

Programación Concurrente 2015

Clase 3



Facultad de Informática
UNLP



Ejemplo de paralelismo interactivo

Ejemplo de paralelismo iterativo: multiplicación de matrices

Solución secuencial:

```
double a[n,n], b[n,n], c[n,n];
for [i = 1 to n]
  { for [j = 1 to n]
    { c[i,j] = 0;
      for [k = 1 to n]
        c[i,j] = c[i,j] + (a[i,k]*b[k,j]);
    }
  }
```

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

.....

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

- El loop interno calcula el producto interno de la fila i de la matriz a por la columna j de la matriz b y obtiene $c[i,j]$.
- El cómputo de cada producto interno es independiente. Aplicación *embarrassingly parallel* (muchas operaciones en paralelas).
- Diferentes acciones paralelas posibles.

Ejemplo de paralelismo iterativo: multiplicación de matrices

Solución paralela por fila:

```
double a[n,n], b[n,n], c[n,n];
co [i = 1 to n]
    { for [j = 1 to n]
        { c[i,j] = 0;
            for [k = 1 to n]
                c[i,j] = c[i,j] + (a[i,k]*b[k,j]);
        }
    }
}
```

En paralelo

Proc 1

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

Proc 2

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

⋮

Proc n

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

Solución paralela por columna:

```
double a[n,n], b[n,n], c[n,n];
co [j = 1 to n]
    { for [i = 1 to n]
        { c[i,j] = 0;
            for [k = 1 to n]
                c[i,j] = c[i,j] + (a[i,k]*b[k,j]);
        }
    }
}
```

En paralelo

Proc 1

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \vdots \\ b_{n1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ \vdots \\ c_{n1} \end{bmatrix}$$

Proc 2

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ \vdots \\ b_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{12} \\ c_{22} \\ \vdots \\ c_{n2} \end{bmatrix}$$

⋮

Proc n

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{1n} \\ b_{2n} \\ \vdots \\ b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1n} \\ c_{2n} \\ \vdots \\ c_{nn} \end{bmatrix}$$

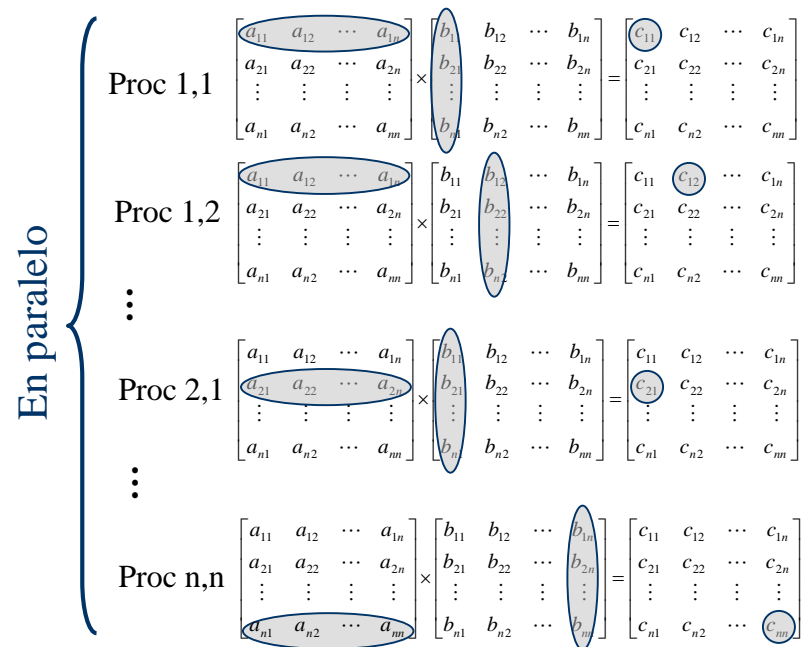
Ejemplo de paralelismo iterativo: multiplicación de matrices

