

## SINCRONIZAÇÃO DE PROCESSOS

- ◆ O problema das secções críticas
- ◆ Soluções baseadas em *software*
- ◆ Soluções baseadas em *hardware*
- ◆ O mecanismo de sincronização básico: semáforos
- ◆ Mecanismos de sincronização mais sofisticados: monitores, passagem de mensagens, regiões críticas
- ◆ Problemas clássicos de sincronização



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Execução concorrente

- ◆ Execução concorrente
  - execução cooperante ou não-cooperante logicamente ao mesmo tempo (ex: multiprogramação)
- ◆ Execução em paralelo
  - execução cooperante ou não-cooperante fisicamente ao mesmo tempo (ex.: multiprocessamento)
- ◆ A execução concorrente pode ocorrer em
  - sistemas uniprocessador
    - interlaçamento de execução (multiprogramação)
  - sistemas multiprocessador
    - interlaçamento e sobreposição de execução (multiprogramação c/ multiprocessamento)
- ◆ Os processos concorrentes precisam frequentemente de partilhar dados / recursos.
- ◆ O acesso concorrente a dados partilhados pode resultar em inconsistência desses dados, se o acesso não ocorrer de forma controlada.
- ◆ Execução concorrente ⇒
  - mecanismos de comunicação entre processos
  - sincronização entre as suas acções



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Necessidade de Sincronização - Exemplo 1

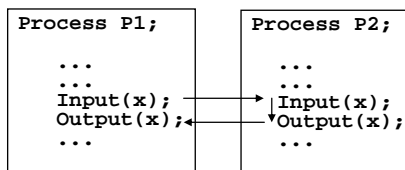
- ◆ Os processos P1 e P2 executam o seguinte código tendo acesso à mesma variável x.

```
Process P1;
Begin
  ...
  Input(x);
  Output(x);
  ...
End;
```

```
Process P2;
Begin
  ...
  Input(x);
  Output(x);
  ...
End;
```

- ◆ Os processos podem ser interrompidos em qualquer ponto.

- ◆ Se P1 for interrompido após a entrada de dados e P2 executar inteiramente então o carácter ecoado por P1 será o que foi lido por P2 !!!



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Exemplo 2

- ◆ Dois processos
  - um lê caracteres do teclado
  - outro ecoa os caracteres lidos para o écran
  - os caracteres são inseridos num *buffer* circular
  - uma variável partilhada, Count, indica o nº de caracteres contidos no *buffer*

```
Process Keyboard;
Begin
  ...
  Count:=Count+1;
  ...
End;
```

```
Process Display;
Begin
  ...
  Count:=Count-1;
  ...
End;
```

- ◆ O que parece uma operação única (actualização da variável count) pode ser traduzido numa série de instruções-máquina.  
Ex.:

```

...      Count:=Count+1;  →  load   A, Count
...                               add    A, 1
...                               store  A, Count
  
```



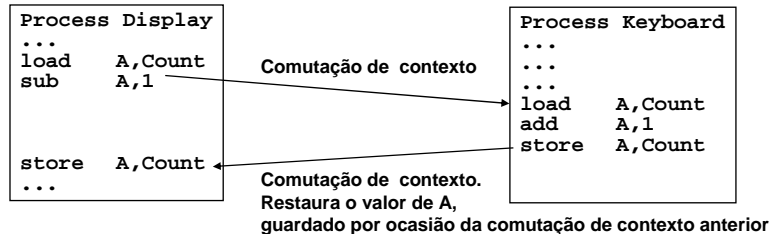
FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Exemplo 2 (cont.)

- ◆ A execução concorrente pode causar um problema (*race condition*):



- ◆ Admitindo que o valor inicial de Count era 5, qual será o valor final ?  
E qual deveria ser ?

◆ Race condition

- situação em que vários processos acedem e manipulam os mesmos dados, concorrentemente, e o resultado da execução depende da ordem em que se dá o acesso a esses dados.



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Exemplo 3

```
struct {
    // nome, B.I., etc...;
    int saldo; } Conta;

int levantar (Conta *conta, int valor) {
    if (conta->saldo >= valor)
        conta->saldo = conta->saldo - valor;
    else
        valor = -1; // ERRO
    return valor;
}
```

Qual é o problema ?



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Exemplo 3 (cont.)

```

struct {
    // nome, B.I., etc...;
    int saldo; } Conta;

int levantar (Conta *conta, int valor) {
    if (conta->saldo >= valor)
        conta->saldo = conta->saldo - valor;
    else
        valor = -1; // ERRO
    return valor;
}

```

Process P1;

```

... levantar (...) {
    if (...) {
        conta->saldo =
        conta->saldo - valor;
    }
    ...
}

```

Process P2;

```

... levantar (...) {
    if (...) {
        ...
        conta->saldo =
        conta->saldo - valor;
    }
    ...
}

```



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Exemplo 3 (cont.)

```

struct {
    // nome, B.I., etc...;
    int saldo; } Conta;

int levantar (Conta *conta, int valor) {
    if (conta->saldo >= valor)
        conta->saldo = conta->saldo - valor;
    else
        valor = -1; // ERRO
    return valor;
}

```

```

... mov AX,saldo
   mv BX,valor
   sub AX,BX
   mov Saldo,AX
   ...

