Sistemas Operativos

Universidad Complutense de Madrid

2020-2021

Módulo 3.3: Comunicación y Sincronización entre Procesos e Hilos

Juan Carlos Sáez

Contenido

Contenido

Procesos concurrentes

- **Concurrencia**: ejecución simultánea o entrelazada de múltiples flujos de instrucciones de distintos procesos o hilos
- Modelos
  - Multiprogramación en un único procesador
  - Multiprocesador
  - Multicomputador (proceso distribuido)
- Razones
  - Compartir recursos físicos
  - Compartir recursos lógicos
  - Acelerar los cálculos
  - Modularidad

Problemas clásicos de concurrencia

- El problema de la sección crítica
- El problema del productor-consumidor
- El problema de los lectores-escritores
- Problema de los filósofos comensales

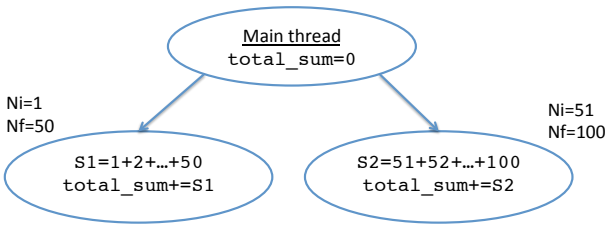
Problema de la sección crítica

- Disponemos de un programa concurrente formado por n procesos/hilos
- Cada uno tiene un fragmento de código que accede/modifica un recurso compartido:
  - Sección crítica
- Queremos que sólo uno de los procesos/hilos en cada instante puede ejecutar su sección crítica

Problema de la sección crítica: Ejemplo 1

```
int i;
int total_sum= 0;
for (i = 1; i <= 100; i++)
        total_sum+=i;
```

Parallelization with two threads



Problema de la sección crítica: Ejemplo 1

- Calcular $\sum_{i=1}^{N} i$ usando múltiples hilos

```
int total_sum = 0; // Var. compartida

void calculate_partial_sum(int ni, int nf) {
    int j = 0;
    int partial_sum = 0; // Var. privada
    for (j = ni; j <= nf; j++)
        partial_sum = partial_sum + j;
    total_sum = total_sum + partial_sum;
    pthread_exit(0);
}
```

- Si varios procesos ejecutan concurrentemente este código se puede obtener un resultado incorrecto

Problema de la sección crítica: Ejemplo 1

- Posible implementación de la sección crítica en ensamblador:

```
total_sum = total_sum + partial_sum;

LDR R1,total_sum     #R1=0 (la 1ª vez)
LDR R2,partial_sum   #R2=1275
ADD R1,R1,R2         #R1=1275
STR R1,total_sum     #total_sum=1275
```

Problema de la sección crítica: Ejemplo 1

- Posible situación de conflicto:

```
    LDR R1,total_sum     #R1=0
    LDR R2,partial_sum   #R2=1275

############## Cambio de Contexto #############
    LDR R1,total_sum     #R1=0
    LDR R2,partial_sum   #R2=3775
    ADD R1,R1,R2         #R1=3775
    STR R1,total_sum     #total_sum=3775

############## Cambio de Contexto #############
    ADD R1,R1,R2         #R1=1275
    STR R1,total_sum     #total_sum=1275
```

Problema de la sección crítica: Ejemplo 1

- Solución:
  - Solicitar permiso para entrar en sección crítica
  - Indicar la salida de sección crítica

```
int total_sum = 0; // Var. compartida

void calculate_partial_sum(int ni, int nf) {
    int j = 0;
    int partial_sum = 0; // Var. privada
    for (j = ni; j <= nf; j++)
        partial_sum = partial_sum + j;

    <Entrar a la sección crítica>
    total_sum = total_sum + partial_sum;
    <Salir de la sección crítica>
    pthread_exit(0);
}
```

Problema de la sección crítica: Ejemplo 2

- Un banco almacena el saldo de las cuentas de cada cliente en un fichero por cuenta
  - Por cada ingreso en cuenta se debe actualizar el saldo almacenado en el fichero correspondiente

```
void ingresar(char *cuenta, int cantidad) {
    int saldo, fd;
    fd = open(cuenta, O_RDWR);
    read(fd, &saldo, sizeof(int));
    saldo = saldo + cantidad;
    lseek(fd, 0, SEEK_SET);
    write(fd, &saldo, sizeof(int));
    close(fd);
    return;
}
```

- Si dos procesos ejecutan concurrentemente este código se puede perder algún ingreso

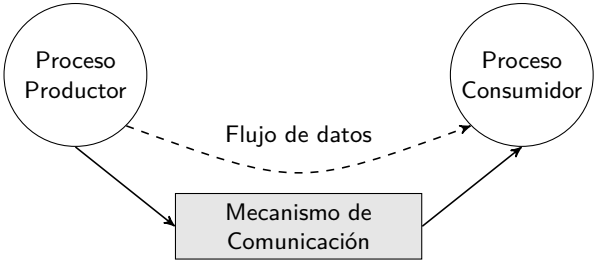
Problema de la sección crítica: Ejemplo 2

```
void ingresar(char *cuenta, int cantidad) {
        int saldo, fd;

        fd = open(cuenta, O_RDWR);
        <Entrada en la sección crítica>
        read(fd, &saldo, sizeof(int));
        saldo = saldo + cantidad;
        lseek(fd, 0, SEEK_SET);
        write(fd, &saldo, sizeof(int));
        <Salida de la sección crítica>
        close(fd);
        return;
}
```

Solución al problema de la sección crítica

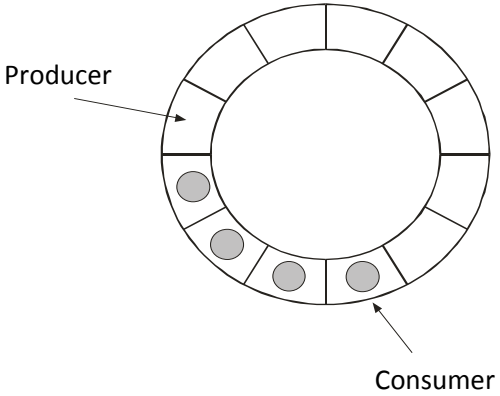
- Requisitos que debe ofrecer cualquier solución para resolver el problema de la SC:
  - **Exclusión mutua**: sólo un proceso en la sección crítica
  - **Eficiencia/Progreso**: Si ningún proceso está ejecutando dentro de la sección crítica, la decisión de qué proceso entra en la sección se hará sobre los procesos que desean entrar
    - Un proceso no debe ver retrasado el acceso a su sección crítica cuando no hay ningún otro proceso usándola
  - **Evitar inanición/Garantizar espera limitada**: ningún proceso debe esperar indefinidamente para entrar en su región crítica
- Hay que tener también en mente:
  - No deben hacerse suposiciones sobre las velocidades relativas de los procesos o sobre el número de procesos competidores
  - Un proceso permanece dentro de su sección crítica un tiempo finito

