

Sistemas Concurrentes y Distribuidos: Problemas Resueltos.

Dpt. Lenguajes y Sistemas Informáticos
ETSI Informática y de Telecomunicación
Universidad de Granada

Curso 2023-24



Universidad de Granada

Índice general

1. Introducción	5
Problema 1.	5
Problema 2.	6
Problema 3.	7
Problema 4.	9
Problema 5.	10
Problema 6.	11
Problema 7.	13
Problema 8.	14
Problema 9.	16
2. Sincronización en memoria compartida.	17
Problema 10.	17
Problema 11.	18
Problema 12.	19
Problema 13.	23
Problema 14.	24
Problema 15.	24
Problema 16.	26
Problema 17.	27
Problema 18.	29
Problema 19.	30
Problema 20.	31
Problema 21.	33
Problema 22.	37
Problema 23.	41
Problema 24.	43
Problema 25.	46
Problema 26.	47
Problema 27.	49

Problema 28.	50
3. Sistemas basados en paso de mensajes.	55
Problema 29.	55
Problema 30.	56
Problema 31.	56
Problema 32.	58
Problema 33.	60
Problema 34.	61
Problema 35.	62
Problema 36.	64
Problema 37.	65
Problema 38.	66
Problema 39.	68
Problema 40.	69
Problema 41.	70
Problema 42.	71
Problema 43.	71
Problema 44.	73
4. Sistemas de Tiempo Real.	75
Problema 45.	75
Problema 46.	76
Problema 47.	77
Problema 48.	78
Problema 49.	79
Problema 50.	80
Problema 51.	81

1

Considerar el siguiente fragmento de programa para 2 procesos P_1 y P_2 :

Los dos procesos pueden ejecutarse a cualquier velocidad. ¿Cuáles son los posibles valores resultantes para x ? Suponer que x debe ser cargada en un registro para incrementarse y que cada proceso usa un registro diferente para realizar el incremento.

```
{ variables compartidas }
var x : integer := 0 ;
```

```
process P1 ;
  var i : integer ;
begin
  for i := 1 to 2 do begin
    x := x+1 ;
  end
end
```

```
process P2 ;
  var j : integer ;
begin
  for j := 1 to 2 do begin
    x := x+1 ;
  end
end
```

Respuesta

Los valores posibles son 2, 3 y 4. Suponemos que no hay optimizaciones al compilar y que por tanto cada proceso hace dos lecturas y dos escrituras de x en memoria. La respuesta se basa en los siguientes tres hechos:

- el valor resultante no puede ser inferior a 2 pues cada proceso incrementa x dos veces en secuencia partiendo de cero, la primera vez que un proceso lee la variable lee un 0 como mínimo, y la primera vez que la escribe como mínimo 1, la segunda vez que ese mismo proceso lee, lee como mínimo un 1 y finalmente escribe como mínimo un 2.
- el valor resultante no puede ser superior a 4. Para ello sería necesario realizar un total de 5 o más incrementos de la variable, cosa que no ocurre pues se realizan únicamente 4.
- existen posibles secuencias de interfoliación que producen los valores 2,3 y 4, damos ejemplos de cada uno de los casos:

resultado 2: se produce cuando todas las lecturas y escrituras de un proceso i se ejecutan completamente entre la segunda lectura y la segunda escritura del otro proceso j . La segunda lectura de j lee un 1 y escribe un 2, siendo esta escritura la última en realizarse y por tanto la que determina el valor de x

resultado 3: se produce cuando los dos procesos leen y escriben x por primera vez de forma simultánea, quedando x a 1. Los otros dos incrementos se producen en secuencia (un proceso escribe antes de que lea el otro), lo cual deja la variable a 3.

resultado 4: se produce cuando un proceso hace la segunda escritura antes de que el otro haga su primera lectura. Es evidente que el valor resultado es 4 pues todos los incrementos se hacen secuencialmente.

2

¿Cómo se podría hacer la copia del fichero f en otro g , de forma concurrente, utilizando la instrucción concurrente `cobegin-coend`? Para ello, suponer que:

- los archivos son secuencia de ítems de un tipo arbitrario T , y se encuentran ya abiertos para lectura (f) y escritura (g). Para leer un ítem de f se usa la llamada a función `leer(f)` y para saber si se han leído todos los ítems de f , se puede usar la llamada `fin(f)` que devuelve verdadero si ha habido al menos un intento de leer cuando ya no quedan datos. Para escribir un dato x en g se puede usar la llamada a procedimiento `escribir(g, x)`.
- El orden de los ítems escritos en g debe coincidir con el de f .
- Dos accesos a dos archivos distintos pueden solaparse en el tiempo.

Para ilustrar como se accede a los archivos, aquí se encuentra una versión secuencial del código que copia f sobre g :

```
process CopiaSecuencial ;
  var v : T ;
begin
  v := leer(f) ;    { lectura adelantada }
  while not fin(f) do
    begin
      escribir(g, v) ; { leer de la variable v y escribir en el archivo g }
      v := leer(f) ;  { leer del archivo f y escribir variable v }
    end
  end
end
```

Respuesta

Los ítems deben ser escritos en secuencia para conservar el orden, así que la lectura y la escritura puede hacerse en un bucle secuencial. Sin embargo, se puede solapar en el tiempo la escritura de un ítem leído y la lectura del siguiente, y por tanto en cada iteración se usará un `cobegin-coend` con la lectura solapada con la escritura.

La solución más obvia sería usar una variable v (compartida entre la lectura y la escritura) para esto, es decir, usar en cada iteración la solución que aparece en la figura de la izquierda. El problema es que en esta solución la variable v puede ser accedida simultáneamente por la escritura y la lectura concurrentes, que podrían interferir entre ellas, así que es necesario usar dos variables. El esquema correcto quedaría como aparece en la figura de la derecha.

```

process CopiaConcurrenteMal ;
  var v : T ;
begin
  v := leer(f) ;
  while not fin(f) do
    cobegin
      escribir(g,v) ;
      v := leer(f) ;
    coend
  end
end

```

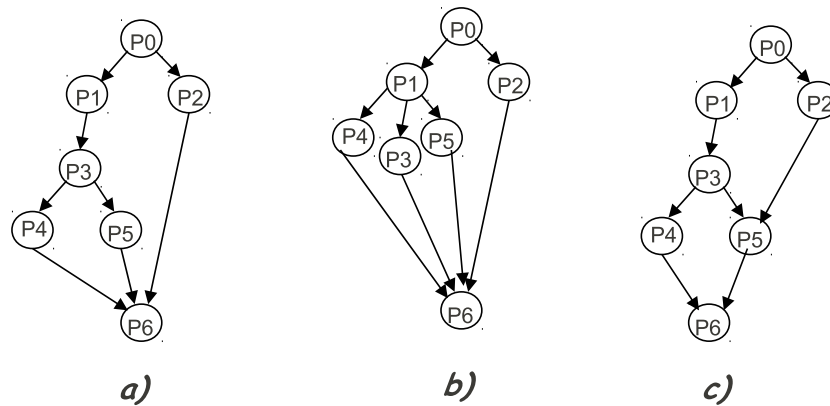
```

process CopiaConcurrente ;
  var v_ant, v_sig : T ;
begin
  v_sig := leer(f) ;
  while not fin(f) do begin
    v_ant := v_sig ;
    cobegin
      escribir(g,v_ant) ;
      v_sig := leer(f) ;
    coend
  end
end
end

```

3

Construir, utilizando las instrucciones concurrentes **cobegin-coend** y **fork-join**, programas concurrentes que se correspondan con los grafos de precedencia que se muestran a continuación:



Respuesta

A continuación incluimos, para cada grafo, las instrucciones concurrentes usando **cobegin-coend** (izquierda) y **fork-join** (derecha)

(a)

```

begin
  P0 ;
  cobegin
    begin
      P1 ; P3 ;
      cobegin
        P4 ; P5 ;
      coend
    end
    P2 ;
  coend
  P6 ;
end

```

```

begin
  P0 ; fork P2 ;
  P1 ; P3 ; fork P4 ; fork P5 ;
  join P2 ; join P4 ; join P5 ;
  P6 ;
end

```

(b)

```

begin
  P0 ;
  cobegin
    begin
      P1 ;
      cobegin
        P3 ; P4 ; P5 ;
      coend
    end
    P2 ;
  coend
  P6 ;
end

```

```

begin
  P0 ; fork P2 ;
  P1 ; fork P3 ; fork P4 ; fork P5 ;
  join P2 ; join P3 ;
  join P4 ; join P5 ;
  P6 ;
end

```

(c) en este caso, **cobegin-coend** no permite expresar el simultáneamente el paralelismo potencial que hay entre **P4** y **P2** y el que hay entre **P4** y **P5**, mientras **fork-join** sí permite expresar todos los paralelismos presentes (es más flexible).

```

begin
  P0 ;
  cobegin
    begin
      P1 ; P3 ;
    end
    P2 ;
  coend
  cobegin
    P4 ; P5 ;
  coend
  P6 ;
end

```

```

begin
  P0 ;
  cobegin
    begin
      P1 ; P3 ; P4 ;
    end ;
    P2 ;
  coend
  P5 ; P6 ;
end

```

```

begin
  P0 ; fork P2 ;
  P1 ;
  P3 ; fork P4 ;
  join P2 ;
  P5 ;
  join P4 ;
  P6 ;
end

```


4

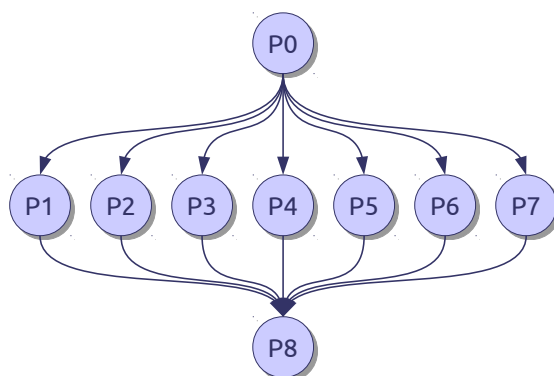
Dados los siguientes fragmentos de programas concurrentes, obtener sus grafos de precedencia asociados:

```
begin
  P0 ;
  cobegin
    P1 ;
    P2 ;
    cobegin
      P3 ; P4 ; P5 ; P6 ;
    coend
    P7 ;
  coend
  P8 ;
end
```

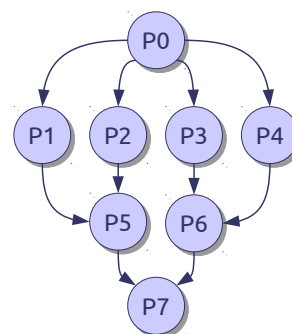
```
begin
  P0 ;
  cobegin
    begin
      cobegin
        P1;P2;
      coend
      P5;
    end
    begin
      cobegin
        P3;P4;
      coend
      P6;
    end
  coend
  P7 ;
end
```

Respuesta

En el caso a), anidar un bloque **cobegin-coend** dentro de otro, sin incluir ningún componente adicional en secuencia, tiene el mismo efecto que incluir directamente en el bloque externo las instrucciones del interno. Esta no es la situación en el caso b), donde las construcciones **cobegin-coend** anidadas son necesarias para reflejar ciertas dependencias entre actividades.



(a)



(b)

5

Suponer un sistema de tiempo real que dispone de un captador de impulsos conectado a un contador de energía eléctrica. La función del sistema consiste en contar el número de impulsos producidos en 1 hora (cada Kwh consumido se cuenta como un impulso) e imprimir este número en un dispositivo de salida.

Para ello se dispone de un programa concurrente con 2 procesos: un proceso acumulador (lleva la cuenta de los impulsos recibidos) y un proceso escritor (escribe en la impresora). En la variable común a los 2 procesos **n** se lleva la cuenta de los impulsos. El proceso acumulador puede invocar un procedimiento **Espera_impulso** para esperar a que llegue un impulso, y el proceso escritor puede llamar a **Espera_fin_hora** para esperar a que termine una hora.

El código de los procesos de este programa podría ser el siguiente:

```
{ variable compartida: }
var n : integer; { contabiliza impulsos }

process Acumulador ;
begin
  while true do begin
    Espera_impulso();
    < n := n+1 > ; { (1) }
  end
end

process Escritor ;
begin
  while true do begin
    Espera_fin_hora();
    write( n ) ; { (2) }
    < n := 0 > ; { (3) }
  end
end
```

En el programa se usan sentencias de acceso a la variable **n** encerradas entre los símbolos < y >. Esto significa que cada una de esas sentencias se ejecuta en exclusión mutua entre los dos procesos, es decir, esas sentencias se ejecutan de principio a fin sin entremezclarse entre ellas.

Supongamos que en un instante dado el acumulador está esperando un impulso, el escritor está esperando el fin de una hora, y la variable **n** vale k . Después se produce de forma simultánea un nuevo impulso y el fin del período de una hora. Obtener las posibles secuencias de interfoliación de las instrucciones (1),(2), y (3) a partir de dicho instante, e indicar cuales de ellas son correctas y cuales incorrectas (las incorrectas son aquellas en las cuales el impulso no se contabiliza).

