



# Tema 2

## Sincronización en memoria compartida

SCD para GIIM

Asignatura *Sistemas Concurrentes y Distribuidos*

Fecha 7 octubre 2021

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos  
Universidad de Granada

# Limitaciones de los semáforos

Hay algunos inconvenientes de usar mecanismos como los semáforos:

- Basados en variables globales: esto impide un diseño modular y reduce la escalabilidad (incorporar más procesos al programa suele requerir la revisión del uso de las variables globales)
- El uso y función de las variables (*protegidas* de los semáforos) no se hace explícito en el programa, lo cual dificulta razonar sobre la corrección de los programas
- Las operaciones se encuentran dispersas y no protegidas (posibilidad de errores)

Por tanto, es necesario un mecanismo que permita el acceso estructurado a los datos del programa y la encapsulación de las estructuras de datos y que, además, proporcione herramientas para garantizar la exclusión mutua e implementar condiciones de sincronización



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores  
Sincronización en  
monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con  
monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los  
Lectores/escritores  
Semántica de las señales  
de los monitores  
Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC  
Solución totalmente  
correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

# Estructura y funcionalidad de un monitor

C.A.R. Hoare, en 1974, idea el concepto de Monitor: es un mecanismo de alto nivel que permite definir objetos abstractos compartidos:

- Una colección de variables encapsuladas (datos) que representan un recurso compartido por varios procesos
- Un conjunto de procedimientos para manipular el recurso: afectan a las variables encapsuladas

Ambos conjuntos de elementos permiten al programador invocar a los procedimientos de forma que en ellos,

- Se garantiza el acceso en exclusión mutua a las variables encapsuladas
- Se implementan la sincronización requerida por el problema mediante esperas bloqueadas (los procesos del programa suspenden sin consumir ciclos del procesador)

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

## Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Características generales de los monitores

## Concepto de monitor

*Módulo de las aplicaciones concurrentes que se usa como un objeto al que se accede concurrentemente por los procesos*

- **Modularidad** en el desarrollo de programas y aplicaciones
- **Programa**= {Monitores, Procesos}
- **Estructuración** en el acceso a tipos de datos, variables compartidas, etc.
- **Capacidad de modelado** de interacciones cooperativas y competitivas entre procesos concurrentes lo más general posible
- **Ocultación** a los procesos de las operaciones de sincronización sobre datos compartidos
- **Reusabilidad** basada en parametrización de los módulos monitor
- **Verificación** mediante reglas más simples que las de los semáforos

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

### Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Concepto de *monitor* II

Sincronización en memoria compartida



## Exclusión mutua en el acceso a los procedimientos/métodos del módulo *monitor*

- La exclusión mutua en el acceso a los procedimientos del monitor está garantizada por la propia definición del módulo *monitor*
- La implementación del monitor garantiza que nunca dos procesos estarán ejecutando simultáneamente algún procedimiento del monitor (el mismo o distintos)

Monitores como mecanismo de alto nivel

### Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Componentes de un monitor

## Variables permanentes: son el estado interno del monitor

- Sólo pueden ser accedidas dentro del monitor (en el cuerpo de los procedimientos y código de inicialización)
- Permanecen sin modificaciones entre dos llamadas consecutivas a procedimientos del monitor

## Procedimientos: modifican el estado interno (garantizando la exclusión mutua durante dicho cambio)

- Pueden tener variables y parámetros locales, que toman un nuevo valor en cada activación del procedimiento
- Algunos (o todos) constituyen la interfaz externa del monitor y podrán ser llamados por los procesos que comparten el recurso

## Código de inicialización: fija el estado interno inicial

- Este bloque es opcional
- Se ejecuta una única vez, antes de cualquier llamada a procedimientos del monitor



Monitores como mecanismo de alto nivel

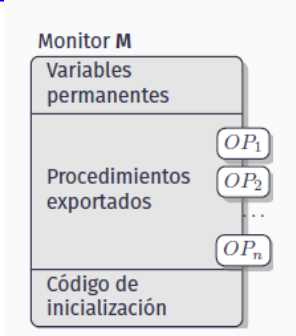
### Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

# Diagrama de los componentes del monitor



**Figure:** Un monitor se puede visualizar como aparece en el diagrama

- El uso que se hace del monitor se hace exclusivamente a través de los procedimientos exportados, que constituyen su interfaz con el exterior
- Las variables permanentes y los procedimientos no exportados no son accesibles desde fuera
- Ventaja: la implementación de las operaciones se puede cambiar sin modificar el código de los programas que las utilizan



Monitores como mecanismo de alto nivel

## Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Concepto de *monitor* III

```
IG ::= { atras = (frente + elementos_ocupados - 1) mod N + 1 }
```

```
Monitor Buf  
type +tipo_dato;  
var  
  +elementos_ocupados:int;  
  -frente, atras:1..N;  
  -no_vacio, no_lleno:cond;
```

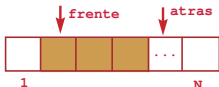
```
+insertar(d: tipo_dato);  
+retirar(var x: tipo_dato);
```

```
if (atras mod N + 1 = frente)  
  then no_lleno.wait();  
  introducir(buf, atras, d);  
  elementos_ocupados += 1;  
  atras := atras mod N + 1;  
  no_vacio.signal();
```

```
if (frente = atras)  
  then no_vacio.wait();  
  eliminar(buf, frente, x);  
  elementos_ocupados -= 1;  
  frente := frente mod N + 1;  
  no_lleno.signal();
```

```
Proceso Prod1::  
  type mis_datos=...  
  ...  
  var D: mis_datos;  
  ...  
  while true do  
    Buf.insertar(D);  
  end do;...
```

```
Proceso Cons1::  
  x: mis_datos=...  
  ...  
  while true do begin  
    Buf.retirar(x);  
    consumir(x);  
  end do;...
```



**Figure:** Representación de gráfica de un módulo monitor



## Monitores como mecanismo de alto nivel

### Definición de monitor

- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

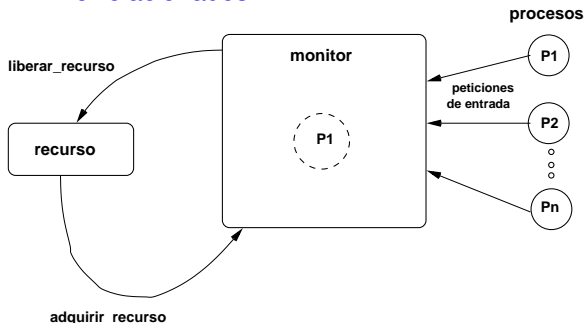
### Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos



# Características de la programación con *monitores*

- Centralización de recursos críticos
- Monitor como versión descentralizada del **monitor monolítico** de los sistemas operativos
- Mantiene la **seguridad** de los datos compartidos incluso si sus procedimientos son **ejecutados concurrentemente por múltiples procesos**
- sólo 1 procedimiento **ejecutado por un solo proceso dentro del monitor**, aunque puede **interrumpirse y reemprenderse** posteriormente
- Posibilidad de **ejecución concurrente de monitores no-relacionados**



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de...

# Instanciación de los monitores

## Los monitores son “objetos” pasivos

Después de ejecutarse el código de inicialización, un monitor es un módulo pasivo del programa y el código de sus procedimientos sólo se ejecuta cuando estos son invocados por los procesos

## Objetivo de la instanciación

- Obtener réplicas de los recursos de un monitor que se puedan acceder simultáneamente por los procesos de un programa concurrente
- Conseguir un principio similar al de *DCE Distributed File System*: procesos distintos se conectan desde diferentes máquinas para acceder a un espacio (recursos) único. Los procesos remotos no distinguen a los ficheros remotos, que utilizan con *locales*

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Instanciación de los monitores

- Cada instancia tiene sus variables permanentes propias
- La E.M. ocurre en cada instancia por separado
- Esto facilita mucho escribir código reentrante

## Condición para que un compilador pueda ofrecer monitores instanciables a los programadores:

El código de los procedimientos de los monitores ha de ser *reentrante*:

- No dependerá de datos estáticos globales
- No puede modificar su propio código
- No puede llamar a funciones *no-reentrantes*