Problema del productor-consumidor

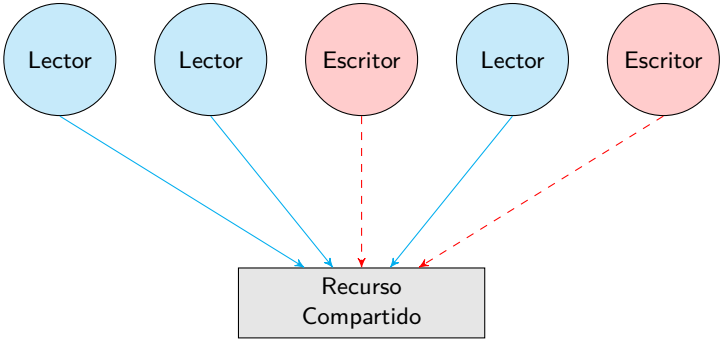


- El consumidor se quedará bloqueado cuando no haya datos que leer
- El productor se bloqueará al intentar enviar datos si no hay espacio libre en el mecanismo de comunicación para almacenarlos

Productor-consumidor: buffer circular



Problema de los lectores-escritores

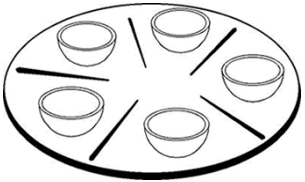


- Los lectores pueden ejecutar su sección critica (SC) simultáneamente
- Si hay un escritor en su SC no puede haber ningún otro proceso (ni lector, ni escritor) ejecutando su SC

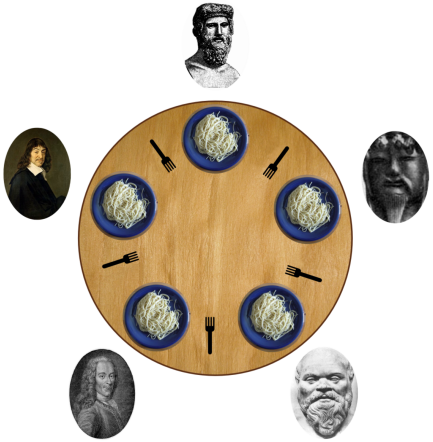
Filósofos comensales (Dijkstra'65)

- Cinco filósofos sentados en una mesa piensan y comen arroz:
  - Emplean un tiempo finito en comer y pensar
  - Necesitan 2 palillos para comer, que se cogen de uno en uno
  - Ningún filósofo debe morir de hambre (evitar inanición e interbloqueo)

- Comportamiento de cada fílósofo (bucle infinito):
  1. Pensar...
  2. Coger un palillo, coger el otro.
  3. comer
  4. soltar un palillo y luego el otro. Ir a 1.



Filósofos comensales (Dijkstra'65)



Filósofos comensales (Dijkstra'65)

Soluciones:

- Turno rotativo:
  - Desperdicia recursos
- Un camarero arbitra el uso de los palillos
  - Necesitamos un supervisor
- Numerar los palillos, coger siempre el menor, luego y el mayor y soltarlos en orden inverso:
  - Penalizamos al último filósofo
- Si no puedo coger el segundo palillo, suelto el primero
  - ¿Y si mis vecinos comen alternativamente?

Contenido

Mecanismos C&S

- Todos los problemas clásicos tienen en común:
  - Necesitan compartir información
    - Que todos puedan conocer el valor de una variable...
  - Necesitan sincronizar su ejecución
    - Que un proceso espere a otro...
- Estudiaremos qué mecanismos suelen ofrecer los sistemas operativos para este fin
  - Resolveremos problemas clásicos para ilustrar cómo se usa cada mecanismo

Mecanismos de comunicación

- Archivos
- Tuberías (pipes, FIFOS)
  - No las estudiaremos
- Memoria compartida
  1. Implícita: hilos
     - Hilos de un mismo proceso se comunican mediante variables o estructuras de datos globales
  2. Explícita: necesidad de una API específica
     - Hilos de distintos procesos no comparten memoria
     - Para establecer comunicación → Crear regiones de memoria compartida

Mecanismos de Sincronización

- Servicios del sistema operativo:
  - Cerrojos, Locks o Mutexes
  - Semáforos
  - Variables condición
  - Señales: asíncronas y no encolables
  - Tuberías (pipes, FIFOS) (no las estudiaremos)
- Las operaciones de sincronización deben ser **atómicas**

Cerrojo (mutex)

- Mecanismo ideal para resolver el problema de la sección crítica
- Podemos ver un cerrojo como un objeto con dos estados:
  - abierto ó cerrado
- Soporta dos operaciones atómicas:
  - *Adquirir el cerrojo (lock)*

```
lock() {
  while(estado!=abierto)
    .. espera ..

  estado=cerrado;
}
```

  - *Liberar el cerrojo (unlock)*

```
unlock() { estado=abierto; }
```

    - lo ejecuta el hilo que lo cerró con `lock()` antes (propietario)

Tipos de cerrojos

```
lock() {
  while(estado!=abierto)
    .. espera ..

  estado=cerrado;
}
```

3 tipos de cerrojo o mutex

1. **Bloqueante**: El hilo se va a dormir cuando durante la espera
   - Estado ⇒ `Bloqueado`
   - `unlock()` *despierta* a un hilo ⇒ estado `Listo para ejecutar`
2. **De espera activa**: El hilo consume ciclos de CPU mientras comprueba la condición en repetidas ocasiones:
   - También llamado *spin lock*
   - Objetivo: reducir el número de cambios de contexto
3. **Adaptivo**: El hilo realiza espera activa durante un tiempo y luego se bloquea

Cerrojo (mutex)

- Un cerrojo o mutex es un mecanismo de sincronización indicado para hilos
  - Ideal para el problema de la sección crítica, pues garantiza exclusión mutua (*MUTual EXclusion*)...
- Cerrojo: "objeto" con 3 atributos y 2 métodos atómicos

```
/* abierto/cerrado */
state_t state;

/* cola de hilos
     bloqueados */
queue_t q;

/* Hilo propietario */
thread_id owner;
```

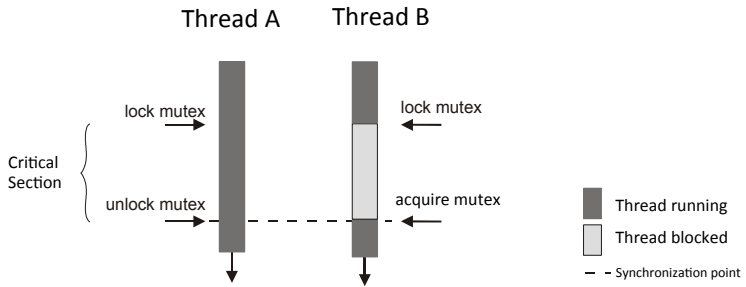
```
lock(m) {
 if (m->estado==cerrado) {
  queue_add(m->q, esteHilo);
  suspenderHilo();
  queue_del(m->q,esteHilo);
 }

 m->estado = cerrado;
 m->owner = esteHilo;
}
```

```
unlock(m) {
 if (m->owner==esteHilo) {
  m->estado=abierto;
  m->owner=NULL;
  if (m->q.notEmpty())
   despiertaUnHiloDeCola();
 }
 else
  error!!
}
```

Secciones críticas con mutex

```
lock(m);   /* entrada en la seccion critica */
< seccion critica >
unlock(m); /* salida de la seccion critica */
```

- La operación `unlock()` debe invocarla el hilo que ejecutó `lock()` (propietario del mutex)



Servicios POSIX: mutexes

- `int pthread_mutex_init(pthread_mutex_t *mutex, pthread_mutexattr_t *attr);`
  - Inicializa un mutex.
- `int pthread_mutex_destroy(pthread_mutex_t *mutex);`
  - Libera los recursos del mutex
- `int pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mutex);`
  - Intenta adquirir el mutex. Bloquea al hilo si el mutex se encuentra adquirido por otro hilo.
- `int pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mutex);`
  - Desbloquea el mutex. El hilo invocador debe ser el propietario del mutex.