Respuesta

Supongamos que hay una variable entera (ficticia) llamada **OUT**, que se crea al terminar el **write** (sentencia (2)) y tiene el valor impreso (esto permite incluir en el estado del programa dicho valor impreso).

En el estado de partida, se cumple $n=k$, y a partir de ahí pueden ocurrir tres interfoliaciones posibles de las sentencias etiquetadas con los dígitos 1,2, y 3. Estas interfoliaciones son: (a) 1,2,3, (b) 2,1,3 y (c) 2,3,1.

Para cada interfoliación podemos considerar los valores de las variables en cada estado al final de cada sentencia, y podemos examinar el estado final, esto es, el valor con el que queda **n** y el valor impreso (el valor de **OUT**).

(a)

Instr.	n	OUT
	k	
$n := n+1$	$k+1$	
write (n)	$k+1$	$k+1$
$n := 0$	0	$k+1$

(b)

Instr.	n	OUT
	k	
write (n)	k	k
$n := n+1$	$k+1$	k
$n := 0$	0	k

(c)

Instr.	n	OUT
	k	
write (n)	k	k
$n := 0$	0	k
$n := n+1$	1	k

Son correctas únicamente las interfoliaciones en las cuales en el estado final se cumple:

$$\text{OUT} + n == k + 1$$

es decir, el valor impreso más el valor de contador es igual al número total de impulsos producidos desde que comenzó la hora que acaba. Evidentemente, las interfoliaciones (a) y (c) son **correctas**, mientras que la (b) es **incorrecta**.

6

Supongamos un programa concurrente en el cual hay, en memoria compartida dos vectores **a** y **b** de enteros y con tamaño par, declarados como sigue:

```
var a,b : array[0..2*n-1] of integer ; { n es una constante predefinida (>2) }
```

Queremos escribir un programa para obtener en **b** una copia ordenada del contenido de **a** (nos da igual el estado en que queda **a** después de obtener **b**).

Para ello disponemos de la función **Sort** que ordena un tramo de **a** (entre las entradas **s**, incluida, y **t**, no incluida), usando el método de la burbuja. También disponemos la función **Copiar**, que copia un tramo de **a** (desde **s**, incluido, hasta **t**, sin incluir) sobre **b** (a partir de **o**).

```
procedure Sort( s,t : integer );
  var i, j : integer ;
begin
  for i := s to t-1 do
    for j := s+1 to t-1 do
      if a[i] < a[j] then
        swap( a[i], a[j] ) ;
    end
  end
end
```

```
procedure Copiar( o,s,t : integer );
  var d : integer ;
begin
  for d := 0 to t-s-1 do
    b[o+d] := a[s+d] ;
  end
end
```

La función **swap** intercambia dos variables. El programa para ordenar se puede implementar de dos formas:

- Ordenar todo el vector **a**, de forma secuencial con la función **Sort**, y después copiar cada entrada de **a** en **b**, con la función **Copiar**.
- Ordenar las dos mitades de **a** de forma concurrente, y después mezclar dichas dos mitades en un segundo vector **b** (para mezclar usamos un procedimiento **Merge**).

A continuación vemos el código de ambas versiones:

```
procedure Secuencial() ;
  var i : integer ;
begin
  Sort( 0, 2*n );      { ordena a }
  Copiar( 0, 0, 2*n ); { copia a en b }
end
```

```
procedure Concurrente() ;
begin
  cobegin
    Sort( 0, n );
    Sort( n, 2*n );
  coend
  Merge( 0, n, 2*n );
end
```

El código de **Merge** se encarga de ir leyendo las dos mitades de **a**. En cada paso primero se selecciona el menor elemento de los dos siguientes por leer (uno en cada mitad), y después se escribe dicho menor elemento en la siguiente mitad del vector mezclado **b**. Al acabar este bucle, será necesario copiar el resto de elementos no leídos de una de las dos mitades. El código es el siguiente:

```
procedure Merge( inferior, medio, superior: integer ) ;
  var escribir : integer := 0 ;      { siguiente posicion a escribir en b }
  var leer1    : integer := inferior ; { siguiente pos. a leer en primera mitad de a }
  var leer2    : integer := medio    ; { siguiente pos. a leer en segunda mitad de a }
begin
  { mientras no haya terminado con alguna mitad }
  while leer1 < medio and leer2 < superior do begin
    if a[leer1] < a[leer2] then begin { minimo en la primera mitad }
      b[escribir] := a[leer1] ;
      leer1 := leer1 + 1 ;
    end else begin { minimo en la segunda mitad }
      b[escribir] := a[leer2] ;
      leer2 := leer2 + 1 ;
    end
    escribir := escribir+1 ;
  end
  { se ha terminado de copiar una de las mitades, copiar lo que quede de la otra }
  if leer2 >= superior then Copiar( escribir, leer1, medio ) ; { copiar primera }
  else Copiar( escribir, leer2, superior ) ; { copiar segunda }
end
```

Llamaremos $T_s(k)$ al tiempo que tarda el procedimiento **Sort** cuando actúa sobre un segmento del vector con k entradas. Suponemos que el tiempo que (en media) tarda cada iteración del bucle interno que hay en **Sort** es la unidad (por definición). Es evidente que ese bucle tiene $k(k-1)/2$ iteraciones, luego:

$$T_s(k) = \frac{k(k-1)}{2} = \frac{1}{2}k^2 - \frac{1}{2}k$$

El tiempo que tarda la versión secuencial sobre $2n$ elementos (llamaremos S a dicho tiempo) será el tiempo de **Sort** ($T_s(2n)$) más el tiempo de **Copiar** (que es $2n$, pues copiar un elemento tarda una unidad de tiempo), luego

$$S = T_s(2n) + 2n = \frac{1}{2}(2n)^2 - \frac{1}{2}(2n) + 2n = 2n^2 + n$$

con estas definiciones, calcula el tiempo que tardará la versión paralela, en dos casos:

- (1) Las dos instancias concurrentes de **Sort** se ejecutan en el mismo procesador (llamamos P_1 al tiempo que tarda).
- (2) Cada instancia de **Sort** se ejecuta en un procesador distinto (lo llamamos P_2)

escribe una comparación cualitativa de los tres tiempos (S, P_1 y P_2).

Para esto, hay que suponer que cuando el procedimiento **Merge** actúa sobre un vector con p entradas, tarda p unidades de tiempo en ello, lo cual es razonable teniendo en cuenta que en esas circunstancias **Merge** copia p valores desde **a** hacia **b**. Si llamamos a este tiempo $T_m(p)$, podemos escribir

$$T_m(p) = p$$

Respuesta (privada)

- (1) Sobre un procesador el coste total de la versión paralela (P_1) sería el de dos ordenaciones secuenciales de n elementos cada una, (es decir $2T_s(n)$), más el coste de la mezcla secuencial (que es $T_m(2n)$), esto es:

$$P_1 = 2T_s(n) + T_m(2n) = (n^2 - n) + 2n = n^2 + n$$

Si comparamos $P_1 = n^2 + n$ con $S = 2n^2 + n$, vemos que, aun usando un único procesador en ambos casos, para valores de n grandes la versión potencialmente paralela tarda la mitad de tiempo que la secuencial.

- (2) Sobre dos procesadores, el coste de la versión paralela (P_2) será el de la ejecución concurrente de dos versiones de **Sort** iguales sobre n elementos cada una, por tanto, será igual a $T_s(n)$. Después, la mezcla se hace en un único procesador y tarda lo mismo que antes, $T_m(2n)$, luego:

$$P_2 = T_s(n) + T_m(2n) = \left(\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n\right) + 2n = \frac{1}{2}n^2 + \frac{3}{2}n$$

ahora vemos que (de nuevo para n grande), el tiempo P_2 es aproximadamente la mitad de P_1 , como era de esperar (ya que se usan dos procesadores), y por supuesto P_2 es aproximadamente la cuarta parte de S .

7

Supongamos que tenemos un programa con tres matrices (**a**, **b** y **c**) de valores flotantes declaradas como variables globales. La multiplicación secuencial de **a** y **b** (almacenando el resultado en **c**) se puede hacer mediante un procedimiento **MultiplicacionSec** declarado como aparece aquí:

```

var a, b, c : array[1..3,1..3] of real ;

procedure MultiplicacionSec()
  var i,j,k : integer ;
begin
  for i := 1 to 3 do
    for j := 1 to 3 do begin
      c[i,j] := 0 ;
      for k := 1 to 3 do
        c[i,j] := c[i,j] + a[i,k]*b[k,j] ;
      end
    end
  end
end

```

Escribir un programa con el mismo fin, pero que use 3 procesos concurrentes. Suponer que los elementos de las matrices **a** y **b** se pueden leer simultáneamente, así como que elementos distintos de **c** pueden escribirse simultáneamente.

Respuesta (privada)

Para implementar el programa, haremos que cada uno de esos 3 procesos concurrentes (llamados **CalcularFila**) calcule y escriba un conjunto distinto de entradas de **c**. Por simplicidad (y equidad entre los procesos), lo más conveniente es hacer que cada uno de ellos calcule una fila de **c** (o cada uno de ellos una columna)

```

var a, b, c : array [1..3,1..3] of real ;

process CalcularFila[ i : 1..3 ] ;
  var j, k : integer ;
begin
  for j := 1 to 3 do begin
    c[i,j] := 0 ;
    for k := 1 to 3 do
      c[i,j] := c[i,j] + a[i,k]*b[k,j] ;
    end
  end
end

```

8

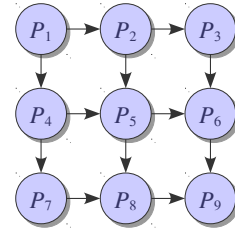
Un trozo de programa ejecuta nueve rutinas o actividades (P_1, P_2, \dots, P_9), repetidas veces, de forma concurrentemente con **cobegin coend** (ver la figura de la izquierda), pero que requieren sincronizarse según determinado grafo (ver la figura de la derecha):

Trozo de programa:

```

while true do
cobegin
  P1 ; P2 ; P3 ;
  P4 ; P5 ; P6 ;
  P7 ; P8 ; P9 ;
coend

```

Grafo de sincronización:

Supón que queremos realizar la sincronización indicada en el grafo, usando para ello llamadas desde cada rutina a dos procedimientos (**EsperarPor** y **Acabar**). Se dan los siguientes hechos:

- El procedimiento **EsperarPor**(*i*) es llamado por una rutina cualquiera (la número *k*) para esperar a que termine la rutina número *i*, usando espera ocupada. Por tanto, se usa por la rutina *k* al inicio para esperar la terminación de las otras rutinas que corresponda según el grafo.
- El procedimiento **Acabar**(*i*) es llamado por la rutina número *i*, al final de la misma, para indicar que dicha rutina ya ha finalizado.
- Ambos procedimientos pueden acceder a variables globales en memoria compartida.
- Las rutinas se sincronizan única y exclusivamente mediante llamadas a estos procedimientos, siendo la implementación de los mismos completamente transparente para las rutinas.

Escribe una implementación de **EsperarPor** y **Acabar** (junto con la declaración e inicialización de las variables compartidas necesarias) que cumpla con los requisitos dados.

Respuesta (privada)

Una posible solución consiste en usar un vector de valores lógicos que indican si cada proceso ha terminado o no. Hay que tener en cuenta que, puesto que la ejecución concurrente de todas las rutinas está en un bucle, dicho vector debe reiniciarse entre una iteración del bucle y la siguiente. Para ello realizamos dicha reiniciación cuando el proceso 9 (el último) señale que ha acabado (en **Acabar**). La implementación queda como sigue:

```

{ compartido entre todas las tareas }
var finalizado : array [1..9] of boolean := (false, false, ..., false) ;

procedure EsperarPor( i : integer )
begin
  while not finalizado[i] do
    begin end
end

procedure Acabar( i : integer )
var j : integer ;
begin
  if i < 9 then
    finalizado[i] := true ;
  else
    for j := 1 to 9 do
      finalizado[j] := false ;
    end
end

```

9

En el problema anterior los procesos P_1, P_2, \dots, P_9 se ponen en marcha usando `cobegin/coend`. Escribe un programa equivalente, que ponga en marcha todos los procesos, pero que use declaración estática de procesos, usando un vector de procesos P , con índices desde 1 hasta 9, ambos incluidos. El proceso $P[n]$ contiene una secuencia de instrucciones desconocida, que llamamos S_n , y además debe incluir las llamadas necesarias a `Acabar` y `EsperarPor` (con la misma implementación que antes) para lograr la sincronización adecuada. Se incluye aquí un plantilla:

```
Process P[ n : 1..9 ]
begin
    ..... { esperar (si es necesario) a los procesos que corresponda }
    Sn ;   { sentencias específicas de este proceso (desconocidas) }
    ..... { señalar que hemos terminado }
end
```

Respuesta (privada)

Esta es una posible implementación. El proceso de índice n tiene *arriba* al proceso $n-3$ (*arriba* según se ha escrito el pseudo-código en el enunciado del problema anterior), pero esto solo ocurre si el proceso no está en la primera fila, es decir, solo si n es mayor estricto que 3). Además, el proceso n tiene a su izquierda al proceso de índice $n-1$ (pero solo si n no está en la primera columna, es decir, solo si el valor $n-1$ no es múltiplo de 3, equivalente a que al reducir $n-1$ módulo 3, de un valor mayor que 0). Por tanto, el código es como sigue:

```
process P[ n : 1..9 ]
begin
    { comprobamos qué procesos debemos esperar en función de 'n' }
    if n>3 then EsperarPor( n-3 ); { esperamos proceso de arriba }
    if n-1 mod 3 > 0 then EsperarPor( n-1 ); { esperamos proceso de la izqda. }

    Sn ;           { sentencias específicas de este proceso (desconocidas) }
    Acabar( n );   { señalar que hemos terminado }
end
```


Sincronización en memoria compartida.