```

Process P1;

```

... levantar (...) {
    if (...) {
        conta->saldo =
        conta->saldo - valor;
    }
    ...
}

```

Process P2;

```

... levantar (...) {
    if (...) {
        ...
        conta->saldo =
        conta->saldo - valor;
    }
    ...
}

```



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## O problema das secções críticas

- ◆ Quando um processo executa código que manipula dados / recursos partilhados, diz-se que o processo está na sua secção crítica (para esses dados / recursos).
- ◆ A execução de secções críticas deve ser mutuamente exclusiva: em cada instante, apenas um processo poderá estar a executar na sua secção crítica (mesmo com múltiplos *CPUs*).
- ◆ Por isso, cada processo deve pedir autorização para entrar na sua secção crítica (SC).
- ◆ A secção de código que implementa este pedido é chamada a secção de entrada (SE).
- ◆ A SC é seguida por uma secção de saída (SS).
- ◆ O resto do código constitui a designada secção restante (SR).
- ◆ O problema das secções críticas é conceber um protocolo que os processos possam usar para que a sua acção não dependa da ordem pela qual a sua execução é interlaçada (mesmo com múltiplos *CPUs*).



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Pressupostos p/ a análise de soluções

- ◆ Cada processo executa com velocidade não nula mas não é feita qualquer suposição acerca da velocidade relativa dos processos.
- ◆ A estrutura geral de uma secção crítica é:  

Secção de entrada;  
Secção crítica;  
Secção de saída;  
Secção restante
- ◆ Podem existir vários *CPU's* mas o *hardware* de memória impede o acesso simultâneo à mesma posição de memória.
- ◆ Não são feitos pressupostos acerca da ordem de interlaçamento da execução.
- ◆ Nas soluções, é necessário especificar as secções de entrada e de saída.



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

### Requisitos que uma solução do problema das SCs deve satisfazer

- ◆ Só um processo de cada vez pode entrar na secção crítica (exclusão mútua).
  - ◆ Um processo a executar numa secção não-crítica não pode impedir outros processos de entrar na secção crítica (progresso).
  - ◆ Um processo que peça para entrar numa secção crítica não deve ficar à espera indefinidamente (espera limitada).
- 
- ◆ Não são feitos pressupostos acerca da velocidade relativa dos processadores (ou do seu número)
  - ◆ Supõe-se que um processo permanece numa secção crítica durante um tempo finito.



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

### Tipos de soluções

- ◆ Soluções baseadas em software (do utilizador)
  - Código escrito pelo programador dos processos.
  - Baseadas em algoritmos cuja correcção não se baseia em nenhum pressuposto além dos anteriores.
- ◆ Soluções baseadas em hardware
  - Baseadas em instruções-máquina especiais.
- ◆ Soluções baseadas em serviços do Sistema Operativo / Linguagens
  - Baseadas em funções e estruturas de dados, fornecidas pelo S.O..
    - semáforos
    - monitores



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Soluções baseadas em software

- ◆ Vamos analisar a evolução de algumas tentativas para resolver o problema (escrita do código da SE e SS).
- ◆ Admite-se que
  - Os processos podem partilhar algumas variáveis globais para sincronizar as suas acções.
  - A operação de leitura (ou de escrita) da memória é atómica.
- ◆ Consideraremos primeiro o caso de 2 processos
  - O algoritmo 1 e o algoritmo 2 são incorrectos.
  - O algoritmo 3 (algoritmo de Peterson) é correcto.
- ◆ Apresentaremos uma solução mais geral, para  $n$  processos
  - O algoritmo da padaria (*bakery algorithm*)

Notação:

- Começamos com 2 processos, P0 e P1.
- Ao falar do processo Pi, Pj representa sempre o outro processo ( $i \neq j$ )



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Algoritmo 1

Variáveis partilhadas:

Turn: 0..1; { Turn = i significa que o proc. Pi pode entrar na SC  
caso contrário não pode - Valor inicial: 0 ou 1 }

Process P0;

```
...
Repeat
  While Turn <> 0 do;
    { SecçãoCrítica }
    Turn:=1;
    { SecçãoRestante };
  Forever;
...
```

Process P1;

```
...
Repeat
  While Turn <> 1 do;
    { SecçãoCrítica }
    Turn:=0;
    { SecçãoRestante }
  Forever;
...
```

Análise do algoritmo:

- ◆ Garante a exclusão mútua das secções críticas:
  - Só um processo pode estar na sua secção crítica;  
Pi está em espera activa (*busy waiting*) se Pj estiver na SC.
- ◆ Não garante o progresso:
  - A execução das secções críticas é feita de forma estritamente alternada
    - Se Pi quiser entrar 2 vezes consecutivas na secção crítica não pode.



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Algoritmo 2

### Variáveis partilhadas:

Flag: Array[0..1] of Boolean; { Flag[i]=True significa que  
o proc. Pi está pronto a entrar na SC }

### Inicialmente

Flag[0] = Flag[1] = false;

### Process Pi;

...

```
Flag[i] = True;      { Pi está pronto a entrar na SC}
While Flag[j] do;    { Se Pj tb. estiver pronto, espera}
{ SecçãoCrítica }
Flag[i] = False;     { Permite que P0 entre}
...
```

### Análise do algoritmo:

◆ Garante a exclusão mútua das secções críticas.

