



SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos
Universidad Complutense de Madrid*

TEMA 5. Threads y Sincronización

Tema 5. Threads y Sincronización

5.1 Introducción

- Concurrency y Paralelismo
- Sincronización y Comunicación

5.2 Procesos y Threads

- Threads
- Creación y terminación

5.3 Región Crítica

- Definición
- pthread_mutex_t
- Patrón de diseño: *Work Crew*

5.4 Variables de Condición

- Definición
- p_thread_cond_t
- Patrón de diseño: *Productor-Consumidor*

5.5 Soporte del Sistema

- Visibilidad de memoria
- Soporte de la CPU - ISA
- Soporte del SO



SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos
Universidad Complutense de Madrid*

TEMA 5.1 Introducción

Concurrencia y Paralelismo

Concurrencia.

- Permite la compartición de recursos (p.ej. CPU) entre procesos (o threads) mientras no está siendo usado por el proceso actual (p.ej. E/S).
- Mecanismos
 - **Multiprogramación** (Tema 3)
 - **Programación multi-thread** (Tema 5)
 - Programación asíncrona (p.ej. corutinas C++, channels Golang, async/await Rust...)

Paralelismo. Uso simultáneo de los recursos del sistema (p.ej. cores de una CPU).

- Asociado al concepto de tiempo-compartido estudiado en la asignatura.
- Usa los mismos mecanismos que la concurrencia

Sincronización y Comunicación (I)

Sincronización. Coordinar la ejecución de varios procesos o threads

- **Mismo sistema**
 - **Señales** (Tema 3)
 - Ficheros, mediante el uso de cerrojos, p.ej. `flock(2)`
 - **Mutex y variables de condición** (hilos de un proceso) (Tema 5)
 - Semáforos (System V IPC, POSIX IPC)
 - Colas de mensajes (System V IPC, POSIX IPC)
 - Basados en UNIX domain socket(7) (Asignatura Redes)
- **Distintos sistemas**
 - Basados en socket(7) TCP/UDP (Asignatura Redes)

Sincronización y Comunicación (II)

Comunicación. Compartir datos entre varios procesos o threads

- **Mismo sistema**

- **Threads** (hilos de un proceso) (Tema 5)
- Memoria compartida (System V IPC, POSIX IPC, [Tema 4](#))
- **Tuberías con y sin nombre** (Tema 1)
- Colas de mensajes (System V IPC, POSIX IPC)
- **Basados en ficheros** (Tema 2)
- Basados en UNIX domain socket(7) (Asignatura Redes)

- **Distintos sistemas**

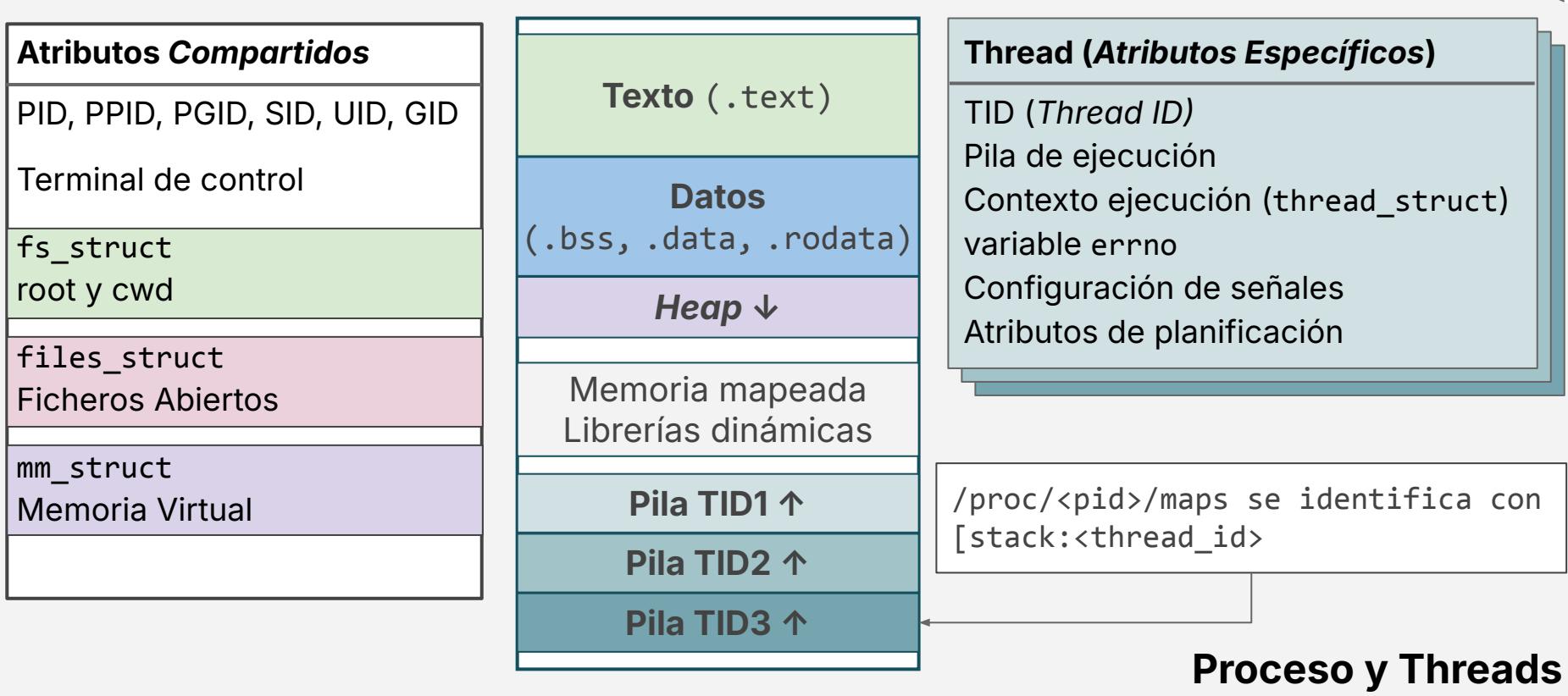
- Basados en socket(7) TCP/UDP (Asignatura Redes)