Semáforos (Dijkstra'65)

- Mecanismo de sincronización
- Misma máquina
- Objeto con 2 atributos
  - Cola de procesos/hilos bloqueados
  - Contador
    - se inicializa a un valor ≥ 0
- Dos operaciones atómicas
  - `wait()`
  - `signal()`

Operaciones sobre semáforos

```
wait(s){
  s.c = s.c - 1;
  if(s.c < 0){
     <Bloquear al proceso>
  }
}

signal(s){
  s.c = s.c + 1;
  if (hay_procesos_bloqueados){
     <Desbloquear a un proceso bloqueado
          por wait>
  }
}
```

Significado de c

- $c \geq 0 \rightarrow$ c es el número de veces que se puede invocar a wait() sin que ningún proceso invocador se bloquee
- $c \leq 0 \rightarrow |c|$ es el número de procesos bloqueados en el semáforo

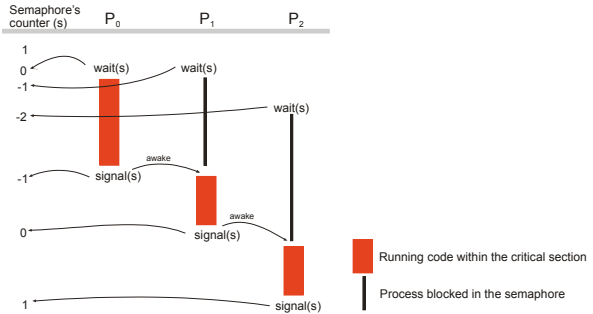
Uso de los semáforos

- Usos típicos
  1. **Garantizar exclusión mutua**
     - Ejemplo: solución al problema de la sección crítica
     - Crear semáforo global inicializado a 1
     - Secciones críticas se encierran entre `wait()` y `signal()`
  2. **Imponer restricciones de sincronización asociadas a condiciones sobre números enteros**
     - Ejemplo: solución del problema productor/consumidor
  3. **Semáforo como cola de espera**
     - Ejemplos: solución de problemas de este tema
     - Crear semáforo S inicializado a 0 + variable entera que lleve la cuenta de número de procesos bloqueados en la cola del semáforo
     - La variable entera estará protegida por un mutex u otro semáforo

Secciones críticas con semáforos

- Inicializar semáforo global con c=1

```
wait(s); /* entrada en la seccion critica */
<sección crítica>
signal(s); /* salida de la seccion critica */
```



Semáforos POSIX: Clasificación

- Dos tipos de semáforos POSIX:
  1. **Semáforos sin nombre**
     - Permiten sincronizar hilos o procesos (típicamente emparentados)
     - Se crean/destruyen mediante `sem_init()`/`sem_destroy()`
  2. **Semáforos con nombre**
     - Suelen usarse para sincronizar procesos no emparentados
  - Nombre del semáforo: ID global (cadena de caracteres)
    - Se crean/destruyen mediante `sem_open()`/`sem_unlink()`
- Las funciones `sem_wait()` y `sem_post()` implementan las operaciones *wait()* y *signal()* de ambos tipos de semáforos
  - Nos centraremos en el uso de los semáforos sin nombre

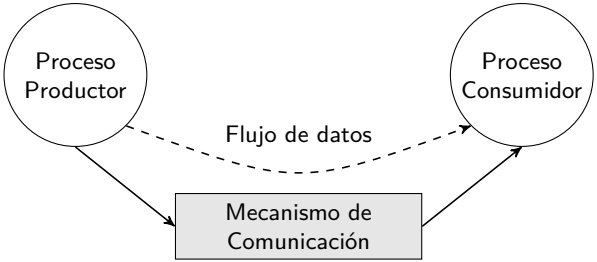
Semáforos POSIX: API

- `int sem_init(sem_t *sem, int shared, unsigned int val);`
  - Inicializa un semáforo sin nombre
    - `shared`: 0 → hilos; 1 → procesos
    - si `shared==1`, el descriptor del semáforo (`sem_t`) debe almacenarse en una región de memoria compartida
- `int sem_destroy(sem_t *sem);`
  - Destruye un semáforo sin nombre
- `int sem_wait(sem_t *sem);`
  - Realiza la operación *wait()* sobre un semáforo
- `int sem_post(sem_t *sem);`
  - Realiza la operación *signal()* sobre un semáforo

Semáforos POSIX: API

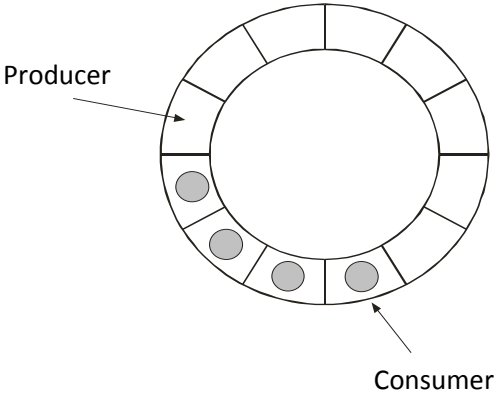
- `sem_t *sem_open(char* name,int flags,mode_t mode, unsigned int val);`
  - Abre (crea) un semáforo con nombre
- `int sem_close(sem_t *sem);`
  - Cierra un semáforo con nombre.
- `int sem_unlink(char *name);`
  - Borra un semáforo con nombre
- `int sem_wait(sem_t *sem);`
  - Realiza la operación *wait()* sobre un semáforo
- `int sem_post(sem_t *sem);`
  - Realiza la operación *signal()* sobre un semáforo

Problema del productor-consumidor



- El consumidor se quedará bloqueado cuando no haya datos que leer
- El productor se bloqueará al intentar enviar datos si no hay espacio libre en el mecanismo de comunicación para almacenarlos

Productor-consumidor: buffer circular



Productor-consumidor con semáforos (I)

```
#define MAX_BUF         1024   /* buffer size */
#define PROD          100000   /* number of items to produce */
sem_t items;                  /* number of items in the buffer */
sem_t gaps;                      /* number of free gaps in the buffer */
int buffer[MAX_BUF];          /* shared buffer */

void main(void){
   pthread_t th1, th2; /* thread descriptors */
   /* semaphore initialization */
   sem_init(&items, 0, 0); sem_init(&gaps, 0, MAX_BUF);

   /* thread creation */
   pthread_create(&th1, NULL, Producer, NULL);
   pthread_create(&th2, NULL, Consumer, NULL);

   /* wait for thread completion */
   pthread_join(th1, NULL); pthread_join(th2, NULL);

   sem_destroy(&gaps); sem_destroy(&items);
   exit(0);
}
```