10

¿Podría pensarse que una posible solución al problema de la exclusión mutua, sería el siguiente algoritmo que no necesita compartir una variable **Turno** entre los 2 procesos?

- (a) ¿Se satisface la exclusión mutua?
- (b) ¿Se satisface la ausencia de interbloqueo?

{ variables compartidas y valores iniciales }

var **b0** : boolean := **false** , { true si P0 quiere acceder o está en SC }
b1 : boolean := **false** ; { true si P1 quiere acceder o está en SC }

<pre> 1 Process P0 ; 2 begin 3 while true do begin 4 { protocolo de entrada: } 5 b0 := true ; {indica quiere entrar} 6 while b1 do begin {si el otro también: } 7 b0 := false ; {cede temporalmente} 8 while b1 do begin end {espera } 9 b0 := true ; {vuelve a cerrar paso} 10 end 11 { seccion critica } 12 { protocolo de salida } 13 b0 := false ; 14 { resto sentencias } 15 end 16 end </pre>	<pre> 1 process P1 ; 2 begin 3 while true do begin 4 { protocolo de entrada: } 5 b1 := true ; {indica quiere entrar} 6 while b0 do begin {si el otro también: } 7 b1 := false ; {cede temporalmente} 8 while b0 do begin end {espera } 9 b1 := true ; {vuelve a cerrar paso} 10 end 11 { seccion critica } 12 { protocolo de salida } 13 b1 := false ; 14 { resto sentencias } 15 end 16 end </pre>
---	---

Respuesta (privada)

(a) ¿ Se satisface la exclusión mutua ?

Sí se satisface.

Para verificar si se cumple, supongamos que no es así e intentemos llegar a una contradicción. Por tanto, supongamos que ambos procesos están en la sección crítica en un instante t . La última acción de ambos antes de acceder a SC es leer (atómicamente) la variable del otro, y ver que está a **false** (en la línea 5). Sin pérdida de generalidad, asumiremos que el proceso **P0** realizó esa lectura antes que el **P1** (en caso contrario se intercambian los papeles de los procesos, ya que son simétricos). Es decir, el proceso **P0** tuvo que leer **false** en **b1**, en un instante que llamaremos s , con $s < t$. A partir de s , la variable **b0** contiene el valor **true**, pues el proceso **P0** es el único que la escribe y entre s y t dicho proceso está en SC y no la modifica.

En s el proceso **P1** no podía estar en RS, ya que entonces no podría haber entrado a SC entre s y t (ya que **b0** es **true** siempre después s), luego concluimos que en s el proceso **P1** estaba en el PE. Más en concreto, el proceso **P1** estaba (en el instante s) forzosamente en el bucle de la línea 6, ya que en otro caso **b1** sería **true** en s , cosa que no ocurrió.

Pero si el proceso 1 estaba (en s) en el bucle de la línea 7, y a partir de s **b0** es **true**, entonces el proceso **P1** no pudo entrar a SC después de s y antes de t , lo cual es una contradicción con la hipótesis de partida (ambos procesos en SC), que por tanto no puede ocurrir.

(b) ¿ Se satisface la ausencia de interbloqueo ?

No se satisface. Para verificarlo, veremos que existe al menos una posible interfoliación de intrucciones atómicas en la cual ambos procesos quedan indefinidamente en el protocolo de entrada.

Entre las líneas 5 y 9, cada proceso i permite pasar a SC al otro proceso j . Sin embargo, para garantizar exclusión mútua, cada proceso i cierra temporalmente el paso al proceso j mientras i está haciendo la lectura de la línea 4. Por tanto, puede ocurrir interbloqueo si ambos procesos están en PE, pero cada uno de ellos comprueba siempre que puede pasar justo cuando el otro le ha cerrado el paso temporalmente.

Esto puede ocurrir partiendo de una situación en la cual ambos procesos están en el bucle de la línea 7. Como ambas condiciones son forzosamente falsas, ambos pueden abandonarlo, ejecutando ambos la asignación de la línea 8 y la lectura de la línea 5 antes de que ninguno de ellos haga la asignación de la línea 6. Por tanto las dos condiciones de la línea 5 se cumplen cuando se comprueban y ambos vuelven a entrar en el bucle de la línea 7. A partir de aquí se repite la interfoliación descrita en este párrafo, lo cual puede ocurrir indefinidamente.

11

Al siguiente algoritmo se le conoce como solución de Hyman al problema de la exclusión mutua. ¿Es correcta dicha solución?

{ variables compartidas y valores iniciales }	
var	c0 : integer := 1 ;
	c1 : integer := 1 ;
	turno : integer := 1 ;

process P0 ;	process P1 ;
begin	begin
while true do begin	while true do begin
c0 := 0 ;	c1 := 0 ;
while turno != 0 do begin	while turno != 1 do begin
while c1 = 0 do begin end	while c0 = 0 do begin end
turno := 0 ;	turno := 1 ;
end	end
{ seccion critica }	{ seccion critica }
c0 := 1 ;	c1 := 1 ;
{ resto sentencias }	{ resto sentencias }
end	end
end	end

Respuesta (privada)

No es correcta.

Este algoritmo fue publicado¹ por Hyman en 1966, en la creencia que era correcto, y como una simplificación del algoritmo de Dijkstra. Después se vio que no era así. En concreto, no se cumple exclusión mutua ni espera limitada:

- **Exclusión mutua:** existe una secuencia de interfoliación que permite que ambos procesos se encuentren en la sección crítica simultáneamente. Llamemos I a un intervalo de tiempo (necesariamente finito) durante el cual el proceso 0 ha terminado el bucle de la línea 6 pero aún no ha realizado la asignación de la línea 7. Supongamos que, durante I , **turno** vale 1 (esto es perfectamente posible). En este caso, durante I el proceso 1 puede entrar y salir en la SC un número cualquiera de veces sin espera alguna y en particular puede estar en SC al final de I . En estas condiciones, al finalizar I el proceso 0 realiza la asignación de la línea 7 y la lectura de la línea 5, ganando acceso a la SC al tiempo que el proceso 1 puede estar en ella.
- **Espera limitada:** supongamos que **turno**=1 y el proceso 0 está en espera en el bucle de la línea 6. Puede dar la casualidad de que, en esas circunstancias, el proceso 1 entre y salga de SC indefinidamente, y por tanto el valor de **c1** va alternando entre 0 y 1, pero puede ocurrir que lo haga de forma tal que siempre que el proceso 0 lea **c1** lo encuentre a 0. De esta manera, el proceso 0 queda indefinidamente postergado mientras el proceso 1 avanza.

12

Se tienen 2 procesos concurrentes que representan 2 máquinas expendedoras de tickets (señalan el turno en que ha de ser atendido el cliente), los números de los tickets se representan por dos variables **n1** y **n2** que valen inicialmente 0. El proceso con el número de ticket más bajo entra en su sección crítica. En caso de tener 2 números iguales se procesa primero el proceso número 1.

- a) Demostrar que se verifica la ausencia de interbloqueo (progreso), la ausencia de inanición (espera limitada) y la exclusión mutua.
- b) Demostrar que las asignaciones **n1** := 1 y **n2** := 1 son ambas necesarias. Para ello

¹<http://dx.doi.org/10.1145/365153.365167>

```
{ variables compartidas y valores iniciales }
var n1 : integer := 0 ;
    n2 : integer := 0 ;
```

```
process P1 ;
begin
  while true do begin
    n1 := 1 ; { E1.1 }
    n1 := n2+1 ; { L1.1;E2.1 }
    while n2 != 0 and { L2.1 }
      n2 < n1 do begin end; { L3.1 }
    { seccion critica } { SC.1 }
    n1 := 0 ; { E3.1 }
    { resto sentencias } { RS.1 }
  end
end
```

```
process P2 ;
begin
  while true do begin
    n2 := 1 ; { E1.2 }
    n2 := n1+1 ; { L1.2;E2.2 }
    while n1 != 0 and { L2.2 }
      n1 <= n2 do begin end; { L3.2 }
    { seccion critica } { SC.2 }
    n2 := 0 ; { E3.2 }
    { resto sentencias } { RS.2 }
  end
end
```

Respuesta (privada)

Apartado (a)

Demostremos la ausencia de interbloqueo (progreso), la ausencia de inanición (espera limitada) y la exclusión mutua.

(a.1) ausencia de interbloqueo

El interbloqueo es imposible. Supongamos que hay interbloqueo, es decir que los dos procesos están en sus bucles de espera ocupada de forma indefinida en el tiempo, haciendo las lecturas en L2 y L3 continuamente. Entonces siempre se cumplen las dos condiciones de dichos bucles (ya que las variables no cambian de valor), y por tanto siempre se cumple la conjunción de ambas, que es:

$$n1 \neq 0 \quad \text{and} \quad n2 \neq 0 \quad \text{and} \quad n2 < n1 \quad \text{and} \quad n1 \leq n2$$

tanto se cumple $n2 < n1$ and $n1 \leq n2$, lo cual es imposible.

(a.2) ausencia de inanición

Supongamos que el proceso **P1** está en espera ocupada (en el bucle del PE) durante un intervalo T y comprobemos cuantas veces puede entrar **P2** a SC durante T (al razonamiento al contrario es similar).

En el intervalo T se cumple $n1 > 0$. El proceso **P2** puede entrar a SC una vez. Si **P2** intenta entrar a SC una segunda vez, durante T , antes de hacerlo tiene que ejecutar $n2 := n1 + 1$ lo que forzosamente hace cierta la condición $n1 < n2$, y como se sigue cumpliendo $n1 \neq 0$, vemos que el proceso **P2** no puede entrar de nuevo a SC. De hecho, en cuanto ejecuta $n2 := n1 + 1$, da paso a **P1** a SC, y luego queda a la espera.

Esto implica que la cota que exige la propiedad de progreso es la unidad (la mejor posible).

(a.3) exclusión mutua

Para demostrar la EM, lo haremos por reducción al absurdo. Supongamos que en un instante t los dos procesos están en la sección crítica. Debe haber habido un instante previo s en el que se ejecutó la última escritura atómica en $n1$ o $n2$ (la escritura en E2.1 o en E2.2). En ese instante ambas variables tienen un valor distinto de 0. En el intervalo de tiempo I entre s y t , ningún proceso ha cambiado el valor de las variables compartidas.

Llamaremos A al proceso que realiza la escritura E2 primero, y B al proceso que la realiza después (justo en el instante s). Llamaremos nA a la variable $n1$ (si A es P1) o a la variable $n2$ (si A es P2). Igualmente haremos con nB , en función de que proceso sea B.

Vemos que si en s el proceso B escribe en nB un valor estrictamente mayor que el que tiene en ese momento nA , entonces el proceso B no ha podido entrar después de s a la sección crítica, ya que cualquiera de los dos procesos queda en su bucle del PE cuando el valor de su variable es mayor que la del otro. Por tanto, deducimos que en s se cumple $nB \leq nA$, ya que de otra forma llegaríamos a una contradicción con la hipótesis de partida (ambos procesos en SC). Como además en s ambos valores son distintos de cero, concluimos que $0 < nB \leq nA$.

Analizamos entonces las posibles combinaciones de valores escritos en $n1$ y $n2$ en las sentencias E2. Hay tres posibilidades, que se detallan aquí:

- (a) El proceso A ha escrito un 2, y el B ha escrito un 3.

Ocurre cuando las dos variables se ponen a 1 (en E1, al inicio del PE), antes de las dos lecturas en L1, y después A lee ese 1 y escribe un 2. A continuación B lee un 2 y escribe un 3. La traza de las operaciones de escritura es esta:

Proc.	Sent.	Lecturas o Escrituras	Valor nA	Valor nB	Estado resultante
			0	0	(1)
A/B	E1	$nA := 1$ y $nB := 1$	1	1	(2)
A	L1	lee 1 en nB	1	1	(2)
A	E2	$nA := 2$	2	1	(3)
B	L1	lee 2 en nA	2	1	(3)
B	E2	$nB := 3$	2	3	(4)

Pero este caso (a) no ha podido ocurrir, ya que vemos que en el estado (4) no se cumple $nB \leq nA$, y por tanto en ese estado B no puede entrar a SC.

- (b) El proceso A ha escrito un 2, y el B ha escrito un 1.