TEMA 5.2 Procesos y Threads

Threads (I)

- **Proceso** Unidad de ejecución con su espacio de memoria virtual y recursos asociados (tabla de ficheros, gestión de señales...)
- **Thread** Es un “proceso ligero” en el contexto de un proceso con el comparte algunos recursos (**especialmente el espacio de direcciones**) pero mantiene su propio contexto de ejecución.



Threads (II)

Aplicaciones multiproceso y *multithread*

- Los programas multi-thread ofrecen
 - Menor coste de creación
 - Cambios de contexto más eficientes
 - Modelo de compartición sencillo
 - Un mecanismo eficaz para aprovechar el **parallelismo** dentro de un proceso, especialmente para aplicaciones intensivas en CPU.
- Sin embargo:
 - Requieren de mecanismos de sincronización
 - Deben usar versiones *thread-safe* o *reentrantes (_r)* de las funciones de librería.
 - Difícil desarrollo y depuración (interbloqueos, condiciones de carrera...)
 - La programación asíncrona es más eficiente para aplicaciones intensivas en E/S (**concurrency**).

Threads (III)

Linux & POSIX Threads

- Procesos y Threads se representan por el mismo objeto del kernel `task_struct`.
- Se crean con la misma llamada `clone(2)` especificando los recursos que se comparten (ver `CLONE_THREAD`)
- Todos los threads de un proceso tienen un identificador único (`TID`), coincide con el `PID` de `task_struct` y tienen el mismo **Thread Group ID** (`TGID`).
- Para el thread principal `TID = TGID`
- `TGID` es el identificador mostrado por `ps` como `PID`
- **API POSIX Threads** define un conjunto de interfaces de programación (POSIX.1) para aplicaciones multi-thread.

pthreads(7)

```
$ ps -aL -o pid,tid,tgid,pgid,cmd
 PID  TID  TGID  PGID CMD
15607 15607 15607 15607 ./prod_cons 1 3 ← main thread
15607 15608 15607 15607 ./prod_cons 1 3
15607 15609 15607 15607 ./prod_cons 1 3
15607 15610 15607 15607 ./prod_cons 1 3
```

Creación y Terminación (I)

<pthread.h>

```
int pthread_create(pthread_t *thread,  
                  const pthread_attr_t *attr,  
                  typeof(void *(void *)) *start,  
                  void *arg);
```

- **pthread_t** Tipo de datos que representa al thread en el proceso.
 - Además de en la creación se puede obtener con `pthread_self(3)`
 - Tipo *opaco*, usar `pthread_equal(3)` para comparar)
- **start** Función ejecutada por el thread `void *(void *)`. El thread terminará:
 - Retorne de la función start
 - Llame a la función `pthread_exit(3)`
 - Sea cancelado por otro thread `pthread_cancel(3)` (**no usar** en general)
 - El proceso termina (de cualquiera de las formas habituales) que terminará todos los threads del proceso.
- **arg** Puntero a los argumentos. **Importante:** El tiempo de vida debe ser igual al del thread.

Creación y Terminación (II)

<pthread.h>

Atributos de creación del thread `pthread_attr_t`

- Permiten fijar características sobre la planificación y **terminación** (ver `pthread_attr_init(3)`).
- **PTHREAD_CREATE_JOINABLE** (defecto). Permite la sincronización por otros threads.
 - `pthread_join(3)` espera la terminación de un thread y devuelve el valor de retorno.
 - Los recursos son destruidos cuando el thread se sincroniza.
- **PTHREAD_CREATE_DETACHED**
 - Cuando no es necesario controlar los threads creados.
 - Los recursos son destruidos cuando el thread termina.