Productor-consumidor con semáforos (II)

```
void Producer(void){
 int widx = 0; /* write index */
 int data; /* data to produce */
 int i;

 for(i=0; i < PROD; i++ ){
    /* produce data */
    data = generate_data();
    /* one gap less */
    sem_wait(&gaps);
    buffer[widx] = data;
    widx = (widx + 1) % MAX_BUF;
    /* added one item */
    sem_post(&items);
 }

 pthread_exit(0);
}
```

```
void Consumer(void){
 int ridx= 0; /* read index */
 int data; /* data to be consumed */
 int i;

 for(i=0; i<PROD; i++ ){
    /* an item will be removed */
    sem_wait(&items);
    data = buffer[ridx];
    ridx= (ridx+ 1) % MAX_BUF;
    /* one free gap more */
    sem_post(&gaps);
    do_something(data);
  }

 pthread_exit(0);
}
```

N Productores - 1 consumidor con semáforos

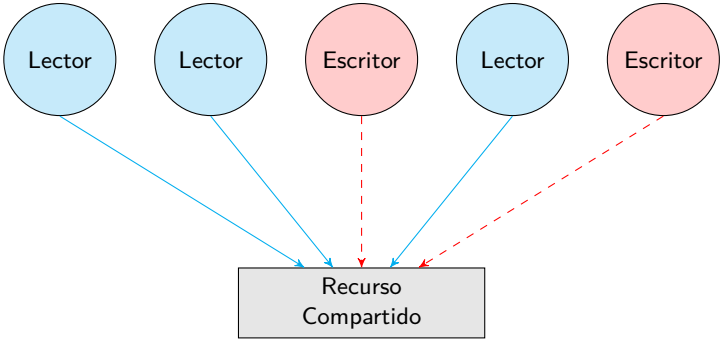
```
#define MAX_BUF         1024   /* buffer size */
#define PROD          100000   /* number of items to produce */
#define N 2   /* Number of producers */
sem_t items;           /* number of items in the buffer */
sem_t gaps;              /* number of free gaps in the buffer */
sem_t producers; /* To enforce mutual exclusion among producers*/
int widx=0;      /* Shared write index */
int buffer[MAX_BUF];    /* shared buffer */

void main(void){
   int i;
   pthread_t thp[N], thc; /* thread descriptors */
   /* semaphore initialization */
   sem_init(&items, 0, 0); sem_init(&gaps, 0, MAX_BUF); sem_init(&producers, 0, 1);

   /* thread creation */
   for (i=0;i<N;i++) pthread_create(&thp[i], NULL, Producer, NULL);
   pthread_create(&th2, NULL, Consumer, NULL);

   /* wait for thread completion */
   for (i=0;i<N;i++) pthread_join(&thp[i], NULL);
   pthread_join(th2, NULL);

   sem_destroy(&gaps); sem_destroy(&items); sem_destroy(&producers);
   exit(0);
}
```

N Productores - 1 consumidor con semáforos

```
void Producer(void){
 int data; /* data to produce */
 int i;

 for(i=0; i < PROD; i++ ){
    /* produce data */
    data = generate_data();
    /* one gap less */
    sem_wait(&gaps);
    sem_wait(&producers);
    /* Critical section */
    buffer[widx] = data;
    widx = (widx + 1) % MAX_BUF;
    sem_post(&producers);
    /* added one item */
    sem_post(&items);
 }

 pthread_exit(0);
}
```

```
void Consumer(void){
 int ridx= 0; /* read index */
 int data; /* data to be consumed */
 int i;

 for(i=0; i<PROD; i++ ){
    /* an item will be removed */
    sem_wait(&items);
    data = buffer[ridx];
    ridx= (ridx+ 1) % MAX_BUF;
    /* one free gap more */
    sem_post(&gaps);
    do_something(data);
  }

 pthread_exit(0);
}
```

Problema de los lectores-escritores



- Los lectores pueden ejecutar su sección critica (SC) simultáneamente
- Si hay un escritor en su SC no puede haber ningún otro proceso (ni lector, ni escritor) ejecutando su SC

Lectores-escritores con semáforos (I)

```
int data = 5;    /* shared resource */
int nr_readers = 0; /* number of readers */
sem_t sem_nreaders; /* control access to nr_readers */
sem_t sem_read_write; /* mutual exclusion between reader-writer and writer-writer */

void main(void){
   pthread_t th1, th2, th3, th4;
   sem_init(&sem_read_write, 0, 1); sem_init(&sem_nreaders, 0, 1);

   pthread_create(&th1, NULL, Reader, NULL);
   pthread_create(&th2, NULL, Writer, NULL);
   pthread_create(&th3, NULL, Reader, NULL);
   pthread_create(&th4, NULL, Writer, NULL);

   pthread_join(th1, NULL); pthread_join(th2, NULL);
   pthread_join(th3, NULL); pthread_join(th4, NULL);

   /* destroy semaphores */
   sem_destroy(&sem_read_write); sem_destroy(&sem_nreaders);
   exit(0);
}
```

Lectores-escritores con semáforos (II)

```
void Reader(void) {
  while(1){
    sem_wait(&sem_nreaders);
    nr_readers = nr_readers + 1;
    if (nr_readers == 1)
      sem_wait(&sem_read_write);
    sem_post(&sem_nreaders);

    /* read data */
    printf("%d\n", data);

    sem_wait(&sem_nreaders);
    nr_readers = nr_readers - 1;
     if (nr_readers == 0)
      sem_post(&sem_read_write);
    sem_post(&sem_nreaders);
  }
}
```

```
void Writer(void) {
  while(1){
    sem_wait(&sem_read_write);

    /* modify the resource */
    data = data + 2;

    sem_post(&sem_read_write);

  }
}
```

Variables condición

- Mecanismo de sincronización para hilos
- Cada variable condición tiene asociada una cola de espera y un mutex
  - El mutex se comparte habitualmente entre múltiples variables condición usadas en el programa concurrente
- Las variables condición soportan 3 operaciones:
  1. `cond_wait()`: el hilo invocador se bloquea en la cola de espera
  2. `cond_signal()`: se despierta a un solo hilo de los que estaban esperando en la cola (si hay alguno)
  3. `cond_broadcast()`: se despierta a todos los hilos que estaban esperando en la cola (si hay alguno)
- Estas operaciones deben invocarse en un fragmento de código entre `lock(mutex)` y `unlock(mutex)`

Operaciones sobre variables condición (I)

```
void cond_wait(lock_t m, vc_t varC ) {
    queue_add(varC->queue, curThread);
    unlock(m);
    park(); // el hilo se bloquea en la cola de espera
    lock(m);
}
```