◆ Não garante o progresso:

■ Se for executada a sequência

- t0 : Flag[0] = true;
- t1 : Flag[1] = true;

ambos os processos ficarão eternamente à espera de entrar na SC  
(situação de *deadlock*)



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Algoritmo 3 (algoritmo de Peterson)

### Variáveis partilhadas:

Turn: 0..1;

Flag: Array[0..1] of Boolean; // Flag[i]=True significa que  
// o proc. Pi está pronto a entrar na SC

### Inicialmente

Turn = qualquer valor, 0 ou 1;  
Flag[0] = Flag[1] = False;

### Process Pi;

...

```
Flag[i] := True;      // Pi está pronto a entrar na SC
Turn := j;            // mas dá a vez a Pj, se ele precisar
While Flag[j] And (Turn=j) do;
{ SecçãoCrítica }
Flag[i] = False;      //Permite que Pj entre
...
```



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## Algoritmo 3

(algoritmo de Peterson)

### Análise do algoritmo:

- ◆ Garante a exclusão mútua das secções críticas
  - Um processo ( ex: P1) só entra na SC se
    - o outro não quiser entrar (  $Flag[0]=False$  )
    - ou se for a sua vez (  $Turn=1$  )
  - Mesmo que os processos executem a sequência
    - $t0 : Flag[0] := True;$
    - $t1 : Flag[1] := True;$
 só um deles poderá entrar porque  $turn$  só pode tomar um valor, 0 ou 1.
- ◆ Garante o progresso e uma espera limitada
  - P1 entrará na sua secção crítica (progresso) depois de, no máximo, uma entrada de P0 (espera limitada)

A implementação deste algoritmo para mais de 2 processos é complicada.



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Algoritmo da padaria

(*bakery algorithm, Lamport*)

- ◆ Solução para  $n$  processos.
- ◆ Antes de entrar na secção crítica, cada processo recebe um *ticket* com um número (como nas padarias, ...)
- ◆ Entra na SC o processo que tiver o número mais pequeno.
- ◆ Se vários processos receberem o mesmo número usa-se o identificador do processo para desempatar.

### Notação:

- $n = n^o$  de processos
- $(a,b) < (c,d)$  se  $(a < c)$  ou  $((a=c) \text{ e } (b < d))$ 
  - $a, c = n^o$  do *ticket*
  - $b, d =$  identificador do processo
- $\max(a_0, \dots, a_{n-1})$  é um número  $k$  ( $n^o$  do *ticket*), tal que  $k \geq a_i$  ( $a_i = n^o$  do *ticket* de qq. um dos outros), para  $i=0 \dots n-1$



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Algoritmo da padaria

### Variáveis partilhadas:

choosing: Array[0..n-1] of Boolean;  
number : Array[0..n-1] of Integer;

### Inicialmente

choosing[i] = false, para i=0..n-1;  
number[i] = 0, para i=0..n-1;

### Bloco de entrada na SC

```
choosing[i]:=true;
number[i]:= max(number[0],..., number[n-1])+1;
choosing[i]:=false;
For j:=0 to n-1 do
  Begin
    While choosing[j] do;
    While (number[j]<>0) And
      ((number[j],j)<(number[i],i) do;
  End;
```

• Anuncia intenção de tirar *ticket*  
• Tira o *ticket*  
• Anuncia que já tirou o *ticket*  
• Espera que outros acabem de tirar o *ticket*  
• Espera, se alguém está a executar a SC. Esse alguém deve  
• ter *ticket* → number[j]<>0  
• e ter direito a acesso antes de Pi → (number[j],j)<(number[i],i)

### Bloco de saída da SC

number[i]:=0; • Deita fora o *ticket*



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Limitações das soluções por *software*

### Características das soluções algorítmicas apresentadas:

- São da competência do programador.
- São complexas (principalmente, para mais do que 2 processos).
- Requerem espera activa (*busy waiting*)
  - os processos que estão a pedir para entrar na sua secção crítica estão a consumir tempo do processador, desnecessariamente.
  - Se as SCs forem demoradas seria mais eficiente bloquear os processos que estão à espera.



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Soluções baseadas em *hardware*

### ◆ Sistemas uniprocessador

- Os processos concorrentes não podem ter execução sobreposta no tempo, mas apenas interlaçada.
- Para garantir a exclusão mútua bastaria inibir as interrupções, impedindo assim qualquer processo de ser interrompido.
  - perigoso permitir que os processos do utilizador o façam

```
Process Pi;
...
Disable_Interrupts;
SecçãoCrítica;
Enable_Interrupts;
...
```

### ◆ Sistemas multiprocessador

- A inibição de interrupções não garante a exclusão mútua.
- São necessárias instruções especiais que permitam testar e modificar uma posição de memória num único passo (sem interrupção), mesmo com vários *CPUs*.



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## A instrução *Test-and-Set*

### ◆ Equivalente numa linguagem de alto nível

```
Function Test_and_Set(Var Target: Boolean): Boolean;
Begin
  Test_and_Set := Target;
  Target := True;
End;
```

### ◆ Executada atomicamente (sem interrupção)

### ◆ Implementação da exclusão mútua usando *Test\_and\_Set*:

Variáveis partilhadas:

```
Lock: Boolean; // Valor inicial: false
}
```

```
Process Pi;
...
While Test_and_Set(Lock) do;
  SecçãoCrítica;
  Lock:=false;
...
```

Não satisfaz a condição de espera limitada. Quando um processo deixa a sua SC e há mais do que um processo à espera, a selecção do processo que entra a seguir é arbitrária. Por isso, um processo pode ficar indefinidamente à espera (inanição).



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## A instrução Swap

- ◆ Permite trocar entre si o valor de 2 variáveis atomicamente.
- ◆ Implementação da exclusão mútua usando *Swap*:

Variáveis partilhadas:

Lock: Boolean; { Valor inicial: False }

```

Process Pi;
...
Key:=True;
Repeat Swap(Lock,Key) Until Key=False;
{SecçãoCrítica };
Lock:=False;
...

