

# Resumen Programación Concurrente

## Clase 1

### Concurrencia

#### ¿Qué es?

- Concurrencia es la capacidad de ejecutar múltiples actividades en paralelo o simultáneamente
- Permite a distintos objetos actuar al mismo tiempo
- Factor relevante para el diseño de hardware, sistemas operativos, multiprocesadores, computación distribuida, programación y diseño

#### ¿Donde está?

- Navegador Web accediendo una página mientras atiende al usuario.
- Varios navegadores accediendo a la misma página
- Acceso a disco mientras otras aplicaciones siguen funcionando
- Impresión de un documento mientras se consulta
- Teléfono avisa recepción de llamada mientras se habla
- Cualquier objeto más o menos "inteligente" exhibe concurrencia
- Juegos, automóviles, etc.

---

Los sistemas biológicos suelen ser masivamente concurrentes: comprenden un gran número de células, evolucionando simultáneamente y realizando (independientemente) sus procesos.

En el mundo biológico los sistemas secuenciales rara vez se encuentran.

En algunos casos se tiende a pensar en sistemas secuenciales en lugar de concurrentes para simplificar el proceso de diseño. Pero esto va en contra de la necesidad de sistemas de cómputo cada vez más poderosos y flexibles.

### Concurrencia "natural"

- Obliga a establecer un orden en el despliegue de cada cartel.
- Código más complejo de desarrollar y mantener
- ¿Qué pasa si se tienen más de dos carteles?
- **Más natural:** cada cartel es un elemento independiente que actúa concurrentemente con otros  
--> **es decir, ejecutar dos o más algoritmos simples concurrentemente**

```
Programa Cartel (color, tiempo)
  Mientras (true)
    Demorar (tiempo segundos)
    Desplegar cartel (color)
```

```
Fin mientras
Fin programa
```

- No hay un orden preestablecido en la ejecución  $\Rightarrow$  no determinismo (ejecuciones con la misma "entrada" puede generar diferentes "salidas")

## ¿Por qué es necesaria la Programación Concurrente?

- No hay más ciclos de reloj  $\rightarrow$  Multicore  $\rightarrow$  ¿por qué? y ¿para qué?
- Aplicaciones con estructura más natural.
  - El mundo no es secuencial.
  - Más apropiado programar múltiples actividades independientes y concurrentes.
  - Reacción a entradas asincrónicas (ej: sensores en un STR).
- Mejora en la respuesta
  - No bloquear la aplicación completa por E/S.
  - Incremento en el rendimiento de la aplicación por mejor uso del hardware (ejecución paralela).
- Sistemas distribuidos
  - Una aplicación en varias máquinas.
  - Sistemas C/S o P2P.

## Objetivo de los sistemas concurrentes

### Important

Ajustar el modelo de arquitectura del hardware y software al problema del mundo real a resolver.

### Important

Incrementar la performance, mejorando los tiempos de respuesta de los sistemas de cómputo, a través de un enfoque diferente de la arquitectura física y lógica de las soluciones

### Algunas ventajas

- La velocidad de ejecución que se puede alcanzar.
- Mejor utilización de la CPU de cada procesador.
- Explotación de la concurrencia inherente a la mayoría de los problemas reales.

## Posible comportamiento de los procesos

### Programa Secuencial:

Un único flujo de control que ejecuta una instrucción y cuando esta finaliza ejecuta la siguiente. Por ahora llamaremos "Proceso" a un programa secuencial.

Un único hilo o flujo de control

→ programación secuencial, monoprocesador.

Múltiples hilos o flujos de control

→ programa concurrente.

→ programa paralelos.

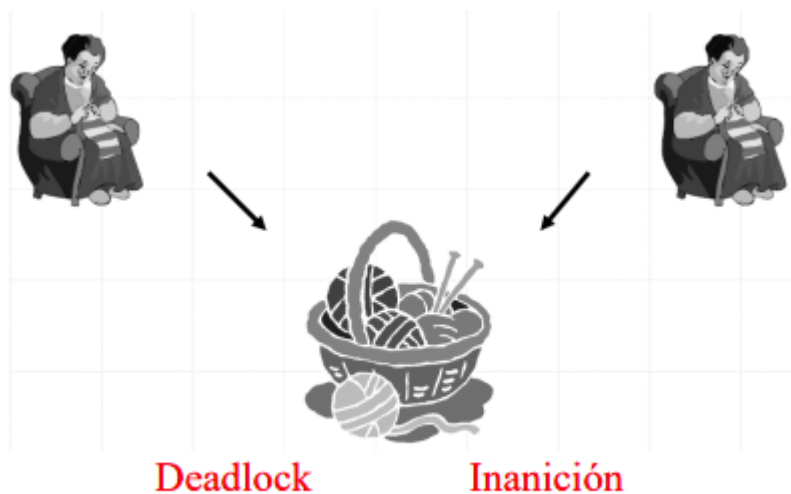
Los procesos cooperan y compiten...

## Procesos independientes

- Relativamente raros.
- Poco interesante.

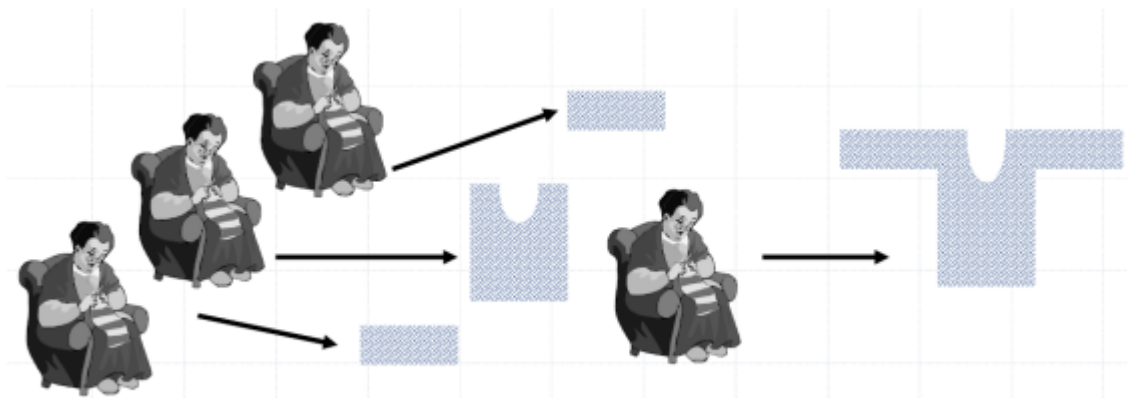
## Competencia

Típico en Sistemas Operativos y Redes, debido a recursos compartidos.



## Cooperación

- Los procesos se combinan para resolver una tarea común.
- Sincronización.



## Procesamiento secuencial, concurrente y paralelo

Analicemos la solución secuencial y monoprocesador (una máquina) para fabricar un objeto compuesto por N partes o módulos.

La solución secuencial **nos fuerza** a establecer un **estricto orden temporal**.

Al disponer de sólo una máquina, el ensamblado final del objeto se podrá realizar luego de N pasos de procesamiento (la fabricación de cada parte).

Si disponemos de N máquinas para fabricar el objeto, y no hay dependencia (por ejemplo de la materia prima), cada una puede trabajar al mismo tiempo en una parte. Solución Paralela.