Un primer proceso (en L1) ha leído un 0, estando el otro fuera del PE o SC. Al leer, ese primer proceso tiene su variable puesta a 1. Después el otro proceso ha accedido al PE y ha leído necesariamente un 1 (en L1).

Después, el orden de las escrituras en E2 puede ser arbitrario en principio. Sin embargo, vemos que el valor 1 no se ha podido escribir antes del valor 2, en ese caso el proceso B sería el que escribe el 2 (el mayor valor) y tras el instante s no se cumpliría $nB \leq nA$ (sabemos que no puede ser).

Así que deducimos que A escribe un 2 primero, y después B escribe un 1, y ha ocurrido necesariamente esta traza de las operaciones de escritura:

Proc	Sent.	Lecturas o Escrituras	Valor nA	Valor nB	Estado resultante
			0	0	(1)
B	E1	$nB := 1$	0	1	(2)
B	L1	lee 0 en nA	0	1	(2)
A	E1	$nA := 1$	1	1	(3)
A	L1	lee 1 en nB	1	1	(3)
A	E2	$nA := 2$	2	1	(4)
B	E2	$nB := 1$	2	1	(5)

El proceso B ha entrado a SC en el estado (5), después de E2.B. El proceso A debe haber entrado a SC después de su escritura en E2.A, bien en el estado (4) o bien en el (5). Pero esto es imposible, ya que el estado (4) realmente es el mismo que el (5), y en ambos se cumple $0 < nB < nA$ lo cual deja con seguridad al proceso A en PE. Por tanto, esta opción (b) queda descartada, no ha podido ocurrir tampoco.

(c) Los procesos A y B escriben ambos un 2.

Ocurre cuando ambos procesos entran al PE de forma *sincrona*, de forma que ambos escriben un 1, después ambos leen un 1, y finalmente ambos escriben un 2.

El orden de las escrituras en E2 puede ser cualquiera en principio. Si P2 escribe después, al hacerlo hace cierto $0 < n1 == n2$. Pero en este estado, P2 no puede entrar a SC, luego concluimos que necesariamente P2 escribe antes y luego P1. La traza es esta:

Proc.	Sent.	Lecturas o Escrituras	Valor $n1$	Valor $n2$	Estado resultante
			0	0	(1)
P1/P2	E1	$n1 := 1$ y $n2 := 1$	1	1	(2)
P1/P2	L1	leen 1 en $n1$ y $n2$	1	1	(2)
P2	E2	$n2 := 2$	1	2	(3)
P1	E2	$n1 := 2$	2	2	(4)

El proceso P1 puede entra en SC en el estado (4). Sin embargo, el proceso P2 no puede entrar a SC en el estado (3) ni en el (4), ya que en ambos se cumple $0 < n1 < n2$.

Luego este caso (c) tampoco ha podido ocurrir.

No hay ninguna posible combinación más de valores escritos en las variables $n1$ y $n2$. Así que hemos visto que no puede haber ninguna interfoliación que lleve a un estado en el cual ambos procesos están en SC. Luego se cumple EM.

Apartado (b)

Hay que demostrar que las asignaciones iniciales del PE son necesarias. Para resolver esto veremos que sin las asignaciones iniciales del PE, no se cumple exclusión mutua, encontrando una interfoliación que deja ambos procesos en SC.

Supongamos que no están las asignaciones $n1 := 1$ ni $n2 := 1$. No existe n E1.1 ni E1.2, el resto igual. Ambas variables están a cero y comienzan los dos procesos.

Supongamos que el proceso 2 comienza y alcanza SC en el intervalo de tiempo que media entre la lectura y la escritura de la asignación 1.1. Entonces, el proceso 1 también puede alcanzar SC mientras el 2 permanece en SC. Más en concreto, la secuencia de interfoliación (a partir del inicio), sería la siguiente:

1. P1 lee un 0 en **n2** (en L1.1)
2. P2 lee un 0 en **n1** (en L1.2)
3. P2 escribe un 1 en **n2** (en E2.2)
4. P2 lee 0 en **n1** (en L2.2)
5. P2 ve que la condición **n1** != 0 no se cumple y avanza hasta SC
6. P1 escribe 1 en **n1** (en E2.1) (en este momento, ambas variables están a 1).
7. P1 hace las lecturas en L3.1, lee un 1 en ambas variables.
8. P1 que la condición **n2** < **n1** no se cumple, y avanza a la SC

13

El siguiente programa es una solución al problema de la exclusión mutua para 2 procesos. Discutir la corrección de esta solución: si es correcta, entonces probarlo. Si no fuese correcta, escribir escenarios que demuestren que la solución es incorrecta.

```

{ variables compartidas y valores iniciales }
var c0 : integer := 1 ;
    c1 : integer := 1 ;

1 process P0 ;
2 begin
3     while true do begin
4         repeat
5             c0 := 1-c1 ;
6             until c1 != 0 ;
7             { seccion critica }
8             c0 := 1 ;
9             { resto sentencias }
10        end
11    end

1 process P1 ;
2 begin
3     while true do begin
4         repeat
5             c1 := 1-c0 ;
6             until c0 != 0 ;
7             { seccion critica }
8             c1 := 1 ;
9             { resto sentencias }
10        end
11    end

```

Respuesta (privada)

No se cumple exclusión mutua.. Hay interfoliaciones que permiten a los dos procesos acceder a la SC. Supongamos que c1 y c0 valen ambas 1 (inicialmente ocurre esto), y los dos procesos acceden al PE. A continuación:

1. ambos procesos ejecutan las asignaciones de la línea 5, y las lecturas de la 6 (ambos procesos escriben y después leen el valor 0), antes de que ninguno de los dos repita las asignaciones de la línea 5.
2. Se repiten las asignaciones de la línea 5 y las lecturas de la 6 (ambos procesos escriben y después leen el valor 1) antes de que ningún proceso alcance la línea 8.

por tanto, tras las lecturas del paso 2, ambos pueden acceder a la SC.

14

Diseñar una solución hardware basada en espera ocupada para el problema de la exclusión mutua utilizando la instrucción máquina **swap(x,y)** (en lugar de usar **LeerAsignar**) cuyo efecto es intercambiar los dos valores lógicos almacenados en las posiciones de memoria x e y .

Respuesta

La forma de usar **swap** es como se indica aquí:

```
{ variables compartidas y valores iniciales }
var sc_libre : boolean := true ; { verdadero solo si la SC esta libre }

{ procesos }
process P[ i : 1 .. n ];
var { variable no compartida: true solo si este proceso ocupa la SC }
    sc_ocupada_proc : boolean := falso ;
begin
    while true do begin
        repeat
            swap( sc_libre, sc_ocupada_proc ) ;
        until sc_ocupada_proc ;

        { seccion critica }

        swap( sc_libre, sc_ocupada_proc ) ;
        { resto seccion }
    end
end
```

15

Supongamos que tres procesos concurrentes acceden a dos variables compartidas (x e y) según el siguiente esquema:

<pre>var x, y : integer ;</pre>		
<pre>{ accede a 'x' } process P1 ; begin while true do begin x := x+1 ; { } end end</pre>	<pre>{ accede a 'x' e 'y' } process P2 ; begin while true do begin x := x+1 ; y := x ; { } end end</pre>	<pre>{ accede a 'y' } process P3 ; begin while true do begin y := y+1 ; { } end end</pre>

con este programa como referencia, realiza estas dos actividades:

1. usando un único semáforo para exclusión mutua, completa el programa de forma que cada proceso realice todos sus accesos a x e y sin solaparse con los otros procesos (ten en cuenta que el proceso 2 debe escribir en y el mismo valor que acaba de escribir en x).
2. la asignación $x:=x+1$ que realiza el proceso 2 puede solaparse sin problemas con la asignación $y:=y+1$ que realiza el proceso 3, ya que son independientes. Sin embargo, en la solución anterior, al usar un único semáforo, esto no es posible. Escribe una nueva solución que permita el solapamiento descrito, usando dos semáforos para dos secciones críticas distintas (las cuales, en el proceso 2, aparecen anidadas).

Respuesta

(1) en este caso la solución es sencilla, basta englobar los accesos en pares `sem_wait-sem_signal`. El proceso 2 debe ejecutar las dos asignaciones de forma atómica, ya que si hace las asignaciones de forma atómica cada una (pero por separado), el valor escrito en y podría ser distinto al escrito antes en x , ya que el proceso 1 podría acceder en mitad. La solución es esta:

<pre>var x,y : integer ; mutex : semaphore := 1 ;</pre>		
<pre>process P1 ; begin while true do begin sem_wait(mutex) ; x := x+1 ; sem_signal(mutex) ; { } end end</pre>	<pre>process P2 ; begin while true do begin sem_wait(mutex) ; x := x+1 ; y := x ; sem_signal(mutex) ; { } end end</pre>	<pre>process P3 ; begin while true do begin sem_wait(mutex) ; y := y+1 ; sem_signal(mutex) ; { } end end</pre>

(2) en este caso usamos dos semáforos, uno (`mutex_x`) para los accesos a x y el otro (`mutex_y`) para los accesos a y , anidando las secciones críticas en el proceso 2:

```

var x,y      : integer ;
mutex_x : semaphore := 1 ;
mutex_y : semaphore := 1 ;

process P1 ;
begin
  while true do begin
    sem_wait(mutex_x);
    x := x+1 ;
    sem_signal(mutex_x);
    { .... }
  end
end

process P2 ;
begin
  while true do begin
    sem_wait(mutex_x);
    x := x+1 ;
    sem_wait(mutex_y);
    y := x ;
    sem_signal(mutex_y);
    sem_signal(mutex_x);
    { .... }
  end
end

process P3 ;
begin
  while true do begin
    sem_wait(mutex_y) ;
    y := y+1 ;
    sem_signal(mutex_y);
    { .... }
  end
end

```

16

En algunas aplicaciones es necesario tener exclusión mutua entre procesos con la particularidad de que puede haber como mucho n procesos en una sección crítica, con n arbitrario y fijo, pero no necesariamente igual a la unidad sino posiblemente mayor. Diseña una solución para este problema basada en el uso de espera ocupada y cerrojos. Estructura dicha solución como un par de subrutinas (usando una misma estructura de datos en memoria compartida), una para el protocolo de entrada y otro el de salida, e incluye el pseudocódigo de las mismas.

Respuesta (privada)

Usaremos una variable compartida, llamada `plazas` que indica cuantos procesos pueden entrar en la sección crítica (se inicializa a n). Los procesos esperan en el protocolo de entrada a que dicha variable sea mayor que cero, entonces la decrementan y entran a SC. En el protocolo de salida, dicha variable se incrementa. Para que los accesos a `plazas` sean correctos, se hacen en exclusión mutua, usando un cerrojo, que llamamos `mutex`.

<pre> var mutex : boolean := false ; { cerrojo de acceso a 'plazas' } plazas : integer := n ; { numero de plazas disponibles en SC } </pre>		
1	<pre> procedure ProtocoloEntrada() ; var esperar : boolean := true ; begin { mientras no haya plazas } while esperar do begin { entrar en excl. mutua } while LeerAsignar(mutex) do begin end { si hay plazas, decrementar } if plazas > 0 then begin plazas := plazas - 1 ; esperar := false; {no esperar mas} end { salir de excl. mutua } mutex := false ; end end </pre>	2
2		3
3		4
4		5
5		6
6		7
7		8
8		9
9		10
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		

17

Sean los procesos P_1 , P_2 y P_3 , cuyas secuencias de instrucciones son las que se muestran en el cuadro. Resuelva los siguientes problemas de sincronización (son independientes unos de otros):

- P_2 podrá ejecutar e una vez por cada vez que P_1 haya ejecutado a o P_3 haya ejecutado g .
- P_2 podrá ejecutar e una vez por cada vez que los procesos P_1 y P_3 hayan ejecutado una vez el par de sentencias a y g .
- Por cada vez que P_1 haya ejecutado b , podrá P_2 ejecutar una vez e y podrá P_3 ejecutar una vez h .
- Sincroniza los procesos de forma que las secuencias b en P_1 , f en P_2 , y h en P_3 , sean ejecutadas como mucho por dos procesos simultáneamente.

{ variables globales }		
<pre> process P1 ; begin while true do begin a b c end end </pre>	<pre> process P2 ; begin while true do begin d e f end end </pre>	<pre> process P3 ; begin while true do begin g h i end end </pre>

Respuesta

(a) P_2 podrá ejecutar e una vez por cada vez que P_1 haya ejecutado a o P_3 haya ejecutado g .

<pre>var S : semaphore := 0 ;</pre>		
<pre>process P₁ ; begin while true do begin a sem_signal(S) ; b c end end</pre>	<pre>process P₂ ; begin while true do begin d sem_wait(S) ; e f end end</pre>	<pre>process P₃ ; begin while true do begin g sem_signal(S) ; h i end end</pre>

(b) P_2 podrá ejecutar e una vez por cada vez que los procesos P_1 y P_3 hayan ejecutado una vez el par de sentencias a y g .