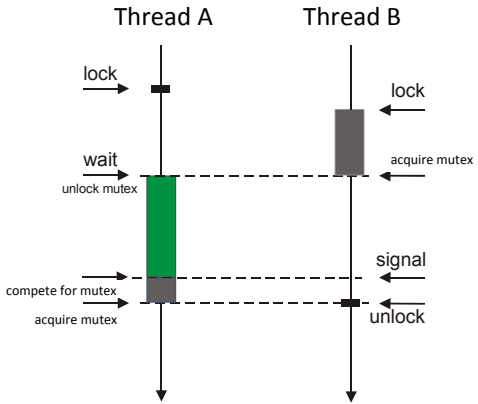
- El hilo invocador debe ser el propietario del mutex
- `cond_wait()` **siempre** bloquea al hilo invocador
  - Antes de bloquearse en la cola, el hilo libera el cerrojo para que otro hilo pueda adquirlo
- Cuando el hilo se despierta y sale la cola, debe readquirir el cerrojo (lock) de nuevo.
- Cuando la operación `cond_wait()` retorna, el hilo invocador es el propietario del mutex de nuevo

Operaciones sobre variables condición (II)

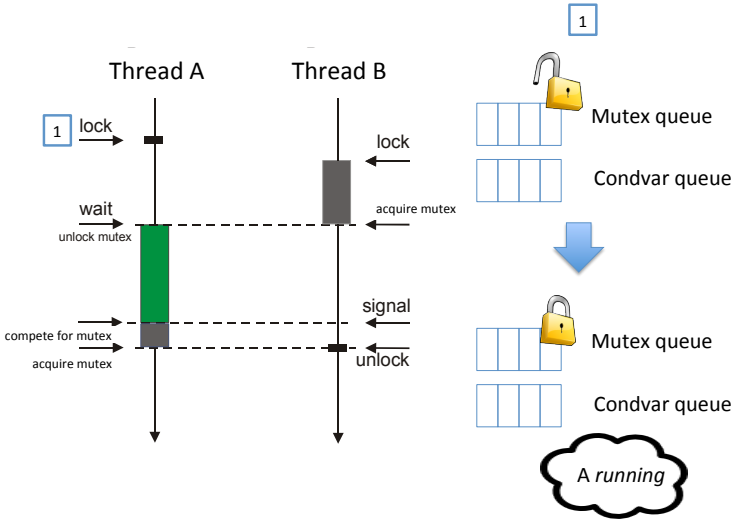
```
/* Despierta a un solo hilo bloqueado en la cola */
void cond_signal (vc_t varC ) {
   if (!isEmpty(varC->queue))
      unpark(queue_remove(varC->queue))
}

/* Despierta a todos los hilos bloqueados en la cola */
void cond_broadcast (vc_t varC ) {
   while (!isEmpty(varC->queue))
       unpark(queue_remove(varC-queue))
}
```

- Es aconsejable invocar estas operaciones en un fragmento de código encerrado entre `lock(mutex)` y `unlock(mutex)`

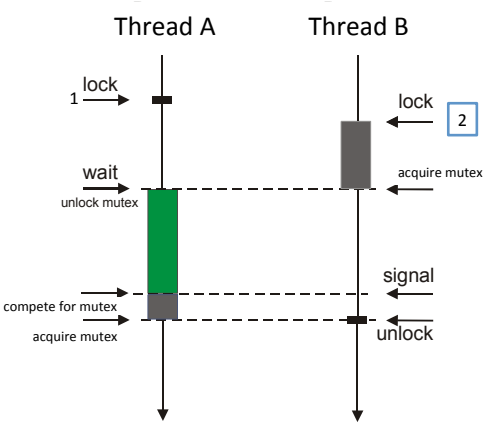
Operaciones sobre variables condición (III)