Consecuencias ⇒

- Menor tiempo para completar el trabajo.
- Menor esfuerzo individual.
- Paralelismo del hardware.

Dificultades ⇒

- Distribución de la carga de trabajo (diferente tamaño o tiempo de fabricación de cada parte, diferentes especializaciones de cada máquina y/o velocidades).
- Necesidad de compartir recursos evitando conflictos.
- Necesidad de esperarse en puntos clave.
- Necesidad de comunicarse.
- Tratamiento de las fallas.
- Asignación de una de las máquinas para el ensamblado (¿Cual?)

Otro enfoque: un sólo máquina dedica una parte del tiempo a cada componente del objeto ⇒

Concurrencia sin paralelismo de hardware ⇒ Menor speedup.

Dificultades ⇒

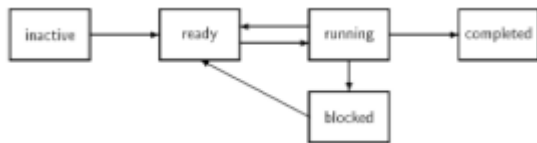
- Distribución de carga de trabajo.
- Necesidad de compartir recursos.
- Necesidad de esperarse en puntos clave.
- Necesidad de comunicarse.
- Necesidad de recuperar el “estado” de cada proceso al retomarlo.

CONCURRENCIA ⇒ Concepto de software no restringido a una arquitectura particular de hardware ni a un número determinado de procesadores.

Este último caso sería multiprogramación en un procesador

- El tiempo de CPU es compartido entre varios procesos, por ejemplo por time slicing.
- El sistema operativo controla y planifica procesos: si el slice expiró o el proceso se bloquea el sistema operativo hace context (process) switch.
  - Process switch: suspender el proceso actual y restaurar otro
    1. Salvar el estado actual en memoria. Agregar el proceso al final de la cola de ready o una cola de wait.
    2. Sacar un proceso de la cabeza de la cola ready. Restaurar su estado y ponerlo a correr.
  - Reanudar un proceso bloqueado: mover un proceso de la cola de wait a la de ready

- Estado de los procesos



## Programa concurrente

### Definición

Un programa concurrente especifica dos o más "programas secuenciales" que pueden ejecutarse concurrentemente en el tiempo como tareas o procesos

Un proceso o tarea es un elemento concurrente abstracto que puede ejecutarse simultáneamente con otros procesos o tareas, si el hardware lo permite (por ejemplo los TASKs de ADA).

Un programa concurrente puede tener N procesos habilitados para ejecutarse concurrentemente y un sistema concurrente puede disponer de M procesadores cada uno de los cuales puede ejecutar uno o más procesos.

Características importantes:

- interacción
- no determinismo  $\Rightarrow$  dificultad para la interpretación y debug

## Procesos e hilos

**Procesos:** Cada proceso tiene su propio espacio de direcciones y recursos

**Procesos livianos, threads o hilos:**

- Proceso "liviano" que tiene su propio contador de programa y su pila de ejecución, pero no controla el "contexto pesado" (por ejemplo, las tablas de página)
- Todos los hilos de un proceso comparten el mismo espacio de direcciones y recursos (los del proceso).
- El programador o el lenguaje deben proporcionar mecanismos para evitar interferencias.
- La concurrencia puede estar provista por el lenguaje (Java) o por el Sistema Operativo (C/POSIX).

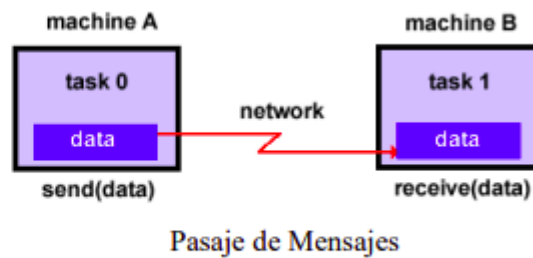
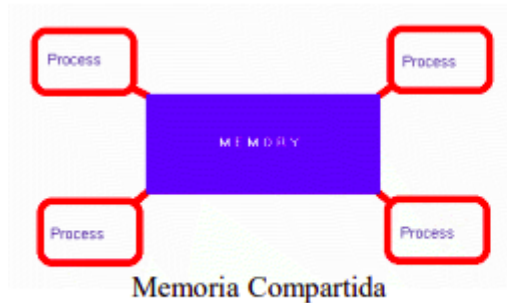
## Conceptos básicos de concurrencia

### Comunicación entre procesos

La comunicación entre procesos concurrentes indica el modo en que se organizan y transmiten datos entre tareas concurrentes. Esta organización requiere especificar protocolos para controlar el progreso y la corrección. Los procesos se COMUNICAN:

- Por Memoria Compartida.

- Por Pasaje de Mensajes.



## Memoria Compartida

- Los procesos intercambian información sobre la memoria compartida o actúan coordinadamente sobre datos residentes en ella.
- Lógicamente no pueden operar simultáneamente sobre la memoria compartida, lo que obliga a bloquear y liberar el acceso a la memoria.
- La solución más elemental es una variable de control tipo “semáforo” que habilite o no el acceso de un proceso a la memoria compartida.

## Pasaje de mensajes

- Es necesario establecer un canal (lógico o físico) para transmitir información entre procesos.
- También el lenguaje debe proveer un protocolo adecuado.
- Para que la comunicación sea efectiva los procesos deben “saber” cuándo tienen mensajes para leer y cuando deben transmitir mensajes.

## Sincronización entre procesos

### Definición

La sincronización es la posesión de información acerca de otro proceso para coordinar actividades. Los procesos se sincronizan:

- Por exclusión mutua.
- Por condición.

### Sincronización por exclusión mutua

- Asegurar que sólo un proceso tenga acceso a un recurso compartido en un instante de tiempo.
- Si el programa tiene secciones críticas que pueden compartir más de un proceso, la exclusión mutua evita que dos o más procesos puedan encontrarse en la misma sección crítica al mismo tiempo.

### Sincronización por condición

- Permite bloquear la ejecución de un proceso hasta que se cumpla una condición dada.

Ejemplo de los dos mecanismos de sincronización en un problema de utilización de un área de memoria compartida (buffer limitado con productores y consumidores).

## Interferencia

### Definición

Un proceso toma una acción que invalida las suposiciones hechas por otro proceso.

Ejemplo 1: nunca se debería dividir por 0.

```
int x, y, z;
process A1
{ ...
    y = 0;
    ...
}
process A2
{ ....
    if (y <> 0) z = x/y;
    ....
}
```

Ejemplo 2: siempre público debería terminar con valor igual a E1+E2

```
int Público = 0
process B1
{ int E1 = 0;
  for i= 1..100
    { esperar llegada
      E1 = E1 + 1;
      Público = Público + 1;
    }
}
process B2
{ int E2 = 0;
  for i= 1..100
    { esperar llegada
      E2 = E2 + 1;
      Público = Público + 1;
    }
}
```

## Prioridad y granularidad

### Important

Un proceso que tiene mayor prioridad puede causar la suspensión (preemption) de otro proceso concurrente

### Important

La granularidad de una aplicación está dada por la relación entre el cómputo y la comunicación.

Relación y adaptación a la arquitectura.

Grano fino y grano grueso.