<pre>var S1 : semaphore := 0 ; S3 : semaphore := 0 ;</pre>		
<pre>process P₁ ; begin while true do begin a sem_signal(S1) ; b c end end</pre>	<pre>process P₂ ; begin while true do begin d sem_wait(S1) ; sem_wait(S3) ; e f end end</pre>	<pre>process P₃ ; begin while true do begin g sem_signal(S3) ; h i end end</pre>

(c) Por cada vez que P_1 haya ejecutado b , podrá P_2 ejecutar una vez e y podrá P_3 ejecutar una vez h .

<pre>var S2 : semaphore := 0 ; S3 : semaphore := 0 ;</pre>		
<pre>while true do begin a b sem_signal(S2) ; sem_signal(S3) ; c end</pre>	<pre>while true do begin d sem_wait(S2) ; e f end</pre>	<pre>while true do begin g sem_wait(S3) ; h i end</pre>

(d) Sincroniza los procesos de forma que las secuencias b en P_1 , f en P_2 , y h en P_3 , sean ejecutadas como mucho por dos procesos simultáneamente.

```
var mutex : semaphore := 2 ;
```

```
while true do
begin
  a
  sem_wait(mutex) ;
  b
  sem_signal(mutex) ;
  c
end
```

```
while true do
begin
  d
  e
  sem_wait(mutex) ;
  f
  sem_signal(mutex) ;
end
```

```
while true do
begin
  g
  sem_wait(mutex) ;
  h
  sem_signal(mutex) ;
  i
end
```

18

El cuadro que sigue nos muestra dos procesos concurrentes, P_1 y P_2 , que comparten una variable global x (las restantes variables son locales a los procesos).

- Sincronizar los procesos para que P_1 use todos los valores x suministrados por P_2 .
- Sincronizar los procesos para que P_1 utilice un valor sí y otro no de la variable x , es decir, utilice los valores primero, tercero, quinto, etc...

```
{ variables globales }
```

```
process P1 ;
  var m : integer ;
begin
  while true do begin
    m := 2*x-n ;
    print( m ) ;
  end
end
```

```
process P2
  var d : integer ;
begin
  while true do begin
    d := leer_teclado() ;
    x := d-c*5 ;
  end
end
```

Respuesta

- Sincronizar los procesos para que P_1 use todos los valores x suministrados por P_2 .

<pre> var x : integer ; x_ya_calculado : semaphore := 0 ; x_ya_leido : semaphore := 1 ; </pre>	
<pre> process P₁ ; var m : integer ; begin while true do begin sem_wait(x_ya_calculado); m := 2*x-n ; sem_signal(x_ya_leido); print(m); end end </pre>	<pre> process P₂ ; var d : integer ; begin while true do begin d := leer_teclado(); sem_wait(x_ya_leido); x := d-c*5 ; sem_signal(x_ya_calculado); end end </pre>

(b) Sincronizar los procesos para que P_1 utilice un valor sí y otro no de la variable x , es decir, utilice los valores primero, tercero, quinto, etc...

<pre> var x : integer ; x_ya_calculado : semaforo := 0 ; x_ya_leido : semaforo := 1 ; </pre>	
<pre> process P₁ ; var m : integer ; begin while true do begin { consumir 1,3,5,... } sem_wait(x_ya_calculado); m := 2*x-n ; sem_signal(x_ya_leido); print(m); { descartar 2,4,6, ... } sem_wait(x_ya_calculado); sem_signal(x_ya_leido); end end </pre>	<pre> process P₂ ; var d : integer ; begin while true do begin d := leer_teclado(); sem_wait(x_ya_leido); x := d-c*5 ; sem_signal(x_ya_calculado); end end </pre>

19

Aunque un monitor garantiza la exclusión mutua, los procedimientos tienen que ser *reentrantes*. Explicar porqué.

Respuesta (privada)

Aunque se ejecute un mismo procedimiento en E.M., puede que un proceso abandone el control del monitor en un punto intermedio (después de invocar `wait`) y, en ese caso, otro proceso ejecutará el mismo código del procedimiento entrelazando su ejecución con el proceso inicial.

20

Se consideran dos tipos de recursos accesibles por varios procesos concurrentes (denominamos a los recursos como recursos de tipo 1 y de tipo 2). Existen N_1 ejemplares de recursos de tipo 1 y N_2 ejemplares de recursos de tipo 2.

Para la gestión de estos ejemplares, queremos diseñar un monitor (con semántica SU) que exporta un procedimiento (**pedir_recurso**), para pedir un ejemplar de uno de los dos tipos de recursos. Este procedimiento incluye un parámetro entero (**tipo**), que valdrá 1 o 2 indica el tipo del ejemplar que se desea usar.

Asimismo, el monitor incorpora otro procedimiento (**liberar_recurso**) para indicar que se deja de usar un ejemplar de un recurso previamente solicitado (este procedimiento también admite un entero que puede valer 1 o 2, según el tipo de ejemplar que se quiera liberar). En ningún momento puede haber un ejemplar de un tipo de recurso en uso por más de un proceso. En este contexto, responde a estas cuestiones:

- Implementa el monitor con los dos procedimientos citados, suponiendo que N_1 y N_2 son dos constantes arbitrarias, mayores que cero.
- El uso de este monitor puede dar lugar a interbloqueo. Esto ocurre cuando más de un proceso tiene algún punto en su código en el cual necesita usar dos ejemplares de distinto tipo a la vez. Describe la secuencia de peticiones que da lugar a interbloqueo.
- Una posible solución al problema anterior es obligar a que si un proceso necesita dos recursos de distinto tipo a la vez, deba de llamar a **pedir_recurso**, dando un parámetro con valor 0, para indicar que necesita los dos ejemplares. En esta solución, cuando un ejemplar quede libre, se dará prioridad a los posibles procesos esperando usar dos ejemplares, frente a los que esperan usar solo uno de ellos.

Respuesta (privada)

Cuestión (a):

Puesto que los procesos necesitan esperar en **pedir_recurso** cuando no hay ejemplares del tipo que quieren, necesitamos saber cuantos ejemplares quedan libres de cada tipo de recurso. Para eso usaremos un array con dos entradas indicando esos dos valores. Al array lo llamamos **libres**

En **pedir_recurso**, los procesos que piden un recurso de tipo 1 esperan la condición **libres**[1]>0. Se usarán dos colas de espera, una por cada tipo de recurso, y dos variables enteras, con el número de ejemplares libres. Tanto las colas como las variables se ponen en dos arrays. El código puede ser como sigue:

```
Monitor DosRecursos_v1;

var libres : array[1..2] of integer;    { número de ejemplares libres (por cada tipo) }
    cola   : array[1..2] of condition; { procesos esperando un ejemplar libre (por cada tipo) }

procedure pedir_recurso( tipo : integer ) { tipo == 1 ó 2 }
begin
    if libres[tipo] == 0 then           { si no quedan ejemplares:    }
        cola[tipo].wait();             { esperar a que quede uno libre }
    libres[tipo] = libres[tipo]-1 ; { queda un ejemplar menos libre }
```

```

end
procedure liberar_recurso( tipo : integer )
begin
    libres[tipo] = libres[tipo]+1 ; { uno más libre      }
    cola[tipo].signal() ;           { despertar uno (si hay) }
end
begin
    libres[1] := N1 ;
    libres[2] := N2 ;
end

```

Cuestión (b):

La situación de interbloqueo ocurre cuando dos procesos llaman cada uno dos veces seguidas a **pedir_recurso**, pidiendo los recursos en orden contrario, y quedando solo un ejemplar libre de cada uno de ellos. En ese caso, cada proceso supera la primera llamada, pero ambos quedan esperando en la segunda.

Cuestión (c):

Ahora se usarán tres colas de espera, dos para los que solicitan un único ejemplar de un recurso (igual que antes), y una nueva para los que solicitan ambos tipos de recursos. Estos esperan una nueva condición, en concreto esperan **libres[1]>0 and libres[2]>0**. Se mantienen las dos variables enteras para saber cuantos recursos libres quedan por cada tipo de recurso.

```

Monitor DosRecursos_v2 ;

var libres : array[1..2] of integer; { numero de ejemplares libres (por cada tipo) }
    cola   : array[1..2] of condition; { procesos esperando un ejemplar libre (por cada tipo) }
    ambos  : condition                { procesos esperando dos ejemplares de los dos tipos }

procedure pedir_recurso( tipo : integer ) { tipo == 0,1 ó 2 }
begin
    if tipo == 0 then begin
        if libres[1]==0 or
           libres[2]==0 then
            ambos.wait() ;
            libres[1] = libres[1] -1 ;
            libres[2] = libres[2] -1 ;
        end
    else begin
        if libres[tipo] == 0 then
            cola[tipo].wait();
            libres[tipo] = libres[tipo]-1 ;
        end
    end
end

procedure liberar_recurso( tipo : integer ) { tipo == 1 o 2 }
var otro_tipo : integer := 1+(tipo mod 2); { el otro tipo }
begin
    libres[tipo] = libres[tipo]+1 ;
    if libres[otro_tipo] > 0
        and ambos.queue() then
        ambos.signal() ;
    else

```



```

        cola[tipo].signal();           { liberar a alguno de este }
end
begin
    libres[1] := N1 ;
    libres[2] := N2 ;
end

```

21

Escribir una solución al problema de *lectores-escriptores* con monitores:

- Con prioridad a los lectores. Quiere decir que, si en un momento puede acceder al recurso tanto un lector como un escritor, se da paso preferentemente al lector.
- Con prioridad a los escritores. Quiere decir que, si en un momento puede acceder tanto un lector como un escritor, se da paso preferentemente al escritor.
- Con prioridades iguales. En este caso, los procesos acceden al recurso estrictamente en orden de llegada, lo cual implica, en particular, que si hay lectores leyendo y un escritor esperando, los lectores que intenten acceder después del escritor no podrán hacerlo hasta que no lo haga dicho escritor.

Respuesta (privada)

Suponemos que varias lecturas pueden ejecutarse en paralelo, pero si una escritura está en curso, no puede haber otras escrituras ni ninguna lectura.

Supondremos que los escritores llaman a **escritura_ini** y **escritura_fin** para comenzar y finalizar de escribir (respectivamente), mientras que los lectores hacen lo mismo con **lectura_ini** y **lectura_fin**.

En general, para las tres soluciones, se usará una variable para llevar la cuenta de cuantos lectores hay leyendo (**nlectores**) y otra variable (lógica) (**escribiendo**) que indicará si hay algún escritor escribiendo. Estas variables son imprescindibles para poder implementar las esperas.

Respecto a las condiciones que espera cada tipo de proceso, los lectores esperan la condición **not escribiendo**, en la cola de nombre **lectores**. Los escritores esperan **not escribiendo and nlectores==0**, en la cola de nombre **escritores**.

(a) prioridad a los lectores

En esta solución, siempre que sea posible dar paso a un lector o a un escritor, se dará paso antes al lector. Esto ocurre en **escritura_fin**. Hay que tener en cuenta que en **lectura_fin** no puede haber ningún lector esperando, pues en ese procedimiento **nlectores** es mayor que cero y forzosamente **escribiendo** debe ser **false**.

```

Monitor LectoresEscritores_plec ;

var escribiendo      : boolean ;
    nlectores        : integer ;
    lectores, escritores : condition ;

```

```

procedure escritura_ini() ;
begin
    if escribiendo or nlectores > 0 then { si no se puede escribir:  }
        escritores.wait() ;              { esperar                }
        escribiendo := true ;            { anotar que se esta escribiendo }
    end

procedure escritura_fin() ;
begin
    escribiendo := false ;
    if lectores.queue() then { si hay lectores esperando:  }
        lectores.signal()   { despertar uno                }
    else
        { si no hay lectores esperando:  }
        escritores.signal() { despertar un escritor, si hay alguno }
    end

procedure lectura_ini() ;
begin
    if escribiendo then { si hay algun escritor escribiendo: }
        lectores.wait() ; { esperar                }
        nlectores := nlectores+1 ; { anotar un lector leyendo mas  }
        lectores.signal() ; { permitir a otros lectores acceder }
    end

procedure lectura_fin() ;
begin
    nlectores := nlectores-1 ; { anotar un lector menos      }
    if nlectores == 0 then { si no hay lectores leyendo:  }
        escritores.signal() ; { despertar un escritor (si hay) }
    end

{ inicializacion }
begin
    nlectores := 0 ; { no hay procesos leyendo  }
    escribiendo := false ; { no hay un escritor escribiendo }
end

```

(b) prioridad a los escritores

En esta solución, siempre que sea posible dar paso a un lector o a un escritor, se dará paso antes al escritor (también en `escritura_fin`). La implementación es semejante a la anterior, excepto en:

- `escritura_fin`: se despierta antes a un escritor que un lector
- `lectura_ini`: hay que evitar ahora que una ráfaga de lectores deje esperando a los escritores. Para ello, se hacen dos modificaciones: por un lado, el `signal` de los lectores no se hace si hay escritores esperando entrar, y por otro lado ahora un lector espera no solo si hay un escritor escribiendo, sino también si hay escritores en su cola esperando a entrar.

```

Monitor LectoresEscritores_pesc ;

```

```

var escribiendo      : boolean ;
    nlectores       : integer ;
    lectores, escritores : condition ;

procedure escritura_ini() ;
begin
    if escribiendo or nlectores > 0 then
        escritores.wait() ;
        escribiendo := true ;
    end

procedure escritura_fin() ;
begin
    escribiendo := false ;
    if escritores.queue() then { si hay escritores esperando: }
        escritores.signal()   { despertar un escritor      }
    else
        { si no hay escritores esperando: }
        lectores.signal()     { despertar un lector, si hay }
    end

procedure lectura_ini() ;
begin
    if escribiendo or escritores.queue() then
        lectores.wait() ;
        nlectores := nlectores+1 ;
        if not escritores.queue() then { si no hay escritores esperando }
            lectores.signal()          { despertar un lector (si hay) }
        end

procedure lectura_fin() ;
begin
    nlectores := nlectores-1 ; { anotar un lector menos      }
    if nlectores == 0 then    { si no hay lectores leyendo: }
        escritores.signal() ; { despertar un escritor (si hay) }
    end

{ inicializacion }
begin
    nlectores := 0 ;
    escribiendo := false ;
end

```

(c) sin prioridad

En esta solución no se pueden usar dos colas, una por tipo de proceso (una de lectores y otra de escritores), puesto que siempre habría que elegir una frente a otra para despertar un proceso, sin poder saber en absoluto cuál de las dos tiene el proceso que lleva más tiempo esperando.