Creación y Terminación (III)

<pthread.h>

```
int pthread_join(pthread_t thread, void **retval);
```

- `retval` dirección de la variable de retorno:
 - El ciclo de vida de la variable debe superar la vida del thread
 - El valor se fija mediante la función `pthread_exit(3)`
- `thread` especifica el thread que se espera
 - Cualquier thread puede realizar la sincronización de otro
 - No se puede esperar a “cualquier thread” como en `waitpid(2)`

Creación y Terminación (IV)

Ejemplo. Ejercicio 1

Escribir un programa que cree un número de threads indicado por el primer argumento, de forma que:

- Cada thread se le asignará un identificador 0,1,2... que imprimirá por la salida estándar y usará para hacer un sleep(3) de los mismos segundos.
- El thread principal esperará a que terminen todos los threads.



SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos
Universidad Complutense de Madrid*

TEMA 5.3 Región Crítica

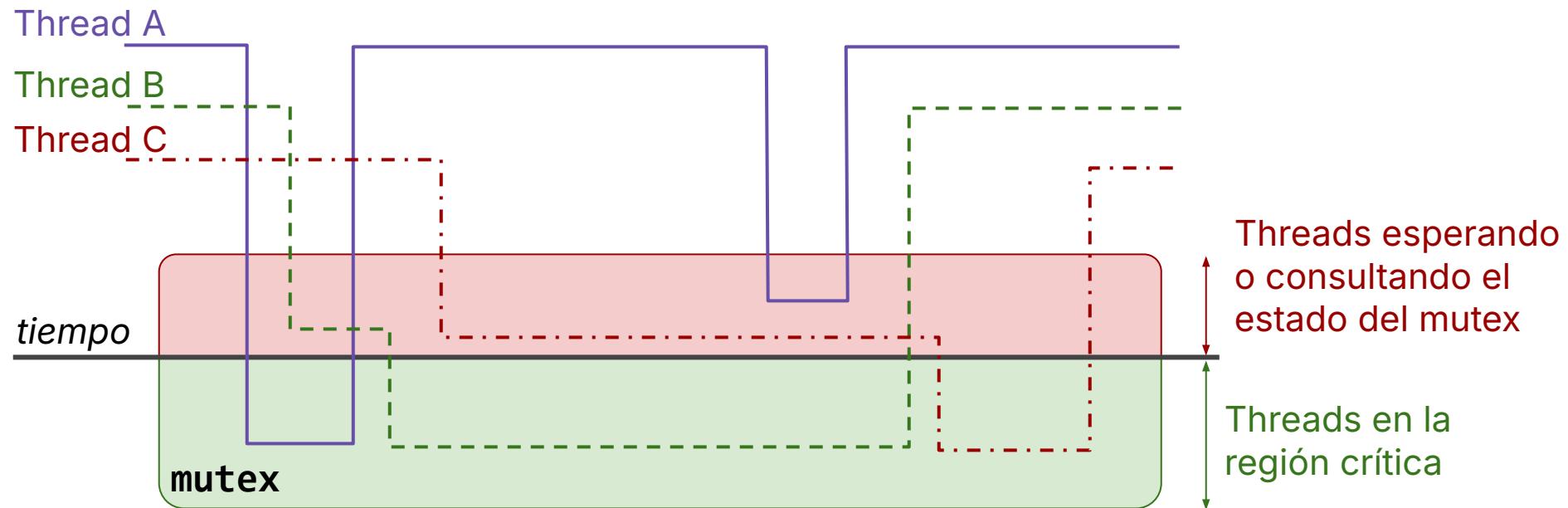
Región Crítica (I)

- **Invariante.** Condición sobre el estado **compartido** que debe satisfacerse cuando se observa fuera de la región crítica.
 - Ejemplo: *En una lista cada elemento debe contener un puntero válido al siguiente elemento menos el último que será NULL*
- **Región Crítica.**
 - Áreas de código donde se modifica o se consulta el estado compartido del programa.
 - Las regiones críticas preservan los invariantes del programa permitiendo la ejecución **exclusiva** de un thread.
 - Ejemplo: *Eliminar un elemento de la lista*
- **Predicados.** Expresión lógica que describen el estado de una invariante. El predicado indica que un thread puede ejecutarse.
 - Ejemplo: *La lista está vacía*

Región Crítica (II)

Mutex. Permiten implementar regiones críticas asegurando que un único thread ejecuta el código de la región a la vez (*mutual exclusion*)