## Manejo de los recursos

Uno de los temas principales de la programación concurrente es la administración de recursos compartidos:

- Esto incluye la asignación de recursos compartidos, métodos de acceso a los recursos, bloqueo y liberación de recursos, seguridad y consistencia.
- Una propiedad deseable en sistemas concurrentes es el equilibrio en el acceso a recursos compartidos por todos los procesos (fairness).
- Dos situaciones NO deseadas en los programas concurrentes son la inanición de un proceso (no logra acceder a los recursos compartidos) y el **overloading** de un proceso (la carga asignada excede su capacidad de procesamiento).
- Otro problema importante que se debe evitar es el **deadlock**.

## Problema de deadlock

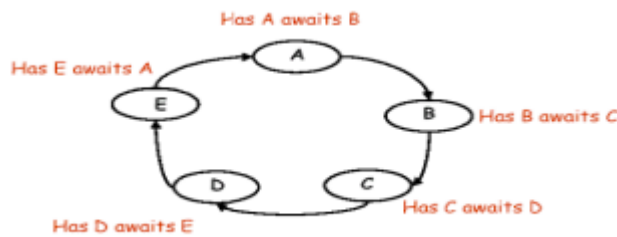
### Definición

Dos (o más) procesos pueden entrar en deadlock, si por error de programación ambos se quedan esperando que el otro libere un recurso compartido. La ausencia de deadlock es una propiedad necesaria en los procesos concurrentes.

### 4 propiedades necesarias y suficientes para que exista deadlock son:

- Recursos reusables serialmente: los procesos comparten recursos que pueden usar con exclusión mutua.
- Adquisición incremental: los procesos mantienen los recursos que poseen mientras esperar adquirir recursos adicionales.
- No-preemption: una vez que son adquiridos por un proceso, los recursos no pueden quitarse de manera forzada sino que sólo son liberados voluntariamente.
- Espera cíclica: existe una cadena circular (ciclo) de procesos tal que cada uno tiene un recurso que su sucesor en el ciclo está esperando adquirir.





## Requerimientos para un lenguaje concurrente

Independientemente del mecanismo de comunicación / sincronización entre procesos, los **lenguajes de programación concurrente** deberán proveer primitivas adecuadas para la especificación e implementación de las mismas.

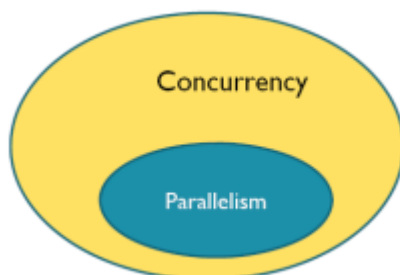
Requerimientos de un lenguaje de programación concurrente:

- Indicar las tareas o procesos que pueden ejecutarse concurrentemente.
- Mecanismos de sincronización.
- Mecanismos de comunicación entre los procesos.

## Concurrencia y paralelismo

CONCURRENCIA ⇒ Concepto de software no restringido a una arquitectura particular de hardware ni a un número determinado de procesadores. Especificar la concurrencia implica especificar los procesos concurrentes, su comunicación y su sincronización.

PARALELISMO ⇒ Se asocia con la ejecución concurrente en múltiples procesadores con el objetivo principal de reducir el tiempo de ejecución.



## Problemas asociados con la Programación concurrente

- Los procesos no son independientes y comparten recursos. La necesidad de utilizar mecanismos de exclusión mutua y sincronización agrega complejidad a los programas.
- Los procesos iniciados dentro de un programa concurrente pueden NO estar "vivos". Esta pérdida de la propiedad de liveness puede indicar deadlocks o una mala distribución de recursos.
- Hay un no determinismo implícito en el interleaving de procesos concurrentes. Esto significa que dos ejecuciones del mismo programa no necesariamente son idénticas ⇒ dificultad para la interpretación y debug.
- Posible reducción de performance por overhead de context switch, comunicación, sincronización, ...
- Mayor tiempo de desarrollo y puesta a punto. Difícil paralelizar algoritmos secuenciales.

- Necesidad de adaptar el software concurrente al hardware paralelo para mejora real en el rendimiento.

### Definición según el libro

Una **propiedad de vivacidad (liveness)** es aquella en la que **el programa eventualmente entra en un estado bueno**, es decir, un estado en el que las variables tienen valores deseables o se cumple una condición esperada.

## Concurrencia a nivel de hardware

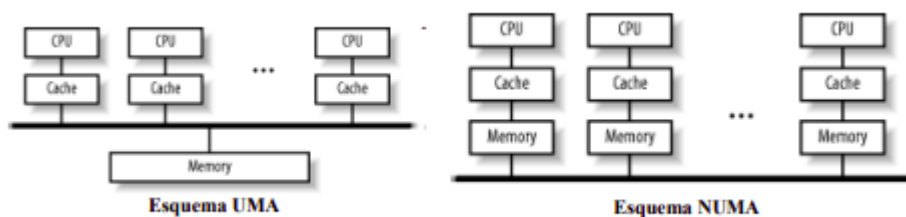
Límite físico en la velocidad de los procesadores

- Máquinas monoprocesador ya no pueden mejorar
- Más procesadores por chip para mayor potencia de cómputo
- Multicores -> Cluster multicores -> Consumo
- Uso eficiente -> Programación concurrente y paralela
- Niveles de memoria.
- Jerarquía de memoria. ¿Consistencia?
- Diferencias de tamaño y tiempo de acceso.
- Localidad temporal y espacial de los datos.

## Máquinas de memoria compartida vs memoria distribuida.

### Multiprocesadores de memoria compartida

- Interacción modificando datos en la memoria compartida
- Esquemas UMA con bus o crossbar switch (SMP, multiprocesadores simétricos). Problemas de sincronización y consistencia
- Esquemas NUMA para mayor número de procesadores distribuidos
- Problema de consistencia



### Multiprocesadores con memoria distribuida

- Procesadores conectados por una red.
- Memoria local (no hay problemas de consistencia).
- Interacción es sólo por pasaje de mensajes.
- Grado de acoplamiento de los procesadores:
  - Multicomputadores (máquinas fuertemente acopladas). Procesadores y red físicamente cerca. Pocas aplicaciones a la vez, cada una usando un conjunto de procesadores. Alto

ancho de banda y velocidad.

- Memoria compartida distribuida.
- Clusters.
- Redes (multiprocesador débilmente acoplado).

## Clases de Instrucciones

### Programación secuencial y concurrente

Un programa concurrente esta formado por un conjunto de programas secuenciales.

- La programación secuencial estructurada puede expresarse con 3 clases de instrucciones básicas: **asignación**, **alternativa** == (decisión) e **iteración** (repetición con condición).
- Se requiere una clase de instrucción para representar la concurrencia.