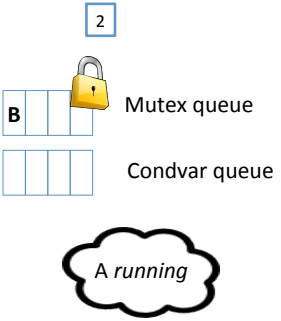


Uso de variables condición

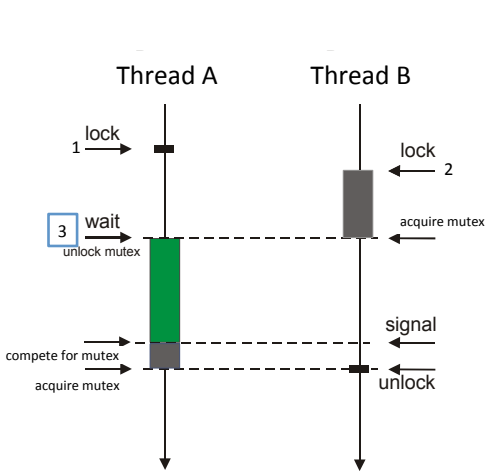


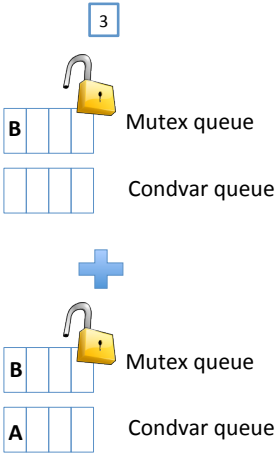
Uso de variables condición



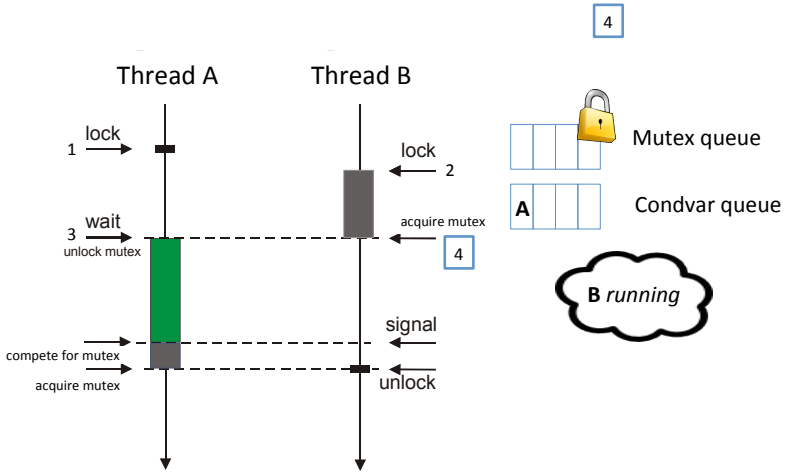


Uso de variables condición

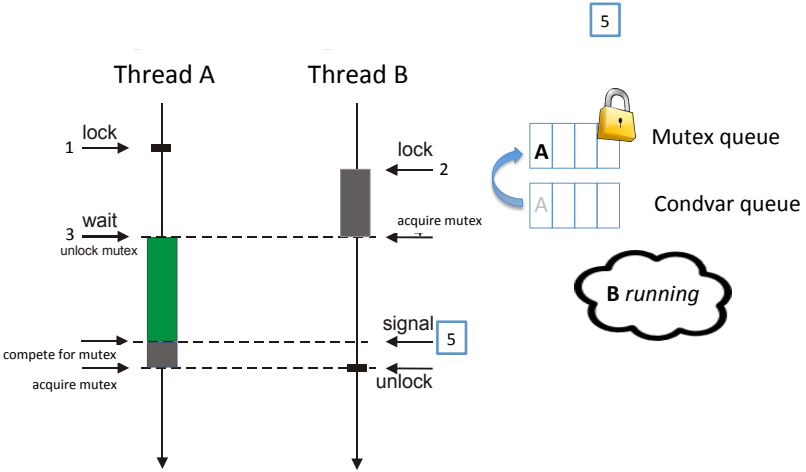




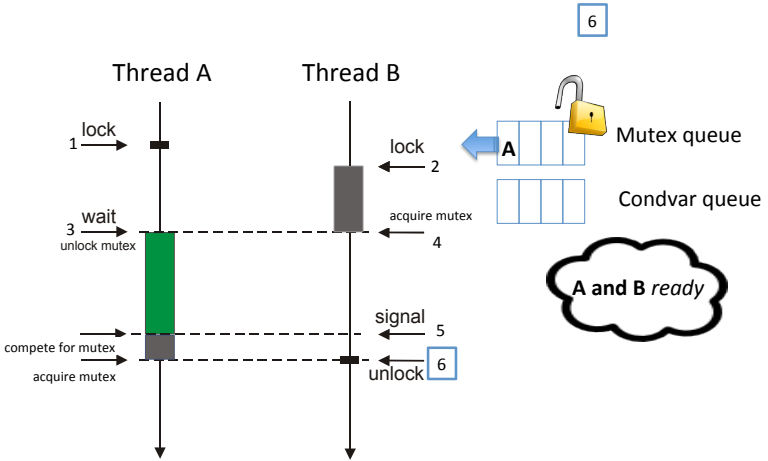
Uso de variables condición



Uso de variables condición



Uso de variables condición



Uso de cerrojos / var. condicionales

- Hilo A

```
lock(mutex); /* entrar a la SC */
<operaciones sobre los recursos compartidos (exclusion mutua)>
while (condición relacionada con el recurso == false)
   cond_wait(condition, mutex); /* bloqueo */
<acciones deseadas que cumplen la condición>
unlock(mutex); /* salir de la SC */
```

- Hilo B

```
lock(mutex); /* entrar a la SC */
<operaciones sobre los recursos compartidos (exclusion mutua)>
/* Como hemos podido afectar a la condición asociada al recurso, despertamos a otro hilo */
cond_signal(condition, mutex);
 <más operaciones protegidas>
unlock(mutex); /* salir de la SC */
```

Debemos usar `while` para re-evaluar la condición

Productor consumidor con var. condición (I)

- Por simplicidad, asumiremos que el buffer circular se da ya implementado como un tipo abstracto de datos (`cbuffer_t`)
  - Operaciones sobre `cbuffer_t`
    - `boolean is_empty(cbuffer_t cb);`
    - `boolean is_full(cbuffer_t cb);`
    - `void add(cbuffer_t cb, item_t data);`
    - `item_t remove(cbuffer_t cb);`
- Restricciones de uso de las operaciones
  1. Implementación no es *thread-safe*
     - No podemos invocar las operaciones simultáneamente desde múltiples threads
     - Se precisa de un cerrojo para serializar acceso al buffer
  2. `add()` no puede invocarse si buffer lleno
  3. `remove()` no puede invocarse si buffer vacío

Productor consumidor con var. condición (II)

Variables globales

```
cbuffer_t b; /* shared ring buffer (max capacity: N items) */
mutex m; /* Mutual exclusion when accessing buffer */
condvar prod,cons; /* To block producer/consumer, respectively */
```

```
void producer() {
  item_t data;

  while (true) {
    data=produce();
    lock(m);




    add(b,data);



    unlock(m);
    delay(...);
   }
}
```

```
void consumer() {
 item_t data;

 while (true) {
    lock(m);




    data=remove(b);



    unlock(m);
    do_something(data);
   }
}
```

Productor consumidor con var. condición (II)

Variables globales

```
cbuffer_t b; /* shared ring buffer (max capacity: N items) */
mutex m; /* Mutual exclusion when accessing buffer */
condvar prod,cons; /* To block producer/consumer, respectively */
```

```
void producer() {
  item_t data;

  while (true) {
    data=produce();
    lock(m);

    while (is_full(b))
       cond_wait(prod,m);

    add(b,data);



    unlock(m);
    delay(...);
   }
}
```

```
void consumer() {
 item_t data;

 while (true) {
    lock(m);

    while (is_empty(b))
        cond_wait(cons,m);

    data=remove(b);



    unlock(m);
    do_something(data);
   }
}
```

Productor consumidor con var. condición (II)

Variables globales

```
cbuffer_t b; /* shared ring buffer (max capacity: N items) */
mutex m; /* Mutual exclusion when accessing buffer */
condvar prod,cons; /* To block producer/consumer, respectively */
```

```
void producer() {
  item_t data;

  while (true) {
    data=produce();
    lock(m);

    while (is_full(b))
       cond_wait(prod,m);

    add(b,data);

    cond_signal(cons);

    unlock(m);
    delay(...);
   }
}
```

```
void consumer() {
 item_t data;

 while (true) {
    lock(m);

    while (is_empty(b))
        cond_wait(cons,m);

    data=remove(b);

    cond_signal(prod);

    unlock(m);
    do_something(data);
   }
}
```

Servicios POSIX (II)

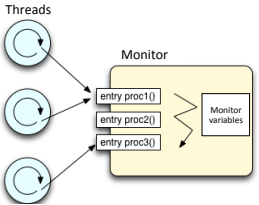
- `int pthread_cond_init(pthread_cond_t* cond, pthread_condattr_t* attr);`
  - Inicializa una variable condicional
- `int pthread_cond_destroy(pthread_cond_t *cond);`
  - Destruye un variable condicional
- `int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cond);`
  - Despierta a un hilo de aquellos que esperan en la cola de la variable condición
  - No tiene efecto si no hay ningún hilo esperando
- `int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cond);`
  - Despierta a todos los hilos que esperan en la cola de la variable condición
- `int pthread_cond_wait(pthread_cond_t* cond, pthread_mutex_t* mutex);`
  - Bloquea al hilo invocador hasta que se despierta más adelante cuando otro hilo invoca `pthread_cond_signal()` o `pthread_cond_broadcast()`

Monitores

- Monitores: uso sistemático de cerrojos y variables condición
  - Se usan cerrojos para conseguir la exclusión mutua
  - Y variables condición para restringir la ejecución en base a condiciones que dependen del estado de las variables compartidas entre hilos
- Ventajas monitores vs. semáforos o mútexes + var. condición:
  - Código más legible y fácil de depurar
  - Monitores se adaptan mejor a la programación orientada a objetos (p.ej., Java)
- Los monitores no son recursos de sincronización que ofrece el SO sino un mecanismo debemos construir a medida para nuestro programa concurrente

Monitores

- Un monitor es un objeto que consta de 3 elementos:
  1. Procedimientos de monitor (métodos)
  2. Variables o estructuras de datos compartidas entre procedimientos (atributos del monitor)
  3. Un mutex + N variables condición
     - En algunas implementaciones de monitores el mutex es implícito
- Los procedimientos del monitor (métodos) se pueden invocar simultáneamente por varios hilos
  - Los problemas de concurrencia se resuelven en la implementación de los procedimientos



Monitores: Implementación (I)