Por eso, en principio, todos los procesos esperan en una sola cola (que es FIFO). Puesto que los procesos en esa cola esperan condiciones distintas, en el momento en que se haga un signal sobre ella, no podemos asegurar que se cumple la condición que espera el proceso que sale (el que más tiempo lleva esperando, ya que no sabemos si es lector o escritor). Por tanto, como siempre en estos casos, necesitamos incluir las

llamadas a `wait` en un bucle `while`, de forma que al salir, si no se cumple su condición, volverán a la cola. Sin embargo, cuando un proceso sale del `wait` y comprueba que debe volver a esperar, entonces se pone el último en la cola (es FIFO), y por tanto no se cumple el requisito de que los procesos acceden al recurso en orden de llamada al monitor. Usar una sola cola es, por tanto, inviable.

Para solucionar el problema, en realidad podemos observar que en cualquier momento en el que haya uno o más procesos esperando acceder al recurso, sólo uno de ellos (el primero que invocó el procedimiento de acceso) debe realmente comprobar su condición de entrada. El resto de procesos (si hay alguno), están esperando que ese primer procedimiento pueda acceder, para ellos a su vez poder comprobar la condición (por orden de llegada).

Esta descripción sugiere el uso de dos colas: una con dicho **primer** proceso (**primero**), y otra con el **resto** de procesos (**resto**). Los procesos que esperan en la cola **resto** esperan que la cola **primero** quede vacía (es un ejemplo en el cual la condición lógica asociada a una variable condición involucra el estado de otra cola). Si un proceso espera en la cola **primero**, espera que se cumpla su condición de acceso al recurso.

En la cola **primero** hay un proceso como mucho. Si está vacía, también lo está **resto**. Al entrar cualquier proceso, si en **primero** hay algún proceso, entonces espera en **resto**. Todos los que están en **resto** esperan lo mismo (que **primero** quede libre), y por tanto da igual el tipo de proceso (lector o escritor) que sean. Los procesos salen de **resto** en orden de entrada, y después comprueban su condición de acceso al recurso, si no pueden entrar, esperan en **primero**. Por tanto todos los procesos pasan a la cola **primero** en el orden en el que acceden al monitor.

Cuando cualquier proceso (ya sea lector o escritor) comprueba que ya puede acceder al recurso, antes de hacerlo debe hacer un `signal` de la cola **resto**. Esto se debe a que en esas circunstancias **primero** va a quedar vacía con seguridad, y por tanto se cumple la condición de espera en **resto**. Por tanto, la última sentencia de `escritura_ini` y `lectura_ini` debe ser `resto.signal()`.

Los lectores y escritores, al acabar de leer o escribir, modifican (actualizan) las variables permanentes del monitor (`nlectores` se decrementa o `escribiendo` se pone a `false`), y por tanto pueden haber hecho cierta la condición de espera del proceso en **primero**. Por tanto, al acabar de acceder al recurso, los procesos deben de hacer `signal` en **primero**.

Los procesos deben entrar a la cola **primero** si comprueban que no pueden acceder al recurso. En el caso de los lectores, al salir de esa cola su condición se cumple con seguridad. Esto se debe a que ese lector ha salido de **primero** por un `signal` de otro proceso señalador que ha terminado de acceder al recurso. Tanto si el señalador es un lector como un escritor, el valor de `escribiendo` ya es `false`, y por tanto el proceso (lector) en **primero** podrá entrar con seguridad al recurso.

Sin embargo, cuando un escritor sale de **primero**, es posible que el señalador sea un escritor que ha terminado de escribir, en ese caso puede acceder al recurso (ya que no hay lectores leyendo), o bien puede que el señalador sea un lector que ha terminado de leer, pero puede que todavía haya otros lectores leyendo, y en ese caso el escritor no puede acceder. Por tanto, para que el programa sea correcto, cuando un escritor sale de **primero** hacemos que vuelva a comprobar su condición, es decir, ponemos el `primero.wait()` de los escritores en un bucle `while`.

Con todo esto, el código fuente queda así:

```
Monitor LectoresEscritores_noprio ;  
  
var escribiendo      : boolean := false ;  
    nlectores        : integer := 0 ;
```

```

    primero          : condition ; { esperan aquí su condición de acceso (según tipo de proc.) }
    resto             : condition ; { esperan aquí hasta que "primero" queda vacía } }

procedure escritura_ini() ;
begin
    if primero.queue() then           { si otro tiene preferencia }
        resto.wait() ;               { esperar }
    while escribiendo or nlectores > 0 do { si no es posible escribir: }
        primero.wait() ;             { esperar }
        escribiendo := true ;         { anotar que se esta escribiendo }
        resto.signal() ;              { pasar al siguiente a 'primero' }
    end

procedure escritura_fin() ;
begin
    escribiendo := false ;           { anotar que no se esta escribiendo }
    primero.signal() ;                { dejar entrar a otro proceso (si hay) }
end

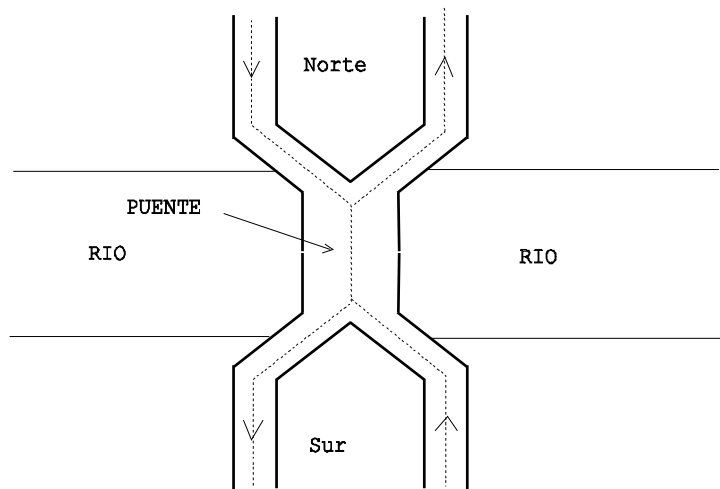
procedure lectura_ini() ;
begin
    if primero.queue() then           { si otro tiene preferencia }
        resto.wait() ;               { esperar }
    if escribiendo do                 { si hay un escritor escribiendo }
        primero.wait() ;             { esperar }
        nlectores := nlectores+1 ;    { anotar un lector mas }
        resto.signal() ;              { pasar al siguiente a 'primero' (si hay alguno) }
    end

procedure lectura_fin() ;
begin
    nlectores := nlectores-1 ;        { anotar un lector menos }
    primero.signal() ;                { permitir comprobar a otro }
end

```

22

Varios coches que vienen del norte y del sur pretenden cruzar un puente sobre un río. Solo existe un carril sobre dicho puente. Por lo tanto, en un momento dado, el puente solo puede ser cruzado por uno o más coches en la misma dirección (pero no en direcciones opuestas).



- a) Completar el código del siguiente monitor que resuelve el problema del acceso al puente suponiendo que llega un coche del norte (sur) y cruza el puente si no hay otro coche del sur (norte) cruzando el puente en ese momento.

```

Monitor Puente

var ... ;

procedure EntrarCocheDelNorte ()
begin
    ...
end
procedure SalirCocheDelNorte ()
begin
    ....
end
procedure EntrarCocheDelSur ()
begin
    ....
end
procedure SalirCocheDelSur ()
begin
    ...
end

{ Inicializacion }
begin
    ....
end
  
```

- b) Mejorar el monitor anterior, de forma que la dirección del tráfico a través del puente cambie cada vez que lo hayan cruzado 10 coches en una dirección, mientras 1 ó más coches estuviesen esperando cruzar el puente en dirección opuesta.

Respuesta (privada)**Caso (a)**

En el caso (a), usaremos dos colas, una para los coches del norte y otra para los del sur (**N** y **S**, respectivamente), y dos contadores (**N_cruzando** y **S_cruzando**) para saber cuantos coches están cruzando provenientes del norte y el sur, respectivamente.

```

Monitor Puente ;

var N_cruzando, S_cruzando : integer ;
    N, S                    : condition ;

procedure EntrarCocheDelNorte()
begin
    if S_cruzando > 0 then
        N.wait() ;
        N_cruzando := N_cruzando+1 ;
        N.signal() ;
    end

procedure SalirCocheDelNorte()
begin
    N_cruzando := N_cruzando-1 ;
    if N_cruzando == 0 then
        S.signal() ;
    end

procedure EntrarCocheDelSur()
begin
    if N_cruzando > 0 then
        S.wait();
        S_cruzando := S_cruzando+1 ;
        S.signal() ;
    end

procedure SalirCocheDelSur()
begin
    S_cruzando := S_cruzando-1 ;
    if S_cruzando == 0 then
        N.signal() ;
    end

{ Inicializacion }
begin
    N_cruzando := 0 ;
    S_cruzando := 0 ;
end

```

Caso (b)

En este caso se usan las mismas variables y condiciones que en el anterior, solo que ahora añadimos dos nuevas variables enteras, **N_pueden** y **S_pueden**. La variable **N_pueden** indica cuantos coches del norte pueden

todavía entrar al puente mientras haya coches del sur esperando (**S_pueden** es similar, pero referida a los coches del sur).

La condición asociada a la cola **N** es: **S_cruzando** == 0 y **N_pueden** > 0, cuando dicha condición no se da, los coches del norte esperan en **N**. Cuando en algún procedimiento (al final del mismo) que la condición es cierta, se debe hacer **signal** de la cola norte por si hubiese algún coche que ahora sí puede entrar. (el razonamiento es similar para la cola **S**).

Monitor Puente

```
var N_cruzando, S_cruzando,
    N_pueden, S_pueden : integer ;
    N,S                 : condition ;
```

```
procedure EntrarCocheDelNorte()
begin
    if S_cruzando > 0 or N_pueden == 0 then { si no se puede pasar }
        N.wait(); { esperar en la cola norte }

    { aqui se sabe con seguridad que se puede pasar, ya que se cumple: }
    { S_cruzando == 0 y N_pueden > 0 (==condicion de 'N')}

    N_cruzando := N_cruzando+1 ; { hay uno mas del norte cruzando }

    if not S.empty() then { si hay coches del sur esperando al entrar este }
        N_pueden := N_pueden - 1 ; { podra entrar uno menos }

    if N_pueden > 0 then { si aun puede pasar otro (se cumple: S_cruzando == 0)}
        N.signal(); { hacer entrar a uno justo tras este (si hay alguno) }
end

procedure SalirCocheDelNorte
begin
    N_cruzando := N_cruzando-1 ; { uno menos del norte cruzando }

    if N_cruzando == 0 then begin { si el puente queda vacio }
        S_pueden := 10 ; { permitir a 10 coches del sur entrar }
        S.signal(); { permite entrar al primero del sur que estuviese esperando, si hay }
    end
end
```

El código para los coches del sur es simétrico (se omiten los comentarios). Al final se incluye la inicialización.

```
procedure EntrarCocheDelSur
begin
    if N_cruzando > 0 or S_pueden == 0 then
        S.wait();
    S_cruzando := S_cruzando + 1 ;
    if not N.empty() then
        S_pueden := S_pueden - 1 ;
    if S_pueden > 0 then
        S.signal();
```



```

end
procedure SalirCocheDelSur
begin
    S_cruzando := S_cruzando-1 ;
    if S_cruzando == 0 then begin
        N_pueden = 10 ;
        N.signal() ;
    end
end
{ Inicializacion }
begin
    N_cruzando := 0 ; S_cruzando := 0 ;
    N_pueden := 10 ; S_pueden := 10 ;
end

```

23

Una tribu de antropófagos comparte una olla en la que caben M misioneros. Cuando algún salvaje quiere comer, se sirve directamente de la olla, a no ser que ésta esté vacía. Si la olla está vacía, el salvaje despertará al cocinero y esperará a que éste haya rellenado la olla con otros M misioneros.