### Declaraciones de variables

- Variable simple:

```
tipo variable = valor. Ej: int x= 8; int z,y;
```

- Arreglos:

```
int a|10|; int e|3:10|
int b|10| = (|10|2)
int aa|5,5|;int ee|3:10,2:9|
int bb|5,5, = (|5|(|5|2))
```

### Asignación

- Asignación simple:  $x = e$
- Sentencia de asignación compuesta:  $x = x + 1; y = y - 1; z = x + y; a|3| = 6;$   
 $aa|2,5| = a|4|$
- Llamado a funciones:  $x = f(y) + g(6) - 7$
- swap:  $v1 \rightleftharpoons v2$
- skip: termina inmediatamente y no tiene efecto sobre ninguna variable de programa

### Alternativa

- Sentencias de alternativa simple:  
if  $B \rightarrow S$   
 $B$  expresión booleana.  $S$  instrucción simple o compuesta ( $\{\}$ ).  
 $B$  “guarda” a  $S$  pues  $S$  no se ejecuta si  $B$  no es verdadera.
- Sentencias de alternativa múltiple:  
if  $B1 \rightarrow S1$   
 $\square B2 \rightarrow S2$   
.....  
 $\square Bn \rightarrow Sn$   
fi  
Las guardas se evalúan en algún orden arbitrario.

Elección no determinística.

Si ninguna guarda es verdadera el if no tiene efecto.

- Otra opción:  
if (cond) S;  
if (cond) S1 else S2;

Ejemplo:

```
if p > 2 → p = p * 2
  □ p < 2 → p = p * 3
  □ p == 2 → p = 5
fi
```

## Iteración

- Sentencias de alternativa ITERATIVA múltiple

```
do B1 → S1
  □ B2 → S2
  . . . . .
  □ Bn → Sn
od
```

Las sentencias guardadas son evaluadas y ejecutadas hasta que todas las guardas sean falsas

La elección es no determinística si más de una guarda es verdadera

- For-all: forma general de repetición e iteración

fa cuantificadores → Secuencia de Instrucciones af

Cuantificador  $\equiv$  variable := exp\_inicial to exp\_final st B

El cuerpo del fa se ejecuta 1 vez por cada combinación de valores de las variables de iteración. Si hay cláusula such-that (st), la variable de iteración toma sólo los valores para los que B es true.

Ejemplo: fa i := 1 to n, j := i+1 to n st a[i] > a[j] → a[i] := a[j] af

- Otra opción:

while (cond) S; for [i = 1 to n, j = 1 to n st (j mod 2 = 0)] S;

Ejemplos:

```
do p > 0 → p = p - 2
  □ p < 0 → p = p + 3
  □ p == 0 → p = random(x)
od
```

Inicialización de un vector

```
fa i := 1 to n → a[i] = 0 af
```

Ordenación de un vector de menor a mayor

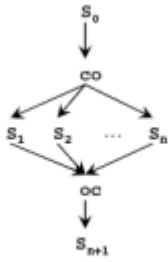
```
fa i := 1 to n, j := i+1 to n st a[i] > a[j] → a[i] := a[j] af
```

## Concurrencia

- **Sentencia co:**

`co S1 // ..... // Sn oc` → ejecuta las Si tareas concurrentemente

La ejecución del co termina cuando todas las tareas terminaron



Cuantificadores

`co [i=1 to n] { a[i]=0; b[i]=0 } oc` → Crea n tareas concurrentes.

- **Process:** otra forma de representar concurrencia

`process A {sentencias}` → proceso único independiente.

Cuantificadores.

`process B [i=1 to n] {sentencias}` → n procesos independientes.

- **Diferencia:** process ejecuta en background, mientras el código que contiene un co espera a que el proceso creado por la sentencia co termine antes de ejecutar la sentencia

## Acciones atómicas y sincronización

### Atomicidad de grano fino

- **Estado** de un programa concurrente.
- Cada proceso ejecuta un conjunto de sentencias, cada una implementada por una o más acciones atómicas.
- Una **acción atómica** hace una transformación de estado indivisibles (estados intermedios invisibles para otros procesos).
- Ejecución de un programa concurrente → intercalado (interleaving) de las acciones atómicas ejecutadas por procesos individuales.
- **Historia** de un programa concurrente (trace): ejecución de un programa concurrente con un interleaving particular. En general el número de posibles historias de un programa concurrente es enorme; pero no todas son válidas.
- **Interacción** → determina cuales historias son correctas.
- Algunas historias son válidas y otras no.
- Se debe asegurar un orden temporal entre las acciones que ejecutan los procesos → las tareas se intercalan ⇒ deben fijarse restricciones.

La sincronización por condición permite restringir las historias de un programa concurrente para asegurar el orden temporal necesario.

Una acción atómica de grano fino (fine grained) se debe implementar por hardware.

no podemos confiar en la intuición para analizar un programa concurrente...

- En la mayoría de los sistemas el tiempo absoluto no es importante.
- Con frecuencia los sistemas son actualizados con componentes más rápidas. La corrección no debe depender del tiempo absoluto.
- El tiempo se ignora, sólo las secuencias son importantes
- Puede haber distintos ordenes (interleavings) en que se ejecutan las instrucciones de los diferentes procesos; los programas deben ser correctos para todos ellos.

En lo que sigue, supondremos máquinas con las siguientes características:

- Los valores de los tipos básicos se almacenan en elementos de memoria leídos y escritos como acciones atómicas.
- Los valores se cargan en registros, se opera sobre ellos, y luego se almacenan los resultados en memoria.
- Cada proceso tiene su propio conjunto de registros (context switching).
- Todo resultado intermedio de evaluar una expresión compleja se almacena en registros o en memoria privada del proceso.

- 
- Si una expresión  $e$  en un proceso no referencia una variable alterada por otro proceso, la evaluación será atómica, aunque requiera ejecutar varias acciones atómicas de grano fino.
  - Si una asignación  $x = e$  en un proceso no referencia ninguna variable alterada por otro proceso, la ejecución de la asignación será atómica.

Normalmente los programas concurrentes no son disjuntos  $\Rightarrow$  es necesario establecer algún requerimiento más débil ...

**Referencia crítica** en una expresión  $\Rightarrow$  referencia a una variable que es modificada por otro proceso. Asumamos que toda referencia crítica es a una variable simple leída y escrita atómicamente.

## Propiedad de "A lo sumo una vez"

Una sentencia de asignación  $x = e$  satisface la propiedad de "A lo sumo una vez" si:

1.  $e$  contiene a lo sumo una referencia crítica y  $x$  no es referenciada por otro proceso, o
2.  $e$  no contiene referencias críticas, en cuyo caso  $x$  puede ser leída por otro proceso.

Una expresión  $e$  que no está en una sentencia de asignación satisface la propiedad de "A lo sumo una vez" si no contiene más de una referencia crítica.

### Important

Puede haber a lo sumo una variable compartida, y puede ser referenciada a lo sumo una vez

Si una sentencia de asignación cumple la propiedad ASV, entonces su ejecución parece atómica, pues la variable compartida será leída o escrita sólo una vez.

Ejemplos:

- `int x=0, y=0 ;` No hay ref. críticas en ningún proceso.  
`co x=x+1 // y=y+1 oc ;` En todas las historias `x = 1` e `y = 1`
- `int x = 0, y = 0 ;` El 1er proceso tiene 1 ref. crítica. El 2do ninguna.  
`co x=y+1 // y=y+1 oc ;` Siempre `y = 1` y `x = 1` o `2`

## Especificación de la sincronización

- Si una expresión o asignación no satisface ASV con frecuencia es necesario ejecutarla atómicamente.
- En general, es necesario ejecutar secuencias de sentencias como una única acción atómica (**sincronización por exclusión mutua**) .

Mecanismo de sincronización para construir una acción atómica de grano grueso (coarse grained) como secuencia de acciones atómicas de grano fino (fine grained) que aparecen como indivisibles.

