado como parámetro (`void* to`).
`kfifo_reset(pk)`	Elimina todos los elementos de kfifo (vaciar)

- Para más información:
  1. Consultar el código de los ejemplos
  2. Consultar la documentación del kernel
  3. Consultar código fuente del kernel (`<linux/kfifo.h>`)
  4. Linux Kernel Development
     - Cap. 6 *"Kernel Data Structures"*

Desarrollo de la parte B

- Antes de comenzar con la implementación, escribir pseudocódigo de la solución usando mutexes y variables condición
  - El pseudocódigo se debe entregar con la práctica (fichero aparte)

Plantilla para el pseudocódigo

```
mutex mtx;
condvar prod,cons;
int prod_count=0,cons_count=0;
struct kfifo cbuffer;

void fifoproc_open(bool abre_para_lectura) {
    /* Completar */
}

int fifoproc_write(char* buff, int len) {
    /* Completar */
}

int fifoproc_read(const char* buff, int len) {
    /* Completar */
}

void fifoproc_release(bool lectura) {
    /* Completar */
}
```

Parte B: FIFO (Pseudocódigo)

```
mutex mtx;
condvar prod,cons;
int prod_count=0,cons_count=0;
struct kfifo cbuffer;

int fifoproc_write(char* buff, int len) {
    char kbuffer[MAX_KBUF];

    if (len> MAX_CBUFFER_LEN || len> MAX_KBUF) { return Error;}
    if (copy_from_user(kbuffer,buff,len)) { return Error;}

    lock(mtx);

    /* Esperar hasta que haya hueco para insertar (debe haber consumidores) */
    while (kfifo_avail(&cbuffer)<len && cons_count>0){
        cond_wait(prod,mtx);
    }

    /* Detectar fin de comunicación por error (consumidor cierra FIFO antes) */
    if (cons_count==0) {unlock(mtx); return -EPIPE;}

    kfifo_in(&cbuffer,kbuffer,len);

    /* Despertar a posible consumidor bloqueado */
    cond_signal(cons);

    unlock(mtx);
    return len;
}
```

Desarrollo de la parte B (Cont.)

- Una vez escrito el pseudocódigo, obtener implementación con semáforos usando la técnica de traducción descrita en el tema anterior
  - Añadir semáforos y contadores al código del módulo del kernel
  - En la implenentación no habrá ningún mutex ni variables condición
- Este FIFO NO puede usarse con `echo` y `cat`
  - Usar programa `fifo_test` para depurar el código

Comportamiento del FIFO

- Si se intenta realizar una **lectura o escritura de un número de bytes superior al tamaño máximo del buffer**, el módulo devolverá un error
  - El semáforo `sem_prod` se usa para *bloquear al productor*
  - El semáforo `sem_cons` se usa para *bloquear al consumidor*

Desarrollo de la parte B (Cont.)

Comportamiento del FIFO (cont.)

- Al **abrir FIFO en modo lectura** (consumidor) se **bloquea al proceso** hasta que productor haya abierto su extremo de escritura
- Al **abrir FIFO en modo escritura** (productor) se **bloquea al proceso** hasta que consumidor haya abierto su extremo de lectura
- El **productor se bloquea si no hay hueco en el buffer** para insertar el número de bytes solicitados mediante `write()`
- El **consumidor se bloquea si el buffer contiene menos bytes** que los solicitados mediante `read()`

Desarrollo de la parte B (Cont.)

Comportamiento del FIFO (cont.)

- Si cualquier proceso bloqueado en un semáforo **se despierta por la recepción de una señal**, la operacion en cuestión (`open()`, `read()` o `write()`) devolverá un error
- Cuando todos los procesos (productores y consumidores) **finalicen su actividad** con el FIFO, **el buffer circular ha de vaciarse**
- Si se intenta hacer una lectura del FIFO cuando el buffer circular esté vacío y no haya productores, el módulo devolverá el valor 0 (EOF)
- Si se intenta escribir en el FIFO cuando no hay consumidores (extremo de lectura cerrado), el módulo devolverá un error