Para solucionar la sincronización usamos un monitor llamado **Olla**, que se puede usar así:

```

monitor Olla ;
....
begin
....
end

```

```

process ProcSalvaje[ i:1..N ] ;
begin
    while true do begin
        Olla.Servirse_1_misionero() ;
        Comer() ; { es un retraso aleatorio }
    end
end

```

```

process ProcCocinero ;
begin
    while true do begin
        Olla.Dormir() ;
        Olla.Rellenar_Olla() ;
    end
end

```

Diseña el código del monitor **Olla** para la sincronización requerida, teniendo en cuenta que:

- La solución no debe producir interbloqueo.
- Los salvajes podrán comer siempre que haya comida en la olla,
- Solamente se despertará al cocinero cuando la olla esté vacía.

Respuesta (privada)

Es evidente que necesitamos saber el estado de la olla, es decir, cuantos misioneros quedan disponibles para comer. Se usa una variable entera, inicializada a M , llamada `num_misioneros`. Se introducen dos variables de condición, para las esperas asociadas al cocinero y a los salvajes, respectivamente (`cocinero` y `salvajes`).

La cola `salvajes` es la cola donde esperan los salvajes en el caso de que no haya comida, es decir donde los salvajes esperan hasta que haya al menos un misionero disponible, por tanto la condición es:

`0 < num_misioneros`

La variable condición `cocinero` es donde espera el cocinero hasta que es necesario rellenar la olla, por tanto la condición asociada es:

`0 == num_misioneros`

Por tanto, el código para implementar el monitor es el siguiente:

```
monitor Olla ;

var num_misioneros      : integer ; { numero de misioneros en la olla }
    cocinero, salvajes  : condition ;

procedure Servirse_1_Misionero()
begin
    if num_misioneros == 0 then { si no hay comida:      }
        salvajes.wait();      { esperar a que haya comida }

    num_misioneros := num_misioneros - 1 ; { coger un misionero }

    if num_misioneros > 0 then { si queda comida:      }
        salvajes.signal();    { despertar a un salvaje (si hay) }
    else { si no queda comida:      }
        cocinero.signal();    { despertar al cocinero (si duerme) }
    end

procedure Dormir()
begin
    if num_misioneros > 0 then { si ya hay comida:      }
        cocinero.wait();      { esperar a que no haya }
    end

Procedure Rellenar_Olla()
begin
    num_misioneros = M ;      { poner M misioneros en la olla }
    salvajes.signal();        { despertar un salvaje (si hay) }
end

{ Inicializacion }
begin
    num_misioneros := M ;
end
```

24

Una cuenta de ahorros es compartida por varias personas (procesos). Cada persona puede depositar o retirar fondos de la cuenta. El saldo actual de la cuenta es la suma de todos los depósitos menos la suma de todos los reintegros. El saldo nunca puede ser negativo.

Queremos usar un monitor para resolver el problema. El monitor debe tener 2 procedimientos: **depositar** (c) y **retirar** (c). Suponer que los argumentos de las 2 operaciones son siempre positivos, e indican las cantidades a depositar o retirar. El monitor usará la semántica *señalar y espera urgente* (SU). Se deben de escribir varias versiones de la solución, según las variaciones de los requerimientos que se describen a continuación:

- (a) Todo proceso puede retirar fondos mientras la cantidad solicitada c sea menor o igual que el saldo disponible en la cuenta en ese momento. Si un proceso intenta retirar una cantidad c mayor que el saldo, debe quedar bloqueado hasta que el saldo se incremente lo suficiente (como consecuencia de que otros procesos depositen fondos en la cuenta) para que se pueda atender la petición. Hacer dos versiones:
 - (a.1) colas normales (FIFO), sin prioridad.
 - (a.2) con colas de prioridad.
- (b) El reintegro de fondos a los clientes se hace únicamente según el orden de llegada, si hay más de un cliente esperando, solo el primero que llegó puede optar a retirar la cantidad que desea, mientras esto no sea posible, esperarán todos los clientes, independientemente de cuanto quieran retirar los demás. Por ejemplo, suponer que el saldo es 200 unidades y un cliente está esperando un reintegro de 300 unidades. Si llega otro cliente debe esperarse, incluso si quiere retirar 200 unidades. De nuevo, resolverlo de dos formas:
 - (b.1) colas normales (FIFO), sin prioridad.
 - (b.2) con colas de prioridad.

Respuesta (privada)

(a.1) Puede retirar el primero que tenga saldo, colas sin prioridad

Se usa una cola (**cola**) para los clientes que esperan a retirar. La condición que esperan las hebras es que el saldo disponible sea igual o mayor a la cantidad a retirar. Si un cliente no puede retirar, antes de volver a la cola, debe de despertar a los otros clientes de la misma para que alguno de esos otros pueda retirar. También debe hacer lo mismo después de haber retirado (ya que puede ser que después de retirar aun quede saldo suficiente para otros). La solución queda así:

```
monitor CuentaCorriente;

    var saldo : integer ;
        cola : condition ;

procedure Retirar( cantidad : integer )
begin
```

```

while cantidad > saldo do begin { mientras no se pueda atender peticion: }
    cola.signal() ;              { permitir que otros comprueben si pueden sacar }
    cola.wait() ;                { esperar hasta volver a comprobar }
end
saldo = saldo - cantidad ;      { retirar cantidad }
cola.signal() ;                 { permitir a otros comprobar }
end
procedure Depositar( cantidad : integer )
begin
    saldo = saldo + cantidad;
    cola.signal() ;
end
{ inicializacion }
begin
    saldo = saldo_inicial ; { == constante predefinida }
end

```

Hay que tener en cuenta que en el caso de que en la cola haya varios clientes y se produzca un ingreso que no sea suficiente para que ninguno de ellos pueda sacar, entonces el primero en comprobar que no puede, al hacer **signal**, pasa a la cola de urgentes y saca al siguiente de la cola condición. Esto ocurre para todos los de la cola, en cadena, hasta el último, que hace **signal** de la cola vacía, no da paso a ningún otro proceso y por tanto puede ejecutar su **wait**, por lo cual a partir de entonces todos los procesos abandonan la cola de urgentes y van haciendo **wait**, entrando por consiguiente de nuevo en la cola condición.

(a.2) Puede retirar el primero que tenga saldo, colas con prioridad

Usando colas de prioridad, el problema se resuelve muy fácilmente (este es un ejemplo claro de la utilidad de las colas de prioridad). Para hacerlo, usamos como valor de prioridad para entrar en la cola la cantidad que el cliente quiere retirar. De forma que, si hay varios clientes esperando retirar, siempre tras un **signal** saldrá uno de los que quieren retirar la cantidad mínima de entre todas las cantidades a retirar.

Si el cliente seleccionado no puede retirar, no puede hacerlo ningún otro, por lo cual no es necesario que antes de volver a la cola avise a los demás, y el algoritmo se simplifica bastante. Por otro lado, sigue siendo necesario que tras retirar un cliente despierte al siguiente, ya que puede que un ingreso permita más de una operación de retirada.

La solución queda así:

```

Monitor CuentaCorriente;

var saldo : integer ;
    cola : condition ;

procedure Retirar( cantidad : integer )
begin
    while cantidad > saldo do
        cond.wait( cantidad );
    saldo = saldo - cantidad;
    cola.signal() ;
end
procedure Depositar( cantidad : integer )
begin

```

```

    saldo = saldo + cantidad;
    cond.signal();
end
{ inicializacion }
begin
    saldo = saldo_inicial ;
end

```

(b.1) Puede retirar únicamente el primero que llegó al banco, colas sin prioridad

En este caso no se puede usar una única cola condición sin prioridad, ya que en ese caso cuando el proceso que más tiempo lleva en ella sale para comprobar el saldo y resulta insuficiente, dicho proceso vuelve a la cola y se pone el último, perdiendo la prioridad que debe tener según el enunciado, por ser el más antiguo. Sin embargo, se puede escribir una solución sencilla que se basa en tener dos variables condición (dos colas) para los clientes:

- Una cola donde espera el cliente que llegó primero (decimos que es el cliente que *está en la ventanilla del banco*), que es el único al que se puede dar dinero. A esa cola se le llama **ventanilla**. Esta cola no necesita prioridades, ya que tiene una hebra como mucho.
- El resto de clientes esperan en una cola distinta, a la que llamaremos **resto**, y que es una cola FIFO normal sin prioridad, ya que solo salen de ella una vez, cuando la ventanilla queda libre, y sale el que más tiempo lleva en **resto** (notese que si no hay ningún cliente en **ventanilla**, no puede haber ninguno en **resto**)

Cuando un cliente llega al banco, si la cola **ventanilla** está vacía, entonces pasa a esa cola, en otro caso (ya hay uno en **ventanilla**) el cliente espera en **resto**. La solución podría quedar así:

```

Monitor CuentaCorriente ;

    var saldo : integer ;
        ventanilla, resto : condition ;

procedure Retirar( cantidad : integer ) ;
begin
    if ventanilla.queue() then { si hay otro cliente en ventanilla }
        resto.wait() ;        { esperar junto con resto de clientes }
    while saldo < cantidad do { mientras saldo no suficiente }
        ventanilla.await() ;  { esperar en ventanilla }
        saldo := saldo - cantidad ; { retirar cantidad del saldo }
        resto.signal() ;      { hacer pasar otro a ventanilla, si hay }
    end
procedure Depositar( cantidad : integer ) ;
begin
    saldo := saldo + cantidad ; { depositar }
    ventanilla.signal() ; { avisar al de ventanilla, si hay }
end
{ inicializacion }
begin
    saldo := 0 ;
end

```

(b.2) Puede retirar únicamente el primero que llegó al banco, colas con prioridad

En este caso la solución es parecida a las anteriores, con la diferencia de que la cola de clientes esperando en el banco es FIFO, ya que, en cualquier momento, de todos los clientes esperando el único que puede retirar dinero es el que más tiempo hace que llamó a **Retirar**.

Para lograr que la cola sea FIFO, los clientes que retiran hacen **wait** usando como prioridad un *número de ticket* que indica el número de orden en la cola de ese cliente. Para ello se usa una variable **ticket**, local al procedimiento **retirar**. En el monitor se guarda una variable, llamada **contador**, que sirve para que cada cliente, cuando accede a retirar, pueda saber cual es su número de ticket.

Cuando un cliente entra al monitor para retirar y e inmediatamente verifica que hay saldo suficiente, no podrá hacerlo si ya había otros procesos en la cola, ya que eso significa que, aunque hay saldo para él, no es el cliente que puede retirar pues hay esperando al menos otro que llegó antes. Por tanto, si al entrar un cliente ve la cola con al menos otro cliente, el que entra debe ingresar en dicha cola.

```

Monitor CuentaCorriente ;

    var saldo, contador : integer ;
        cola           : condition ;

procedure Retirar( cantidad : integer ) ;
var ticket : integer ;
begin
    ticket := contador ;           { leer numero de ticket propio    }
    contador := contador + 1 ;     { incrementar contador de tickets }
    if cola.queue() then          { si ya hay otros esperando:    }
        cola.wait(ticket) ;       { ingresar en la cola          }
    while cantidad > saldo or      { mientras el saldo no sea suficiente }
        cola.wait(ticket) ;       { esperar                      }
    saldo := saldo - cantidad ;    { retirar la cantidad          }
    cola.signal() ;               { avisar al siguiente que llego, si hay }
end
procedure Depositar( cantidad : integer ) ;
begin
    saldo := saldo + cantidad ; { depositar }
    cola.signal() ; { avisar al que mas tiempo lleve esperando, si hay alguno }
end
{ inicializacion }
begin
    saldo := 0 ;
    contador := 0 ;
end

```

25

Los procesos P_1, P_2, \dots, P_n comparten un único recurso R , pero solo un proceso puede utilizarlo cada vez. Un proceso P_i puede comenzar a utilizar R si está libre; en caso contrario, el proceso debe esperar a que el recurso sea liberado por otro proceso. Si hay varios procesos esperando a que quede libre R , se concederá

al proceso que tenga mayor prioridad. La regla de prioridad de los procesos es la siguiente: el proceso P_i tiene prioridad i , (con $1 \leq i \leq n$), donde los números menores implican mayor prioridad (es decir, si $i < j$, entonces P_i pasa por delante de P_j) Implementar un monitor que implemente los procedimientos **Pedir** y **Liberar**.