$\langle e \rangle$  indica que la expresión  $e$  debe ser evaluada atómicamente.

$\langle \text{await}(B)S; \rangle$  se utiliza para especificar sincronización

La expresión booleana  $B$  especifica una condición de demora.

$S$  es una secuencia de sentencias que se garantiza que termina

Se garantiza que  $B$  es true cuando comienza la ejecución de  $S$

Ningun estado interno de  $S$  es visible para los otros procesos

Sentencia con alto poder expresivo, pero el costo de implementación de la forma general de `await` (exclusión mutua y sincronización por condición) es alto.

- Await general:  $\langle \text{await}(s > B) s = s - 1; \rangle$
- Await para exclusión mutua  $\langle x = x + 1; y = y + 1 \rangle$
- Ejemplo await para sincronización por condición:  $\langle \text{await} (\text{count} > 0) \rangle$   
Si  $B$  satisface ASV, puede implementarse como busy waiting o spin loop  
`do (not B) → skip od (while (not B); )`

Acciones atómicas incondicionales y condicionales

Ejemplo: productor/consumidor con buffer de tamaño  $N$

```
cant: int = 0;
Buffer: cola;
process Productor
{ while (true)
    Generar Elemento
    <await (cant < N); push(buffer, elemento); cant++ >
}
process Consumidor
{ while (true) 0)
    <await (cant > 0); pop(buffer, elemento); cant-- >
    Consumir Elemento
}
```

# Propiedades y Fairness

## Propiedad de seguridad y vida

Una propiedad de un programa concurrente es un atributo verdadero en cualquiera de las historias de ejecución del mismo. Toda propiedad puede ser formulada en términos de dos clases: seguridad y vida. 73

- Seguridad (safety)
  - Nada malo le ocurre a un proceso: asegura estados consistentes.
  - Una falla de seguridad indica que algo anda mal.
  - Ejemplos de propiedades de seguridad: exclusión mutua, ausencia de interferencia entre procesos, partial correctness.
- Vida (liveness)
  - Eventualmente ocurre algo bueno con una actividad: progresa, no hay deadlocks.
  - Una falla de vida indica que las cosas dejan de ejecutar.
  - Ejemplos de vida: terminación, asegurar que un pedido de servicio será atendido, que un mensaje llega a destino, que un proceso eventualmente alcanzará su SC, etc ⇒ dependen de las políticas de scheduling.

## Fairness y políticas de scheduling

### Definición

Fairness: trata de garantizar que los procesos tengan chance de avanzar, sin importar lo que hagan los demás

Una acción atómica en un proceso es elegible si es la próxima acción atómica en el proceso que será ejecutada. Si hay varios procesos ⇒ hay varias acciones atómicas elegibles. Una política de scheduling determina cuál será la próxima en ejecutarse.

Ejemplo: Si la política es asignar un procesador a un proceso hasta que termina o se demora.  
¿Qué podría suceder en este caso?

```
bool continue = true;  
co while (continue); // continue = false; oc
```

### Definición

Fairness Incondicional: Una política de scheduling es incondicionalmente fair si toda acción atómica incondicional que es elegible eventualmente es ejecutada. En el ejemplo anterior, RR es incondicionalmente fair en monoprocesador, y la ejecución paralela lo es en un multiprocesador.

### Definición



Fairness Débil: Una política de scheduling es débilmente fair si :

1. Es incondicionalmente fair y
2. Toda acción atómica condicional que se vuelve elegible eventualmente es ejecutada, asumiendo que su condición se vuelve true y permanece true hasta que es vista por el proceso que ejecuta la acción atómica condicional.

No es suficiente para asegurar que cualquier sentencia await elegible eventualmente se ejecuta: la guarda podría cambiar el valor (de false a true y nuevamente a false) mientras un proceso está demorado.

### Definición

Fairness Fuerte: Una política de scheduling es fuertemente fair si:

1. Es incondicionalmente fair y
2. Toda acción atómica condicional que se vuelve elegible eventualmente es ejecutada pues su guarda se convierte en true con infinita frecuencia.

Ejemplo: ¿Este programa termina?

```
bool continue = true, try = false;
co while (continue) { try = true; try = false; }
// <await (try) continue = false>
oc
```

No es simple tener una política que sea práctica y fuertemente fair. En el ejemplo anterior, con 1 procesador, una política que alterna las acciones de los procesos sería fuertemente fair, pero es impráctica. Round-robin es práctica pero no es fuertemente fair.

## Clase 2

### Sincronización por variables compartidas

#### Herramientas para la concurrencia

- Memoria Compartida
  - Variables compartidas
  - Semáforos
  - Monitores
- Memoria distribuida (pasaje de mensajes)
  - Mensajes asincrónicos
  - Mensajes sincrónicos
  - Remote Procedure Call (RPC)
  - Rendezvous

#### Locks y barreras

### Definición

Problema de la Sección Crítica: implementación de acciones atómicas en software (locks).

### Definición

Barrera: punto de sincronización que todos los procesos deben alcanzar para que cualquier proceso pueda continuar.

En la técnica de **busy waiting** un proceso chequea repetidamente una condición hasta que sea verdadera:

- Ventaja de implementarse con instrucciones de cualquier procesador.
- Ineficiente en multiprogramación (cuando varios procesos comparten el procesador y la ejecución es intercalada).
- Aceptable si cada proceso ejecuta en su procesador

## El problema de la Sección crítica

```
process SC[i=1 to n]
{ while (true)
  { protocolo de entrada; ⇔ <
    sección crítica; ⇔ SC
    protocolo de salida; ⇔ >
    sección no crítica;
  }
}
```

Las soluciones a este problema pueden usarse para implementar sentencias **await** arbitrarias.  
¿Qué propiedades deben satisfacer los protocolos de entrada y salida?.

### Propiedades a cumplir

#### Important

Exclusión mutua: A lo sumo un proceso está en su SC.

Ausencia de Deadlock (Livelock): si 2 o más procesos tratan de entrar a sus SC, al menos uno tendrá éxito.

Ausencia de Demora Innecesaria: si un proceso trata de entrar a su SC y los otros están en sus SNC o terminaron, el primero no está impedido de entrar a su SC.

Eventual Entrada: un proceso que intenta entrar a su SC tiene posibilidades de hacerlo (eventualmente lo hará).

- Solución trivial  $\langle SC \rangle$  . Pero, ¿cómo se implementan los  $\langle \rangle$  ?

## Implementación de sentencias await

- Cualquier solución al problema de la SC se puede usar para implementar una acción atómica incondicional  $\langle S \rangle ; \Rightarrow \text{SCEnter} ; S ; \text{SCExit}$
- Para una acción atómica condicional  $\langle \text{await } (B) S; \rangle \Rightarrow \text{SCEnter} ; \text{while } (\text{not } B) \{ \text{SCExit}; \text{SCEnter}; \} S ; \text{SCExit};$
- Si S es skip, y B cumple ASV,  $\langle \text{await } (B); \rangle$  puede implementarse por medio de  $\Rightarrow \text{while } (\text{not } B) \text{ skip};$

Correcto, pero ineficiente: un proceso está spinning continuamente saliendo y entrando a SC hasta que otro altere una variable referenciada en B.