Solución paralela por celda (opción 1):

```
double a[n,n], b[n,n], c[n,n];
co [i = 1 to n , j= 1 to n]
    { c[i,j] = 0;
      for [k = 1 to n]
        c[i,j] = c[i,j] + (a[i,k]*b[k,j]);
    }
```

Solución paralela por celda (opción 2):

```
double a[n,n], b[n,n], c[n,n];
co [i = 1 to n]
    { co [j = 1 to n]
      { c[i,j] = 0;
        for [k = 1 to n]
          c[i,j] = c[i,j] + (a[i,k]*b[k,j]);
        }
    }
```



Ejemplo de paralelismo iterativo: multiplicación de matrices. Uso de Process.

Solución paralela por fila con process:

```
process fila [i = 1 to n]
{ for [j = 1 to n]
  { c[i,j] = 0;
    for [k = 1 to n]
      c[i,j] = c[i,j] + (a[i,k]*b[k,j]);
    }
  }
```

¿Qué sucede si hay menos de n procesadores?

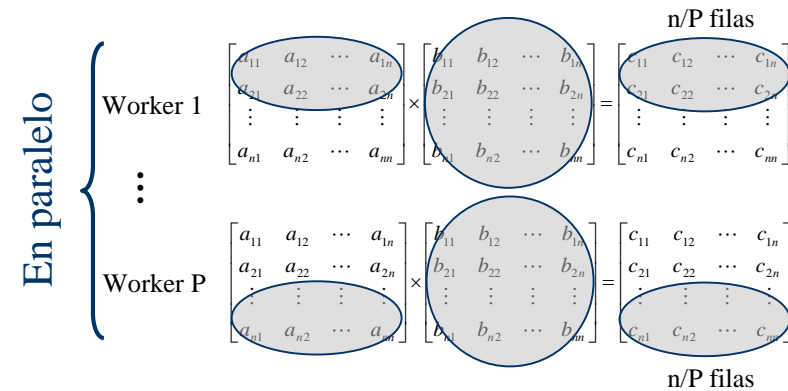
- Se puede dividir la matriz resultado en *strips* (subconjuntos de filas o columnas) y usar un proceso por strip.
- El tamaño del strip óptimo es un problema interesante para balancear costo de procesamiento con costo de comunicaciones.

Ejemplo de paralelismo iterativo: multiplicación de matrices. Uso de Process.

Solución paralela por strips: (P procesadores con $P < n$)

```

process worker [ w = 1 to P]
{ int primera = (w-1)*(n/P) + 1;
  int ultima = primera + (n/P) - 1;
  for [i = primera to ultima]
    { for [j = 1 to n]
      { c[i,j] = 0;
        for [k = 1 to n]
          c[i,j] = c[i,j] + (a[i,k]*b[k,j]);
        }
      }
    }
}
    
```



- Ejercicio:** a) Si $P=8$ y $n=120$. ¿Cuántas asignaciones, sumas y productos hace cada procesador?.
- b) Si $P_1=\dots=P_7$ y los tiempos de asignación son 1, de suma 2 y de producto 3; y si P_8 es 2 veces más lento. ¿Cuánto tarda el proceso total?. ¿Cuál es el speedup?. ¿Qué puede hacerse para mejorar el speedup?.



Acciones atómicas y sincronización

Acciones atómicas y Sincronización

Atomicidad de grano fino

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.

Acciones atómicas y Sincronización

Atomicidad de grano fino

- 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.

Acciones atómicas y Sincronización

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 expresiones 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.

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

Acciones atómicas y Sincronización

Propiedad de “*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;`
`co x=x+1 // y=y+1 oc;`
No hay ref. críticas en ningún proceso.
En todas las historias $x = 1$ e $y = 1$
- `int x = 0, y = 0;`
`co x=y+1 // y=y+1 oc;`
El 1er proceso tiene 1 ref. crítica. El 2do ninguna.
Siempre $y = 1$ y $x = 1$ o 2
- `int x = 0, y = 0;`
`co x=y+1 // y=x+1 oc;`
Ninguna asignación satisface ASV.
Posibles resultados: $x = 1$ e $y = 2$ / $x = 2$ e $y = 1$
Nunca puede ocurrir $x = 1$ e $y = 1$

Acciones atómicas y Sincronización

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 → *Acción atómica de Grano Grueso*

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.