- Un mutex tiene dos estados cerrado (*locked*) y abierto (*unlocked*)
- La región crítica es la sección de código comprendida entre las llamadas lock y unlock
- Caso especial de los semáforos [Dijkstra 1968] (más difíciles de usar)



Región Crítica (III)

```
pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;  
int pthread_mutex_init(pthread_mutex_t *mutex,  
                      const pthread_mutexattr_t *attr);  
int pthread_mutex_destroy(pthread_mutex_t *mutex);
```

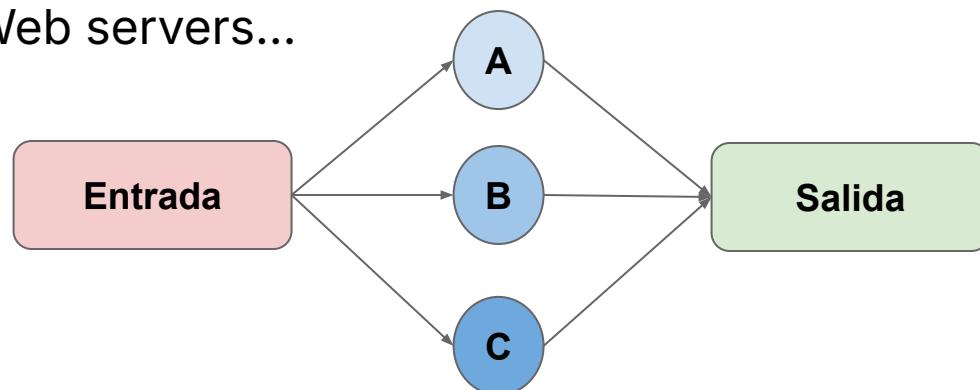
- attr Define el comportamiento del mutex respecto a los errores:
 - *deadlock* Un thread no debe hacer lock() doble de un mutex
 - Un thread no debe hacer unlock() de mutex de otros threads
 - No hacer de unlock() the un mutex en estado unlock()
- La función destroy sólo se puede llamar cuando otros threads no estén esperando en el mutex y el mutex está unlock

```
int pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mutex);  
int pthread_mutex_trylock(pthread_mutex_t *mutex);  
int pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mutex);
```

Patrón: Work Crew / Thread Pool

Work Crew

- Los threads cooperan mediante la ejecución independiente de tareas.
- La tarea ejecutada por cada thread puede ser diferente
- Requieren la sincronización en los datos de entrada y salida de tarea
- Ejemplos: Game engines, Web servers...



Ejemplo. Ejercicio 3

Escribir un programa cuyo primer argumento indicará el número de threads y el segundo el tamaño de bloque (T_b):

- Cada thread se le asignará un identificador ($i = 0, 1, 2, \dots$) y sumará T_b enteros en el rango $[i*T_b - (i+1)*T_b - 1]$
- El thread principal sincronizará todos los threads y mostrará la suma.

Patrón: Lector - Escritor (I)

Lector-Escritor

- En este patrón de sincronización se asume un recurso compartido:
 - Los accesos de lectura son mucho más frecuentes que los de escritura
 - Se permite el acceso concurrente al recurso por varios *lectores*
 - El acceso de los *escritores* debe ser exclusivo para mantener la consistencia de los datos.
 - La tarea ejecutada por cada thread puede ser diferente
- Ejemplos de aplicación:
 - Caché compartidas
 - Consulta del estado del global del juego
- **Problemas de Inanición** si se favorecen las lecturas o escrituras. En linux (pthread_rwlock_t) se favorece la productividad priorizando las lecturas.

Patrón: Lector - Escritor (II)

```
pthread_rwlock_t rwlock = PTHREAD_RWLOCK_INITIALIZER;  
int pthread_rwlock_init(pthread_rwlock_t *rwlock,  
                      const pthread_rwlockattr_t *attr);  
int pthread_rwlock_destroy(pthread_rwlock_t *rwlock);
```

- Mismas consideraciones en la creación y destrucción que un `pthread_mutex_t`

```
int pthread_rwlock_[rd|wr]lock(pthread_rwlock_t *lock);  
int pthread_rwlock_try[rd|wr]lock(pthread_rwlock_t *lock);  
int pthread_rwlock_unlock(pthread_rwlock_t *lock);
```