- Se dice que un hilo "entra al monitor" cuando invoca alguno de sus procedimientos y "sale" cuando finaliza la ejecución del procedimiento
- Restricciones de implementación:
  1. Sólo puede haber un hilo activo (no bloqueado) ejecutándose en el monitor (dentro del cuerpo de cualquiera de sus procedimientos)
     - El hilo que ejecuta código dentro del monitor accede a las variables del mismo (atributos) en exclusión mutua
  2. Puede haber varios hilos bloqueados dentro del monitor
     - Los hilos se bloquean en las colas de espera asociadas a las variables condición del monitor

Monitores: Implementación (II)

- En la implementación en "C" con POSIX Threads de los monitores, las restricciones anteriores se garantizan de la siguiente forma:
  - Procedimiento del monitor es una función en C con un único punto de salida
  - El cuerpo del procedimiento de monitor se encierra entre `lock()` y `unlock()` del mutex del monitor

```
procedimiento_de_monitor() {
    pthread_mutex_lock(&mutex); /* entrar al monitor */
    <Cuerpo del procedimiento>
    pthread_mutex_unlock(&mutex); /* salir del monitor */
}
```

- Todo hilo que va a bloquearse en una variable condición del monitor libera implícitamente el mutex al invocar `cond_wait()`

Uso de los monitores

- Los hilos ejecutan los procedimientos del monitor para dos cosas:
  1. Modificar/acceder a las variables del monitor de manera segura
  2. Entrar/salir de sección crítica

```
Procedimiento_de_entrada()
<Sección crítica>
Procedimiento_de_salida()
```

Productor-consumidor con monitor

```
#define MAX_BUFFER 1024 /* buffer size */
#define DATA_TO_PRODUCE 10000
pthread_mutex_t mutex;  /* monitor's mutex */
pthread_cond_t c_full;  /* to block the producer */
pthread_cond_t c_empty; /* to block the consumer */
int nr_items;           /* # of items in the buffer */
int buffer[MAX_BUFFER]; /* shared buffer */
int ridx,widx;       /* R/W positions in the buffer */

void init_monitor(void); /* Initialize monitor */
void destroy_monitor(void); /* Free up monitor resources */
/* Monitor procedures */
void produce(int item); /* Insert item into the buffer */
int consume(void);   /* Extract an item from the buffer */
```

Productor-consumidor con monitor

```
void Producer(void) {
 int i,item;
 for (i=0;i<DATA_TO_PRODUCE;i++){
    item=... generate an item ...
    produce(item);
  }
 pthread_exit(0);
}
```

```
void Consumer(void) {
 int i,item;
 for (i=0;i<DATA_TO_PRODUCE;i++){
  item=consume();
    ... Do something with item ...
  }
  pthread_exit(0);
}
```

```
int main(int argc, char *argv[]){
    pthread_t th1, th2;
    init_monitor();
    pthread_create(&th1, NULL, Producer, NULL);
    pthread_create(&th2, NULL, Consumer, NULL);
    pthread_join(th1, NULL); pthread_join(th2, NULL);
    destroy_monitor();
    return 0;
}
```

Productor-consumidor con monitor

```
void init_monitor(void)
{
   pthread_cond_init(&c_full, NULL);
   pthread_cond_init(&c_empty, NULL);
   pthread_mutex_init(&mutex, NULL);
   ridx=widx=nr_items=0;
}

void destroy_monitor(void)
{
    pthread_mutex_destroy(&mutex);
    pthread_cond_destroy(&c_full);
    pthread_cond_destroy(&c_empty);
}
```

Productor-consumidor con monitor

```
void produce(int item) {
 /* "enter the monitor" */
 pthread_mutex_lock(&mutex);

 /* block while buffer full */
while (nr_items == MAX_BUFFER)
 pthread_cond_wait(&c_full,&mutex);

 buffer[widx] = item;
 widx= (widx+ 1) % MAX_BUFFER;
 nr_items++;

 /* buffer is not empty */
 pthread_cond_signal(&c_empty);

 /* "exit the monitor" */
 pthread_mutex_unlock(&mutex);
}
```

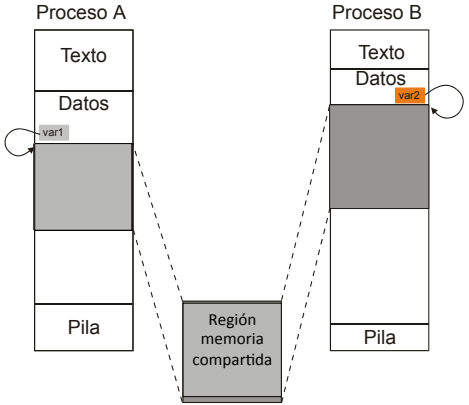
```
int consume(void) {
 int item;
 /* "enter the monitor" */
  pthread_mutex_lock(&mutex);

/* block while buffer empty */
 while (nr_items == 0)
  pthread_cond_wait(&c_empty,&mutex);

 item = buffer[ridx];
 ridx= (ridx + 1) % MAX_BUFFER;
 nr_items--;

 /* buffer is not full */
 pthread_cond_signal(&c_full);

 /* "exit the monitor" */
 pthread_mutex_unlock(&mutex);
 return item;
}
```

Mecanismos de comunicación

- Archivos
- Tuberías (pipes, FIFOS)
  - No las estudiaremos
- Memoria compartida
  1. Implícita: hilos
     - Hilos de un mismo proceso se comunican mediante variables o estructuras de datos globales
  2. Explícita: necesidad de una API específica
     - Hilos de distintos procesos no comparten memoria
     - Para establecer comunicación → Crear regiones de memoria compartida

Memoria compartida (entre procesos)

- Declaración independiente de variables dentro de los procesos que apuntan a la misma región de memoria "real"



Memoria compartida POSIX

- `void *mmap(void *addr, size_t length, int prot, int flags,int fd, off_t offset);`
  - Ubica (mapea) una porción del fichero especificado por el descriptor `fd` en memoria, devolviendo un puntero a esa región (`addr`)
  - La región de memoria puede ser compartida o privada:
    - `flags`: `MAP_SHARED` or `MAP_PRIVATE`
  - También se puede declarar sin respaldo en disco:
    - `flags`: `MAP_ANONYMOUS` (compartir padre-hijo)
    - Empleando `shm_open()` para obtener un descriptor
- `int munmap(void *addr, size_t length);`
  - Actualiza el fichero de respaldo de la región de memoria y borra las ubicaciones para el rango de direcciones especificado
- `int msync(void *addr, size_t len, int flags);`
  - Escribe cualquier dato (página) modificada en memoria en su correspondiente fichero de respaldo

Resumen

- Threads:
  - Memoria compartida (variables globales)
  - Mutexes, variables condicionales, semáforos o monitores
- Procesos emparentados (`fork()`):
  - Tuberías y memoria compartida (mapeada)
  - Semáforos sin nombre (mapeados en memoria)
- Procesos no emparentados en la misma máquina:
  - Tuberías con nombre
  - Semáforos con nombre