⟨e⟩ indica que la expresión *e* debe ser evaluada atómicamente.

⟨await (B) S;⟩ 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.

Ningún estado interno de S es visible para los otros procesos.

Acciones atómicas y Sincronización

Especificación de la sincronización

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:* $\langle \text{await } (s > 0) \text{ } s = s - 1; \rangle$

- *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*
 $\text{do (not B)} \rightarrow \text{skip od} \quad (\text{while (not B);})$

Acciones atómicas incondicionales y condicionales

Acciones atómicas y Sincronización

Especificación de la sincronización

Ejemplo: productor/consumidor con buffer de tamaño N.

cant: int = 0;

Buffer: cola;

process Productor

{ while (true)

<await (cant < N); push(buffer, elemento); cant++ >

}

process Consumidor

{ while (true)

<await (cant > 0); pop(buffer, elemento); cant-- >

}



Propiedades

Propiedades 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.

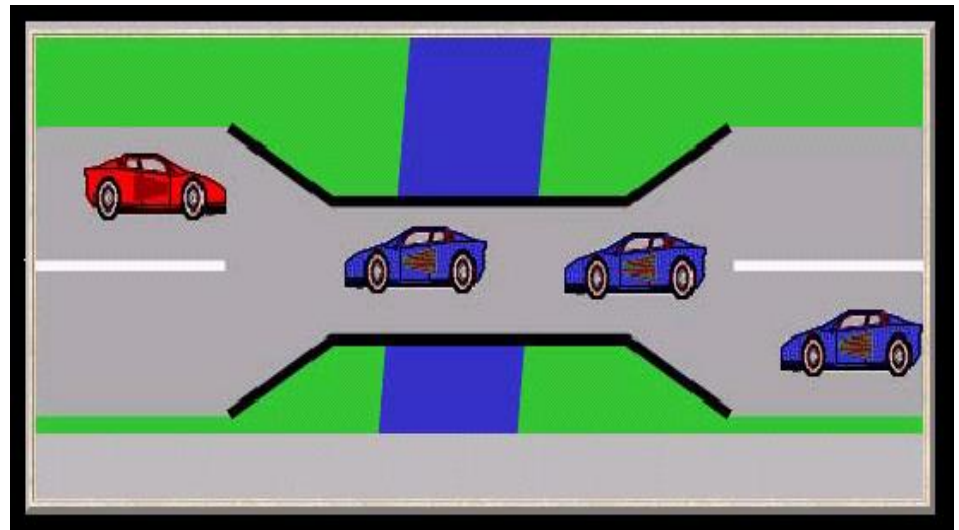
- ***seguridad*** (safety)
 - Nada malo le ocurre a un proceso: asegura estados consistentes.
 - Una *falla de seguridad* indica que algo anda mal.
 - Ejemplos de seguridad: ausencia de ***deadlock*** y ausencia de interferencia (exclusión mutua) entre procesos, ***partial correctness***.
- ***vida*** (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 \Rightarrow ***dependen de las políticas de scheduling***.

¿Que pasa con la ***total correctness***?

Propiedades de seguridad y vida

Ejemplo: Puente sobre río con ancho sólo para una fila de tráfico \Rightarrow los autos pueden moverse concurrentemente si van *en la misma dirección*

- Violación de *seguridad* si dos autos en distintas direcciones entran al puente al mismo tiempo.
- *Vida*: cada auto tendrá eventualmente oportunidad de cruzar el puente?.



Los temas de seguridad deben balancearse con los de vida.