```



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Spinlocks

- ◆ É um mecanismo de sincronização em que um processo / *thread* espera num ciclo (*spins*), testando se o *lock* (ferrolho) está disponível.
- ◆ É uma solução do tipo *busy waiting* para o problema da exclusão mútua.
- ◆ As operações sobre *spinlocks* são: InitLock, Lock e UnLock.

Type Lock = Boolean;

InitLock(L: Lock)

Lock := False;

Lock(L: Lock)

While TestAndSet(L) do;

UnLock(L: Lock)

Lock := False;

**Secção crítica:**

```

...
Lock(Mutex);
  SecçãoCrítica;
Unlock(Mutex);
...

```



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Características das soluções por *hardware*

- + Podem ser usadas com múltiplas secções críticas, cada secção crítica controlada por uma variável.
- + São aplicáveis a qualquer número de processos em sistemas uniprocessador ou multiprocessador
- Requerem suporte de hardware (instruções-máquina especiais).
- Usam espera activa (*busy waiting*)
  - Um processo à espera de entrar numa SC consome tempo de *CPU*.
- Se não forem tomadas precauções (v. pág. seguinte) é possível a inanição dos processos
  - Quando um processo deixa uma SC e há mais do que um processo à espera a selecção do processo que entra a seguir é arbitrária



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Solução baseada em *hardware* com espera limitada

```
Type Lock      = Boolean;
Waiting = Array[N] of Boolean;
```

InitLock(L: Lock)

```
Lock := False;
Waiting[1..N] := False;
```

Lock(L: Lock)

```
Waiting[i] := True;
Key := True;
while (Waiting[i] And Key)
  Key := TestAndSet(Lock);
Waiting[i] := False;
```

UnLock(L: Lock)

```
j := (i+1) Mod N;
while ((j <> i) And (Not Waiting[j]))
  j := (j+1) Mod N;
if (j=i)
  Lock := False;
else
  Waiting[j] := False;
```



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Semáforos (Dijkstra,1965)

### ◆ Semáforo

- mecanismo de sincronização (fornecido pelo S.O.) que não requer espera activa.

### ◆ Semáforo S

- Variável inteira S inicializada com um valor não-negativo ( $\geq 0$ )
- Depois de inicializada só pode ser actualizada através de duas operações atómicas:
  - `wait(S)` ou `P(S) : S:=S-1;`  
If  $S < 0$  then `Block(S)`;
  - `signal(S)` ou `V(S) : S:=S+1;`  
If  $S \leq 0$  Then `WakeUp(S)`;
- `Block(S)` - o processo que a invocou é bloqueado
- `WakeUp(S)` - um processo que invocou anteriormente `Block(S)` fica pronto a correr
- Para evitar espera activa, quando um processo tem de esperar é colocado numa fila de processos bloqueados no semáforo.



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Semáforos

### ◆ De facto, um semáforo é um registo (*record* ou *structure*):

```

Type Semaphore = Record
    Count: Integer;
    Queue: List_of_Process
End;

```

```
Var S: Semaphore;
```

### ◆ E as operações sobre semáforos são:

- `Wait(S) :`  
`S.Count:=S.Count-1;`  
 If  $S.Count < 0$  then  
   Begin  
     Colocar este processo em S.Queue;  
     Bloquear este processo  
   End;
- `Signal(S):`  
`S.Count:=S.Count+1;`  
 If  $S.Count \leq 0$  then  
   Begin  
     Remover um processo, P, de S.Queue;  
     Colocar P na fila de proc.s prontos  
   End;
- S.Count pode ser inicializada com um valor não negativo.
- Quando  $S.Count \geq 0$ , S.Count representa o nº de proc.s que podem executar `Wait(S)` sem bloquear.
- Quando  $S.Count < 0$ ,  $|S.Count|$  representa o nº de proc.s que estão à espera no semáforo.



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Implementação dos semáforos

- ◆ A implementação dos semáforos introduz implicitamente uma secção crítica:
  - O incremento e decremento da variável introduz uma secção crítica, bem como,
  - a alteração do valor da variável seguida de um teste do seu valor na instrução seguinte.
- ◆ `Wait()` e `Signal()` têm de ser operações atómicas.
- ◆ Como implementar a secção crítica interna ?
  - Sistema uniprocessador
    - Inibir as interrupções durante a execução de `Wait()` e `Signal()` ...
  - Sistemas multiprocessador
    - Usar uma das "soluções por *software*", anteriormente analisadas.
      - Notar que não nos livramos da espera activa, mas ela fica limitada às operações `Wait()` e `Signal()` que são curtas.
    - Usar uma das "soluções por *hardware*", anteriormente analisadas, se disponíveis (ex: `Test_And_Set` ou `Swap`)



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Utilização dos semáforos para resolver problemas de secções críticas

- ◆ Variável partilhada pelos N processos:

```
Var Mutex: Semaphore;
```
- ◆ Valor inicial

```
Mutex.Count:= 1;
```

(só 1 processo consegue entrar na SC - exclusão mútua)
- ◆ Um processo que não consiga entrar imediatamente na SC bloqueia e cede o processador.
- ◆ Os processos bloqueados retomam a sua execução, à medida que os outros processos forem saindo das SC's correspondentes.
- ◆ Um semáforo que é inicializado com o valor 1 e é usado por 2 ou mais processos para assegurar que só um deles consegue executar uma SC ao mesmo tempo é conhecido por semáforo binário ou *mutex*.

```
Process Pi;  
...  
Wait(Mutex);  
Secção_Crítica;  
Signal(Mutex);  
...
```



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

### Problemas comuns c/ a utilização de semáforos *Mutex*

- ◆ Inicializar o semáforo com o valor 0, em vez de 1
  - ⇒ nenhum processo consegue executar a secção crítica
- ◆ Trocar as operações P e V (Wait e Signal não se trocam tão facilmente)
  - ⇒ não há exclusão mútua
- ◆ "Aninhamento" inadequado de semáforos *Mutex*

■ Ex:  
O que acontece  
se a ordem  
de execução  
for A, C, B, D ?