- Para reducir contención de memoria  $\Rightarrow \text{SCEnter} ; \text{while } (\text{not } B) \{ \text{SCExit}; \text{Delay}; \text{SCEnter}; \} S ; \text{SCExit};$

## Solución hardware: deshabilitar interrupciones

```
process SC[i=1 to n] {
  while (true) {
    deshabilitar interrupciones; # protocolo de entrada
    sección crítica;
    habilitar interrupciones; # protocolo de salida
    sección no crítica;
  }
}
```

- Solución correcta para una máquina monoprocesador.
- Durante la SC no se usa la multiprogramación  $\rightarrow$  penalización de performance
- La solución no es correcta en un multiprocesador.

## Solución de "grano grueso"

``bool in1=false, in2=false # MUTEX:  $\neg(\text{in1} \wedge \text{in2})$

<pre>process SC1 { while (true)   { in1 = true; # protocolo de entrada     sección crítica;     in1 = false; # protocolo de salida     sección no crítica;   } }</pre>	<pre>process SC2 { while (true)   { in2 = true; # protocolo de entrada     sección crítica;     in2 = false; # protocolo de salida     sección no crítica;   } }</pre>
--	--

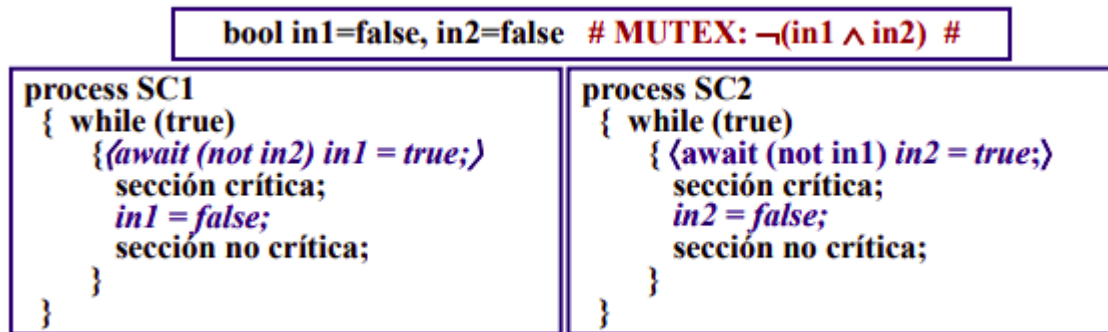
- No asegura el invariante MUTEX  $\Rightarrow$  solución de "grano grueso"

<pre>process SC1 { while (true)   { {await (not in2) in1 = true;}     sección crítica;     in1 = false;     sección no crítica;   } }</pre>	<pre>process SC2 { while (true)   { {await (not in1) in2 = true;}     sección crítica;     in2 = false;     sección no crítica;   } }</pre>
---	---

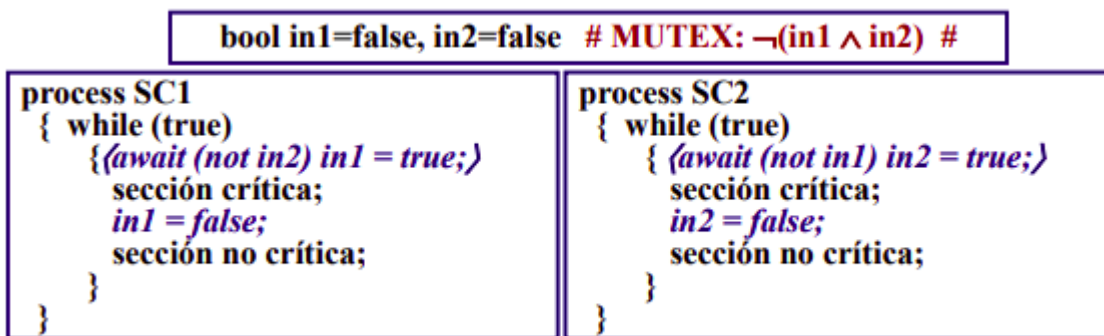
- ¿Satisface las 4 propiedades?

### Solución de “grano grueso” - ¿Cumple las condiciones?

**Exclusión mutua:** por construcción, SC1 y SC2 se excluyen en el acceso a la SC.



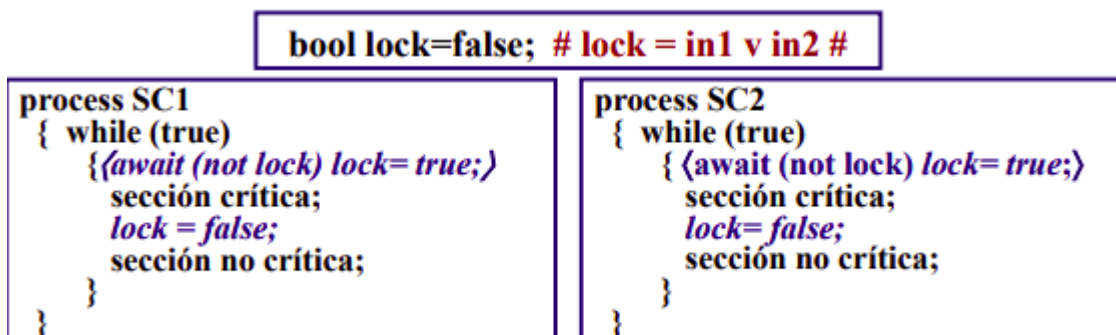
**Ausencia de deadlock:** si hay deadlock, SC1 y SC2 están bloqueados en su protocolo de entrada  $\Rightarrow$  in1 e in2 serían true a la vez. Esto NO puede darse ya que ambas son falsas en ese punto (lo son inicialmente, y al salir de SC, cada proceso vuelve a serlo). Ausencia de **demora innecesaria:** si SC1 está fuera de su SC o terminó, in1 es false; si SC2 está tratando de entrar a SC y no puede, in1 es true;  $(\neg in1 \wedge in1 = false) \Rightarrow$  no hay demora innecesaria.



Eventual Entrada:

- Si SC1 está tratando de entrar a su SC y no puede, SC2 está en SC (in2 es true). Un proceso que está en SC eventualmente sale  $\rightarrow$  in2 será false y la guarda de SC1 true.
- Análogamente para SC2.
- Si los procesos corren en procesadores iguales y el tiempo de acceso a SC es finito, las guardas son true con infinita frecuencia.

Se garantiza la eventual entrada con una política de scheduling fuertemente fair



- Generalizar la solución a n procesos

```

process SC [i=1..n]
{ while (true)
  {<await (not lock) lock= true;>
   sección crítica;
   lock = false;
   sección no crítica;
  }
}

```

## Solución de “grano fino”: Spin Locks

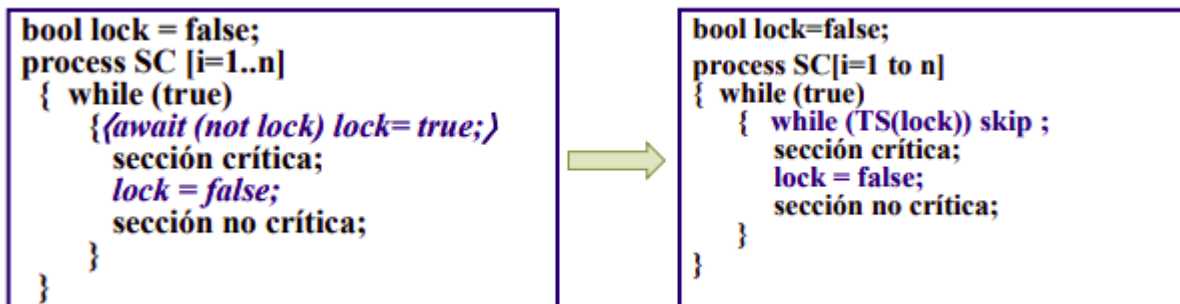
- Objetivo: hacer “atómico” el await de grano grueso.
- Idea: usar instrucciones como **Test & Set** (TS), **Fetch & Add** (FA) o **Compare & Swap**, disponibles en la mayoría de los procesadores.