Propiedades de seguridad y vida

Seguridad → Fallas típicas (*race conditions*):

- Conflictos de read/write: un proceso lee un campo y otro lo escribe (el valor visto por el lector depende de quién ganó la “carrera”).
- Conflictos de write/write: dos procesos escriben el mismo campo (quién gana la “carrera”).

Vida → Fallas:

- *Temporarias*: bloqueo temporarios, espera, contención de CPU, falla recuperable.
- *Permanente*: deadlock, señales perdidas, anidamiento de bloqueos, livelock, inanición, agotamiento de recursos, falla distribuida.

Prueba de propiedades

¿Dado un programa y una propiedad deseada, cómo probar que el programa la satisface?

- **Testing o debugging**: “tome el programa y vea qué sucede”. Verificación para algunos casos. No demuestra la ausencia de historias “malas”.
- **Razonamiento operacional**: análisis exhaustivo de casos. Un programa con n procesos y m acciones en cada proceso tiene $(n*m)!/(m!)^n$ historias posibles...

Ejemplo: para $n=3$ y $m=2 \Rightarrow 90$ historias.

$n=2$ y $m=4 \Rightarrow 70$ historias.

- **Razonamiento asercional**: análisis abstracto. Se usan fórmulas de lógica de predicados (*aserciones*) para caracterizar conjuntos de estados. Acciones \Rightarrow transformadores de predicados. Representación compacta de estados y transformaciones.



Fairness

Fairness y políticas de scheduling

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 \Rightarrow 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
```

Fairness y políticas de scheduling

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.

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.

Fairness y políticas de scheduling

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.

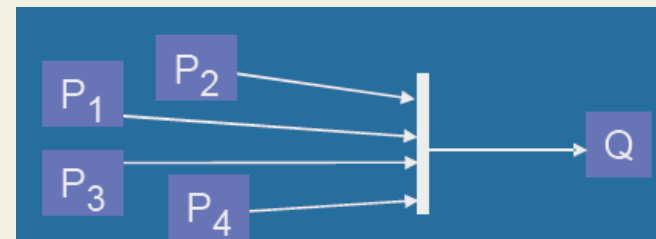


Problemas clásicos

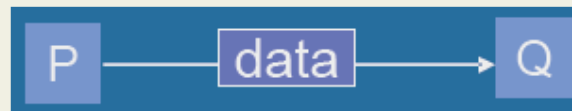
Tipos de Problemas Básicos de Concurrency

Exclusión Mutua: problema de la sección crítica (administración de recursos).

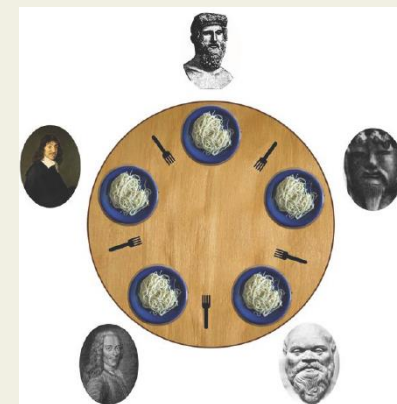
Barreras: punto de sincronización.



Comunicación:

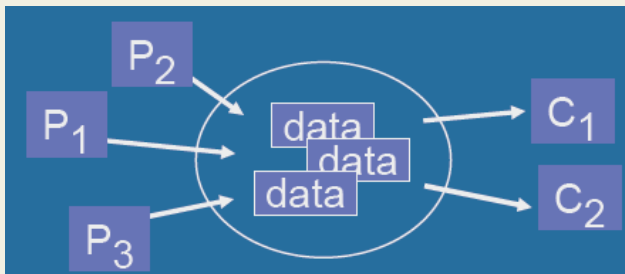


Filósofos: Dijkstra, 1971.
Sincronización multiproceso.
Evitar deadlock e inanición.
Exclusión mutua selectiva.

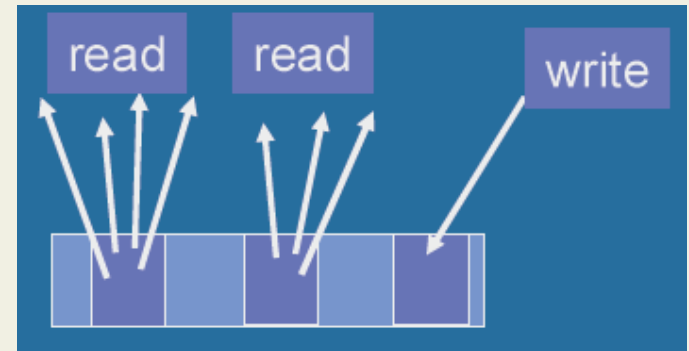


Tipos de Problemas Básicos de Concurrency

Productor - Consumidor



Lectores-Escritores



Sleeping barber: Dijkstra.
Sincronización - rendezvous.



Herramientas para la concurrencia

➤ Memoria Compartida

- Variables compartidas
- Semáforos
- *Regiones Críticas Condicionales*
- Monitores

➤ Memoria distribuida (pasaje de mensajes)

- Mensajes asincrónicos
- Mensajes sincrónicos
- Remote Procedure Call (RPC)
- Rendezvous

Sincronización por Variables Compartidas

Locks - Barreras



Locks y barreras

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

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;
    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?.

El problema de la Sección Crítica

Propiedades a cumplir

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).

- Las 3 primeras son propiedades de seguridad, y la 4° de vida.
- Solución trivial $\langle SC \rangle$. Pero, ¿cómo se implementan los $\langle \rangle$?

El problema de la Sección Crítica.

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 → penalización de performance
- La solución no es correcta en un multiprocesador.

El problema de la Sección Crítica.

Solución de “grano grueso”

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