Parte B: Ejemplo de ejecución

terminal 1

```
kernel@debian:~/FifoTest$ sudo insmod ../ProcFifo/fifomod.ko
kernel@debian:~/FifoTest$ ./fifotest -f /proc/modfifo -s < test.txt
kernel@debian:~/FifoTest$
```

terminal 2

```
kernel@debian:~/FifoTest$ ./fifotest -f /proc/modfifo -r
En un lugar de la Mancha, de cuyo nombre no quiero acordarme, no ha mucho tiempo
que vivía un hidalgo de los de lanza en astillero, adarga antigua, rocín flaco y
galgo corredor. Una olla de algo más vaca que carnero, salpicón las más noches,
duelos y quebrantos los sábados, lentejas los viernes, algún palomino de añadidura
los domingos, consumían las tres partes de su hacienda. El resto della concluían
sayo de velarte, calzas de velludo para las fiestas con sus pantuflos de lo mismo,
los días de entre semana se honraba con su vellori de lo más fino. Tenía en su casa
una ama que pasaba de los cuarenta, y una sobrina que no llegaba a los veinte, y
un mozo de campo y plaza, que así ensillaba el rocín como tomaba la podadera...
kernel@debian:~/FifoTest$
```

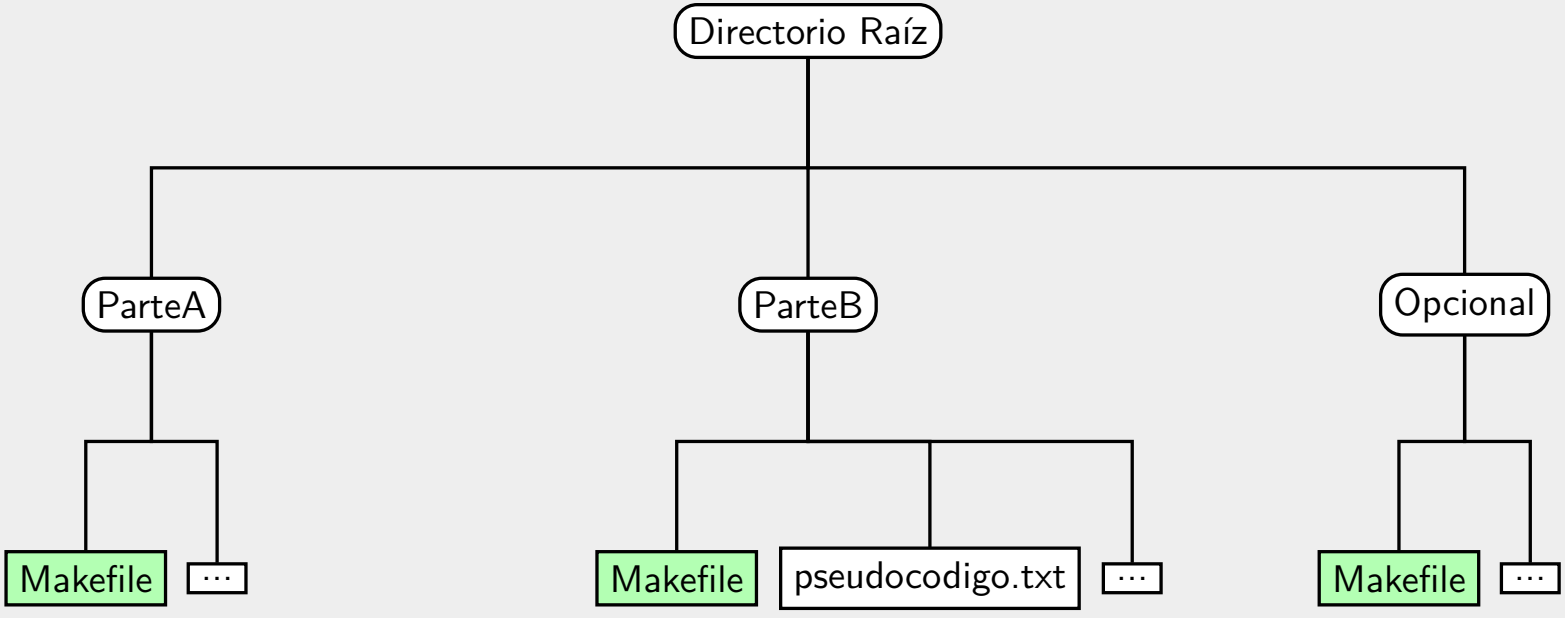
Parte opcional

- Modificar el módulo de la parte B de la práctica para que exponga el FIFO al usuario como un dispositivo de caracteres en lugar de como una entrada /proc
  - El módulo se comportará como un driver de dispositivo de caracteres
  - El fichero especial de caracteres se creará explícitamente con el comando `mknod`

Entrega de la práctica

- A través del Campus Virtual
  - Hasta el 22 de noviembre
- Obligatorio mostrar el funcionamiento después de hacer la entrega

Estructura entrega (en un fichero comprimido .tar.gz o .zip)



Licencia

LIN - Práctica 4: Procesos y Sincronización
Versión 1.2

Este documento (o uno muy similar) está disponible en
`https://cv4.ucm.es/moodle/course/view.php?id=121225`