¿Como funciona **Test & Set**?

```

bool TS(bool ok);
{<bool inicial = ok;
  ok = true;
  return inicial;>
}

```

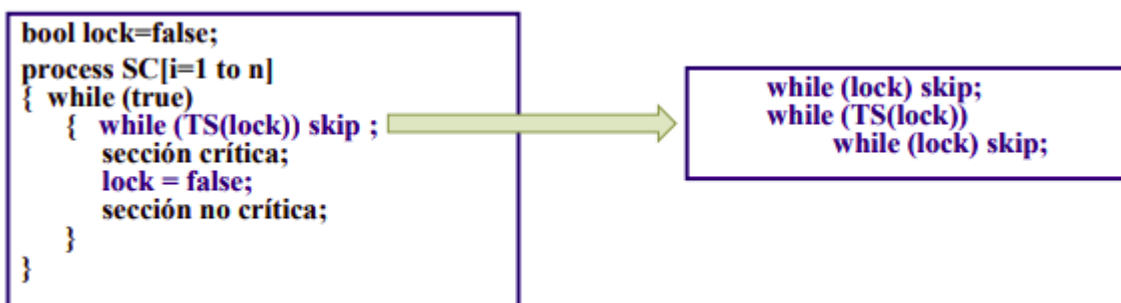


Solución tipo “spin locks”: los procesos se quedan iterando (spinning) mientras esperan que se limpie lock.

**Cumple las 4 propiedades si el scheduling es fuertemente fair.**

Una política débilmente fair es aceptable (rara vez todos los procesos están simultáneamente tratando de entrar a su SC).

TS escribe siempre en lock aunque el valor no cambie ⇒ Mejor Test-and-Test-and-Set



**Memory contention** se reduce, pero no desaparece. En particular, cuando lock pasa a false posiblemente todos intenten hacer TS.

## Solución Fair: algoritmo Tie-Breaker

Spin locks  $\Rightarrow$  no controla el orden de los procesos demorados  $\Rightarrow$  es posible que alguno no entre nunca si el scheduling no es fuertemente fair (race conditions)

**Algoritmo Tie-Breaker** (2 procesos): protocolo de SC que requiere scheduling sólo débilmente fair y no usa instrucciones especiales  $\Rightarrow$  más complejo.

Usa una variable por cada proceso para indicar que el proceso comenzó a ejecutar su protocolo de entrada a la sección crítica, y una variable adicional para romper empates, indicando qué proceso fue el último en comenzar dicha entrada  $\Rightarrow$  esta última variable es compartida y de acceso protegido.

Demora (quita prioridad) al último en comenzar su protocolo de entrada (entry protocol).

### Solución de “Grano Grueso” al Algoritmo Tie-Breaker

```
bool in1 = false, in2 = false;
int ultimo = 1;
process SC1 {
    while (true) {
        ultimo = 1; in1 = true;
        <await (not in2 or ultimo==2);>
        sección crítica;
        in1 = false;
        sección no crítica;
    }
}
process SC2 {
    while (true) {
        ultimo = 2; in2 = true;
        <await (not in1 or ultimo==1);>
        sección crítica;
        in2 = false;
        sección no crítica;
    }
}
```

### Solución de “Grano Fino” al Algoritmo Tie-Breaker

```
bool in1 = false, in2 = false;
int ultimo = 1;
process SC1 {
    while (true) {
        in1 = true; ultimo = 1;
        while (in2 and ultimo == 1) skip;
        sección crítica;
        in1 = false;
        sección no crítica;
    }
}
process SC2 {
    while (true) {
        in2 = true; ultimo = 2;
```

```

        while (in1 and ultimo == 2) skip;
        sección crítica;
        in2 = false;
        sección no crítica;
    }
}

```

Generalización a n procesos:

- Si hay n procesos, el protocolo de entrada en cada uno es un loop que itera a través de n-1 etapas.
- En cada etapa se usan instancias de tie-breaker para dos procesos para determinar cuáles avanzan a la siguiente etapa.
- Si a lo sumo a un proceso a la vez se le permite ir por las n-1 etapas  $\Rightarrow$  a lo sumo uno a la vez puede estar en la SC.

```

int in[1:n] = ([n] 0), ultimo[1:n] = ([n] 0);
process SC[i = 1 to n] {
    while (true) {
        for [j = 1 to n] {    # protocolo de entrada
            # el proceso i está en la etapa j y es el último
            in[i] = j; ultimo[j] = i;
            for [k = 1 to n st i <math>\neq k</math>] {
                # espera si el proceso k está en una etapa más alta
                # y el proceso i fue el último en entrar a la etapa j
                while (in[k] >= in[i] and ultimo[j] == i) skip;
            }
        }
        sección crítica;
        in[i] = 0;
        sección no crítica;
    }
}

```

## Solución Fair: algoritmo Ticket

Tie-Breaker n-procesos  $\Rightarrow$  complejo y costoso de tiempo

### Definición

Algoritmo Ticket: se reparten números y se espera a que sea el turno. Los procesos toman un número mayor que el de cualquier otro que espera ser atendido; luego esperan hasta que todos los procesos con número más chico han sido atendidos.

```

int numero = 1, proximo = 1, turno[1:n] = ( [n] 0 );

{ TICKET: proximo > 0 ^ (∀i: 1 ≤ i ≤ n: (SC[i] está en su SC) ⇒ (turno[i] == proximo) ^
  (turno[i] > 0) ⇒ (∀j: 1 ≤ j ≤ n, j ≠ i: turno[i] ≠ turno[j] ) ) }

process SC [i: 1..n]
{ while (true)
  { < turno[i] = numero; numero = numero + 1; >
    < await turno[i] == proximo; >
    sección crítica;
    < proximo = proximo + 1; >
    sección no crítica;
  }
}

```

**Potencial problema:** los valores de próximo y turno no son ilimitados. En la práctica, podrían resetearse a un valor chico (por ejemplo, 1).

### Cumplimiento de las propiedades:

- El predicado **TICKET** es un invariante global, pues **número** es leído e incrementado en una acción atómica y **próximo** es incrementado en una acción atómica ⇒ hay a lo sumo un proceso en la SC.
- La ausencia de deadlock y de demora innecesaria resultan de que los valores turno son únicos.
- Con scheduling débilmente fair se asegura eventual entrada.

El **await** puede implementarse con busy waiting (la expresión booleana referencia una sola variable compartida).