```
process SC1
{ while (true)
  { in1 = true; # protocolo de entrada
    sección crítica;
    in1 = false; # protocolo de salida
    sección no crítica;
  }
}
```

```
process SC2
{ while (true)
  { in2 = true; # protocolo de entrada
    sección crítica;
    in2 = false; # protocolo de salida
    sección no crítica;
  }
}
```

- No asegura el invariante MUTEX \Rightarrow solución de “grano grueso”

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

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

- ¿Satisface las 4 propiedades?

El problema de la Sección Crítica.

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

Exclusión mutua: por construcción, P1 y P2 se excluyen en el acceso a la SC.

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

```
process SC1
{ while (true)
  { await (not in2) in1 = true;
    sección crítica;
    in1 = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

```
process SC2
{ while (true)
  { await (not in1) in2 = true;
    sección crítica;
    in2 = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

Ausencia de deadlock: si hay deadlock, P1 y P2 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 P1 está fuera de su SC o terminó, **in1** es *false*; si P2 está tratando de entrar a SC y no puede, **in1** es *true*; $(\neg \text{in1} \wedge \text{in1} = \text{false}) \Rightarrow$ **no hay demora innecesaria**.

El problema de la Sección Crítica.

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

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

```
process SC1
{ while (true)
  { ⟨await (not in2) in1 = true;⟩
    sección crítica;
    in1 = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

```
process SC2
{ while (true)
  { ⟨await (not in1) in2 = true;⟩
    sección crítica;
    in2 = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

Eventual Entrada:

- Si P1 está tratando de entrar a su SC y no puede, P2 está en SC (**in2** es *true*). Un proceso que está en SC eventualmente sale → **in2** será *false* y la guarda de P1 *true*.
- Análogamente para P2.
- 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.

El problema de la Sección Crítica.

Solución de “grano grueso”

bool in1=false, in2=false # MUTEX: $\neg(in1 \wedge in2)$ #

```
process SC1
{ while (true)
  { <await (not in2) in1 = true;
    sección crítica;
    in1 = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

```
process SC2
{ while (true)
  { <await (not in1) in2 = true;
    sección crítica;
    in2 = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

- ¿Si hay n procesos? → Cambio de variables.

bool lock=false; # lock = in1 v in2 #

```
process SC1
{ while (true)
  { <await (not lock) lock= true;
    sección crítica;
    lock = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

```
process SC2
{ while (true)
  { <await (not lock) lock= true;
    sección crítica;
    lock= false;
    sección no crítica;
  }
}
```

El problema de la Sección Crítica.