R: *deadlock*

A  
B  
Process P1;  
...  
Wait(Mutex1);  
...  
Wait(Mutex2);  
Secção\_Crítica;  
Signal(Mutex1);  
...  
Signal(Mutex2);  
...

C  
D  
Process P2;  
...  
Wait(Mutex2);  
...  
Wait(Mutex1);  
Secção\_Crítica;  
Signal(Mutex2);  
...  
Signal(Mutex1);  
...



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

### Utilização dos semáforos para resolver problemas de sincronização

- ◆ Os semáforos que são inicializados com `S.Count=0` fornecem um mecanismo p/ sincronizar a execução de 2 processos.

Ex:  
A instrução S1 do proc. P1  
tem de ser executada  
antes da instrução S2 do proc. P2

Sync.Count:=0; // Inicialmente

Process P1;  
...  
S1;  
Signal(Sync);  
...

Process P2;  
...  
Wait(Sync);  
S2;  
...

Ex:  
Dois processos necessitam de  
esperar um pelo outro  
num determinado ponto

Sync1.Count:=0; //Inicialmente  
Sync2.Count:=0;

Process P1;  
...  
Signal(Sync1);  
Wait(Sync2);  
...

Process P2;  
...  
Signal(Sync2);  
Wait(Sync1);  
...



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## Problemas com os semáforos

- ◆ Os semáforos constituem um mecanismo poderoso para garantir a exclusão mútua e a sincronização de processos.
- ◆ Contudo, é fácil cometer erros na sua utilização.  
Quando as operações `wait()` e `signal()` estão espalhadas por vários processos, pode ser difícil compreender os seus efeitos.
- ◆ A sua utilização tem de ser correcta em todos os processos.
- ◆ Um processo mal escrito (ou "mal intencionado") pode contribuir para a falha de um conjunto de processos.



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problemas clássicos de sincronização

### Problema do Produtor/Consumidor

#### Enunciado

- ◆ Um processo produtor produz informação que é consumida por um processo consumidor.
  - ex: um programa de impressão produz caracteres que são consumidos por um *driver* de impressora
- ◆ Existe um *buffer* de itens que pode ser preenchido pelo produtor e esvaziado pelo consumidor.
- ◆ O processo produtor pode produzir um item enquanto o processo consumidor consome outro item.
- ◆ O produtor e o consumidor devem ser sincronizados de modo a que o consumidor não tente consumir um item ainda não produzido.
- ◆ Sendo o tamanho do *buffer* limitado, o produtor não pode acrescentar novos itens se o *buffer* estiver cheio.



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problema do Produtor/Consumidor

```

Var
  Buffer = ...
  Full, Empty, Mutex: Semaphore;

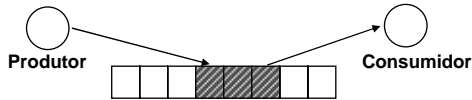
Inicialização:
  Full.Count:= 0;
  Empty.Count:= N;
  Mutex.Count:=1;
  
```

```

Process Producer;
...
Repeat
...
Produce(Item);
Wait(Empty);
Wait(Mutex);
Append(Item);
Signal(Mutex);
Signal(Full);
...
Until ...;
  
```

```

Process Consumer;
...
Repeat
...
Wait(Full);
Wait(Mutex);
Item=Take();
Signal(Mutex);
Signal(Empty);
Consume(Item);
...
Until ...;
  
```



- ◆ Full
  - p/ sincronizar os 2 processos;
  - não significa *buffer* cheio mas que tem pelo menos 1 item.
- ◆ Empty
  - p/ sincronizar os 2 processos;
  - não significa *buffer* vazio mas que se esvaziou um elem.to
- ◆ Mutex
  - p/implementar a exclusão mútua.



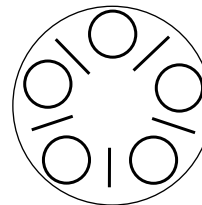
FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problema dos filósofos a jantar

### ◆ Enunciado:

- 5 filósofos estão sentados a uma mesa;
- os filósofos passam a vida a pensar e a comer (arroz ...?!);
- cada um precisa de 2 "pausinhos" para comer;
- só há 5 "pausinhos" ...!!!
- só pode pegar num pausinho de cada vez (e não pode roubar um do vizinho !)



- ◆ Problema clássico de sincronização.
- ◆ Ilustra a dificuldade de alocar recursos entre processos sem provocar impasse / bloqueamento fatal (*deadlock*) ou inanição (*starvation*).



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problema dos filósofos a jantar

### 1ª tentativa de solução

- ◆ Cada filósofo é um processo.
- ◆ Um semáforo por "pausinho":
  - Fork: Array[0..4] of Semaphore;
- ◆ Conduz a *deadlock* se, por exemplo, cada filósofo começar por pegar no "pausinho" à sua esquerda (/ direita).