El incremento de **proximo** puede ser un load/store normal (a lo sumo un proceso puede estar ejecutando su protocolo de salida).

```

int numero = 1, proximo = 1, turno[1:n] = ( [n] 0 );
process SC [i: 1..n]
{ while (true)
  { <turno[i] = numero; numero = numero + 1>
    while (turno[i] <> proximo) skip;
    sección crítica;
    proximo = proximo + 1;
    sección no crítica;
  }
}

```

**¿Cómo se implementa la primera acción atómica donde se asigna el número?** • Sea Fetch-and-Add una instrucción con el siguiente efecto:

FA(var,incr): < temp = var; var = var + incr; return(temp) >

```

int numero = 1, proximo = 1, turno[1:n] = ( [n] 0 );
process SC [i: 1..n]
{ while (true)
  { turno[i] = FA (numero, 1);

```



```

    while (turno[i] <> proximo) skip;
    sección crítica;
    proximo = proximo + 1;
    sección no crítica;
  }
}

```

## Solución Fair: algoritmo Bakery

Ticket  $\Rightarrow$  si no existe FA se debe simular con una SC y la solución puede no ser fair.

### Definicion

Algoritmo Bakery: Cada proceso que trata de ingresar recorre los números de los demás y se auto asigna uno mayor. Luego espera a que su número sea el menor de los que esperan. Los procesos se chequean entre ellos y no contra un global

- El algoritmo Bakery es más complejo, pero es fair y no requiere instrucciones especiales.
- No requiere un contador global proximo que se “entrega” a cada proceso al llegar a la SC.

```

int turno[1:n] = ([n] 0);

{BAKERY: ( $\forall i: 1 \leq i \leq n: (SC[i] \text{ está en su SC}) \Rightarrow (turno[i] > 0) \wedge (\forall j: 1 \leq j \leq n, j \neq i: turno[j] = 0 \vee turno[i] < turno[j])$  ) ) }

process SC[i = 1 to n]
{ while (true)
  {  $\{ turno[i] = \max(turno[1:n] + 1; )$ 
    for [j = 1 to n st j  $\diamond$  i]  $\{ \text{await } (turno[j] == 0 \text{ or } turno[i] < turno[j]); \}$ 
    sección crítica
    turno[i] = 0;
    sección no crítica
  }
}

```

Esta solución de grano grueso no es implementable directamente:

- La asignación a turno[i] exige calcular el máximo de n valores.
- El await referencia una variable compartida dos veces

```

int turno[1:n] = ([n] 0);

{BAKERY: ( $\forall i: 1 \leq i \leq n: (SC[i] \text{ está en su SC}) \Rightarrow (turno[i] > 0) \wedge (\forall j: 1 \leq j \leq n, j \neq i: turno[j] = 0 \vee turno[i] < turno[j])$  ) ) }

process SC[i = 1 to n]
{ while (true)
  { turno[i] = 1; //indica que comenzó el protocolo de entrada
    turno[i] = max(turno[1:n]) + 1;
    for [j = 1 to n st j  $\neq$  i] //espera su turno
      while (turno[j]  $\neq$  0) and ( (turno[i],i) > (turno[j],j) )  $\rightarrow$  skip;
    sección crítica
    turno[i] = 0;
    sección no crítica
  }
}

```

# Sincronización Barrier

## Definición

Una barrera es un punto de demora a la que deben llegar todos los procesos antes de permitirles pasar y continuar su ejecución. Dependiendo de la aplicación las barreras pueden necesitar reutilizarse más de una vez (por ejemplo en algoritmos iterativos).

## Contador compartido

n procesos necesitan encontrarse en una barrera:

- Cada proceso incrementa una variable Cantidad al llegar.
- Cuando Cantidad es n los procesos pueden pasar

```
int cantidad = 0; process Worker[i=1 to n]
{ while (true)
  { código para implementar la tarea i;
    <cantidad = cantidad + 1;>
    <await (cantidad == n);>
  }
}
```

## Flags y coordinadores

- Si no existe FA → Puede distribuirse Cantidad usando n variables (arreglo arribo[1..n]).
- El await pasaría a ser: <await (arribo[1] + ... + arribo[n] == n);>
- Reintroduce contención de memoria y es ineficiente.

Puede usarse un conjunto de valores adicionales y un proceso más ⇒ Cada Worker espera por un único valor.

```
int arribo[1:n] = ([n] 0), continuar[1:n] = ([n] 0);
process Worker[i=1 to n]
{ while (true)
  { código para implementar la tarea i;
    arribo[i] = 1;
    while (continuar[i] == 0) skip;
    continuar[i] = 0;
  }
}
process Coordinador
{ while (true)
  { for [i = 1 to n]
    { while (arribo[i] == 0) skip;
      arribo[i] = 0;
    }
    for [i = 1 to n] continuar[i] = 1;
  }
}
```

```

    }
}

```

## Árboles

Problemas:

- Requiere un proceso (y procesador) extra.
- El tiempo de ejecución del coordinador es proporcional a  $n$ .

Posible solución:

- Combinar las acciones de Workers y Coordinador, haciendo que cada Worker sea también Coordinador.
- Por ejemplo, Workers en forma de árbol: las señales de arribo van hacia arriba en el árbol, y las de continuar hacia abajo  $\Rightarrow$  combining tree barrier (más eficiente para  $n$  grande).

## Barrera Simétrica

- En combining tree barrier los procesos juegan diferentes roles.
- Una Barrera Simétrica para  $n$  procesos se construye a partir de pares de barreras simples para dos procesos:

<pre> W[i]:: { await (arribo[i] == 0); }         arribo[i] = 1;         { await (arribo[j] == 1); }         arribo[j] = 0; </pre>	<pre> W[j]:: { await (arribo[j] == 0); }         arribo[j] = 1;         { await (arribo[i] == 1); }         arribo[i] = 0; </pre>
---	---

- ¿Cómo se combinan para construir una barrera  $n$  proceso? Worker[1: $n$ ] arreglo de procesos. Si  $n$  es potencia de 2  $\Rightarrow$  Butterfly Barrier.
- $\log_2 n$  etapas: cada worker sincroniza con uno distinto en cada etapa.
- En la etapa  $s$ , un worker sincroniza con otro a distancia  $2^{s-1}$ .
- Cuando cada worker pasó  $\log_2 n$  etapas, todos pueden seguir.

## Butterfly barrier

```

int E = log(N);
int arribo[1:N] = ([N] 0);

```

```

process P[i=1..N]
{
  int j;
  while (true)
  {
    //Sección de código anterior a la barrera.
    //Inicio de la barrera
    for (etapa = 1; etapa <= E; etapa++)
    {
      j = (i-1) XOR (1<<(etapa-1)); //calcula el proceso con cual sincronizar
      while (arribo[i] == 1)  $\rightarrow$  skip;
      arribo[i] = 1;
      while (arribo[j] == 0)  $\rightarrow$  skip;
      arribo[j] = 0;
    }
    //Fin de la barrera
    //Sección de código posterior a la barrera.
  }
}

```

## Defectos de la sincronización por busy waiting

- Protocolos “busy-waiting”: complejos y sin clara separación entre variables de sincronización y las usadas para computar resultados.
- Es difícil diseñar para probar corrección. Incluso la verificación es compleja cuando se incrementa el número de procesos.
- Es una técnica ineficiente si se la utiliza en multiprogramación. Un procesador ejecutando un proceso spinning puede ser usado de manera más productiva por otro proceso.

Necesidad de herramientas para diseñar protocolos de sincronización.