Solución de “grano grueso”

bool lock=false; # lock = in1 v in2 #

```
process SC1
{ while (true)
  { ⟨await (not lock) lock= true;⟩
    sección crítica;
    lock = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

```
process SC2
{ while (true)
  { ⟨await (not lock) lock= true;⟩
    sección crítica;
    lock= false;
    sección no crítica;
  }
}
```

- 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;
  }
}
```

El problema de la Sección 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; >  
}
```

El problema de la Sección Crítica.

Solución de “grano fino”: *Spin Locks*

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



```
bool lock=false;
process SC[i=1 to n]
{ while (true)
  { while (TS(lock)) skip ;
    sección crítica;
    lock = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

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).

El problema de la Sección Crítica.

Solución de “grano fino”: *Spin Locks*

- Baja performance en multiprocesadores si varios procesos compiten por el acceso.
- *lock* es una variable compartida y su acceso continuo es muy costoso (“*memory contention*”).
- Además, podría producirse un alto overhead por cache inválida

TS escribe siempre en *lock* aunque el valor no cambie \Rightarrow Mejor ***Test-and-Test-and-Set***

```
bool lock=false;
process SC[i=1 to n]
{ while (true)
  { while (TS(lock)) skip ;
    sección crítica;
    lock = false;
    sección no crítica;
  }
}
```

```
while (lock) skip;
while (TS(lock))
  while (lock) skip;
```

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

El problema de la Sección Crítica.

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* $\Rightarrow \text{SCEnter} ; \text{while } (\text{not } B) \{ \text{SCExit}; \text{Delay}; \text{SCEnter}; \} S; \text{SCExit};$

Problema de la Sección Crítica.

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 *entry protocol*.

Problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Tie-Breaker*

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

```
bool in1 = false, in2 = false;
int ultimo = 1;

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

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

Problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Tie-Breaker*

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;
    }
}
```

Problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Tie-Breaker*

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 <> k] {
                # 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;
    }
}
```



Problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Ticket*

Tie-Breaker n-proceso \Rightarrow complejo y costoso en tiempo.

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

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;
  }
}
```

Problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Ticket*

Potencial problema: los valores de *próximo* y *turno* 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 \Rightarrow hay a lo sumo un proceso en la SC.
- La ausencia de deadlock y de demora innecesaria resultan de que los valores de **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)

Problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Ticket*

```
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;  
  }  
}
```

El problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Bakery*

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

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.
- Esta solución de grano grueso no es implementable directamente.

El problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Bakery*

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

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

process SC[i = 1 to n]

```
{ while (true)
    {  $\langle \text{turno}[i] = \max(\text{turno}[1:n]) + 1; \rangle$ 
      for [j = 1 to n st j <> i]  $\langle \text{await } (\text{turno}[j] == 0 \text{ or } \text{turno}[i] < \text{turno}[j]); \rangle$ 
      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.

El problema de la Sección Crítica.

Solución Fair: algoritmo *Bakery*

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

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

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 != i] //espera su turno
          while (turno[j] != 0) and ( (turno[i],i) > (turno[j],j) )  $\rightarrow$  skip;
      sección crítica
      turno[i] = 0;
      sección no crítica
    }
}
```