Inicialização:

```
For i:=0 to 4 do  
  Fork[i].Count:=1;
```

```
Process Pi;  
Repeat  
  Think;  
  Wait(Fork[i]);  
  Wait(Fork[(i+1) Mod 5]);  
  Eat;  
  Signal(Fork[(i+1) Mod 5]);  
  Signal(Fork[i]);  
Until ...;
```



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problema dos filósofos a jantar

### 2ª tentativa de solução

- ◆ Depois de pegar no "pausinho" à sua esquerda, por exemplo, vê se o "pausinho" da direita está livre. Se estiver pausa o da esquerda.
- ◆ Problema:
  - Todos pegam no "pausinho" da esquerda simultaneamente.
  - Ao verem que o "pausinho" da direita está ocupado pousam todos os da esquerda !!!
  - Conduz a inanição (*starvation*).



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problema dos filósofos a jantar

### Uma solução

- ◆ Admitir que só 4 filósofos tentam comer simultaneamente.
- ◆ Usar um outro semáforo  $M$  que limita a 4 o número de filósofos que podem tentar comer.

#### Inicialização:

$M.Count := 4;$

- ◆ Então 1 filósofo pode sempre estar a comer enquanto os outros 3 seguram 1 "pausinho".

Quando aquele terminar, um dos outros pode comer.

#### Inicialização:

$M.Count := 4;$

```
Process Pi;
Repeat
  Think;
  Wait(M);
  Wait(Fork[i]);
  Wait(Fork[(i+1) Mod 5]);
  Eat;
  Signal(Fork[(i+1) Mod 5]);
  Signal(Fork[i]);
  Signal(M);
Until ...;
```



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problema dos filósofos a jantar

### Outra solução ("melhor que a anterior, pois garante máximo paralelismo", Tanenbaum)

```
#define N 5 /* Número de filósofos */
#define RIGHT(i) (((i)+1) % N)
#define LEFT(i) (((i)==0) ? (N-1) : (i)-1)
#define THINKING 0
#define HUNGRY 1
#define EATING 2

semaphore mutex = 1;
semaphore s[N]; /* inicializados com zero */
```

```
void take_forks(int i) {
  wait(&mutex);
  state[i] = HUNGRY;
  test(i);
  signal(&mutex);
  wait(&s[i]);
}
```

2

```
void put_forks(int i) {
  wait(&mutex);
  state[i] = THINKING;
  test(LEFT(i));
  test(RIGHT(i));
  signal(&mutex);
}
```

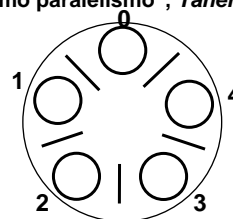
3

```
void test(int i) {
  if ( state[i] == HUNGRY &&
      state[LEFT(i)] != EATING &&
      state[RIGHT(i)] != EATING ) {
    state[i] = EATING;
    signal(&s[i]);
  }
}
```

4

```
void philosopher(int i) {
  while(.....) {
    think();
    take_forks(i); /*obtem 2 pausinhos ou bloqueia*/
    eat();
    put_forks(i);
  }
}
```

1



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Problema dos Leitores/Escritores

### ◆ O problema

- leitores e escritores acedem a informação comum
- leitores - apenas leem a informação
- escritores - modificam a informação

### ◆ Solução 1 - os leitores têm prioridade (mais simples)

- Enquanto um escritor estiver a aceder à informação nenhum outro escritor ou leitor pode aceder.
- Quando um leitor estiver a aceder à informação outros leitores que entretanto cheguem podem aceder livremente.

### ◆ Solução 2 - os escritores têm prioridade

- Impedir qualquer leitor de aceder à informação sempre que haja algum escritor à espera de a actualizar.
- Quando o leitor/escritor actual terminar o acesso um escritor que esteja à espera tem prioridade sobre outros leitores.



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Solução 1 - Prioridade aos leitores

```

Program ReadersWriters;
Var ReadCount: Integer;
    X, WSem: Semaphore (:=1);

Procedure Reader;
Begin
  Repeat
    Wait(X);
    ReadCount:=ReadCount+1;
    If ReadCount=1 Then Wait(WSem);
    Signal(X);
    READUNIT;
    Wait(X);
    ReadCount:=ReadCount-1;
    If ReadCount=0 Then Signal(WSem);
    Signal(X)
  Forever
End;

Begin
  ReadCount:=0;
  ParBegin
    Reader;
    Writer;
  ParEnd
End.

```

```

Procedure Writer;
Begin
  Repeat
    Wait(WSem);
    WRITEUNIT;
    Signal(WSem);
  Forever
End;

```

WSem - garante a exclusão mútua no acesso à informação partilhada; desde que um escritor esteja a aceder aos dados nenhum outro escritor ou leitor pode aceder; leitores ou escritores que cheguem entretanto têm de esperar em WSem.

X - garante que a actualização de ReadCount é feita correctamente

ReadCount - para tomar nota do número de leitores; desde que haja pelo menos um leitor os leitores que cheguem entretanto não têm de esperar.



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Solução 2 - Prioridade aos escritores

```

Program ReadersWriters;
Var ReadCount, WriteCount: Integer;
    X, Y, Z, WSem, RSem: Semaphore (:=1);

Procedure Reader;
Begin
  Repeat
    Wait(Z);
    Wait(RSem);
    Wait(X);
    ReadCount:=ReadCount+1;
    If ReadCount = 1 Then Wait(WSem);
    Signal(X);
    Signal(RSem);
    Signal(Z);
    READUNIT;
    Wait(X);
    ReadCount:=ReadCount-1;
    If ReadCount=0 Then Signal(WSem);
    Signal(X)
  ForEver
End;

Procedure Writer;
Begin
  Repeat
    Wait(Y);
    WriteCount:=WriteCount+1;
    If WriteCount=1 Then Wait(RSem);
    Signal(Y);
    Wait(WSem);
    WRITEUNIT;
    Signal(WSem);
    Wait(Y);
    WriteCount:=WriteCount-1;
    If WriteCount=0 Then Signal(RSem);
    Signal(Y);
  ForEver
End;

Begin
  ReadCount:=0; WriteCount:=0;
  ParBegin
    Reader;
    Writer;
  ParEnd
End.