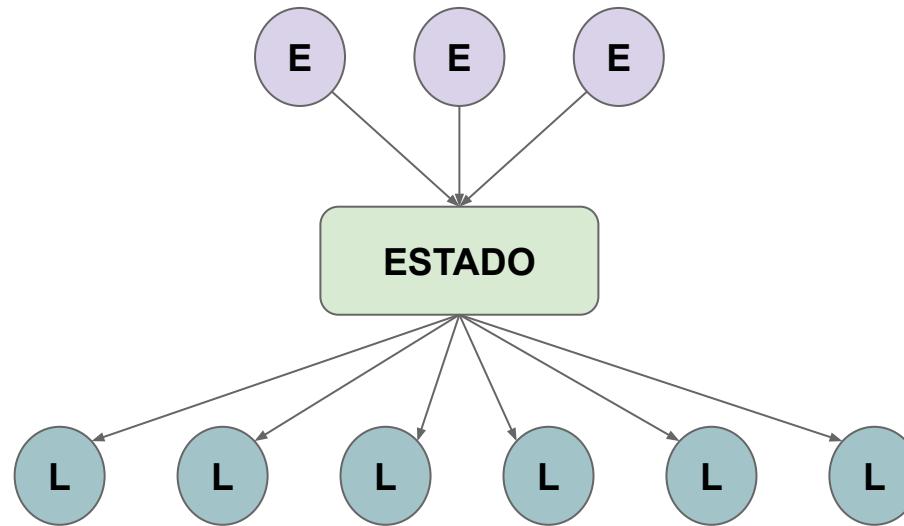
- Bloqueo de lectura (`rdlock`), el thread obtiene el mutex si no está bloqueado por un escritor ni hay escritores esperando (se puede bloquear varias veces)
- Bloqueo de escritura (`wrlock`), el thread obtiene el mutex si ningún otro thread tiene un bloqueo de cualquier tipo (`rd` o `wr`).

Patrón: Lector - Escritor (III)

Ejemplo. Ejercicio 6.

Escribir un programa que cree L lectores (primer argumento) y E escritores (segundo argumento), de forma que:

- Los threads *Lector* imprimirán por pantalla un entero compartido y esperarán 0.1s con la llamada usleep(3). Este acceso lo repetirán 5 veces.
- Los threads *Escritor* incrementarán en 1 la variable y esperarán 0.25s. Este acceso lo repetirán 3 veces.
- El thread principal arrancará primero los escritores.





SISTEMAS OPERATIVOS

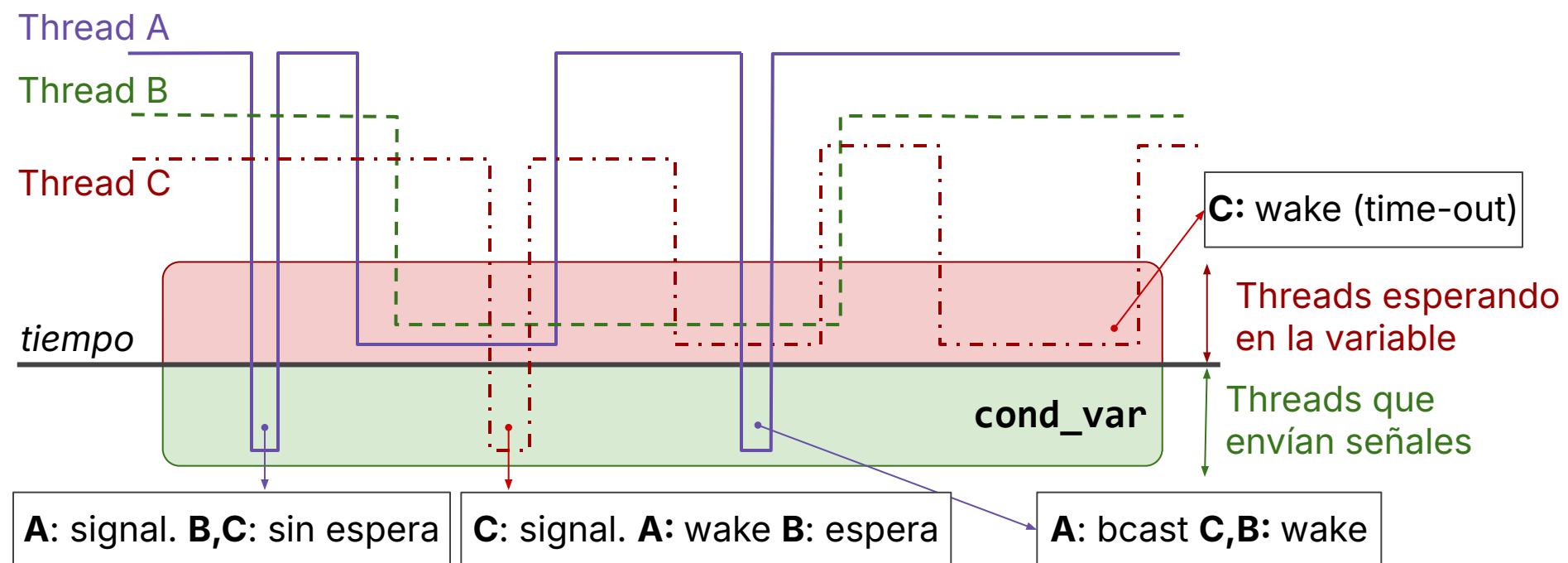
*Grado en Desarrollo de Videojuegos
Universidad Complutense de Madrid*