Sincronización *Barrier*

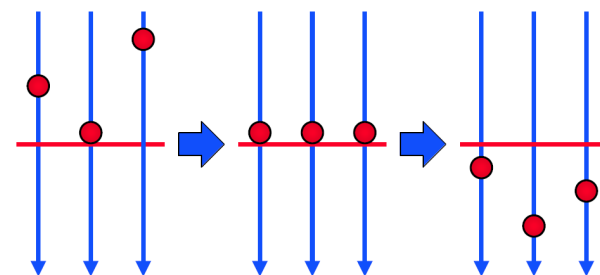
Algoritmo Iterativo: computan sucesivas mejores aproximaciones a una respuesta, y terminan al encontrarla o al converger. En cada iteración todos los procesos realizan el mismo trabajo sobre diferentes datos y requieren que haya finalizado el paso previa.

- Ignorando terminación, y asumiendo n tareas paralelas en cada iteración, se tiene la forma general:

```
while (true)
  { co [i=1 to n] código para implementar la tarea i; oc }
```

- Ineficiente, ya que produce n procesos en cada iteración \Rightarrow crear procesos al comienzo y sincronizarlos al final de cada iteración.

```
Procces Worker[i=1 to n]
{ while (true)
  { código para implementar la tarea i;
    esperar a que se completen las  $n$  tareas;
  }
}
```



Sincronización barrier: el punto de demora al final de cada iteración es una barrera a la que deben llegar todos antes de permitirles pasar.

Sincronización *Barrier*

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); >
    }
}
```

- Se puede implementar con:

```
FA(cantidad,1);
while (cantidad <> n) skip;
```

- **Problemas:** cantidad necesita ser 0 en cada iteración, puede haber contención de memoria, coherencia de cache,

Sincronización *Barrier*

Contador Compartido

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

¿Cuándo se reinicia *Cantidad* en 0?

Sincronización *Barrier*

Flags y Coordinadores

- Si no existe FA → Puede distribuirse *Cantidad* usando n variables (arreglo *arribo*[1.. n]).
- El *await* pasaría a ser:
 $\langle \text{await } (\text{arribo}[1] + \dots + \text{arribo}[n] == n); \rangle$
- Reintroduce contención de memoria y es ineficiente.

Puede usarse un conjunto de valores adicionales y un proceso más \Rightarrow
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;
         $\langle \text{await } (\text{continuar}[i] == 1); \rangle$ 
        continuar[i] = 0;
    }
}

process Coordinador
{ while (true)
    {   for [i = 1 to n]
        {  $\langle \text{await } (\text{arribo}[i] == 1); \rangle$ 
          arribo[i] = 0;
        }
        for [i = 1 to n] continuar[i] = 1;
    }
}
```


Sincronización *Barrier*

Flags y Coordinadores

```
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;
    }
}
```

Sincronización *Barrier*

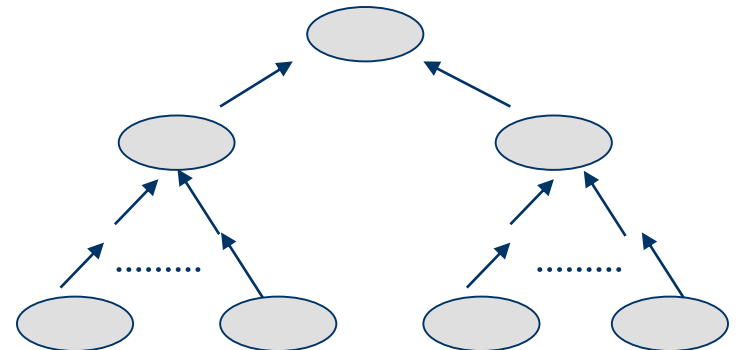
Árboles

- **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 arriba van hacia arriba en el árbol, y las de continuar hacia abajo \Rightarrow ***combining tree barrier*** (más eficiente para n grande).