```

Além dos semáforos e variáveis anteriores temos:

- RSem - impede o acesso dos leitores enquanto houver pelo menos um escritor a querer aceder à informação partilhada
- Y - garante que a actualização de WriteCount é feita correctamente
- WriteCount - controla o Signal a Rsem
- Z - só um leitor pode fazer fila em RSem
- os outros fazem fila em Z

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

```

Procedure Reader;
...
  Wait(Z);
  Wait(RSem);
  Wait(X);
  ReadCount:=ReadCount+1;
  If ReadCount = 1 Then Wait(WSem);
  Signal(X);
  Signal(RSem);
  Signal(Z);
  READUNIT;
  Wait(X);
  ReadCount:=ReadCount-1;
  If ReadCount=0 Then Signal(WSem);
  Signal(X);
...

Procedure Writer;
...
  Wait(Y);
  WriteCount:=WriteCount+1;
  If WriteCount=1 Then Wait(RSem);
  Signal(Y);
  Wait(WSem);
  WRITEUNIT;
  Signal(WSem);
  Wait(Y);
  WriteCount:=WriteCount-1;
  If WriteCount=0 Then Signal(RSem);
  Signal(Y);
...

```

### Estado das filas dos semáforos:

Só leitores no sistema ..... WSem activado  
Não existem filas

Só escritores no sistema ..... WSem e RSem activados  
Os escritores fazem fila em WSem

Leitores e escritores, com leitor a aceder em 1º lugar ..... WSem activado pelo leitor  
RSem activado pelo escritor  
Todos os escritores fazem fila em WSem  
Um leitor faz fila em RSem  
Outros leitores fazem fila em Z

Leitores e escritores, com escritor a aceder em 1º lugar ..... WSem activado pelo escritor  
RSem activado pelo escritor  
Os escritores fazem fila em WSem  
Um leitor faz fila em RSem  
Outros leitores fazem fila em Z

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Construções de alto nível p/ exclusão mútua e sincronização

- ◆ Monitores
- ◆ Regiões críticas
- ◆ Passagem de mensagens



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Monitores

- ◆ Monitor
  - módulo de *software* constituído por
    - 1 ou mais procedimentos
    - 1 secção de inicialização
    - dados locais (escondidos)
- ◆ O "mundo exterior" só "vê" os procedimentos.
- ◆ Os dados locais só podem ser manipulados no interior dos procedimentos.
- ◆ A entrada no monitor faz-se através de uma chamada a um procedimento.
- ◆ Só um processo pode estar a executar no monitor de cada vez.
- ◆ Deste modo os monitores permitem implementar facilmente a exclusão mútua.
- ◆ As variáveis de tipo condição (*condition variables*) permitem a sincronização.



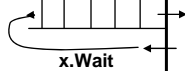
FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

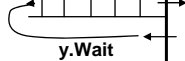
## Monitores

*x, y: condition variables*  
(podem ser usadas c/ 2 operações  
pré-definidas: wait e signal)

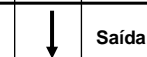
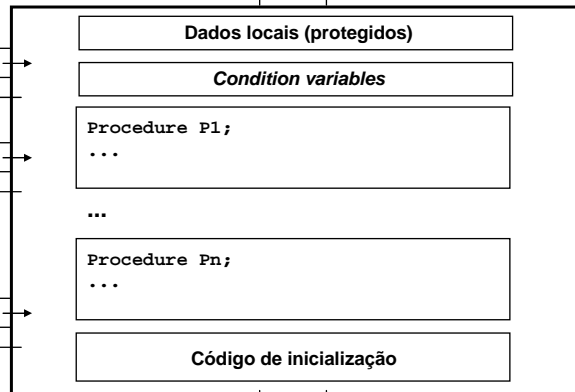
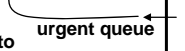
processos que  
executaram  
*x.Wait*



processos que  
executaram  
*y.Wait*



processos que  
executaram  
*Signal*  
a meio de  
um procedimento



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Exemplo (Problema do produtor/consumidor)

```

Monitor Bounded_Buffer;
Var
  Buffer: Array[0..N-1] of Char;
  NextIn, NextOut, Count: Integer;
  NotFull, NotEmpty: Condition;

Procedure Append (X: Char);
Begin
  If Count=N then NotFull.Wait;
  Buffer[NextIn]:=X;
  NextIn:=(NextIn+1) Mod N;
  Count:=Count+1;
  NotEmpty.Signal;
End;

Procedure Take (X: Char);
Begin
  If Count=0 then NotEmpty.Wait;
  X:=Buffer[NextOut];
  NextOut:=(NextOut+1) Mod N;
  Count:=Count-1;
  NotFull.Signal;
End;

Begin {Monitor initialization}
  NextIn:=0; NextOut:=0; Count:=0;
End;
  
```

```

(* Programa que usa o monitor *)
...
Procedure Producer;
Var
  X: Char;
Begin
  Repeat
    Produce(X);
    Append(X);
  Until ...
End;

Procedure Consumer;
Var
  X: Char;
Begin
  Repeat
    Take(X);
    Consume(X);
  Until ...
End;

Begin
  ParBegin
    Producer; Consumer;
  ParEnd;
End.
  