P&C con memoria compartida y semáforos

- Productor:
  - Crea los semáforos con nombre (`sem_open`)
  - Crea un archivo (`open`)
  - Le asigna espacio (`ftruncate`)
  - Proyecta el archivo en su espacio de direcciones (`mmap`)
  - Utiliza la zona de memoria compartida
  - Desproyecta la zona de memoria compartida (`munmap`)
  - Cierra y borra el archivo
- Consumidor:
  - Abre los semáforos (`sem_open`)
  - Debe esperar a que archivo esté creado para abrirlo (`open`)
  - Proyecta el archivo en su espacio de direcciones (`mmap`)
  - Utiliza la zona de memoria compartida
  - Cierra el archivo

Código del productor

```
#define MAX_BUFFER      1024   /* buffer size */
#define DATA_TO_PRODUCE 100000 /* # elements to produce */
sem_t *elements; /* # of elements in the buffer */
sem_t *gaps;   /* # of free gaps in the buffer */

void main(int argc, char *argv[]){
   int shd;
   int *buffer;  /* shared buffer */

   /* the producer creates the file */
   shd = open("BUFFER", O_CREAT|O_WRONLY, 0700);
   ftruncate(shd, MAX_BUFFER * sizeof(int));

   /* Maps the file into the process address space */
   buffer = (int*) mmap(NULL, MAX_BUFFER * sizeof(int),
               PROT_WRITE, MAP_SHARED, shd, 0);
```

Código del productor (II)

```
/* The producer creates the semaphores */
   elements = sem_open("ELEMENTS", O_CREAT, 0700, 0);
   gaps =   sem_open("GAPS", O_CREAT, 0700, MAX_BUFFER);

   /* core producer's code */
   Producer(buffer);

   /* Unmap shared buffer */
   munmap(buffer, MAX_BUFFER * sizeof(int));
   close(shd);      /* close the shared memory region */
     unlink("BUFFER"); /* delete the shared memory region */

   sem_close(elements);
   sem_close(gaps);
   sem_unlink("ELEMENTS");
   sem_unlink("GAPS");
}
```

Código del consumidor

```
#define MAX_BUFFER      1024   /* buffer size */
#define DATA_TO_PRODUCE 100000 /* # elements to produce */
sem_t *elements; /* # of elements in the buffer */
sem_t *gaps;   /* # of free gaps in the buffer */

void main(int argc, char *argv[]){
   int shd;
   int *buffer;  /* shared buffer */

   /* the consumer opens the file */
   shd = open("BUFFER", O_RDONLY);

  /* Maps the file into the process address space */
   buffer = (int *) mmap(NULL, MAX_BUFFER * sizeof(int),
                         PROT_READ, MAP_SHARED, shd, 0);
```

Código del consumidor (II)

```
    /* Consumer opens semaphores */
    elementos = sem_open("ELEMENTS", 0);
    huecos   = sem_open("GAPS", 0);

    /* consumer's core processing */
    Consumer(buffer);

    /* unmap shared buffer */
    munmap(buffer, MAX_BUFFER * sizeof(int));
    close(shd); /* close shared memory object */

    /* close semaphores */
    sem_close(elements);
    sem_close(gaps);
}
```

Función del productor

```
void Producer(int *buffer)
{
   int pos = 0; /* write index */
   int item;   /* data to produce */
   int i;

   for(i=0; i < DATA_TO_PRODUCE; i++ ) {
      item = produce_item();
      sem_wait(gaps);
      buffer[pos] = item;
      pos = (pos + 1) % MAX_BUFFER;
      sem_post(elements);
   }
}
```

Función del consumidor

```
void Consumer(char *buffer)
{
   int pos = 0; /* read index */
   int i, item;

   for(i=0; i < DATA_TO_PRODUCE; i++ ) {
      sem_wait(elements);
      dato = buffer[pos];
      pos = (pos + 1) % MAX_BUFFER;
      sem_post(gaps);
      printf("Received %d\n", item);
   }
}
```

Contenido

Implementación de lock()/unlock()

- El SO asegura que lock() y unlock() son operaciones **atómicas**
  - La implementación de estas operaciones requiere resolver un problema de sección crítica (variables compartidas)

```
lock(m) {
 if (m->estado==cerrado) {
  queue_add(m->q, esteHilo);
  suspenderHilo();
  queue_del(m->q,esteHilo);
 }

 m->estado = cerrado;
 m->owner = esteHilo;
}
```

```
unlock(m) {
 if (m->owner==esteHilo) {
  m->estado=abierto;
  m->owner=NULL;
  if (m->q.notEmpty())
   despiertaUnHiloDeCola();
 }
 else
  error!!
}
```

Soluciones al problema de la sección crítica

Tipos de soluciones

- Espera activa
  - Sin soporte HW
    - Basadas en variables de control (Peterson 1981)
  - Con soporte HW
    - Test And Set (TAS), XCHG, LL/SC
- Sin espera activa
  - Soporte del SO
  - El SO bloquea el proceso/hilo

Instrucciones máquina

- Se utiliza una instrucción máquina para actualizar una posición de memoria
- Puede aplicarse cualquier número de procesos:
  - Ciclo de memoria **RMW** (*read/modify/write*)
- No sufren injerencias por parte de otras instrucciones
- Puede aplicarse a múltiples secciones críticas
- Es simple y fácil de verificar

Ejemplos de instrucciones

Generales

- Test and set (T&S)
- Fetch and add (F&A)
- Swap/Exchange
- Compare and Swap (exchange)
- Load link/ Store conditional (LL/SC)

Intel (x86)

- Muchas instrucciones pueden ser atómicas
- F&A lock; xaddl eax, [mem_addr];
- XCHG xchg eax, [mem_addr]
- CMPXCHG -> lock cmpxchg [mem_addr], eax

ARM (y otros)

- LL/SC LDREX y STREX

Semántica de Swap/Exchange

Exchange

```
xchg src, dst
-------------
   rtmp  <- Mem [src]
   Mem [src] <- Mem [dst]
   Mem [dst] <- rtmp
```

- Es una instrucción máquina (NO una función)
  - Es atómica, ininterrumplible
- Intercambia dos valores (potencialmente, ambos en memoria)
  - En Intel, sólo uno de los dos (src o dst) pueden estar en memoria

Uso de Swap/Exchange

- Solución al problema de la **Sección Crítica con XCHG**

Implementación

```
/* it may be stored in a register */
tmp = 1;
/* Busy wait */
while( tmp== 1)
   xchg(MemAddr, tmp);

Critical_section();

*MemAddr= 0;
```

Semántica de LL/SC

Load Link

```
ll src
-------
   rout <- Mem [src]
```

Store Conditional

```
sc src, valor
--------------
    si nadie accedió a src desde el anterior LL
        Mem[src]= valor
        rout <- 1
    sino
    rout <- 0
```

- Son DOS instrucciones máquina
  - Una siempre hace el load; la otra sólo hace store si no hubo escrituras a esa posición de memoria posteriores al LL

Uso de LL/SC

- Solución al problema de la **Sección Crítica con LL/SC**

Implementación

```
while (1) {
    while(ll(MemAddr)== 1);
    if (sc(MemAddr,1)==1) break;
    /* otherwise, execute Load-Link again */
}
Critical_section();
*MemAddr= 0;
```