TEMA 5.3 Variables de Condición

Variables de Condición (I)

Variable de Condición. Abstracción que permite bloquear y despertar threads según la evaluación de un predicado sobre variables (estado) compartido:

- **Estado compartido**, representado por variables del programa. Ejemplo: *número de elementos en la lista*
- **Mutex**, para actualizar el estado en una región crítica. Un thread **despierta** de la espera siempre con el **mutex bloqueado** (*lock*)
- **Predicado**, condición sobre el estado que se espera/señaliza. Ejemplo: *elementos > 0*



Variables de Condición (II)

```
pthread_cond_t cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER;  
  
int pthread_cond_init(pthread_cond_t *cond,  
                      const pthread_condattr_t *attr);  
  
int pthread_cond_destroy(pthread_cond_t *cond);
```

- La función destroy sólo se puede llamar cuando otros threads no estén esperando el la variable de condición

```
int pthread_cond_wait(pthread_cond_t *cond, pthread_mutex_t *mutex);
```

- Versión timedwait permite especificar un timeout (struct timespec).
- El thread vuelve de la llamada con mutex en estado lock
- El thread debe **comprobar el predicado** antes de entrar en la espera y después de salir de ella.

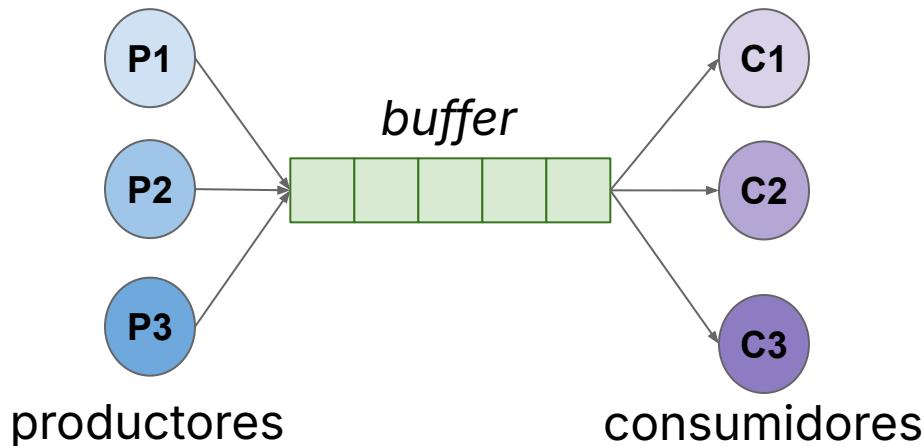
```
int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cond);  
int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cond);
```

- Despierta a un thread (*cualquiera*) esperando en la variable de condición.
La versión broadcast despierta todos.

Patrón de Diseño: Productor - Consumidor (I)

Productor - Consumidor

- Productores, generan datos que se colocan en un buffer compartido
- Consumidores, recogen los datos del buffer y los procesan.
- Variables de condición y mutex para controlar el buffer.
- Predicados: *Buffer no está vacío* (se puede consumir), *Buffer no está lleno* (se puede producir).



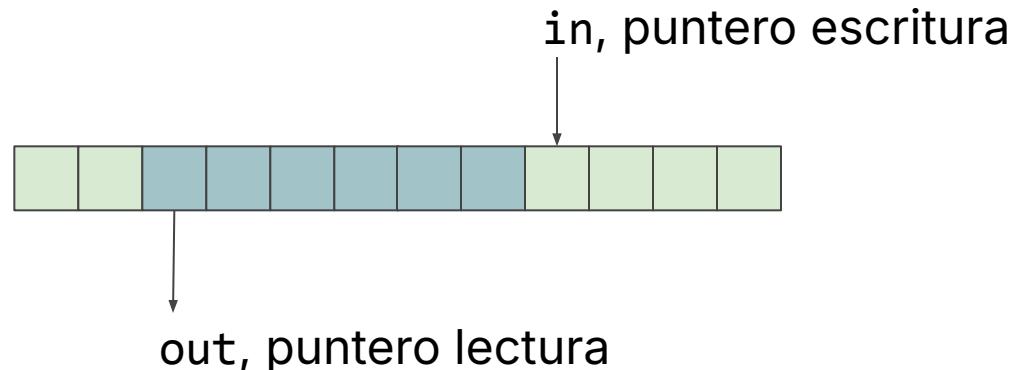
- Generalización en el patrón *pipeline*, con múltiples etapas de productor-consumidor.

Patrón de Diseño: Productor - Consumidor (II)

Ejemplo. Ejercicio

Escribir un programa con P threads productores (argumento 1) y C threads consumidores (argumento 2).

- Los tiempos de producción y consumición serán de 1 y 2 segundos respectivamente.
- El buffer compartido será un array de tamaño fijo con dos índices (*in* - producción, y *out* - consumición).



- Implementar el sistema con dos variables de condición y predicados:
 - consumidor: `elements > 0`
 - productor: `elements < buffer_size`
- Cada productor producirá un número fijo de elementos (`NUM_ELEMENTS`)

Patrón de Diseño: Productor - Consumidor (II)

Ejemplo

- Añadir una condición de finalización para los consumidores:
 - Opción 1. Contar el número de elementos totales consumidos, y modificar el predicado y los envíos de señales (broadcast) de los consumidores.
 - Opción 2 (*patrón píldora envenenada*). Escribir un elemento de finalización cuando se hayan producido todos los elementos, si un consumidor lee del buffer el elemento de finalización, terminará.



SISTEMAS OPERATIVOS

*Grado en Desarrollo de Videojuegos
Universidad Complutense de Madrid*

TEMA 5.4 Soporte del Sistema Operativo

Visibilidad de Memoria (I)

- El compilador y el hardware pueden **reordenar libremente las instrucciones** que se emiten si mantienen la **causalidad** aparente del programa.

```
x = 3;  
...  
c = 2 * x + 1  
...  
y = c;
```

relación de orden observable entre operaciones de memoria.

load, add, store
se pueden reordenar siempre que en este punto $y=7$

- En situaciones **asíncronas** (p.ej. manejadores de señales, multi-thread) no se puede asegurar esta *causalidad*:
 - Cache privadas por procesador (los protocolos de coherencia no aseguran valores consistentes hasta que se propagan las invalidaciones)
 - Ejecución *fuerza de orden* y *especulativa* (que afecta temporización y cache)
 - Optimizaciones del compilador
 - Modelo de **consistencia** de memoria (reordenación de las operaciones store/load según unas reglas bien definidas)

Visibilidad de Memoria (II)

Las barreras de memoria (*memory barriers*) imponen un orden parcial aparente de las operaciones en cada lado de la barrera.

Tipos de Barreras de Memoria

- **Lectura:** Las lecturas (load) antes de la barrera se completan antes de las operaciones de lectura después de la barrera.
- **Escritura:** Las escrituras (store) antes de la barrera se completan antes de las operaciones de escritura después de la barrera.
- **General/Completa:** afectan tanto a las operaciones load y store. Las llamadas `pthreads_mutex_lock/unlock` actúan de este modo.

C++11. `<atomic>`

- Ofrece un interfaz para gestionar el acceso a datos compartidos en programas multi-thread.
- Permite definir el modelo de memoria de forma que el programador puede establecer un orden bien definido de accesos.

Visibilidad de Memoria (III)

pthreads: Reglas de Visibilidad

- **Creación de threads (pthread_create)**
 - Un thread recién creado observa todos los efectos de memoria realizados por el thread creador antes de la llamada a pthread_create().
- **Mutex (pthread_mutex_lock / pthread_mutex_unlock)**
 - Todas las operaciones de memoria realizadas antes de pthread_mutex_unlock() por un thread son visibles para cualquier thread que posteriormente adquiera el mismo mutex mediante pthread_mutex_lock().
- **Finalización de threads (pthread_join)**
 - Todos los efectos de memoria de un thread finalizado son visibles para el thread que ejecuta pthread_join() sobre él.
- **Variables de condición (pthread_cond_signal / pthread_cond_broadcast)**
 - Todos los efectos de memoria previos a un signal o broadcast son visibles para los threads que se despiertan a consecuencia de la señalización.

Estos puntos requieren de una barrera de memoria implícita en las llamadas.

Soporte del Sistema: CPU ISA

Barreras de Memoria

- Soporte del procesador para implementar las barreras de memoria:
 - x86: `mfence`, `sfence`, `lfence`
 - ARM: `dmb`, `dsb`, `isb`

Instrucciones atómicas

- La arquitectura del repertorio de instrucciones ofrece operaciones de lectura-modificación-escritura atómicas (libres de condiciones de carrera)
- Ejemplo: *Compare-and-Swap*. Intel x86 instrucción `cmpxchg`

```
bool cmpxchg(int *addr, int expected, int newval){
    old = *addr;
    if (old == expected)
    {
        *addr = newval;
        return true;          El nuevo valor se actualizó con éxito
    }
    else
    {
        return false;         Otro proceso actualizó el valor
    }
}
```

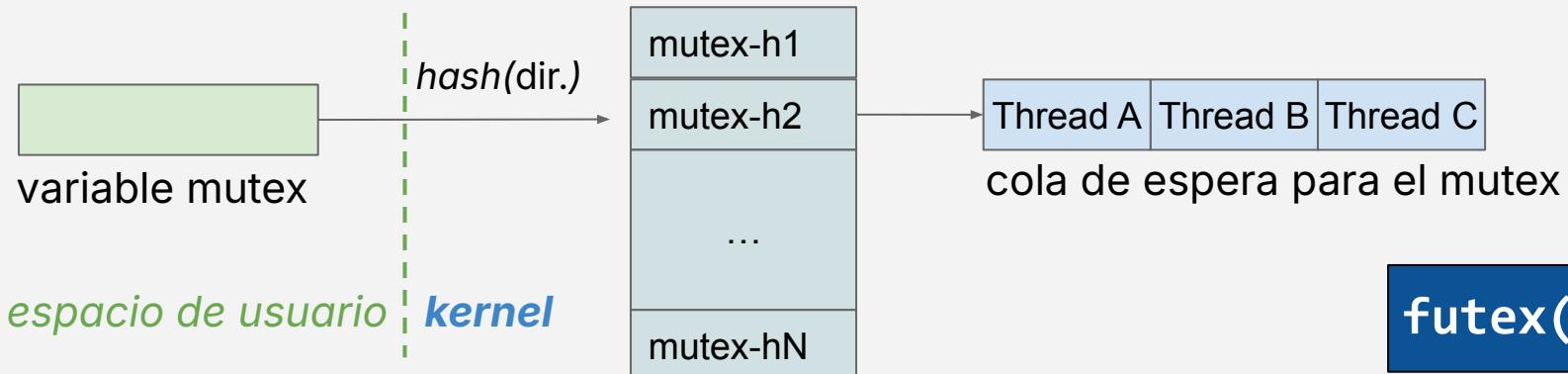
Soporte del Sistema: SO (I)

Subsistemas del SO

- Memoria virtual compartida entre threads (**Tema 4**)
- Suspensión y reanudación de la ejecución de threads (**Tema 3**)
- Implementación de colas de espera asociadas a mutex y variables de condición
- Linux y Windows implementan el soporte mediante la estructura futex (*fast user space mutex*)

futex

- Representados por una variable compartida por procesos (`mmap - shared`) o threads.
- La variable se modifica siempre mediante operaciones atómicas
- Las operaciones **sin contienda** se realizan en el espacio de usuario. Si varios threads entran en contienda por un mutex el kernel arbitra el acceso.



Soporte del Sistema: SO (II)

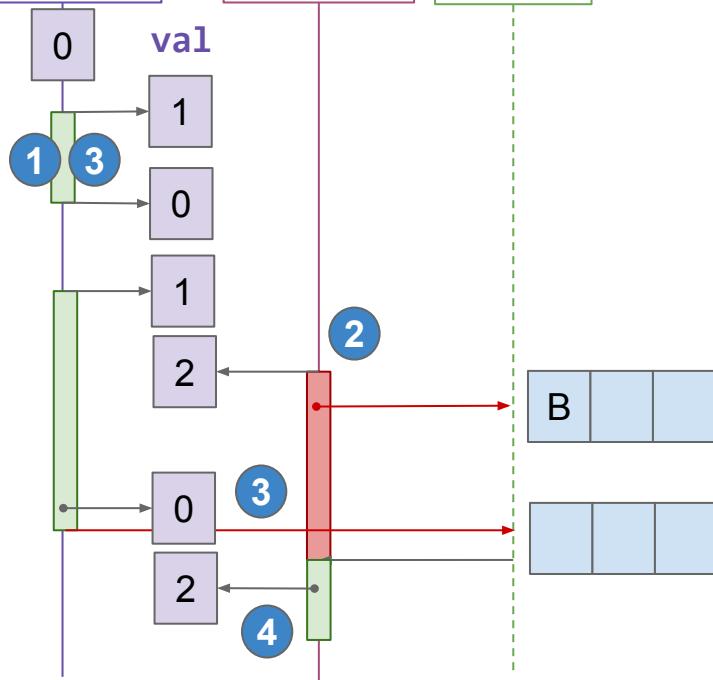
mutex lock

```
if ((c = cmpxchg(val, 0, 1)) != 0) ①  
do  
{  
    if (c == 2 || cmpxchg(val, 1, 2) != 0)  
        ② futex_wait(val, 2); //espera si 2  
} while ((c = cmpxchg(val, 0, 2)) != 0); ④
```

mutex unlock

```
if ((atomic_dec(val)) != 1) //val--  
{  
    *val = 0;  
    //Despierta a 1 thread  
    futex_wake (val, 1);  
}
```

thread A thread B kernel



pthread_mutex_lock

- Implementación usa un modelo similar
- Ver __data.__lock (pthred_mutex_lock.c)
- A futex overview and update