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Instanciación de los monitores-II

```
class monitor VariableProtegida(entr, salid : integer);  
var x, inc : integer;  
// incremento(), valor(); son los procedimientos llamables  
    por los procesos  
procedure incremento( );  
begin  
    x := x+inc ;  
end;  
procedure valor(var v : integer);  
begin  
    v := x ;  
end;  
begin  
x:= entr ; inc := salid ;  
end
```

```
var mv1 : VariableProtegida(0,1);  
mv2 : VariableProtegida(10,4);  
i1,i2 : integer ;  
begin  
mv1.incremento( ) ;  
mv1.valor(i1) ; { i1==1 } //permanentes (x,inc) distintas  
mv2.incremento( ) ; //para cada instancia del monitor  
mv2.valor(i2) ; { i2==14 }  
end
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Cola del monitor para exclusión mutua

El control de la exclusión mutua se basa en la existencia de una *cola de entrada al monitor*

- Si un proceso está dentro del monitor y otro proceso intenta ejecutar un procedimiento del monitor, éste último proceso queda bloqueado y se inserta (espera) en la cola del monitor
- Cuando un proceso abandona el monitor (finaliza la ejecución del procedimiento), se desbloquea un proceso de la cola, que ya puede entrar al monitor
- Si la cola del monitor está vacía, el monitor está libre y el primer proceso que ejecute una llamada a uno de sus procedimientos, entrará en el monitor
- Para garantizar la propiedad de *vivacidad* del programa con monitores, la planificación de la cola del monitor debe seguir una política FIFO



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Diagrama de estados de un proceso



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

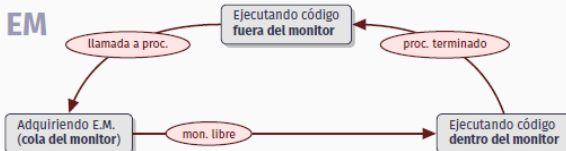
Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de



**Figure:** Posibles estados de los procesos y las transiciones entre dichos estados

Si el monitor está libre en el momento de la llamada al procedimiento del monitor, no habrá espera en la cola del monitor

# Estado del monitor



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

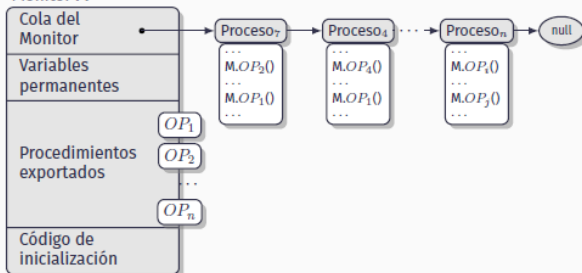
Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

Monitor M



**El estado del monitor incluye la cola de procesos esperando a comenzar a ejecutar el código del mismo**

# Operaciones de sincronización en monitores

Para implementar la sincronización, se requiere de una facilidad para que los procesos hagan esperas bloqueadas, hasta que sea cierta determinada condición

## En semáforos existe:

- La posibilidad de bloqueo (`sem_wait`) y activación (`sem_signal`)
- Un valor entero (el valor del semáforo), que indica si la condición se cumple (variable:  $> 0$ ) o no ( $= 0$ ).

## En monitores, sin embargo, se tiene:

- Sólo se dispone de sentencias de bloqueo y activación
- los valores de las variables permanentes del monitor determinan si la condición se cumple o no se cumple

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de



# Operaciones de sincronización en monitores

## Encapsulación de la sincronización

- Explícitamente programada dentro de los procedimientos
- TDA `cond`
- Variables condición: posibilitan la espera de condiciones diferentes dentro de un monitor
- Se define 1 variable por cada condición, dentro de los procedimientos

<code>c.wait()</code> : bloquea siempre. El desbloqueo de los procesos se produce en orden FIFO	<code>c.signal()</code> : si la cola de <code>c</code> no está vacía, desbloquea al primer proceso de la cola
---	---

- La representación de las variables condición no es accesible al programador de monitores

`c.queue()` :

función lógica que devuelve `true` si hay algún proceso esperando en la cola de `cond`, y `false` en caso contrario



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

### Sincronización en monitores

Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

## El TDA *cond* de los monitores

- La sincronización y la exclusión mutua –en el acceso a recursos que protege el monitor– se programa dentro del monitor con variables del TDA *cond* (soporte de señales)
- La exclusión mutua se levanta como consecuencia de ejecutar `c.wait()` → se evita el bloqueo del monitor
- Se cede el acceso al monitor al proceso señalado (`c.signal()` con semántica desplazante) → se evita el robo de señal

Comportamiento de los procesos después de ejecutar las operaciones de sincronización

- Después de ejecutar `c.wait()`
- Después de ejecutar `c.signal()`

No pueden programarse operaciones `c.wait()` indebidas;  
ni tampoco omitirse las operaciones `c.signal` necesarias

- Operaciones `c.queue` y `c.signal_all`
- No es segura la simulación de `c.signal_all` utilizando `c.queue` y señales desplazantes



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Estado de un monitor con varias colas



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

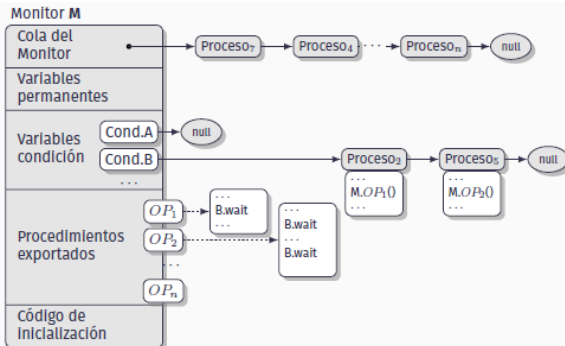
## Sincronización en monitores

Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de



**Figure:** Los procesos 2 y 5 ejecutan las operaciones 1 y 2, ambas producen esperas de la condición B

# Verificación de programas con monitores

## La verificación de la corrección de un programa concurrente con monitores supone:

- Probar la corrección de cada monitor
- Probar la corrección de cada proceso de forma aislada
- Probar la corrección de la ejecución concurrente de los procesos implicados

**El programador no puede conocer a priori la traza concreta de llamadas a los procedimientos del monitor. El enfoque de verificación que vamos a seguir utiliza un invariante de monitor**

## Invariante de un monitor (IM):

- Es una propiedad que el monitor cumple siempre, pero específico de cada monitor diseñado por un programador
- Unido a las propiedades de los procesos que invocan al monitor, el IM facilita la verificación de los programas concurrentes

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Verificación de programas con monitores-II

## Esquema general de demostración de programas con monitores:

- Probar la **corrección parcial de los procesos** secuenciales
- Comprobar** que el **invariante** de cada uno de los monitores del programa se mantienen
- Aplicar la **regla de la concurrencia**

## Características de un IM:

- Es una función lógica que se puede evaluar como *true* o *false* en cada estado del monitor a lo largo de la ejecución
- Su *valor de verdad* depende de la traza del monitor y de los valores de las variables permanentes de dicho monitor
- Debe ser cierto en cualquier estado del programa concurrente, excepto cuando un proceso está ejecutando código del monitor, en E.M. (está en proceso de actualización de los valores de las variables permanentes)

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Verificación de los monitores

- Axiomas iniciales

La demostración de corrección se basa en:

## Invariante del monitor(IM)

relación constante entre los valores permitidos de las variables permanentes del monitor

## Axioma (inicialización variables)

$\{V\}$  inicialización variables permanentes  $\{IM\}$

La inicialización se lleva a cabo dentro del `cuerpo begin ... end` del monitor

**El invariante del monitor debe ser cierto en su estado inicial, justo después de la inicialización de las variables permanentes**

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Verificación de los monitores-II

## El invariante del monitor debe ser cierto:

- antes y después de cada llamada a un procedimiento del monitor

## Axioma (procedimientos del monitor)

$$\{IN \wedge IM\} \text{ procedimiento}_i \{OUT \wedge IM\}$$

- IN satisfecho por los p. *in, in/out*
- OUT satisfecho por los p. *out, in/out*



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores  
Sincronización en  
monitores

### Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los  
Lectores/escritores  
Semántica de las señales  
de los monitores  
Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC  
Solución totalmente  
correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Axiomas de operaciones de sincronización con semántica desplazante

## El invariante del monitor debe ser cierto:

- antes de cada operación `wait`
- después de cada operación `signal`
- Además, justo antes de una operación `signal` sobre una variable condición **c** debe ser cierta la condición lógica **C** asociada a dicha variable

## Axioma (operacion `c.wait()`)

$$\{IM \wedge L\} c.wait() \{C \wedge L\}$$

- El proceso que ocasiona la ejecución de `c.wait` se bloquea y deja libre el monitor
- Entra en la cola FIFO asociada a `c`
- Las demostraciones de corrección **no tienen en cuenta la obligación de que el proceso termine de ejecutar** `c.wait()`



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores

### Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de



# Axiomas de operaciones de sincronización con semántica desplazante-II



## Axioma (operación `c.signal()`)

$$\{\neg \text{vacío}(c) \wedge L \wedge C\} c.\text{signal}() \{IM \wedge L\}$$

- No tiene efecto si la cola `c` está vacía
- Se supone **semántica desplazante**: el monitor mantiene el estado expresado por `C` hasta que un proceso bloqueado en `c` se reanude
- Los axiomas no tienen en cuenta el orden de desbloqueo de los procesos

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores

### Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

## Ejemplo: verificación de un monitor con señales desplazantes

```
Monitor Semaforo;  
  var s: integer; {IM:  $s \geq 0$ }  
      c: cond;  
  procedure P;  
  begin  
    {IM}  
    if s=0 then  
      { $s = 0 \wedge \text{IM}$ }  
      c.wait;  
    { $s > 0$ }  
  else  
    { $s > 0$ }  
    null;  
  { $s > 0$ }  
  endif;  
  { $s > 0$ }  
  s := s-1  
  { $s \geq 0 \rightarrow \text{IM}$ }  
end;
```

```
procedure V;  
begin  
  {IM}  
  s := s+1;  
  { $s > 0$ }  
  c.signal;  
  { $s \geq 0 \rightarrow \text{IM}$ }  
end;  
begin  
  {TRUE}  
  s := 0;  
  { $s \geq 0$ }  $\rightarrow$  {IM}  
end;
```



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores  
Sincronización en  
monitores

### Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los  
Lectores/escritores  
Semántica de las señales  
de los monitores  
Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC  
Solución totalmente  
correcta para N procesos

# Verificación de un monitor con señales desplazantes-II

## Ejemplo

### Semáforo de Habermann

$n_p \leq n_a$ , ya que primero ha de incrementarse  $n_a$   
 $n_p \leq n_v$ , ya que  $n_a$  no puede superar a  $n_v$  para incrementar  $n_p$   
 $n_p \geq \min(n_a, n_v)$ , condición no necesaria, pero deseable

```
Monitor Semaforo;  
  var na, np, nv:int  
      c: cond;
```

```
procedure P;  
begin  
  na:= na+1;  
  if(na > nv)  
    then c.wait();  
  np:= np+1;  
end;
```

```
na:=0;  
nv:=0;  
np:=0;
```

```
procedure V;  
begin  
  nv:= nv+1;  
  if(na > np)  
    then c.signal;  
end;
```



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores  
Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Regla de la concurrencia para la verificación de programas con monitores



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

$\{P_i\} S_i \{Q_i\}, 1 \leq i \leq n$

ninguna variable libre en  $P_i$  o en  $Q_i$  es modificada por  $S_j, i \neq j$

todas las variables en  $IM_k$  son locales al monitor  $m_k$

---

$\{IM_1 \wedge \dots \wedge IM_m \wedge P_1 \wedge \dots \wedge P_n\}$

cobegin  $S_1 \parallel S_2 \parallel \dots \parallel S_n$  coend

$\{IM_1 \wedge \dots \wedge IM_m \wedge Q_1 \wedge \dots \wedge Q_n\}$

- La programación concurrente con monitores excluye cualquier interferencia entre las demostraciones de los procedimientos y las de los procesos secuenciales del programa
- Si los asertos de las demostraciones de los procesos **no son críticos**, entonces las **demostraciones individuales**  $\{P_i\}S_i\{Q_i\}$  **cooperan** (no es necesario demostrar **teoremas de no-interferencia**)



## Se estudian a continuación los patrones de solución para tres problemas sencillos, típicos de la Programación Concurrente

- Espera única (EU): un proceso, antes de ejecutar una sentencia, debe esperar a que otro proceso complete otra sentencia (ocurre típicamente cuando un proceso debe leer una variable escrita por otro proceso, el primero se suele denominar Consumidor y el segundo Productor)
- Exclusión mutua(EM): acceso en exclusión mutua a una sección crítica por parte de un número arbitrario de procesos
- Problema del Productor/Consumidor(PC): similar a la espera única, pero de forma repetida en un bucle (un proceso Productor escribe sucesivos valores en una variable, y cada uno de ellos debe ser leído una única vez por otro proceso Consumidor)

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

### Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Monitor para Espera Única (EU)

```
monitor EU;  
var terminado:boolean;  
    //true si se ha terminado E, si no: false  
lee: boolean //variable auxiliar  
cola:condition;  
    //cola consumidor esperando terminado==true  
export esperar, notificar;  
    //Invariante: terminado= false => lee= false  
procedure esperar(); //para llamar antes de L  
begin  
    if (not terminado) then begin //si no se ha terminado E  
        cola.wait(); //esperar hasta que termine  
        lee:= true;  
    end;  
end;  
procedure termina();  
begin lee:= false; terminado:= false; end;  
procedure notificar(); //para llamar después de E  
begin  
    terminado:=true; //Condición de sincronización  
    cola.signal(); //reactivar el otro proceso, si espera  
end  
begin { inicializacion: }  
    terminado := false; //al inicio no ha terminado E }  
    lee:= false;  
end;
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Uso del monitor de EU

```
//variables compartidas
var x: integer; //contiene cada valor producido
process Productor; //escribe x
  var a: integer;
  begin
    a:=ProducirValor();
    x:=a; //sentencia E
    EU.notificar(); //sentencia N
  end
process Consumidor //lee x
  var b: integer;
  begin
    EU.esperar(); //sentencia W
    b:=x; //sentencia L
    EU.termina();
    UsarValor(b);
  end
end
```

- El proceso Consumidor espera, antes de leer, a que el Productor termine la sentencia de escritura
- De esta forma nos aseguramos que es posible un entrelazamiento **E, L**, pero no puede ocurrir el entrelazamiento **L, E**

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Verificación del monitor EU

*Invariante del monitor :  $terminado = false \Rightarrow lee = false$*

```
procedure esperar();
{Invariante, terminado= false, lee= false}
if (not terminado) then
  begin
    {terminado= true, lee= false, Invariante}
    cola.wait();
    {Condicion de sincronizacion: lee= true}
    lee:= true
    {Invariante}
  end;
end;
```

```
procedure notificar();
begin
  {terminado= false, lee=false, Invariante}
  terminado:= true;
  {Condicion de sincronizacion: terminado= true}
  cola.signal();
  {terminado= true, Invariante}
end;
```



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de



# Patrón de Exclusión Mutua (EM)

```
monitor EM ;
  var ocupada:boolean;
    //true hay un proceso en SC, si no: false
  cola:condition;
    //cola de procesos esperando ocupada==false
  export entrar,salir;
    //nombra procedimientos publicos
procedure entrar();//protocolo de entrada (sentencia E)
begin
  if ocupada then//si hay un proceso en la SC
    cola.wait();//esperar hasta que termine
    ocupada:=true;//indicar que la SC está ocupada
  end
procedure salir();//protocolo de salida (sentencia S)
begin
  ocupada := false;//marcar la SC como libre
  //si al menos un proceso espera, reactivar uno
  cola.signal();
end
begin//inicializacion:
  ocupada:=false;//al inicio no hay procesos en SC
end
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de



El monitor puede ser utilizado por  $n$  procesos concurrentes:

```
process Usuario[ i : 0..n ]  
begin  
  while true do begin  
    EM.entrar(); //esperar SC libre, registrar SC ocupada  
    ..... //seccion critica  
    EM.salir(); //registrar SC libre, señalar  
    ..... //otras actividades (RS)  
  end  
end
```

- $\#E$  es el número de llamadas a entrar completadas
- $\#S$  es el número de llamadas a salir completadas
- El número de procesos en SC es  $\#E - \#S$
- El único entrelazamiento correcto es **E, S, E, S,...**
- Se debe cumplir  $0 \leq \#E - \#S \leq 1$

Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para  $N$  procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Invariante del monitor

El invariante del monitor, es la conjunción de estas dos condiciones:

- $$IM :: ocupada == false \Leftrightarrow num\_sc == 0 \wedge$$
$$0 \leq num\_sc \leq 1$$

es decir, no puede ejecutar más de 1 proceso la sección crítica.

## Demostración del IM:

- Al inicio, IM es cierto (la sección crítica está vacía, luego  $num\_sc == 0$  y  $ocupada == false$ ).



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Corrección del programa

- Demostración del procedimiento *entrar()* modificado:

```
procedure entrar();
{ocupada= false, num_sc= 0 OR ocupada= true, num_sc=
  1}>={IM}
if (ocupada) then
  begin
    cola.wait();{Condicion sincronizacion: ocupada ==
      true}
    num_sc:= num_sc + 1;
  end;
{ocupada= true, num_sc= 1}>={IM}
end;
```

- Demostración del procedimiento *salir()* modificado:

```
procedure salir();
begin {ocupada== true, num_sc== 1, IM}
  if cola.queue() then
    begin {Condicion de sincronizacion}
      ocupada:= true;
      cola.signal();
    end else begin
      ocupada:= false;
      num_sc:= 0;
    end;
end;
```



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Sincronización tipo Productor/Consumidor

El problema del Productor-Consumidor con las lecturas y escrituras (E y L) repetidas en un bucle puede solucionarse con el monitor PC, muy sencillo, que encapsula el valor compartido

- El procedimiento `escribir` escribe el parámetro en la variable compartida
- El procedimiento `leer`, lee el valor que hay en la variable

```
process Productor; //calcula x
var a:integer;
begin
  while true do begin
    a:=ProducirValor();
    PC.escribir(a); //copia a en valor
  end
end
process Consumidor //lee x
var b : integer ;
begin
  while true do begin
    PC.leer(b); //copia valor en b
    UsarValor(b);
  end
end
```



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

## Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

# Monitor Productor/Consumidor

```
Monitor PC ;
var valor_com:integer;//valor compartido
    pendiente:boolean;//true: valor escrito y no leído
    cola_prod:condition;
    //espera productor hasta que pendiente == false
    cola_cons:condition;
    //espera consumidor hasta que pendiente == true
procedure escribir( v:integer );
begin
    if pendiente then
        cola_prod.wait();
        valor_com:=v; //num_escrituras:= num_escrituras+1
        pendiente:=true;
        cola_cons.signal();
    end;
function leer():integer;
begin
    if (not pendiente) then
        cola_cons.wait();
        result:=valor_com;//num_lecturas:= num_lecturas+1
        pendiente:=false;
        cola_prod.signal();
    end;
begin //inicialización
    pendiente := false ;
end;
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Verificación del monitor

Al igual que en los otros casos, podemos verificar que el monitor funciona bien:

- $\#E$  = número de llamadas a escribir completadas
- $\#L$  = número de llamadas a leer completadas
- El monitor es correcto sólo si en cualquier estado:  
$$0 \leq \#E - \#L \leq 1$$

El invariante del monitor es:

$$\#E - \#L = \begin{cases} 0 & \text{si pendiente} == \text{false} \\ 1 & \text{si pendiente} == \text{true} \end{cases}$$

- Condición sincronización del productor: pendiente == false; Condición sincronización del consumidor: pendiente == true;



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Demostración del invariante

## Se cumplen las siguientes condiciones lógicas:

- Al inicio, se cumple el invariante, ya que #E y #L son 0, y pendiente es false
- Si se cumple el invariante y se ejecuta escribir:

```
procedure escribir( v:integer );
begin
{pendiente==false, num_escrituras==num_lecturas OR
 pendiente==true, num_escrituras==num_lecturas+1}=>
  Invariante
  if pendiente then
    cola_prod.wait();
    {Condicion sincronizacion: pendiente= false}
    valor_com:=v; //num_escrituras:= num_escrituras+1
    pendiente:=true;
    {Condicion sincronizacion del consumidor}
    if cola_cons.queue() then cola_cons.signal();
  { Invariante }
end;
```



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos



# Demostración del invariante-II

- Si se cumple el invariante y se ejecuta leer:

```
function leer():integer;
{pendiente==false, num_escrituras==num_lecturas OR
 pendiente==true, num_escrituras==num_lecturas+1}=>
    Invariante
begin
    if (not pendiente) then
        cola_cons.wait();
        {Condicion sincronizacion: pendiente= true}
        result:=valor_com;//num_lecturas:= num_lecturas+1
        pendiente:=false ;
        {Condicion sincronizacion del productor}
        if cola_prod.queue() then cola_prod.signal();
    {Invariante}
end;
```



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores  
Sincronización en  
monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad  
El problema de los  
Lectores/escritores  
Semántica de las señales  
de los monitores  
Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC  
Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Señales con prioridad

- La semántica de las señales no contempla el **desbloqueo de los procesos según un orden prioritario**

`c.wait(prioridad)` bloquea a los procesos en la cola `c`, pero ordenándolos con respecto al valor del argumento `prioridad`

Despertador que recuerda los tiempos indicados por sus usuarios. Varios de ellos pueden indicar la misma hora

```
procedure tick();  
begin  
    ahora:= ahora +1;  
    despertar.signal();  
end;  
begin  
    ahora:= 0;  
end;
```



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

## Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Señales con prioridad-II

```
monitor despertador;  
var  
  ahora: integer;  
  despertar: {\bf cond}; --prioritaria  
  
procedure despiertame(n: integer);  
  var alarma: integer;  
  begin  
    alarma:= ahora + n;  
    while ahora< alarma do  
      despertar.wait(n);  
    end do;  
    despertar.signal();  
  end;
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Señales con prioridad-III

- Simulación mediante señales FIFO con semántica desplazante

```
Monitor despertador[d:tipo_enumerado]
```

```
var
  ahora:int;
  despertar:cond;
procedure despiertame(n:int)
begin
  alarma:= ahora + n;
  while(ahora< alarma) do
  begin
    despertar.signal();
    despertar.wait();
  end;
  despertar.signal();
end;
procedure tick
begin
  ahora:= ahora + 1;
  despertar.signal();
end;
begin
  ahora:= 0;
end;
```

Escenario de ejecución

id	instruccion	tiempo
P1	despiertame(10)	0
P2	despiertame(3)	1
P3	despiertame(5)	2
P4	despiertame(3)	3

ahora=3

despertar.signal()

inicialmente



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores

## Colas de prioridad

- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

# El problema de Lectores/Escritores (LE)

## Dos tipos de procesos acceden concurrentemente a datos compartidos:

- **Escritores:** procesos que modifican la estructura de datos (escriben en ella). El código de escritura no puede ejecutarse concurrentemente con ninguna otra escritura ni lectura, ya que está formado por una secuencia de instrucciones que temporalmente ponen la estructura de datos en un estado no utilizable por otros procesos
- **Lectores:** procesos que leen la estructura de datos, pero no modifican su estado en absoluto. El código de lectura puede (y debe) ejecutarse concurrentemente por varios lectores de forma arbitraria, pero no puede hacerse a la vez que la escritura. La solución de este problema usando semáforos es compleja, veremos que con monitores es sencillo



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad

### El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Variables permanentes y procedimientos para lectores

```
monitor Lec_Esc ;
var n_lec:integer;//numero de lectores leyendo
    escrib:boolean;
    //true si hay algun escritor escribiendo
    lectura:condition;
    //no hay escrit. escribiendo, lectura posible
    escritura:condition;
    //no hay lect. ni escrit., escritura posible
export ini_lectura, fin_lectura,
    //invocados por lectores
    ini_escritura, fin_escritura;
    //invocados por escritores
procedure ini_lectura()
begin
    if escrib then//si hay escritor:
        lectura.wait();//esperar
    //registrar un lector más
    n_lec := n_lec + 1 ;
    //desbloqueo en cadena de
    //posibles lectores bloqueados
    lectura.signal()
end
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

## Variables permanentes y procedimientos para lectores-II

```
procedure fin_lectura()  
begin //registrar un lector menos  
    n_lec:= n_lec - 1 ;  
    //si es el ultimo lector:desbloquear un escritor  
    if n_lec == 0 then  
        escritura.signal()  
    end  
procedure ini_escritura()  
begin //si hay otros, esperar  
    if n_lec > 0 or escribiendo then  
        escritura.wait()  
        //registrar que hay un escritor  
        escribiendo:= true;  
    end;  
procedure fin_escritura()  
begin//registrar que ya no hay escritor  
    escribiendo := false;  
    //si hay lectores, despertar uno; si no hay, a un escritor  
    if lectura.queue() then  
        lectura.signal();  
    else  
        escritura.signal() ;  
    end;  
begin//inicializacion  
    n_lec := 0; escribiendo:= false ;  
end
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de



- En esta implementación se ha dado prioridad a los lectores (en el momento que un escritor termina, si hay escritores y lectores esperando, pasan los lectores)
- Hay otras opciones:
  - prioridad a escritores,
  - prioridad al que más tiempo lleva esperando

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores  
Semántica de las señales de los monitores  
Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de



# Uso del monitor

Los procesos lectores y escritores usan el monitor de esta forma:

```
process Lector[ i:1..n ] ;
begin
  while true do begin
    .....
    Lec_Esc.ini_lectura() ;
    //codigo de lectura: ....
    Lec_Esc.fin_lectura() ;
    .....
  end
end
process Escritor[ i:1..m ] ;
begin
  while true do begin
    .....
    Lec_Esc.ini_escritura() ;
    //codigo de escritura: ....
    Lec_Esc.fin_escritura() ;
    .....
  end
end
```



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad

## El problema de los Lectores/escritores

- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

# Todos los mecanismos de señalación alternativos de los monitores

Sincronización en memoria compartida



SA	señales automáticas	señal implícita
SC	señalar y continuar	señal explícita, no desplazante
SS	señalar y salir	señal explícita, desplazante, el proceso sale del monitor
SE	señalar y esperar	señal explícita, desplazante, el proceso señalador espera en la cola de entrada al monitor
SU	señales urgentes	señal explícita, desplazante, el proceso señalador espera en la cola de <i>procesos urgentes</i>

Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Posibles semánticas de las señales de los monitores

- 1 El proceso señalador continua su ejecución tras la operación `signal`

El proceso señalado espera bloqueado hasta que puede adquirir la E.M. de nuevo, semántica de señal: *SC: señalar y continuar*

## El proceso señalado se reactiva inmediatamente

- 2 El proceso señalador abandona el monitor tras hacer `signal`, sin ejecutar el código que haya después de dicho `signal`, semántica de señal: *SS: señalar y salir*
  - El señalador queda bloqueado a la espera en la cola del monitor, junto con otros posibles procesos que quieren comenzar a ejecutar código del monitor, semántica de señal: *SE: señalar y esperar*
  - El señalador se queda bloqueado en una cola específica, dicha cola mantiene a estos procesos con mayor prioridad para volver a entrar al monitor: *SU: señalar y espera urgente*



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

### Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

# Señalar y continuar (SC): diagrama de estados del proceso

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

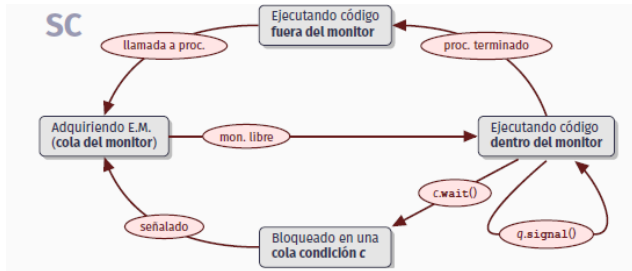
Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de



- Señalador: continúa inmediatamente la ejecución de código del procedimiento del monitor tras `signal`
- Señalado: abandona la cola condición y espera en la cola del monitor hasta readquirir la E.M. y ejecutar código tras la operación `wait`

# Señalar y continuar (SC): características

## El proceso señalador continúa su ejecución dentro del monitor después del signal

- El proceso señalado abandonará después la cola condición y espera en la cola del monitor para readquirir la E.M.
- Tanto el señalador como otros procesos pueden hacer falsa la condición después de que el señalado abandone la cola condición
- Por tanto, en el proceso señalado no se puede garantizar que la condición asociada a **cond** es cierta al terminar **cond.wait()** y, lógicamente, es necesario volver a comprobarla entonces
- Esta semántica obliga a programar la operación wait en un bucle, de la siguiente manera:

```
while not {\bf cond} icion_lógica_desbloqueo do  
  {\bf cond}.wait() ;
```



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores

### Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Señalar y salir (SS): diagrama de estados del proceso



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores

### Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

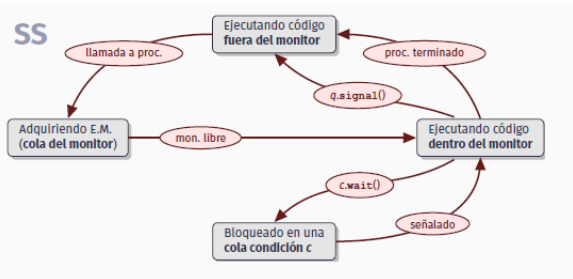
Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de



- Señalador: abandona el monitor (ejecuta código tras la llamada al procedimiento del monitor). Si hay código en este proceso, tras ejecutar `signal`, no se ejecuta inmediatamente
- Señalado: reanuda inmediatamente la ejecución del código del procedimiento del monitor, programado tras la operación `wait`

# Señalar y salir (SS): características

El proceso señalador sale del monitor después de ejecutar `cond.signal()`

- Si hay código tras `signal`, no se ejecuta. El proceso señalado reanuda inmediatamente la ejecución de código del monitor.
- En ese caso, la operación `signal` conlleva:
  - 1 Liberar al proceso señalado
  - 2 Terminación del procedimiento del monitor que estaba ejecutando el proceso señalador
  - 3 Está asegurado el estado que permite al proceso señalado continuar la ejecución del procedimiento del monitor en el que se bloqueó (la condición de desbloqueo se cumple)
  - 4 Esta semántica condiciona el estilo de programación ya que obliga a colocar siempre la operación `signal` como última instrucción de los procedimientos de monitor que la usen

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Señalar y esperar (SE): diagrama de estados del proceso



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores

## Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

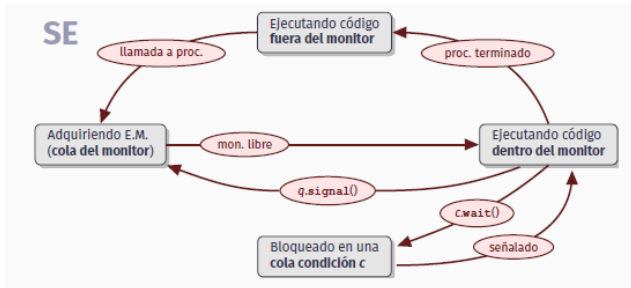
Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de



- Señalador: se bloquea en la cola del monitor hasta readquirir E.M. y ejecutar el código del monitor tras signal
- Señalado: reanuda inmediatamente la ejecución de código del monitor tras wait



# Señalar y esperar (SE): características

## El proceso señalador se bloquea en la cola del monitor justo después de ejecutar signal

- El proceso señalado entra de forma inmediata en el monitor
- Está asegurado el estado que permite al proceso señalado continuar la ejecución del procedimiento del monitor en el que se bloqueó
  - 1 El proceso señalador entra en la cola de procesos del monitor, por lo que está al mismo nivel que el resto de procesos que compiten por la exclusión mutua del monitor
  - 2 Puede considerarse una semántica injusta respecto al proceso señalador ya que dicho proceso ya había obtenido el acceso al monitor por lo que debería tener prioridad sobre el resto de procesos que compiten por el monitor



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

### Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Señalar y espera urgente (SU): diagrama de estados del proceso



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores

## Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

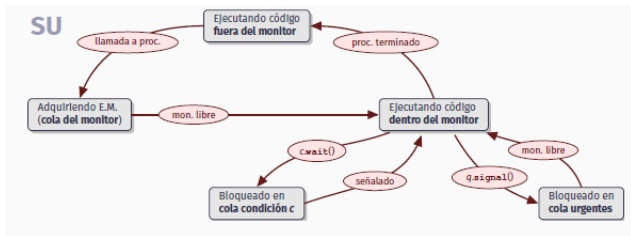
Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de



- Señalador: se bloquea en la cola de urgentes hasta readquirir la E.M. y ejecutar código del monitor tras signal. Para readquirir E.M. tiene más prioridad que los procesos en la cola del monitor
- Señalado: reanuda inmediatamente la ejecución de código del monitor tras la operación `wait`

# Señalar y espera urgente (SU): características

Es similar la semántica SE, pero se intenta corregir el problema de falta de equitatividad de las señales SS

- El proceso señalador se bloquea justo después de ejecutar la operación signal
  - 1 El proceso señalado entra de forma inmediata en el monitor
  - 2 Está asegurado el estado que permite al proceso señalado continuar la ejecución del procedimiento del monitor en el que se bloqueó
  - 3 El proceso señalador entra en una nueva cola de procesos que esperan para acceder al monitor, que podemos llamar cola de procesos urgentes
  - 4 Los procesos de la cola de procesos urgentes tienen preferencia para acceder al monitor frente a los procesos que esperan en la cola del monitor



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

## Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

# Procesos en la cola de urgentes



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores

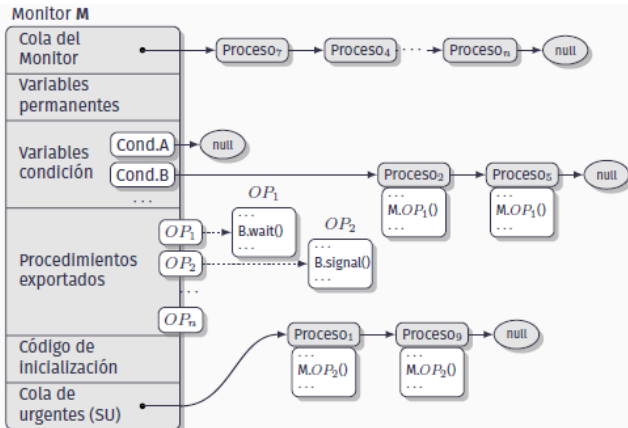
## Semántica de las señales de los monitores

- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de



**Figure:** El proceso 1 y el 9 han ejecutado la op.2, que hace señal de la **cond.** B.

# Análisis comparativo de las diferentes semánticas de señales

**Potencia expresiva: todas las semánticas son capaces de resolver los mismos problemas**

## Facilidad de uso:

La semántica SS condiciona el estilo de programación y puede llevar a aumentar de forma artificial el número de procedimientos

## Eficiencia:

- Las semánticas SE y SU resultan ineficientes cuando no hay código tras `signal`, ya que en ese caso implican que el señalador emplea tiempo en bloquearse y después reactivarse, pero justo a continuación abandona el monitor sin hacer nada
- La semántica SC también es un poco ineficiente al obligar a usar un bucle para cada instrucción `signal`

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Comparativa entre las distintas semánticas de señales mediante un ejemplo

## Barrera parcial

- El monitor tiene un único procedimiento público llamado *cita*
- Hay  $p$  procesos ejecutando un bucle infinito, en cada iteración realizan una actividad de duración arbitraria y después llaman a *cita*
- Ningún proceso termina *cita* antes de que haya al menos  $n$  de ellos que la hayan iniciado (donde  $1 < n < p$ ). Después de esperar en *cita*, pero antes de terminarla, el proceso imprime un mensaje
- Cada vez que un grupo de  $n$  procesos llegan a la cita, esos  $n$  procesos imprimen su mensaje antes de que lo haga ningún otro proceso que haya llegado después de todos ellos a dicha cita (que sea del siguiente grupo de  $n$ )



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

### Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para  $N$  procesos

## Diseño del monitor *barrera parcial*

Cuando un proceso comienza a ejecutar cita, debe esperar hasta que haya otros  $n - 1$  que también lo hayan hecho:

- Eso supone usar una variable condición (la llamamos cola)
- Para saber si hay que esperar o no, es necesario saber cuantos procesos han llegado a la cita pero no la han terminado todavía, para ello usamos una variable entera (contador), inicialmente a 0. Al entrar en la cita, debe incrementarse
- Por tanto, la condición lógica asociada a la variable condición cola es `contador==n`
- El proceso que, tras llegar a la cita e incrementar, observa que `contador==n` debe encargarse de que los procesos en espera abandonan dicha espera y terminen cita (puesto que ya se cumple la condición que esperan)



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

### Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

# Una posible implementación del monitor

```
Monitor BP //monitor Barrera Parcial }
var cola : {\bf cond}ition; //procesos esperando contador
==n
contador : integer; //numero de procesos ejecutando
cita
procedure cita() ;
begin
  contador := contador+1; //registrar un proceso mas
  ejecutando cita
  if (contador<n) then
    cola.wait(); //esperar a que haya n procesos
    ejecutando
  else begin //si ya hay n procesos ejecutando la cita
    for i := 1 to n-1 do //para cada uno de estos
      cola.signal(); //despertalo
    contador := 0; //volver a poner el contador a 0
  end
  print("salgo_de_cita"); //mensaje de salida
end
begin //inicializacion del monitor
  contador := 0 ; { inicialmente, no hay procesos en cita }
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de



# Comportamiento del monitor *barrera parcial* para las distintas semánticas de señales

Si llamamos último al último proceso en llegar a la cita de cada grupo de  $n$  (el que observa `contador==n`), ocurrirá lo siguiente:

- *Señalar y Continuar*: el último proceso ejecuta todos los `signal` seguidos sin esperar entre ellos, y después pone el `contador` a 0. Los  $n - 1$  procesos señalados abandonan el `wait`, pero pasan a la cola del monitor. Por tanto, antes de que esos señalados puedan terminar de ejecutar cita, todos los procesos del siguiente grupo de  $n$  podrían iniciar y terminar dicha cita, y no se cumple el segundo requisito de la solución correcta del problema
- *Señalar y Salir*: en este caso, el último proceso abandona el monitor tras el primer `signal`, por tanto, no pone `contador` a 0, no ejecuta el resto de `signal` necesarios y el siguiente proceso en llegar (primero del siguiente grupo), no hace la espera requerida



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

## Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para  $N$  procesos

# Comportamiento del monitor *barrera parcial* para las distintas semánticas de señales-II



...

- *Señalar y Esperar*: el último proceso, después de ejecutar el primer `signal`, va a la cola del monitor. Por tanto, podría entrar a la cita el primer proceso del siguiente grupo y observar `contador==n`, con lo cual este primer proceso no haría la espera requerida
- *Señalar y Espera Urgente*: el último proceso ejecuta todos los `signals`. Entre cada dos de ellos, espera en la *cola de urgentes* a que el señalado abandone el monitor. Los procesos del siguiente grupo esperan en la cola del monitor hasta que todos los señalados lo abandonen y el último ejecute la asignación `contador:=0`. La semántica SU de señales hace que esta solución sea correcta

## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores  
Sincronización en monitores  
Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores  
Colas de prioridad  
El problema de los Lectores/escritores

## Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo  
Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad  
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC  
Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

# Implementación alternativa del monitor *barrera parcial*

Monitor BP

```
var cola: {\bf cond}ition; //procesos esperando contador==n
    contador: integer; //numero de procesos esperando en la
        cola
procedure cita() ;
begin
    contador:=contador+1; //registrar un proceso mas
        esperando
    if (contador<n) then //todavia no hay n procesos:
        cola.wait(); //esperar a que los haya
    contador:=contador-1; //registrar un proceso menos
        esperando
    print ("salgo_de_la_cita"); //mensaje de salida
    if (contador>0) then //si hay otros procesos en la cola
        cola.signal(); //despertar al siguiente
    end
begin //inicialización:
    contador:=0; //inicialmente, no hay procesos en la cola
end;
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Comportamiento de la versión alternativa



## Analizamos el comportamiento en todas las semánticas:

- No funciona con la semántica SC, ya que al salir del wait los señalados vuelven a la cola del monitor, donde ya podría haber esperando procesos del siguiente grupo que entrarían a la cita antes de que los del grupo actual puedan completar su ejecución tras wait
- Sí funciona con el resto de semánticas (SE,SS,SU): en todos los casos, los procesos señalados completan la ejecución de cita inmediatamente después de salir del wait. En ningún caso los procesos del siguiente grupo tienen opción de colarse en la cita antes de tiempo

En general, hay que ser cuidadoso con la semántica en uso, especialmente si el monitor tiene código tras signal. Generalmente, la semántica SC puede complicar mucho los diseños

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

### Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

# Reglas de verificación de las señales no-desplazantes SC

Sincronización en memoria compartida



## Axioma de la operación `c.wait()`

$$\{IM \wedge L\} c.wait() \{IM \wedge L\}$$

- La regla permite demostrar la **corrección parcial** de los programas independientemente de la planificación de los procesos de la cola `c`
- No demuestra, por tanto, por tanto ni la propiedad de vivacidad, ni detecta bloqueos

## Axioma de las operaciones `c.signal()`, `c.signal_all()`

$$\{P\} c.signal() \{P\}$$

Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

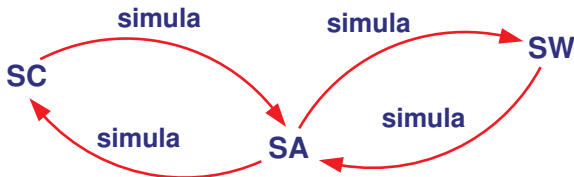
Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Intercambio de señales en programas que usan monitores

condiciones que se han de cumplir para poder intercambiar SW y SC sin modificar adicionalmente el código del monitor:

- 1 Sólo se ha de exigir como postcondición de `c.wait()` el Invariante del Monitor
- 2 Después de una llamada a la operación `c.signal()` se ha de *salir* del monitor
- 3 No se puede utilizar `c.signal_all()`: difusión de una señal a un grupo de procesos



Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Implementaciones alternativas de un semáforo con monitores

```
Monitor semaforo_FIFO1;
{IM: s>=0}
var c: cond;
    s: int;
procedure P;
begin
    if(s=0) then
        c.wait();
        {s > 0}
        s:=s-1;
    end;
procedure V;
begin
    s:= s+1;
    c.signal;
end;
begin
    s:=0;
end;
```

```
Monitor semaforo_FIFO2;
{IM: s>=0}
var c: cond;
    s: int;
procedure P;
begin
    while(s=0) do
        c.wait();
        {s>= 0}
    end do;
    {s > 0}
    s:=s-1;
end;
procedure V;
begin
    c.signal;
    s:= s+1;
end;
begin
    s:=0;
end;
```

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

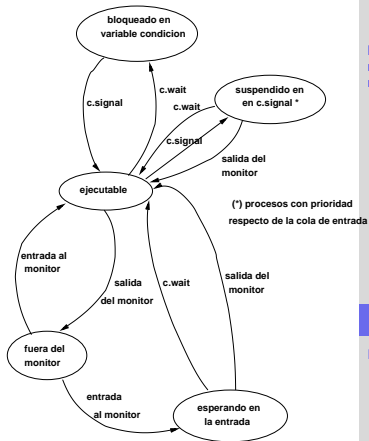
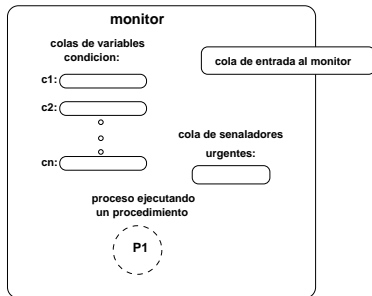
Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Implementación de los monitores

## Esquema de implementación de un monitor con señales SU



### Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos



# Implementación de los monitores con semáforos



## Concepto fundamental:

- Cola de entrada al monitor: controlada por el semáforo **mutex**
- Cola de procesos urgentes: controlada por el semáforo **next**
- Número de procesos *urgentes* en cola: se contabiliza en la variable **next\_count**
- Colas de procesos bloqueados en cada condición: controladas por el semáforo asociado a cada condición **x\_sem** y el número de procesos en cada cola se contabiliza en una variable asociada a cada condición (**x\_sem\_count**)

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

### Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Implementación de los monitores con semáforos-II



## Semáforo **mutex** para implementar la exclusión mutua del monitor

```
procedure P1 (...)
begin
  sem_wait(mutex);
  { cuerpo del procedimiento }
  sem_signal(mutex);
end
```

```
//inicializacion
mutex := 1 ;
```

### Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores

### Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Implementación de los monitores con semáforos-III

Semáforo **next** para implementar la cola de *urgentes* y **next\_count** para contar los procesos en esa cola

```
procedure P1 (...)
begin
  sem_wait(mutex);
  { cuerpo del procedimiento }
  if (next_count > 0) then
    sem_signal(next);
  else sem_signal(mutex);
end;
```

```
//inicializacion
next := 0 ;
next_count := 0 ;
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Implementación de los monitores con semáforos-IV

Para implementar las variables condición: semáforo **x\_sem** para cada una y una variable para contar los procesos bloqueados en su cola asociada: **x\_sem\_count**

```
void entrada() {  
    //implementacion de entrada al monitor  
    sem_wait(mutex); //entre al monitor o se queda bloqueado  
        en la cola de entrada  
}
```

```
void x_wait(Semaphore x_sem, unsigned x_sem_count) {  
    //implementacion de x.wait()  
    x_sem_count := x_sem_count + 1 ;//cuenta 1 proceso mas  
        bloqueado en la cola de condicion "x"  
    if (next_count <> 0) then//hay procesos señaladores  
        esperando  
        sem_signal(next); //desbloquea un proceso señalador  
    else  
        sem_signal(mutex); //deja libre el monitor para que  
            entre otro proceso  
    sem_wait(x_sem); //se bloquea esperando la certeza de  
        condicion "x"  
    x_sem_count := x_sem_count - 1; //cuenta 1 proceso menos  
        bloqueado en la condicion "x"  
}
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Implementación de los monitores con semáforos-V

```
void x_signal(Semaphore x_sem, unsigned x_sem_count){  
  //implementacion de x.signal()  
  if (x_sem_count <> 0) then  
    begin //hay procesos bloqueados esperando la condicion "  
      x"  
      next_count := next_count + 1; //cuenta 1 proceso mas en  
        la cola de señaladores  
      sem_signal(x_sem); //desbloquea 1 proceso esperando:  
        la condicion "x" es cierta ahora  
      sem_wait(next); //entra en la cola de señaladores  
      next_count := next_count - 1; //cuenta 1 proceso  
        señalador menos en cola de señaladores  
    end  
  }  
}
```

```
void salida() {  
  //implementacion de la salida del monitor  
  if (next_count <> 0) then //hay procesos senialadores  
    esperando  
    sem_signal(next); //desbloquea un proceso senialador  
  else  
    sem_signal(mutex); //libera la exclusion mutua del  
      monitor  
  }  
}
```

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Ejemplo de uso de la implementación del Monitor

```
Semaphore puede_escribir= 1, puede_leer= 0;
//Monitor PC ;
int valor_com,puede_escribir_count,puede_leer_count;
boolean pendiente;

procedure escribir(puede_escribir,puede_escribir_count);
begin entrada();
  if pendiente then
    x_wait(puede_escribir, puede_escribir_count);
  valor_com:=v; pendiente:=true;
  x_signal(puede_leer, puede_leer_count);
  salida();
end;

function leer(puede_leer,puede_leer_count):integer;
begin entrada();
  if (not pendiente) then
    x_wait(puede_leer, puede_leer_count);
  result:=valor_com; pendiente:=false ;
  x_signal(puede_escribir, puede_escribir_count);
  salida();
end;

begin entrada();
  pendiente := false ;
  valor_com=0;puede_escribir_count=0;puede_leer_count=0;
  salida();
end;
```



## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

# Introducción al problema del “exclusión mutua”



## Introducción histórica al problema de la exclusión mutua

1962 Dekker propone el problema de la **exclusion mutua** para multiprocesadores:

"diseñar un protocolo que garantice el acceso mutuamente excluyente, sin que exista interbloqueo, a una sección crítica por parte de un determinado número de procesos que compiten por entrar a dicha sección..."

1965 Dijkstra propone una solución **segura, libre de interbloqueo**, pero que puede producir **inanición**

1966 Knuth propone una solución sin **inanición**; garantiza retraso limitado de los procesos, pero no FIFO

1974 Lamport: permite a los procesos "detenerse" en la ejecución del protocolo de adquisición, solapar las operaciones de lectura con la escritura y **retraso FIFO** de los procesos que ya esperan entrar

1981 Peterson propone una solución **equitativa** para 2 y "n" procesos; garantiza el retraso cuadrático de los procesos, es la solución más simple hasta fecha para multiprocesadores

1983 Algoritmos totalmente distribuidos que resuelven el problema para multicomputadores;  
Ricart-Aggrawala, Suzuki-Kasami

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

## Solución al problema con bucles de espera activa

- Los procesos iteran en un bucle vacío hasta que la entrada en Sección Crítica (SC) sea segura
- Aceptable si el sistema/aplicación no tuviera muchos procesos

Condiciones de Dijkstra para obtener una solución *parcialmente correcta* al problema de exclusión mutua:

- 1 No hacer ninguna suposición acerca de las instrucciones o número de procesos soportados por el multiprocesador
- 2 Ni tampoco acerca de la velocidad de ejecución de los procesos, excepto que no es cero (*Progreso Finito*)
- 3 Cuando un proceso se encuentra ejecutando código fuera de la sección crítica no puede impedir a los otros procesos entrar en ésta
- 4 La sección crítica siempre será alcanzada por alguno de los procesos que esperan entrar



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

#### Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos



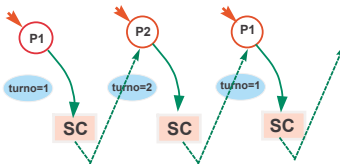
# Método de refinamiento sucesivo



## Esquema de "corrutinas": no se cumple la tercera propiedad de Dijkstra!

### 1A Etapa

Proceso P1	Proceso P2
<pre>while true do begin   &lt;&lt;resto instrucciones&gt;&gt;    while turno &lt;&gt; 1 do     nothing;   enddo;    &lt;&lt;seccion critica&gt;&gt;   turno:= 1; end enddo;</pre>	<pre>while true do begin   &lt;&lt;resto instrucciones&gt;&gt;    while turno &lt;&gt; 2 do     nothing;   enddo;    &lt;&lt;seccion critica&gt;&gt;   turno:= 1; end enddo;</pre>



### Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Método de refinamiento sucesivo –II



## 2A Etapa

### Proceso P1

```
while true do
  begin
    <<resto instrucciones>>
```

La salida de la espera activa y el cambio de la clave no se realizan atómicamente

```
while c2=0 do
  nothing;
enddo;
```

```
c1:= 0;
<<seccion critica>>
c1:= 1;
```

```
end
enddo;
```

### Proceso P2

```
while true do
  begin
    <<resto instrucciones>>
```

```
while c1= 0 do
  nothing;
enddo;
```

```
c2:= 0;
<<seccion critica>>
c2:= 1;
end
enddo;
```

**Problema!: no se cumple la propiedad de seguridad del algoritmo.**

### Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

### Método de refinamiento sucesivo

- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Método de refinamiento sucesivo –III



## 3A Etapa

Adelantando la asignación de la clave la solución es segura

Proceso P1	Proceso P2
<pre>while true do begin   &lt;&lt;resto instrucciones&gt;&gt;   c1:= 0;</pre>	<pre>while true do begin   &lt;&lt;resto instrucciones&gt;&gt;   c2:= 0;</pre>
<pre>  while c2=0 do     nothing;   enddo;</pre>	<pre>  while c1= 0 do     nothing;   enddo;</pre>
<pre>  &lt;&lt;seccion critica&gt;&gt;   c1:= 1;</pre>	<pre>  &lt;&lt;seccion critica&gt;&gt;   c2:= 1;</pre>
<pre>end enddo;</pre>	<pre>end enddo;</pre>

**Nuevo problema!: el proceso que modifica la clave no sabe si el otro hace lo mismo concurrentemente con el**

### Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra

### Método de refinamiento sucesivo

- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Método de refinamiento sucesivo –IV



## 4A Etapa:

### Proceso P1

```
while true do
  begin
    <<resto instrucciones>>
    c1:= 0;
  while c2=0 do
    begin
      c1:= 1;
      while c2= 2 do
        nothing;
      enddo;
      c1:= 0;
    end
  enddo;
  <<seccion critica>>
  c1:= 1;
end
enddo;
```

Para indicar que intenta entrar en S.C., cambia su clave

Comprueba la clave del otro; la vuelve a cambiar si el otro también intenta entrar,

### Proceso P2

```
while true do
  begin
    <<resto instrucciones>>
    c2:= 0;
  while c1= 0 do
    begin
      c2:= 1;
      while c1= 1 do
        nothing;
      enddo;
      c2:= 0;
    end
  enddo;
  <<seccion critica>>
  c2:= 1;
end
enddo;
```

## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra

## Método de refinamiento sucesivo

- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

# Método de refinamiento sucesivo –V



## 5A Etapa: Algoritmo de Dekker

	Proceso P1	Proceso P2
	<pre>while true do   begin     &lt;&lt;resto instrucciones&gt;&gt;     c1:= 0;</pre>	<pre>while true do   begin     &lt;&lt;resto instrucciones&gt;&gt;     c2:= 0;</pre>
El proceso intenta entrar en S.C.		
comprueba la clave del otro	<pre>while c2= 0 do   if turno= 2 then     begin       c1:= 1;       while turno= 2 do         nothing;       enddo;       c1:= 0;     end   endif enddo;</pre>	<pre>while c1= 0 do   if turno= 1 then     begin       c2:= 1;       while turno= 1 do         nothing;       enddo;       c2:= 0;     end   endif enddo;</pre>
si no tiene el turno hace espera activa, despues de cambiar su clave	<pre>&lt;&lt;seccion critica&gt;&gt; turno:= 2; c1:= 1; end enddo;</pre>	<pre>&lt;&lt;seccion critica&gt;&gt; turno:= 1; c2:= 1; end enddo;</pre>

### Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra

### Método de refinamiento sucesivo

- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de



## Verificación de propiedades de seguridad

### Exclusión mutua:

- 1  $P_i$  entra en sección crítica sólo si  $c[j] == 1$
- 2  $P_i$  comprueba la clave del otro,  $c[j]$ , sólo después de asignar su propia clave. Luego, cuando  $P_i$  entra se cumple  $c[j] == 1 \wedge c[i] == 0$

Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Método de refinamiento sucesivo: verificación de propiedades –II

## Verificación de propiedades de seguridad Alcanzabilidad de la sección crítica:

Si  $P_i$  y  $P_j$  intentan entrar en sección crítica y  $\text{turno} == i$ :

- ① si  $P_i$  encuentra la clave del otro  $c[j] == 1$ , entonces  $P_i$  entra;
- ② si no, dependerá de quien tenga el turno:
  - ① si  $\text{turno} == i$  espera que  $P_j$  cambie su clave y, después, entra
  - ② si  $\text{turno} == j$  cambia su clave a 1 y se queda en espera activa

Discusión sobre la *equidad* de la solución dada por el Algoritmo de Dekker



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

### Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Generalización a N procesos: Algoritmo de Dijkstra



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo

## Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

```
c: array[0..n-1] of (pasivo,solicitando,en_SC)
turno: 0.. n-1;
```

```
repeat
```

```
  repeat
```

```
    E2:c[i]:= solicitando;
```

1A barrera  
detiene a los  
procesos si  
el que posee  
el turno no  
esta pasivo

```
  while turno <> i do
    E3:if c[turno]= pasivo
      then turno:= i
    endif;
  enddo;
```

La comprobacion  
del estado del que  
tiene el turno y  
el cambio de este  
no se hace  
atomicamente

Si un grupo de  
procesos se ve  
obligado a ciclar  
nuevamente,  
el que posee el  
turno no puede  
estar pasivo

```
  E4:c[i]:= en_SC;
  j:= 0;
```

2A barrera  
asegura que  
se cumple la  
propiedad  
de seguridad

```
  while(j<n) and (j=i or c[j] <> en_SC) do
    j:= j+1;
  enddo;
until j>= n;
```

```
  <<Seccion Critica>>
```

```
  E1:c[i]:= pasivo;
```

```
  <<Resto de instrucciones>>
```

```
until false
```



# Verificación de las propiedades del A. Dijkstra

## Verificación de las propiedades de seguridad

### Exclusión mutua:

demostración similar a la del A. Dekker

### Alcanzabilidad de la sección crítica:

① `turno` es una variable compartida, será asignada por el último  $P_i$  que cambie su clave,  $c[j] == \text{en\_SC}$

② Sean  $\{P_1 \dots P_i \dots P_m\}$  tales que  $c[i] = \text{en\_SC}$  y  $\text{turno} == k$  con  $1 \leq k \leq m$ , entonces

$P_k$  entrará en su sección en tiempo finito y el resto

$P_i : 1 \leq i \leq m \wedge i \neq k$  se quedará ciclando



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor  
Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores  
Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

### Algoritmos distribuidos para el problema de

# Verificación de las propiedades de vivacidad del A. Dijkstra

El A. Dijkstra satisface seguridad pero no evita el peligro de inanición de los procesos del programa

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los

Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

posición/acción	c[1]	c[2]	c[3]	turno
Inic.: $P_1, P_2, P_3$ en E1	pasivo	pasivo	pasivo	3
$P_1 : E_1 \rightarrow E_2$	solicitando	pasivo	pasivo	3
$P_2 : E_1 \rightarrow E_2$	solicitando	solicitando	pasivo	3
$P_1 : E_2 \rightarrow E_3$	solicitando	solicitando	pasivo	3
$P_2 : E_2 \rightarrow E_3$	solicitando	solicitando	pasivo	3
$P_1 : E_3 \rightarrow E_4$	en_SC	solicitando	pasivo	3
$P_2 : E_3 \rightarrow E_4$	en_SC	en_SC	pasivo	3
...	...	...	...	...

```

c: array[0..n-1] of (pasivo,solicitando,en_SC)
turno: 0..n-1;

repeat
  repeat
    E2:c[i]:= solicitando;

1A barrera          while turno <> i do
detiene a los        E3:if c[turno]= pasivo
procesos si          then turno:= i
el que posee         endif;
el turno no          enddo;
esta pasivo          E4:c[i]:= en_SC;
                     j:= 0;

2A barrera          while (j<n) and (j=i or c[j] <> en_SC) do
asegura que          j:= j+1;
se cumple la         enddo;
propiedad            until j>= n;
de seguridad

<<Seccion Critica>>
E1:c[i]:= pasivo;
<<Resto de instrucciones>>
until false
    
```

La comprobacion del estado del que tiene el turno y el cambio de este no se hace atomicamente

Si un grupo de procesos se ve obligado a ciclar nuevamente, el que posee el turno no puede estar pasivo

# Algoritmo de Knuth para N procesos



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

```
repeat
  repeat
    E0: c[i]:= solicitando;
        j:= turno; --variable local
    E1: while j <> i do
        if c[j] <> pasivo then j:= turno
        else j:= (j-1) MOD n
        endif;
      enddo;
    E2: c[i]:= en_SC;
        k:= 0
        while (k<n) and (k=i pr c[k]<>en_SC) do
          k:= k+1;
        enddo;
    until k>= n;
    E3: turno:= i;
        << Seccion Critica >>
        turno:= (i-1) MOD n;
    E4: c[i]:= pasivo;
    E5: <<resto de instrucciones>>
  until false;
```

1A barrera  
detiene a los  
procesos si  
el que posee  
el turno no está  
pasivo

2A barrera  
asegura que  
se cumple la  
propiedad  
de seguridad

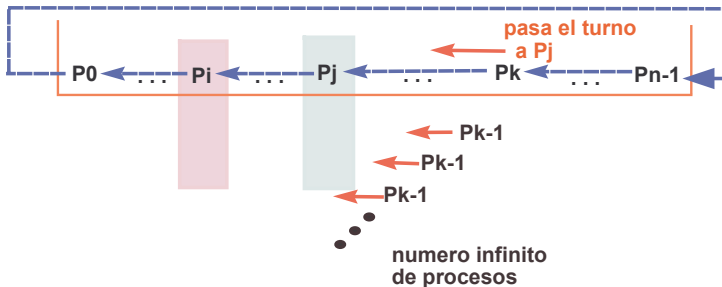
Si un grupo de  
procesos se ve  
obligado a ciclar  
nuevamente,  
el que posee el  
turno no puede  
estar pasivo

# Algoritmo de Knuth para N procesos –II

Imposibilidad de la inanición de los procesos si se supone que existe un número finito de ellos en el algoritmo

Escenario de inanición:  $P_j$  se adelanta continuamente a  $P_i$

Turno circular



numero infinito  
de procesos

Sincronización en  
memoria compartida



Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores  
Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Algoritmo de Knuth para N procesos –III



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

## Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

- Solución totalmente correcta para N procesos

Escenario que muestra la espera maxima para 4 procesos con el A. Knuth

E0:  $\langle P_4 \rangle$   
 $\langle c[i] == \text{solicitando} \rangle$

E1: 1A Barrera

$\langle \text{turno} == i \rangle$

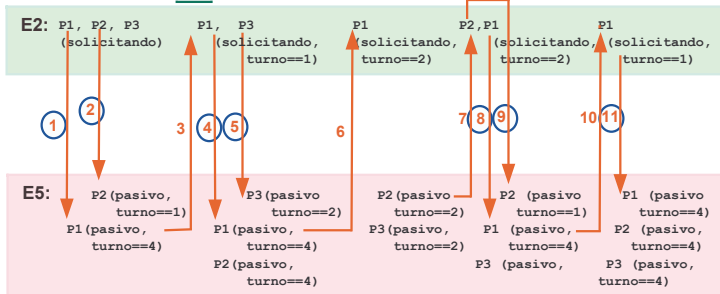
E2:

2A Barrera

$\langle c[i] == \text{pasivo} \rangle$

$\ll \text{Seccion Critica} \gg$

E5:



## Sincronización en memoria compartida

The diagram illustrates the execution of a distributed algorithm with two processes, *a* and *b*, and a shared resource (a yellow triangle).

- Initial State:** Process *a* (purple stick figure) and Process *b* (red stick figure) are shown. Process *a* has a yellow triangle on its right side. Process *b* has a yellow triangle on its right side. A red circle labeled *a* is shown above Process *a*, and a red circle labeled *b* is shown above Process *b*.
- Step 1:** Process *a* performs step 1, setting `turno=a`.
- Step 2:** Process *b* performs step 2, setting `turno=b (final)`.
- Step 3:** Process *a* performs step 3, placing the yellow triangle on a table. Process *b* performs step 3, placing the yellow triangle on a table.

```
Pi:=
...
solicitado[i]:= true; --j=2, i=1
turno:= i;
while (solicitado[j] and turno=i) do
  nothing;
enddo;
<<seccion critica>>
solicitado[i]:= false;
...
```

## Monitores como mecanismo de alto nivel

### Definición de monitor

### Funcionamiento de los monitores

### Sincronización en monitores

### Verificación de monitores

### Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

## El problema de los Lectores/escriutores

### Semántica de las señales de los monitores

### Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

## Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

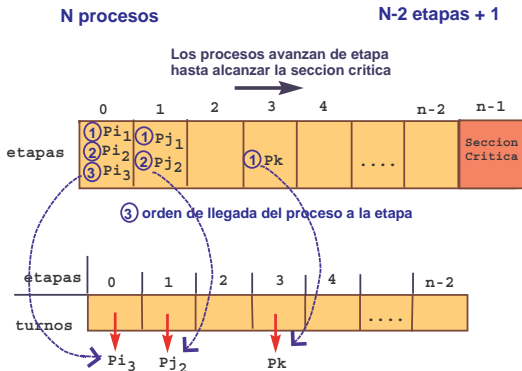
### Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos

## Algoritmo de Peterson-II

# Solución para $N$ procesos - Idea general:



Variables compartidas entre los procesos:

```
type etapas= -1..n-2; var c: array[0..n-1] of etapas;  
procesos= 0..n-1;      turno: array[0..n-2] of procesos;
```

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para  $N$  procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Algoritmo de Peterson-III

## Solución para $N$ procesos



### Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para  $N$  procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

Variables compartidas entre los procesos:

```
var c: array[0..n-1] of -1..n-2;  
    turno: array[0..n-2] of 0..n-1;
```

```

      Pi
      . . .
while true do
  begin
    <<resto de instrucciones>>

    for j=0 to n-2 do
      begin
        c[i]:= j;
        turno[j]:= i;
        while ( (Exists k <> i: c[k] >= j) && turno[j] = i) do
          nothing;
        end;
      enddo;

      c[i]:= n-1; -- metainstruccion
      <<seccion critica>>
      c[i]:= -1;
    end;
  end;
enddo;
```

El proceso en etapa j

El ultimo en llegar se queda con el turno

Bucle de asignacion de etapas a procesos

Indica que se ha llegado a la S.C.; es una etapa ficticia

Etapa inicial de los procesos

No se cumple la condicion si  
(a) el proceso esta en la etapa mas avanzada  
o (b) ha llegado otro proceso despues a la etapa

(Exists k <> i: c[k] >= j) && turno[j] = i



# Verificación de las propiedades del Algoritmo de Peterson



Se dice que  $P_i$  precede a un proceso  $P_j$  si  $c[i] > c[j]$

L1 Un proceso que precede a todos los demás puede avanzar al menos una etapa

**(Exists  $k < i$ :  $c[k] \geq j$ ) && turno[j] = i**

**Ya que no se cumple la condicion del segundo bucle si:**

**(a) el proceso esta en la etapa mas avanzada**

**o (b) ha llegado otro proceso despues a la etapa**

- El proceso  $P_i$  puede ser adelantado en la etapa siguiente
- Podrían llegar más de un proceso a la etapa  $j$
- Pero siempre se cumplirá que  $P_i$  avanzará

Monitores como  
mecanismo de alto  
nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra  
Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de



**L2** Un proceso que pasa de la etapa  $j$  a la  $j+1$  ha de verificar alguna de estas condiciones:

- 1 *Precede a todos los demás*
- 2 *No estaba solo en la etapa  $j$*

- La condición (1) nos sitúa en las condiciones de aplicar el **Lema 1**
- Si (2)  $\Rightarrow \text{turno}[j] \neq i$ , luego al proceso se le unió otro
  - Podría suceder que, justo cuando el proceso vaya a avanzar de etapa
  - porque se cumple la condición (1), se le una otro proceso a su etapa.
  - Pero también se cumplirá

## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para  $N$  procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Verificación de las propiedades del Algoritmo de Peterson-III

Sincronización en  
memoria compartida



**L3** Si existe al menos dos procesos en la etapa  $j$ , entonces existe al menos un proceso en cada una de las etapas anteriores

- *La demostración se hace por inducción sobre la variable que representa la etapa  $j$*

**L4** El número máximo de procesos que puede haber en la etapa  $j$  es  $n-j$ , con  $0 \leq j \leq n-2$

- *La demostración se hace aplicando el **Lema 3***
- *Por tanto, a la etapa  $n-2$  llegarán como máximo 2 procesos*

## Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

## Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

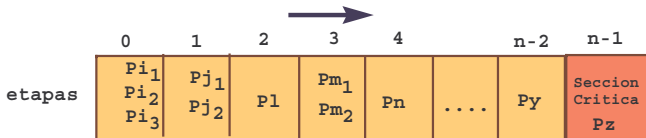
Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para  $N$  procesos

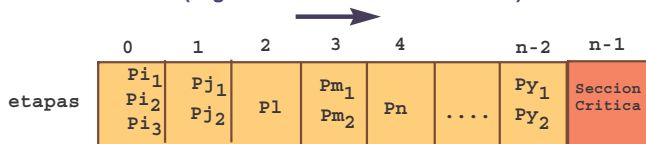
Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Verificación de las propiedades de seguridad del A. Peterson-IV

El algoritmo de Peterson cumple con la exclusion mutua en el acceso a la seccion critica



Py no puede avanzar a la siguiente etapa mientras la seccion critica este ocupada (segun las condiciones del Lema 2)



Segun el Lema 2, solo 1 de los 2 procesos en la etapa (n-2) podra avanzar a la seccion critica

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

## Algoritmo de Peterson-IV

```
var c: array[0..N-1] of -1..N-2;  
    turno: array[0..N-2] of 0..N-1;  
while (true) do  
    begin  
        Resto de las instrucciones;  
(1) for j=0 TO N-2 do  
(2)     begin  
(3)         c[i]:= j;  
(4)         turno[j]:= i;  
(5)         for k=0 TO N-1 do  
(6)             begin  
(7)                 if (k=i) then continue;  
(8)                 while(c[k]>=j and turno[j]=i) do  
(9)                     nothing;  
(10)                enddo;  
(11)            end;  
(12)        end;  
(13) c[i]:= n-1; /*meta-instruccion*/  
(14) <seccion critica>  
(15) c[i]:= -1  
    end
```



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los  
monitores

Sincronización en  
monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con  
monitores

Colas de prioridad

El problema de los  
Lectores/escritores

Semántica de las señales  
de los monitores

Implementación de los  
monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento  
sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y  
problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y  
equidad relativa en el  
acceso a la SC

Solución totalmente  
correcta para N procesos

Algoritmos distribuidos  
para el problema de

# Verificación de propiedades concurrentes adicionales

Sincronización en memoria compartida



## I. Alcanzabilidad de la SC:

### demostración por *reducción al absurdo*

- Todos los procesos se quedan bloqueados al llegar a una etapa y no avanzan más (hipótesis de incorrección)
  - 1 El proceso precede a los demás  $\Rightarrow$  contradice el **Lema 1**
  - 2 Si no, el proceso llega a una etapa ocupada al menos por otro proceso  $\Rightarrow$  se contradice el **Lema 2**

Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

## II. Propiedad de equidad

### demostración:

- El número máximo de turnos que un proceso cualquiera tendría que esperar con el algoritmo de Peterson es de
$$r(n) = n - 1 + r(n - 1) = \frac{n \times (n-1)}{2} \text{ turnos}$$

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Problemática para la implementación de los algoritmos en sistemas distribuidos



## Miscelánea

- Los algoritmos no pueden utilizar sincronización global entre los procesos sólo utilizando variables en memoria compartida
- Se utilizan operaciones atómicas de paso de mensajes para sincronizarlos
- La red de comunicaciones ha de cumplir las siguientes condiciones:
  - 1 Red de comunicaciones completamente conectada
  - 2 Transmisión de mensajes sin errores
  - 3 Retraso variable en la entrega de mensajes con tiempo acotado
  - 4 Posibles *desencuenciamientos* en la entrega de mensajes en transmisión

### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

# Algoritmo de Ricart-Agrawala



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

variables  
locales

## Proceso P(i)

```
ns:0..+INF; mns:0..INF:=0;  
solicitaSC, prioridad:boolean;  
num_reesperadas: 0..n-1;  
repretrasadas:array[1..N]of boolean;
```

Hebra Main(i):=

```
solicitaSC:=true;  
ns:= mns+1;  
num_reesperadas:=n-1;
```

```
for j:=1 to n do  
  if j<>i then  
    send(j,pet,ns,i);
```

```
  endif;  
enddo;
```

```
wait(sinc);  
<<Seccion  
  Critica>>
```

```
solicitaSC:=false;
```

```
for j:=1 to no do  
  if repretrasadas[j]  
  then  
    begin  
      repretrasadas[j]:=false;  
      send(j,rep);  
    end;  
  endif;  
enddo
```

secciones  
de código  
exclusion  
mutua

Hebra Rep(i):=

```
receive(rep);  
num_reesperadas-=1;  
if num_reesperadas=0  
then  
  signal(sinc);  
endif;
```

Hebra Pet(i):

```
receive(pet,k,j)  
mns:=max(ns,k);  
prioridad:=solicitaSC and  
(k>ns or (k=ns and i<j));  
if prioridad then  
  repretrasadas[j]:=true  
else send(j, rep)  
endif;
```



# Algoritmo de Ricart-Agrawala-II



Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

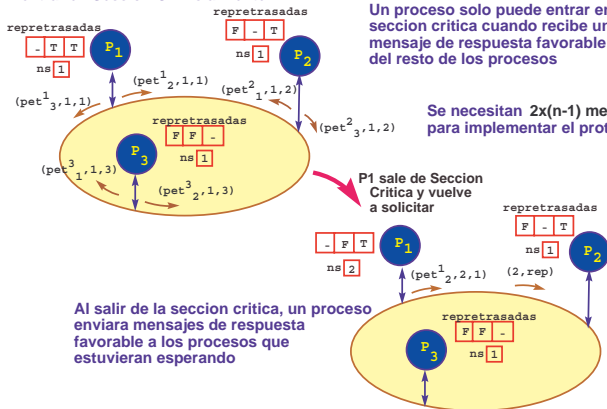
Escenario en el que 3 procesos intentan entrar en Sección C. inicialmente

Un proceso solo puede entrar en seccion critica cuando recibe un mensaje de respuesta favorable del resto de los procesos

Se necesitan  $2x(n-1)$  mensajes para implementar el protocolo

P1 sale de Seccion Critica y vuelve a solicitar

Al salir de la seccion critica, un proceso enviara mensajes de respuesta favorable a los procesos que estuvieran esperando



# Verificación de las propiedades del algoritmo de Ricart-Agrawala

## Exclusión mutua entre procesos al acceder a la sección crítica

- $P_i$  y  $P_j$  consiguen entrar a la vez en S.C. (hipótesis de incorrección)
- $\Leftrightarrow P_{i,j}$  ha transmitido su petición a  $P_{j,i}$ , recibiendo contestación favorable
  - 1  $P_i$  ha enviado contestación favorable antes de generar su número de secuencia  $\Rightarrow P_j$  pospone la respuesta
  - 2  $P_j$  ha enviado contestación favorable antes de generar su número de secuencia  $\Rightarrow P_i$  pospone la respuesta
  - 3 Después de generar su número de secuencia es imposible que cada proceso envíe contestación favorable al otro

## Alcanzabilidad de la sección crítica

Debido a la ordenación total de las peticiones, es imposible que se retrase indefinidamente la contestación favorable a algún proceso



### Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

### Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

# Algoritmo de Suzuki-Kasami-Ricart-Agrawala



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

### Proceso P(i)

#### Variables locales a P(i)

```
token_presente: boolean;  
en_SC: boolean;  
token: array[1..N] of 0..+INF;  
peticion: array[1..N] of 0..+INF;
```

```
Hebra pet(i) ::=  
  receive(pet,k,j);  
  peticion[j] := max(peticion[j],k)  
  if token_presente and  
    not en_SC then  
    for j:=i+1 to n, 1 to i-1 do  
      if peticion[j]>token[j] and  
        token_presente then  
        begin  
          token_presente:= false;  
          send(j,acceso,token);  
        end;  
    end;  
  end;  
enddo
```

secciones  
de código  
exclusión  
mutua

#### Hebra main(i) ::=

```
if NOT token_presente then  
  begin  
    ns:= ns+1;  
    broadcast(pet,ns,i);  
    receive(acceso,token);  
    token_presente:= true;  
  end;  
endif;  
en_SC:=true;
```

```
<<Seccion  
Critica>>  
token[i] := ns;  
en_SC:= false;
```

```
for j:=i+1 to n, 1 to i-1 do  
  if peticion[j]>token[j] and  
    token_presente then  
    begin  
      token_presente:= false;  
      send(j,acceso,token);  
    end;  
  end;  
endif;  
enddo
```

# Verificación del algoritmo de Suzuki-Kasami-Ricart-Agrawala

- El que todo proceso acceda en exclusión mutua es equivalente a demostrar el siguiente aserto: "globalmente, el número de variables *token\_presente* = *true* es idénticamente igual a la unidad"
  - El aserto anterior se satisface inicialmente
  - El aserto anterior se cumple cada vez que se transmite el token. El protocolo necesita  $n$  mensajes.

## Alcanzabilidad de la sección crítica

- Si ningún proceso posee el token, en un momento de la ejecución del algoritmo, este ha de estar necesariamente en transmisión

## Propiedad de equidad

- Se obliga a que  $P_j$  transmita el token al primero que lo solicitó en el orden  $\{j + 1, j + 2, \dots, n, 1, \dots\}$
- ¿Qué pasa si se pierden mensajes?

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para  $N$  procesos

Algoritmos distribuidos para el problema de

# Algoritmo de regeneración de token de Misra

Sincronización en memoria compartida



Monitores como mecanismo de alto nivel

Definición de monitor

Funcionamiento de los monitores

Sincronización en monitores

Verificación de monitores

Patrones de solución con monitores

Colas de prioridad

El problema de los Lectores/escritores

Semántica de las señales de los monitores

Implementación de los monitores

Exclusión mutua

Condiciones de Dijkstra

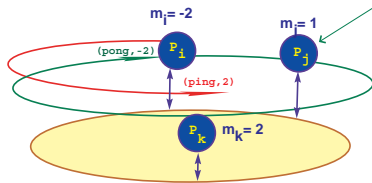
Método de refinamiento sucesivo

Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad

Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC

Solución totalmente correcta para N procesos

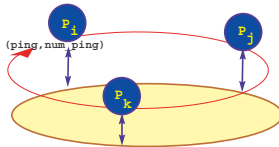
Actualización de tokens



se han encontrado aquí la primera vez

Caso de pérdida de 1 token

$m_i = \text{num\_ping}$



Relacion invariante durante toda la ejecución

$$\text{num\_ping} + \text{num\_pong} = 0$$

Inicialmente, ambos tokens asignados a un solo nodo con:

$$\text{num\_ping} = 1, \text{ num\_pong} = -1$$

# Algoritmo de regeneración de token de Misra-II



## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Proceso (i)

```
while true do      variable local mi: int:=0;
  Seleccionar
  Cuando recibido(ping,num_ping) hacer
    if mi= num_ping then
      begin -- se ha perdido pong, hay que recuperarlo
        num_ping := (num_ping+1)mod n+1;
        num_pong := -num_ping;
      end
    else mi:= num_ping;
  endif;
endhacer;
Cuando recibido(pong,num_pong) hacer
  if mi= num_pong then
    begin -- se ha perdido ping, hay que recuperarlo
      num_pong := -((-num_pong+1)mod n+1);
      num_ping := -num_pong;
    end
  else mi:= num_pong;
endif;
endhacer;
Cuando se encuentran(ping,pong) hacer
  begin -- |num_ping|=|num_pong|,llevan el "num.colisiones"
    num_ping := (num_ping+1)mod n+1;
    num_pong := -num_ping;
  end
endhacer;
endseleccionar;
enddo;
```



**Para más información, ejercicios, bibliografía adicional, o "simplemente inspiración" sobre la temática, se puede consultar:**

## Monitores como mecanismo de alto nivel

- Definición de monitor
- Funcionamiento de los monitores
- Sincronización en monitores
- Verificación de monitores
- Patrones de solución con monitores
- Colas de prioridad
- El problema de los Lectores/escritores
- Semántica de las señales de los monitores
- Implementación de los monitores

## Exclusión mutua

- Condiciones de Dijkstra
- Método de refinamiento sucesivo
- Algoritmo de Dijkstra y problemas de vivacidad
- Algoritmo de Knuth y equidad relativa en el acceso a la SC
- Solución totalmente correcta para N procesos

## Algoritmos distribuidos para el problema de

2.1. Capel-Rodríguez Valenzuela (2012) capítulo 2  
Michel Raynal (1986). Algorithms for mutual exclusion.  
Cambridge: MIT Press.

Andrews (2000) capítulo 5,

Ben Ari (2006) capítulo 7

Michel Raynal (2013). Distributed algorithms for message-passing systems. Springer.

“Concurrency”:

<https://web.archive.org/web/20060128114620/>

<http://vl.fmnet.info/concurrent/>

“Concurrency Talk”:

<http://shairosenfeld.com/concurrency.html>