Respuesta (privada)

```
Monitor Recurso ;

var ocupado : boolean ;
    recurso : condition ;

procedure Pedir( i : integer )
begin
    if ocupado then
        recurso.wait(i);
        ocupado = true;
    end
procedure Liberar()
begin
    ocupado = false;
    recurso.signal();
end
{ Inicializacion }
begin
    ocupado := false;
end
```

26

En un sistema hay dos tipos de procesos: A y B . Queremos implementar un esquema de sincronización en el que los procesos se sincronizan por bloques de 1 proceso del tipo A y 10 procesos del tipo B . De acuerdo con este esquema:

- Si un proceso de tipo A llama a la operación de sincronización, y no hay (al menos) 10 procesos de tipo B bloqueados en la operación de sincronización, entonces el proceso de tipo A se bloquea.
- Si un proceso de tipo B llama a la operación de sincronización, y no hay (al menos) 1 proceso del tipo A y 9 procesos del tipo B (aparte de él mismo) bloqueados en la operación de sincronización, entonces el proceso de tipo B se bloquea.
- Si un proceso de tipo A llama a la operación de sincronización y hay (al menos) 10 procesos bloqueados en dicha operación, entonces el proceso de tipo A no se bloquea y además deberán desbloquearse exactamente 10 procesos de tipo B . Si un proceso de tipo B llama a la operación de sincronización y hay (al menos) 1 proceso de tipo A y 9 procesos de tipo B bloqueados en dicha operación, entonces el proceso de tipo B no se bloquea y además deberán desbloquearse exactamente 1 proceso del tipo A y 9 procesos del tipo B .
- No se requiere que los procesos se desbloqueen en orden FIFO.

Implementar un monitor (con semántica SU) que implemente procedimientos para llevar a cabo la sincronización requerida entre los diferentes tipos de procesos. El monitor puede exportar una única operación de sincronización para todos los tipos de procesos (con un parámetro) o una operación específica para los de tipo A y otra para los de tipo B.

Respuesta (privada)

En esta solución se exporta un procedimiento para los procesos de tipo A (llamada **SincA**), y otra para los de tipo B (**SincB**).

Parace bastante evidente que todos los procesos necesitan saber cuantos procesos de cada tipo han llegado ya a la cita. Usaremos dos variables enteras para ello, llamadas **nA** y **nB**. Para implementar las esperas, cada proceso comprobará si es el último del grupo de 11 procesos en la cita. Si lo es, despierta a los otros 10. Si no lo es, espera hasta que otro proceso posterior lo despierte. Después, el proceso continua.

Cuando el último en llegar a la cita despierta a todos los demás, dicho último proceso permanece en la cola de urgentes hasta que todos los demás (que estaban esperando) abandonan todos el monitor, así que durante ese intervalo de tiempo se prohíbe la entrada de otros nuevos procesos a la operación del monitor (esperan en la cola del monitor).

```
Monitor Sincronizacion ;

var  nA,nB      : integer ;    { numero de procesos de tipo A o B esperandp }
     condA, CondB : condition ; { colas para esperas de procesos tipo A o B }

procedure SincA ()
begin
  nA := nA+1 ;                { uno mas de tipo A.      }
  if nB < 10 then              { si aun no hay 10 de tipo B: }
    condA.wait() ;            { esperar a que los haya    }
  else                         { si ya hay 10 de tipo B:  }
    for i := 1 to 10 do       { para cada uno de ellos:   }
      condB.signal() ;        { despertarlo              }
    nA := nA-1 ;              { uno menos de tipo A      }
end

procedure SincB()
begin
  nB := nB+1 ;                { uno mas de tipo B.      }
  if nA < 1 or nB < 10 then    { si no esta el A o no estan 10 del B: }
    condB.wait() ;            { esperar a que esten todos  }
  else begin                  { si ya esta el A y soy el ultimo B: }
    condA.signal() ;          { despertar al A            }
    for i := 1 to 9 do        { para cada uno de los otros 9 B: }
      condB.signal() ;        { despertarlo              }
    end                       {                               }
    nB := nB-1 ;              { uno menos de tipo B      }
end

{ Inicializacion }
begin
  nA := 0 ;
  nB := 0 ;
```


end

27

El siguiente monitor (**Barrera2**) proporciona un único procedimiento de nombre **entrada**, que provoca que el primer proceso que lo llama sea suspendido y el segundo que lo llama despierte al primero que lo llamó (a continuación ambos continúan), y así actúa cíclicamente. Obtener una implementación de este monitor usando semáforos.

```
Monitor Barrera2 ;

    var n : integer;      { num. de proc. que han llegado desde el signal }
        s : condicion ;   { cola donde espera el segundo }

procedure entrada() ;
begin
    n := n+1 ;           { ha llegado un proceso mas }
    if n < 2 then        { si es el primero: }
        s.wait()        { esperar al segundo }
    else begin           { si es el segundo: }
        n := 0;          { inicializa el contador }
        s.signal()      { despertar al primero }
    end
end
{ Inicializacion }
begin
    n := 0 ;
end
```

Respuesta (privada)

Necesitaremos un semáforo **s** para las esperas asociadas a la cita, y otro **mutex** que implementa la exclusión mutua en el acceso a las variables compartidas. Por supuesto, también se necesita una variable compartida (**n**) para saber si otro proceso ha llegado antes a la cita o no.

El código quedaría como aparece aquí:

```
{ variables compartidas }
var n      : integer := 0 ;
    s      : semaphore := 0 ;
    mutex : semaphore := 1 ;

procedure entrada() ;
begin
    sem_wait( mutex );
    n := n+1 ;           { uno más ha llegado a la cita }
    if n < 2 then begin { si es el primero: }
        sem_signal( mutex ); { liberar exclusión mutua }
        sem_wait( s );      { esperar al segundo }
    end
end
```

```

else begin
    n := 0 ;
    sem_signal( s );
    sem_signal( mutex );
end
end
end

```

28

Este es un ejemplo clásico que ilustra el problema del *interbloqueo*, y aparece en la literatura con el nombre de **el problema de los filósofos-comensales**. Se puede enunciar como se indica a continuación:

Sentados a una mesa están cinco filósofos. La actividad de cada filósofo es un ciclo sin fin de las operaciones de pensar y comer. Entre cada dos filósofos hay un tenedor. Para comer, un filósofo necesita obligatoriamente dos tenedores: el de su derecha y el de su izquierda. Se han definido cinco procesos concurrentes, cada uno de ellos describe la actividad de un filósofo. Los procesos usan un monitor, llamado **MonFilo**.

Antes de comer cada filósofo debe disponer de su tenedor de la derecha y el de la izquierda, y cuando termina la actividad de comer, libera ambos tenedores. El filósofo i alude al tenedor de su derecha como el número i , y al de su izquierda como el número $i + 1 \bmod 5$.

El monitor **MonFilo** exportará dos procedimientos: **coge_tenedor**(num_tenedor, num_proceso) y **libera_tenedor**(i) para indicar que un proceso filósofo desea coger un tenedor determinado.

El código del programa (sin incluir la implementación del monitor) es el siguiente:

```

monitor MonFilo ;
....
procedure coge_tenedor( num_ten, num_proc : integer );
....
procedure libera_tenedor( num_ten : integer );
....
begin
....
end

process Filosofo[ i: 0..4 ] ;
begin
while true do begin
    MonFilo.coge_tenedor(i,i);           { argumento 1=codigo tenedor }
    MonFilo.coge_tenedor(i+1 mod 5,i);   { argumento 2=numero de proceso }
    comer();
    MonFilo.libera_tenedor(i);
    MonFilo.libera_tenedor(i+1 mod 5);
    pensar();
end
end

```

Con este interfaz para el monitor, responde a las siguientes cuestiones:

- (a) Diseña una solución para el monitor **MonFilo**
- (b) Describe la situación de interbloqueo que puede ocurrir con la solución que has escrito antes.
- (c) Diseña una nueva solución, en la cual se evite el interbloqueo descrito, para ello, esta solución no debe permitir que haya más de cuatro filósofos simultáneamente intentado coger su primer tenedor

Respuesta (privada)

Cuestión (a)

Respecto de las variables permanentes, los procesos necesitan saber si cada tenedor está libre u ocupado, lo cual se debe implementar obviamente con una variable lógica por cada tenedor. Dada la numeración de filósofos y tenedores, lo más sencillo es usar un array de 5 valores lógicos, con índices comenzando en cero. Lo llamamos `ten_ocup`. El valor de `ten_ocup[i]` es `true` si el *i*-ésimo tenedor está ocupado, `false` si está libre.

Respecto de las variables condición, vemos que un filósofo puede estar en un instante de tiempo esperando que se quede libre un tenedor concreto, por tanto necesitamos una cola de espera por cada tenedor, ya que la condición de espera de cada tenedor es distinta, en concreto, la condición del *i*-ésimo tenedor es `not ten_ocup[i]`. Cada una de estas colas tendrá un proceso como mucho. De nuevo, lo más fácil es disponerlas también en un array.

```
monitor MonFilo ;
var
  ten_ocup  : array[0..4] of boolean ; { true <==> el i-ésimo tenedor está en uso }
  cola_ten  : array[0..4] of condition; { colas de espera por cada tenedor      }

procedure coge_tenedor( num_ten, num_proc : integer );
begin
  if ten_ocup[num_ten] then           { si el tenedor esta ocupado: }
    cola_ten[num_ten].wait() ;        { esperar a que este libre }
    ten_ocup[num_ten] := true ;       { marcar tenedor como ocupado }
  end
procedure libera_tenedor( num_ten : integer );
begin
  ten_ocup[num_ten] := false ;        { el tenedor ya no esta ocupado }
  cola_ten[num_ten].signal() ;        { avisar a alguno que lo esperaba, si hay }
end
{ inicializacion }
begin
  for i := 0 to 4 do
    ten_ocup[i] := false ; { tenedores libres }
  end
end
```

Cuestión (b)

El interbloqueo ocurre si todos los filósofos toman el tenedor a su izquierda antes de que ninguno de ellos pueda coger el tenedor de la derecha, en ese caso todos los filósofos quedan esperando en el `wait` de la segunda llamada al monitor para coger un tenedor, sin que ninguno de ellos pueda abandonar dicho `wait`, al no haber ninguna operación `signal`.

Cuestión (c)

Para esta nueva solución mantenemos las colas y variables permanentes que ya había en la anterior. Para solucionar el interbloqueo, un filósofo hará una espera previa, antes de intentar coger su primer tenedor, si ya hay 4 filósofos que han cogido su primer tenedor pero todavía no han cogido su segundo tenedor. Para implementarlo, añadimos una nueva variable permanente entera (**num_f12**), que nos indica cuantos filósofos hay entre su primer y segundo tenedor. Añadimos por tanto una cola de espera, llamada **previa**, para el caso de que un filósofo deba retrasar su intento de coger su primer tenedor. La condición que esperan los filósofos en la cola **previa** es **num_f12 < 4**. De esta manera, evitamos que haya 5 filósofos esperando en las colas de tenedor, ya que como mucho habrá 1 esperando en **previa** y 4 en las colas de los tenedores (se garantiza que al menos uno de los 4 en las colas de tenedores podrá progresar, ya que al menos uno de ellos tendrá disponible su segundo tenedor con seguridad).

En la solución se debe distinguir si un filósofo está intentando coger su primer tenedor o el segundo. Esto es fácil hacerlo ya que en el caso de ser primer tenedor, el número de filósofo coincide con el del tenedor.

```
monitor MonFilo ;
var
  previa      : condition ;           { no más de cuatro esperando primer tenedor }
  ten_ocup    : array[0..4] of boolean ; { true <==> el i-ésimo tenedor está en uso }
  cola_ten    : array[0..4] of condition; { colas de espera por cada tenedor }
  num_f12     : integer ;             { número de filósofos con 1er y sin 2o ten. }

procedure coge_tenedor( num_ten, num_proc : integer );
begin
  { si es necesario, hacer espera previa }
  if num_ten == num_proc then begin { si es el primer tenedor de los dos: }
    if num_f12 == 4 then             { si ya hay 4 con 1er y sin 2o }
      previa.wait() ;                { esperar a que alguno logre su segundo }
    end
  end

  { coger el tenedor, esperando si es necesario }
  if ten_ocup[num_ten] then          { si el tenedor está ocupado: }
    cola_ten[num_ten].wait() ;       { esperar a que este libre }
  ten_ocup[num_ten] := true ;        { marcar tenedor como ocupado }

  { actualizar cuenta de procesos con 1o y sin 2o }
  if num_ten == num_proc then        { si ha cogido su primer tenedor: }
    num_f12 := num_f12+1 ;           { hay uno más con 1o y sin 2o }
  else begin                          { si ha cogido su segundo tenedor: }
    num_f12 := num_f12-1 ;           { hay uno menos con 1o y sin 2o }
    if num_f12 < 4 then               { si ahora ya hay menos de 4 con 1o y sin 2o }
      previa.signal() ;              { dejar uno coja primero, si hay }
    end
  end
end

procedure libera_tenedor( num_ten : integer );
begin
  ten_ocup[num_ten] := false ;       { el tenedor ya no esta ocupado }
  cola_ten[num_ten].signal() ;       { avisar a alguno que lo esperaba, si hay }
end

{ inicializacion }
begin
  num_f12 := 0 ;                     { hay 0 filósofos con 1o y sin 2o }
end
```

```
for i := 0 to 4 do  
    ten_ocup[i] := false ; { tenedores libres inicialmente }  
end
```