Sincronización *Barrier*

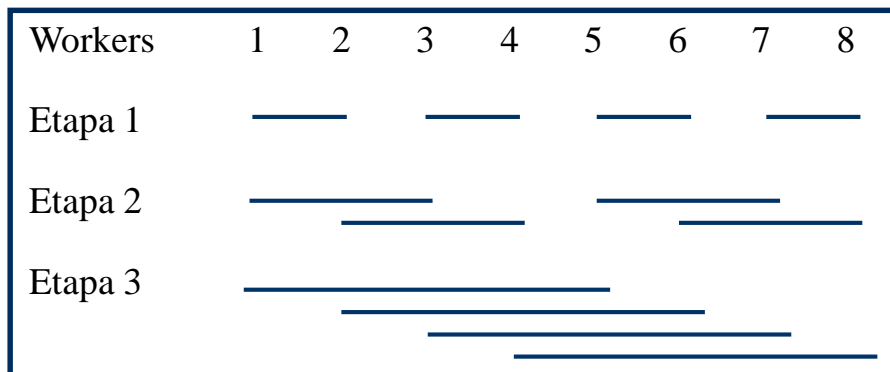
Barreras Simétrica

- 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:

```
W[i]:: < await (arribo[i] == 0); >
      arribo[i] = 1;
      < await (arribo[j] == 1); >
      arribo[j] = 0;
```

```
W[j]:: < await (arribo[j] == 0); >
      arribo[j] = 1;
      < await (arribo[i] == 1); >
      arribo[i] = 0;
```

- ¿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.

Sincronización *Barrier*

Barreras Simétrica – *Butterfly barrier*

```
int E = log(N);
int arribo[1:N] = ([N] 0), paso[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) → skip;
      arribo[i] = 1;
      while (arribo[j] == 0) → skip;
      arribo[i] = 0;
    }
    //Fin de la barrera
    //Sección de código posterior a la barrera.
  }
}
```

Sincronización *Barrier*

Ejemplo: *Cómputo de Prefijo Paralelo*

Algoritmo *Data Parallel*: varios procesos ejecutan el mismo código y trabajan en distintas partes de datos compartidos.

Ejemplo: computar en paralelo las sumas de los prefijos de un arreglo $a[n]$, para obtener $sum[n]$, donde $sum[i]$ es la suma de los primeros i elementos de a .

- Solución Secuencial:

$sum[0] = a[0];$

$for [i=1 \text{ to } n-1] \text{ } sum[i] = sum[i-1] + a[i];$

- ¿Cómo se puede paralelizar?

Sumar en paralelo pares contiguos, luego pares a distancia 2, luego a distancia 4, etc. $\Rightarrow (\log_2 n)$ pasos

- 1) Setear $sum[i]=a[i]$
- 2) En paralelo, sumar $sum[i-1]$ a $sum[i]$, $\forall i > 1$ (suma a distancia 1)
- 3) Luego, doblar la distancia, sumando $sum[i-2]$ a $sum[i]$, $\forall i > 2$
- 4) Luego de $(\log_2 n)$ rondas se tienen todas las sumas parciales

Sincronización *Barrier*

Ejemplo: *Cómputo de Prefijo Paralelo*

valores iniciales de a[1:6]	1	2	3	4	5	6
sum inicial	1	2	3	4	5	6
sum después de distancia 1	1	3	5	7	9	11
sum después de distancia 2	1	3	6	10	14	18
sum después de distancia 4	1	3	6	10	15	21

- Implementación Paralela

```
int a[n], sum[n], viejo[n];
process Sum[i=0 to n-1] {
    int d = 1;
    sum[i] = a[i];
    barrier(i);
    while (d < n) {
        viejo[i] = sum[i];
        barrier(i);
        if ( (i-d) >= 0 ) sum[i] = viejo[i-d] + sum[i];
        barrier(i);
        d = 2 * d;
    }
}
```

- ¿Qué pasaría si se usara un multiprocesador sincrónico?

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.

Tareas propuestas

- Investigar los semáforos como herramienta de sincronización entre procesos
- Buscar información sobre problemas clásicos de sincronización entre procesos y su resolución con semáforos.