```



FEUP

MIEIC

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## Monitores

- ◆ Tal como acontece com os semáforos  
é possível cometer erros de sincronização com os monitores.
  - Ex: omitir `NotFull.Signal`, no exemplo anterior
- ◆ A vantagem que os monitores têm sobre os semáforos é que  
todas as funções de sincronização ficam confinadas ao interior do monitor
  - mais fácil detectar e corrigir os erros de sincronização
- ◆ Os monitores podem ser implementados recorrendo a semáforos  
e vice-versa.
- ◆ Algumas linguagens de programação suportam monitores
  - ex: Java (<http://journals.ecs.soton.ac.uk/java/tutorial/java/threads/monitors.html>)



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Regiões críticas

- ◆ Uma região crítica protege uma estrutura de dados partilhada.  
O compilador encarrega-se de gerar código que  
garante a exclusão mútua no acesso aos dados.
- ◆ Requer uma variável  $v$ , de tipo  $T$ , declarada como segue:
  - `var V: Shared T;     {ex: var I: Shared Integer;}`
- ◆ A variável  $v$  só pode ser acedida dentro de uma instrução do tipo:
  - `Region V When B do S;`  
onde  $B$  é uma expressão booleana e  
 $S$  é uma instrução (simples ou composta);
- ◆ Enquanto  $S$  estiver a ser executada, nenhum outro processo  
pode executar esta ou outra região "guardada" pela variável  $v$ .
- ◆ Quando um processo executar a instrução `Region`, a expressão Booleana  $B$  é avaliada.
  - Se  $B$  for True, a instrução  $S$  é executada.
  - Se  $B$  for False, o processo é retardado até que  
( $B$  seja True) e (nenhum outro processo esteja a executar numa região associada a  $V$ ).



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

### Exemplo (Problema do produtor/consumidor)

```

Var
  Buffer = Shared Record
    Pool: Array[0..N-1] of Item;
    Count, In, Out: Integer;
End;

```

```

Process Producer;
...
{Insere ItemP no buffer partilhado}
Region Buffer When Count < N do
  Begin
    Pool[In] := ItemP;
    In := (In+1) Mod N;
    Count := Count+1;
  End;
...

```

```

Process Consumer;
...
{Remove ItemC no buffer partilhado}
Region Buffer When Count > 0 do
  Begin
    ItemC := Pool[Out];
    Out := (Out+1) Mod N;
    Count := Count-1;
  End;
...

```



Pascal-FC (linguagem p/o ensino de programação concorrente)  
suporta *conditional critical regions*

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

### Passagem de mensagens

#### ◆ Semáforos e monitores

- resolvem o problema da exclusão mútua em sistemas com 1 ou mais CPUs que tenham acesso a uma memória comum
- não podem ser usados em sistemas distribuídos

#### ◆ Semáforos

- são construções de mais baixo nível

#### ◆ Monitores

- só estão disponíveis em algumas linguagens

#### ◆ Passagem de mensagens

- pode ser usada em sistemas c/ memória partilhada (uniprocessador ou multiprocessador), bem como em sistemas distribuídos



MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Passagem de mensagens

- ◆ Os sistemas operativos implementam geralmente um sistema de mensagens que permite que os processos
  - comuniquem
  - sincronizem as suas acções
- ◆ Há pelo menos 2 operações que devem ser suportadas:
  - `send(destination,message)`
  - `receive(source,message)`
- ◆ Depois de executar `Send()`/`Receive()` os processos podem bloquear ou não.
- ◆ **Sender** (transmissor)  
o mais natural é não bloquear após executar `Send()`.
- ◆ **Receiver** (receptor)  
o mais natural é bloquear após executar `Receive()`.
- ◆ Por vezes, existem outras possibilidades
  - Ex: `Send()` c/bloqueio e `Receive()` c/bloqueio



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Exemplo (resolução de problemas de exclusão mútua)

- ◆ Criar uma *mailbox* (ex. *Mutex*) partilhada por N processos.
- ◆ `Send()` não bloqueia.
- ◆ `Receive()` bloqueia quando *Mutex* estiver vazia.
- ◆ Inicialização:  
`Send(Mutex,Anything)`
- ◆ O 1º processo que executar `Receive()` entra na secção crítica.  
Os outros ficam bloqueados até que ele reenvie a mensagem.

```
Process Pi;  
  
Var  
  Msg: Message;  
  ...  
  Repeat  
    Receive(Mutex,Msg);  
    {Secção Crítica}  
    Send(Mutex,Msg);  
    ...  
  Until ...  
  ...
```



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Exemplo (Problema do produtor/consumidor)**

Usa-se 2 *mailboxes*  
capacidade igual a Capacity

**MayConsume**

- contém os itens

**MayProduce**

- contém mensagens nulas

```
...
Begin
  Create_Mailbox(MayProduce);
  Create_Mailbox(MayConsume);
  For I:=1 to Capacity do
    Send(MayProduce,Null);
  ParBegin
    Producer; Consumer
  ParEnd
End.
```

```
...
Procedure Producer;
Var
  PMsg: Message;
Begin
  Repeat
    Receive(MayProduce,PMsg);
    PMsg:=produce();
    Send(MayConsume,PMsg);
  Until ...
End;
```

```
Procedure Consumer;
Var
  CMsg: Message;
Begin
  Repeat
    Receive(MayConsume,CMsg);
    Consume(CMsg);
    Send(MayProduce,Null);
  Until ...
End;
```



FEUP

MIEIC  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto