MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

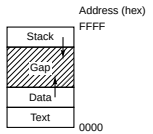
Processos e Threads 1

Objetivos

- Processo
  - Espaço de endereçamento
- Pthreads
  - Operações create e join
  - Envio e recepção de valores para threads

Processo

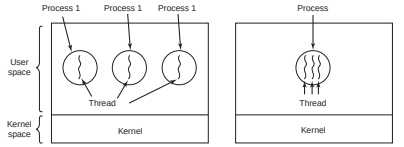
- Programa em execução
- Espaço de endereçamento



Tanenbaum: Figura 1.20

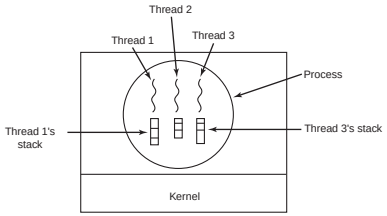
- Veja os códigos: ender.c e ender-malloc.c

Modelo de threads



Tanenbaum: Figura 2.6

Pilhas independentes



Tanenbaum: Figura 2.8

Como trabalhar com threads

Veja os comandos:

- `pthread_create`
- `pthread_join`
- `pthread_exit`

Para mais informações: `man <comando>`

Como criar uma thread

```
int  pthread_create(pthread_t  *thread,
            pthread_attr_t *attr,
            void * (*start_routine)(void *),
            void *arg);
```

Veja o código: create0.c

Como esperar por uma thread

```
int pthread_join(pthread_t thr,
            void **thread_return);
```

Veja os códigos: join0.c, join1.c, join2.c, join3.c e join4.c

Como passar argumentos para uma thread

- Exemplo: cada thread pode precisar de um identificador único.
- Veja os códigos: create1.c, create2.c, create3.c e create4.c

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Processos e Threads 2

Objetivos

- Pthreads
  - Revisão create e join
  - Operação exit
- Pilha de execução
- Primeiros problemas de condição de corrida

Create e Join

```
int pthread_create(pthread_t  *thread,
            pthread_attr_t *attr,
            void * (*start_routine)(void *),
            void *arg);

int pthread_join(pthread_t thr,
            void **thread_return);
```

Veja o código: create_join.c

Como encerrar a execução de uma thread

- Comando `return` na função principal da thread (passada como parâmetro em `pthread_create`)
- Análogo ao comando `return` na função `main()`

Veja os códigos: return0.c, return1.c pthread_return.c

Como encerrar a execução de uma thread

- `void pthread_exit(void *retval);`
- Análogo ao comando `exit(status);`

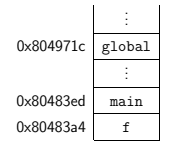
Veja os códigos: exit0.c, exit1.c e pthread_exit0.c

Pilha de execução:

- Espaço para valor de retorno da função
- Argumentos
- Endereço de retorno
- Registradores
- Variáveis locais

Veja o código: pilha.c

Exemplo de endereços



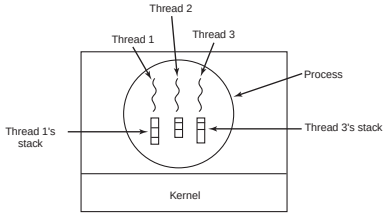
Exemplo de endereços

0xbfb0f1f0	local_main
	⋮
0xbfb0f1d0	param_f
	⋮
0xbfb0f1c4	v[1]
0xbfb0f1c0	v[0]
	⋮

É muito fácil corromper a pilha

- Basta fazer acesso a posições não alocadas de um vetor
- Veja os códigos: corrompe_pilha.c e corrompe_pilha1.c

Pilhas independentes



Tanenbaum: Figura 2.8

Veja o código: pilhas.c

Uma thread pode corromper a pilha de outra thread

- Pilhas são independentes, mas não protegidas
- Veja o código: corrompe_thread.c

Acesso a recursos compartilhados

- Estudo de caso:

```
volatile int s; /* Variável compartilhada */

/* Cada thread tentar executar os seguintes
   comandos sem interferência.   */

s = thr_id;
printf ("Thr %d: %d", thr_id, s);
```

Condição de disputa
Saída esperada

```
int s; /* Variável compartilhada */
```

Thread 0		Thread 1	
(i)	`s = 0;`	(iii)	`s = 1;`
(ii)	`print ("Thr 0: ", s);`	(iv)	`print ("Thr 1: ", s);`

Saída: Thr 0: 0
Thr 1: 1

Condição de disputa
Saída esperada II

```
int s; /* Variável compartilhada */
```

Thread 0		Thread 1	
(iii)	`s = 0;`	(i)	`s = 1;`
(iv)	`print ("Thr 0: ", s);`	(ii)	`print ("Thr 1: ", s);`

Saída: Thr 1: 1
Thr 0: 0

Condição de disputa
Saída inesperada

```
int s = 0; /* Variável compartilhada */
```

Thread 0		Thread 1	
(i)	`s = 0;`	(ii)	`s = 1;`
(iii)	`print ("Thr 0: ", s);`	(iv)	`print ("Thr 1: ", s);`

Saída: Thr 0: 1
Thr 1: 1

Veja o código: `inesperada.c`

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Processos e Threads 3

Objetivos

- Primeiros problemas de condição de corrida
- Exclusão mútua
- Primeiras tentativas de algoritmos
- Algoritmo de Dekker
- Algoritmo do desempate

Acesso a recursos compartilhados

- Estudo de caso:

```
volatile int s; /* Variável compartilhada */

/* Cada thread tentar executar os seguintes
   comandos sem interferência.   */

s = thr_id;
printf ("Thr %d: %d", thr_id, s);
```

Condição de disputa
Saída esperada

```
volatile int s; /* Variável compartilhada */
```

Thread 0		Thread 1	
(i)	`s = 0;`	(iii)	`s = 1;`
(ii)	`print ("Thr 0: ", s);`	(iv)	`print ("Thr 1: ", s);`

Saída: Thr 0: 0
Thr 1: 1

Condição de disputa
Saída esperada II

```
volatile int s; /* Variável compartilhada */
```

Thread 0		Thread 1	
(iii)	`s = 0;`	(i)	`s = 1;`
(iv)	`print ("Thr 0: ", s);`	(ii)	`print ("Thr 1: ", s);`

Saída: Thr 1: 1
Thr 0: 0

Condição de disputa
Saída inesperada

```
volatile int s; /* Variável compartilhada */
```

Thread 0		Thread 1	
(i)	`s = 0;`	(ii)	`s = 1;`
(iii)	`print ("Thr 0: ", s);`	(iv)	`print ("Thr 1: ", s);`

Saída: Thr 0: 1
Thr 1: 1

Veja o código: `inesperada.c`

Escalonamento de threads

- A execução de uma thread pode ser interrompida a qualquer momento.
- Veja o código `preemptivo.c`

Exclusão mútua

- Acesso controlado a recursos compartilhados
- Estudo de caso:

```
volatile int s; /* Variável compartilhada */
  while (1) {
      /* Região não crítica */
      /* Protocolo de entrada */
      /* Região crítica */
        s = thr_id;
        printf ("Thr %d: %d", thr_id, s);
      /* Protocolo de saída */
  }
```

Tentando implementar um lock

- Lock = variável compartilhada com o seguinte significado:
  - `lock == 0` ⇒ região crítica está livre
  - `lock != 0` ⇒ região crítica está ocupada
- Protocolo de entrada na região crítica

```
while (lock != 0);
```

- Protocolo de saída da região crítica

```
lock = 0;
```

Tentando implementar um lock

```
volatile int s = 0, lock = 0;
```

Thread 0

```
while (lock == 1);
lock = 1;
s = 0;
print ("Thr 0:" , s);
lock = 0;
```

Thread 1

```
while (lock == 1);
lock = 1;
s = 1;
print ("Thr 1:" , s);
lock = 0;
```

- Veja o código: tentativa_lock.c

Solução em hardware

```
entra_RC:
    TSL RX, lock
    CMP RX, #0
    JNE entra_RC
    RET

deixa_RC:
    MOV lock, \#0
    RET
```

- Não vale para a aula de hoje :-)

Abordagem da Alternância

```
int s = 0;
int vez = 1; /* Primeiro a thread 1 */
```

Thread 0

```
while (true)
  while (vez != 0);
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  vez = 1;
```

Thread 1

```
while (true)
  while (vez != 1);
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  vez = 0;
```

- Veja o código: alternancia.c

Abordagem da Alternância
N threads

Thread_i:

```
while (true)
  while (vez != i);
  s = i;
  print ("Thr ", i, ": ", s);
  vez = (i + 1) % N;
```

- Veja o código: alternanciaN.c

Limitações da Alternância

- Uma thread fora da RC pode impedir outra thread de entrar na RC
- Se uma thread interromper o ciclo a outra não poderá mais entrar na RC

Vetor de Interesse

```
int s = 0;
int interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (interesse[1]);
  s = 0;
  print("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while (interesse[0]);
  s = 1;
  print("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

- Veja o código: interesse.c

Algoritmos de Exclusão Mútua

- Devemos garantir:
  - exclusão mútua
  - ausência de deadlock
  - progresso (uma thread que não esteja interessada na região crítica não pode impedir outra thread de entrar na região crítica)
- Como escrever provas formais?

  Fonte: Principles of Concurrent and Distributed Programming - M. Ben-Ari

Vetor de Interesse

```
int i[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  a0:  nao_critica();
  b0:  i[0] = true;
  c0:  while (i[1]);
  d0:  critica();
  e0:  i[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  a1:  nao_critica();
  b1:  i[1] = true;
  c1:  while (i[0]);
  d1:  critica();
  e1:  i[1] = false;
```

Prova - deadlock

- Basta apresentar um escalonamento: $a0\ a1\ b0\ b1$

Prova - exclusão mútua

$i[0] \equiv at(c0) \vee at(d0) \vee at(e0)$

$i[1] \equiv at(c1) \vee at(d1) \vee at(e1)$

Exclusão mútua $\equiv \neg(at(d0) \wedge at(d1))$

Prova - exclusão mútua

$i[0] \equiv at(c0) \vee at(d0) \vee at(e0)$

- $a0$ A fórmula é inicialmente válida
- $a0 \rightarrow b0$ - não altera a fórmula
- $b0 \rightarrow c0$ - altera os dois lados da fórmula
- $c0 \rightarrow c0$, $c0 \rightarrow d0$ e $d0 \rightarrow e0$ - não alteram a validade de nenhum dos dois lados da fórmula
- $e0 \rightarrow a0$ - altera os dois lados da fórmula
- Transições na thread 1 não alteram a fórmula

Prova - exclusão mútua

$\neg(at(d0) \wedge at(d1))$

- A fórmula é inicialmente válida
- Considere $at(d0)$ e que a thread 1 vai fazer a transição $c1 \rightarrow d1$
- $at(d0)$ implica $i[0]$ e, portanto, a thread 1 fica presa no loop e não consegue completar a transição
- Cenários simétricos ⇒ provas similares

Limitações do Vetor de Interesse

- O algoritmo anterior garante exclusão mútua, mas...
- se as duas threads ficarem interessadas ao mesmo tempo haverá deadlock.
- Podemos tentar sanar este problema da seguinte forma:

  Se as duas threads ficarem interessadas ao mesmo tempo, elas irão baixar o interesse, esperar um pouco e tentar novamente.
- Veja o código: interesse2.c

Vetor de Interesse II

```
int s = 0;
int interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (interesse[1])
    interesse[0] = false;
    sleep(1);
    interesse[0] = true;
  s = 0;
  print("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while (interesse[0])
    interesse[1] = false;
    sleep(1);
    interesse[1] = true;
  s = 1;
  print("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

Limitações do Vetor de Interesse II

- O algoritmo anterior garante exclusão mútua, mas...
- se as duas threads andarem sempre no mesmo passo haverá livelock.
- Podemos tentar outra abordagem que é:

  Se as duas threads ficarem interessadas ao mesmo tempo, entrará na região crítica a thread cujo identificador estiver marcado na variável vez.
- Veja o código: interesse_vez.c

Vetor de Interesse e Alternância

```
int s = 0, vez = 0;
int interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  if (interesse[1])
    while (vez != 0);
  s = 0;
  print("Thr 0:", s);
  vez = 1;
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  if (interesse[0])
    while (vez != 1);
  s = 1;
  print("Thr 1:", s);
  vez = 0;
  interesse[1] = false;
```

Limitações da combinação anterior

- O algoritmo anterior não garante exclusão mútua. Você consegue indicar um cenário?
- Podemos tentar melhorar o algoritmo:

  Se as duas threads ficarem interessadas ao mesmo tempo, elas deverão baixar o interesse e esperar por sua vez.
- Veja o código: quase_dekker.c

Quase o algoritmo de Dekker

```
int s = 0, vez = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (interesse[1])
     interesse[0] = false;
     while (vez !=0);
     interesse[0] = true;
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  vez = 1;
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while(interesse[0])
     interesse[1] = false;
     while(vez != 1);
     interesse[1] = true;
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  vez = 0;
  interesse[1] = false;
```

Limitações do algoritmo anterior

- O algoritmo anterior garante exclusão mútua?
- É possível que uma thread ganhe sempre a região crítica enquanto a outra fica só esperando?
- Podemos melhorar o algoritmo:

  Se as duas threads ficarem interessadas ao mesmo tempo, a thread da vez não baixa o interesse.
- Veja o código: dekker.c

Algoritmo de Dekker

```
int s = 0, vez = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (interesse[1])
    if (vez != 0)
      interesse[0] = false;
      while (vez !=0);
      interesse[0] = true;
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  vez = 1;
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while(interesse[0])
    if (vez != 1)
      interesse[1] = false;
      while(vez != 1);
      interesse[1] = true;
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  vez = 0;
  interesse[1] = false;
```

Algoritmo do Desempate (1981)

```
int s = 0, ultimo = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  ultimo = 0;
  while (ultimo == 0 &&
         interesse[1]);
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  ultimo = 1;
  while (ultimo == 1 &&
         interesse[0]);
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Processos e Threads 4

Objetivos

- Revisão de problemas de exclusão mútua
- Tentativas de algoritmos para N threads
- Algoritmo de Dijkstra
- Algoritmos de Hyman e Peterson

Exclusão mútua

- Devemos garantir: exclusão mútua, ausência de deadlock e ausência de starvation

```
volatile int s; /* Variável compartilhada */
  while (1) {
      /* Região não crítica */
      /* Protocolo de entrada */
      /* Região crítica */
        s = thr_id;
        printf ("Thr %d: %d", thr_id, s);
      /* Protocolo de saída */
  }
```

Vetor de Interesse

```
int s = 0;
int interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (interesse[1]);
  s = 0;
  print("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while (interesse[0]);
  s = 1;
  print("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

- Veja o código: interesse.c

Interesse para N threads

```
int interesse[N] = {false, ..., false}
while (true) {  /* Código da Thread_i */
   interesse[i] = true;
   while (existe j!=i tal que (interesse[j]));
   s = i;
   print ("Thr ", i, ": ", s);
   interesse[i] = false;
```

- Veja o código: interesseN.c

Vetor de Interesse e Alternância

```
int s = 0, vez = 0;
int interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  if (interesse[1])
    while (vez != 0);
  s = 0;
  print("Thr 0:", s);
  vez = 1;
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  if (interesse[0])
    while (vez != 1);
  s = 1;
  print("Thr 1:", s);
  vez = 0;
  interesse[1] = false;
```

- Veja o código: interesse_vez.c

Interesse e vez para N threads

```
int interesse[N] = {false, ..., false}
int vez = 0;
while (true) {  /* Código da Thread_i */
   interesse[i] = true;
   if (existe j!=i tal que (interesse[j]))
     while (vez != i);
   s = i;
   print ("Thr ", i, ": ", s);
   vez = (i + 1) % N;
   interesse[i] = false;
```

- Veja o código: interesse_vezN.c

Algoritmo de Dekker (1965)

```
int s = 0, vez = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (interesse[1])
    if (vez != 0)
      interesse[0] = false;
      while (vez !=0);
      interesse[0] = true;
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  vez = 1;
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while(interesse[0])
    if (vez != 1)
      interesse[1] = false;
      while(vez != 1);
      interesse[1] = true;
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  vez = 0;
  interesse[1] = false;
```

Sugestão para N threads

```
int vez = 0, interesse = {false, ..., false}
while (true) {  /* Código da Thread_i */
   interesse[i] = true;
   while (existe j!=i tal que (interesse[j]))
     if (vez != i)
       interesse[i] = false;
       while (vez != i) ;
       interesse[i] = true;
    s = i;
    print ("Thr ", i, ": ", s);
    vez = (i+1) % N;
    interesse[i] = false;
```

Sugestão para N threads

Garante exclusão mútua?

- Uma thread só entra na região crítica após percorrer o vetor e verificar que nenhuma outra está interessada.

Garante ausência de deadlock?

- Se todas estiverem interessadas, pelo menos uma thread (a da vez) consegue entrar na região crítica

Garante progresso?

- Não. A vez pode ser passada para uma thread desinteressada.
- Veja o código dekkerN.c

Outra sugestão...

```
int vez = -1, interesse = {false, ..., false}
while (true) {  /* Código da Thread_i */
   interesse[i] = true;
   while (existe j!=i tal que (interesse[j]))
     if (vez != -1 && vez != i)
       interesse[i] = false;
       while (vez == -1 || vez != i) ;
       interesse[i] = true;
```

Outra sugestão...
(continuação)

```
s = i;
print ("Thr ", i, ": ", s);
vez = alguma interessada ou -1;
interesse[i] = false;
```

Por que não funciona?

- Porque mais de uma thread pode achar que é a vez dela ao encontrar vez == -1
- Veja o código: outro_dekkerN.c

Algoritmo de Dijkstra (1965)

```
int vez = -1, interesse = {false, ..., false}
while (true) {  /* Código da Thread_i */
   interesse[i] = true;
   while (existe j!=i tal que (interesse[j]))
     if (vez != i)
       interesse[i] = false;
       while (vez != -1);
       vez = i;
       interesse[i] = true;
```

Algoritmo de Dijkstra (1965)
(continuação)

```
s = i;
print ("Thr ", i, ": ", s);
vez = -1
interesse[i] = false;
```

Algoritmo de Dijkstra
Garante exclusão mútua?

- Uma thread só entra na região crítica após percorrer o vetor e verificar que nenhuma outra está interessada.

Garante ausência de deadlock?

- Entre as interessadas, pelo menos a última a alterar a variável vez consegue entrar na região crítica

Garante ausência de starvation?

- Não. Uma thread pode nunca conseguir ser a última a alterar vez.
- Veja o código dijkstra.c

Proposta incorreta de Hyman (1966)

```
int s = 0, vez = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (vez != 0)
      while (interesse[1]);
      vez = 0;
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while(vez != 1)
      while(interesse[0]);
      vez = 1;
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

Algoritmo do Desempate (1981)

```
int s = 0, ultimo = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  ultimo = 0;
  while (ultimo == 0 &&
         interesse[1]);
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  ultimo = 1;
  while (ultimo == 1 &&
         interesse[0]);
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Processos e Threads 5

Objetivos

- Algoritmo do desempate (Peterson)
- Extensão para N threads
- Técnica do campeonato

Algoritmo de Dekker (1965)

```
int s = 0, vez = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (interesse[1])
    if (vez != 0)
      interesse[0] = false;
      while (vez !=0);
      interesse[0] = true;
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  vez = 1;
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while(interesse[0])
    if (vez != 1)
      interesse[1] = false;
      while(vez != 1);
      interesse[1] = true;
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  vez = 0;
  interesse[1] = false;
```

Proposta incorreta de Hyman (1966)

```
int s = 0, vez = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  while (vez != 0)
      while (interesse[1]);
      vez = 0;
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  while(vez != 1)
      while(interesse[0]);
      vez = 1;
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

Algoritmo do Desempate (1981)

```
int s = 0, ultimo = 0, interesse[2] = {false, false};
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  ultimo = 0;
  while (ultimo == 0 &&
         interesse[1]);
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Thread 1

```
while (true)
  interesse[1] = true;
  ultimo = 1;
  while (ultimo == 1 &&
         interesse[0]);
  s = 1;
  print ("Thr 1:" , s);
  interesse[1] = false;
```

Algoritmo do Desempate
3 Threads (bug!)

```
int s=0, ultimo=0, interesse[3];
```

Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  ultimo = 0;
  while (ultimo == 0 && (interesse[1] || interesse[2]));
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Algoritmo do desempate
Extensão para 3 threads

- Para 2 threads, podemos estabelecer que a thread de identificador `ultimo` perde;
- Caso 3 threads alterem a variável ultimo simultaneamente, só poderemos identificar a que fez a última alteração.
- Como indicar que 2 threads perderam?

Algoritmo do Desempate
3 Threads

```
int s=0, ultimo, penultimo, interesse[3];
```

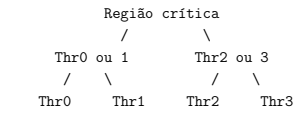
Thread 0

```
while (true)
  interesse[0] = true;
  ultimo = 0;
  while (ultimo == 0 && interesse[1] && interesse[2]);
  penultimo = 0;
  while (penultimo == 0 && (interesse[1]||interesse[2]));
  s = 0;
  print ("Thr 0:" , s);
  interesse[0] = false;
```

Algoritmo do Desempate
Características

- Funciona para 2 threads
- Variável ultimo é acessada pelas 2 threads
- Variável interesse[i] é acessada
  - para escrita pela thread i
  - para leitura pela thread adversária

Campeonato entre 4 threads



- A thread campeã da disputa entre Thr0 e Thr1 disputa a região crítica com a thread campeã da disputa entre Thr2 e Thr3.
- Todas as partidas são instâncias do algoritmo do desempate.

Campeonato entre 4 threads

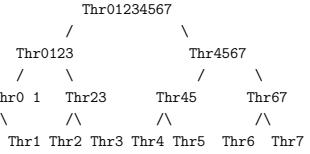
Variáveis de controle replicadas

```
int ultimo_final = 0;
int interesse_final[2] = {false, false};

int ultimo01 = 0;
int interesse01[2] = {false, false};

int ultimo23 = 2;
int interesse23[2] = {false, false};
```

- Veja código: camp4.c

Exclusão mútua entre N threads

Abordagem do campeonato



- As threads podem concorrer duas a duas
- Garante ausência de starvation?

Algoritmo do desempate

Extensão para N threads

- Caso M threads alterem a variável ultimo simultaneamente, só poderemos identificar a que fez a última alteração.
- Como indicar que $M-1$ threads perderam?

Algoritmo do desempate

N threads

- Dividimos o problema em N-1 fases (0..N-2)
- A cada fase, conseguimos identificar uma thread perdedora, que fica esperando
- Variáveis de controle:

```
int interesse[N]; /* -1..N-2 */
int ultimo[N-1];
```

Desempate para N threads

Estado inicial

	Thr0	Thr1	Thr2	Thr3	Thr4
interesse	-1	-1	-1	-1	-1

	Fase0	Fase1	Fase2	Fase3
ultimo	–	–	–	–

Desempate para N threads

Todas as threads interessadas

	Thr0	Thr1	Thr2	Thr3	Thr4
interesse	0	0	0	0	0

	Fase0	Fase1	Fase2	Fase3
ultimo	2	–	–	–

- Thread 2 não poderá mudar de fase

Desempate para N threads

Todas as threads interessadas

	Thr0	Thr1	Thr2	Thr3	Thr4
interesse	1	1	0	1	1

	Fase0	Fase1	Fase2	Fase3
ultimo	2	1	–	–

- Thread 1 não poderá mudar de fase

Desempate para N threads

Todas as threads interessadas

	Thr0	Thr1	Thr2	Thr3	Thr4
interesse	2	1	0	2	2

	Fase0	Fase1	Fase2	Fase3
ultimo	2	1	0	–

- Thread 0 não poderá mudar de fase

Desempate para N threads

Todas as threads interessadas

	Thr0	Thr1	Thr2	Thr3	Thr4
interesse	2	1	0	3	3

	Fase0	Fase1	Fase2	Fase3
ultimo	2	1	0	4

- Thread 3 pode entrar na região crítica

Desempate para N threads

Algumas threads interessadas

	Thr0	Thr1	Thr2	Thr3	Thr4
interesse	1	0	-1	-1	-1

	Fase0	Fase1	Fase2	Fase3
ultimo	1	0	–	–

- Thread 1 deverá esperar
- Thread 0 pode progredir pois as outras threads não estão interessadas

Desempate para N threads

```
int interesse[N], ultimo[N-1];
```

Thread_i:

```
for (f = 0; f < N-1; f++)
   interesse[i] = f;
   ultimo[f] = i;
   for (k = 0; k < N && ultimo[f] == i; k++)
      if (k != i)
         while (f <= interesse[k] && ultimo[f] == i);
s = i;
print ("Thr ", i, s);
interesse[i] = -1;
```

Desempate para N Threads

- Garante exclusão mútua
- Garante ausência de deadlock
- Garante ausência de starvation
  - *deve haver um limite no número de vezes que outras threads podem entrar na região crítica (rodadas) a partir do momento que uma thread submete o pedido e o momento em que ela executa a região crítica.*
  - espera máxima = N(N-1)/2 rodadas?

Desempate para N Threads

Pior cenário?

- Thr_0 perde de n-1 threads na fase 0
- Estas N-1 threads tentam novamente
- Thr_0 é desbloqueada e uma outra thread fica bloqueada na fase 0.
- Thr_0 perde de n-2 threads na fase 1
- ...

- Como ilustrar este cenário?

Algoritmo de Knuth

```
enum estado {passive, requesting, in_cs};
int vez, interesse[N];
```

Thread_i:

```
do {
   interesse[i] = requesting;
   vez_local = vez;
    while (vez_local != i)
       if (interesse[vez_local] != passive)
            vez_local = vez;
       else  vez_local = (vez + 1) % N;
   interesse[i] = in_cs;
} while (existe j!=i tal que interesse[j] == in_cs);
vez = i;
```

Algoritmo de Knuth (continuação)

```
s = i;
print ("Thr ", i, s);

vez = (thr_id + 1) % N;
interesse[i] = passive;
```

- Espera máxima pode parecer linear, mas ...

Algoritmo de Knuth

Pior cenário $2^{N-1} - 1$

- 3 Threads: $T2\ T1\ T2\ T0$
  - $T0$ faz o pedido (vez $= 1$)
  - $T2$ pára imediatamente antes de setar in_cs
  - $T1$ pára imediatamente antes de setar in_cs
  - $T2$ entra na RC e vez $= 0$
  - $T1$ entra na RC e vez $= 2$
  - $T2$ entra na RC e vez $= 0$
- 4 Threads: $T3\ T2\ T3\ T1\ T3\ T2\ T3\ T0$

Algoritmo de Knuth

Pior cenário $2^{N-1} - 1$

- 4 Threads: $T3\ T2\ T3\ T1\ T3\ T2\ T3\ T0$
  - $T0$ faz o pedido (vez $= 1$)
  - $T3$, $T2$ e $T1$ param antes de setar in_cs
  - $T3$ entra na RC e vez $= 0$
  - $T2$ entra na RC e vez $= 3$
  - $T3$ entra na RC e vez $= 0$
  - $T1$ entra na RC e vez $= 2$
  - $T3$ pára imediatamente antes de setar in_cs
  - $T2$ entra na RC e vez $= 3$
  - $T3$ entra na RC e vez $= 0$

Algoritmo de Bruijn

```
enum estado {passive, requesting, in_cs};
int vez, interesse[N];
```

Thread_i:

```
do {
   interesse[i] = requesting;
   vez_local = vez;
    while (vez_local != i)
       if (interesse[vez_local] != passive)
             vez_local = vez;
       else  vez_local = (vez + 1) % N;
   interesse[i] = in_cs;
 } while (existe j!=i tal que interesse[j] == in_cs);
```

Algoritmo de Bruijn (continuação)

```
s = i;
print ("Thr ", i, s);

if (interesse[vez] == passive || vez == i)
   vez = (thr_id + 1) % N;
interesse[i] = passive;
```

- Espera máxima $n(n-1)/2$

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Processos e Threads 6

Objetivos

- Abordagem da Thread Gerente
- Algoritmo da Padaria
- Prioridades para Threads

Algoritmos de Exclusão Mútua

- E se tivéssemos uma thread gerente?
  - Os algorimos seriam mais simples?
  - Qual o grande ponto negativo desta abordagem?
- Veja os programas: gerente?.c

Algoritmo da Padaria

- Análogo a um sistema de distribuição de senhas a clientes em uma loja
- A thread com a senha de menor número é atendida
- A própria thread deve escolher o seu número

Algoritmo da padaria

Primeira tentativa

```
num[N] = { 0, 0, ..., 0 }
```

Thread_i:

```
num[i] = max (num[0]...num[N-1]) + 1

for (j = 0; j < N; j++)
  while (num[j] != 0 &&  num[j] < num[i]) ;

s = i;
print ("Thr ", i, s);

num[i] = 0;
```

Algoritmo da padaria

Segunda tentativa

```
num[N] = { 0, 0, ..., 0 }
```

Thread_i:

```
num[i] = max (num[0]...num[N-1]) + 1

for (j = 0; j < N; j++)
  while (num[j] != 0 &&
          (num[j] < num[i] || num[i] == num[j] && j < i));

s = i;
print ("Thr ", i, s);

num[i] = 0;
```

Algoritmo da padaria

```
escolhendo[N] = { false, false, ..., false }
num[N] = { 0, 0, ..., 0 }
```

Thread_i:

```
escolhendo[i] = true;
num[i] = max (num[0]...num[N-1]) + 1
escolhendo[i] = false;
for (j = 0; j < N; j++)
  while (escolhendo[j]) ;
  while (num[j] != 0 &&
          (num[j] < num[i] || num[i] == num[j] && j < i));
s = i;
print ("Thr ", i, s);
num[i] = 0;
```

Black-White Bakery

Gadi Taubenfe

- The Black-White Bakery Algorithm. Proceedings of the 18th international symposium on distributed computing, Amsterdam, the Netherlands, October 2004. In: LNCS 3274 Springer Verlag 2004, 56-70
- rodadas de senhas coloridas
- permite senhas de tamanho fixo

Filas de prioridades diferentes

- Suponha que o gerente da padaria está pensando em implantar atendimento especial a idosos e gestantes
- Existem threads prioritárias e outras menos prioritárias;
- Nenhuma thread menos prioritária é atendida se houver uma thread mais prioritária esperando;
- Se uma thread menos prioritária estiver sendo atendida, a mais prioritária deve esperar;

Modificação para duas filas

Duas instâncias do algoritmo da padaria

```
#define N 10
#define M 5

esc[N] = { false, false, ..., false }
num[N] = { 0, 0, ..., 0 }

esc_pri[M] = { false, false, ..., false }
num_pri[M] = { 0, 0, ..., 0 }
```

Modificação para duas filas

Uma instância do algoritmo do desempate

```
#define PRI 0
#define NAO_PRI 1
int vez;
int interesse[2];
```

Thread menos prioritária

```
esc[i] = true;
num[i] = max (num[0]...num[N-1]) + 1
esc[i] = false;
for (j = 0; j < N; j++)
  while (esc[j]) ;
  while (num[j] != 0 &&
          (num[j] < num[i] || num[i] == num[j] && j < i));
interesse[NAO_PRI] = 1;
vez = NAO_PRI;
while (vez == NAO_PRI && interesse[PRI]);
s = i;
print ("Thr ", i, s);
interesse[NAO_PRI] = 0;
num[i] = 0;
```

Thread mais prioritária (?)

```
esc_pri[i] = true;
num_pri[i] = max (num_pri[0]...num_pri[M-1]) + 1
esc_pri[i] = false;
for (j = 0; j < M; j++)
  while (esc_pri[j]) ;
  while (num_pri[j] != 0 && (num_pri[j] < num_pri[i] ||
         num_pri[i] == num_pri[j] && j < i));
interesse[PRI] = 1;
vez = PRI;
while (vez == PRI && interesse[NAO_PRI]);
s = i;
print ("Thr ", i, s);
interesse[PRI] = 0;
num_pri[i] = 0;
```

Thread mais prioritária

```
/* Código da padaria simples */
if (!interesse[PRI]){
  interesse[PRI] = 1;
  vez = PRI;
  while (vez == PRI && interesse[NAO_PRI]);
}
/* Região crítica */
if (não existe j!= i : num_pri[j] > 0)
  interesse[PRI] = 0;
num_pri[i] = 0;
```

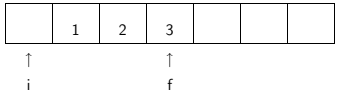
MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Produtores e Consumidores

Problema do Produtor-Consumidor

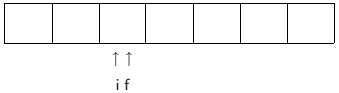
- Dois processos compartilham um *buffer* de tamanho fixo
- O produtor insere informação no *buffer*
- O consumidor remove informação do *buffer*

Controle do buffer



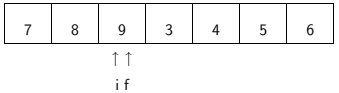
- **i:** aponta para a posição anterior ao primeiro elemento
- **f:** aponta para o último elemento
- **c:** indica o número de elementos presentes
- **N:** indica o número máximo de elementos

Buffer vazio



- **i == f**
- **c == 0**

Buffer cheio



- **i == f**
- **c == N**

Comportamento básico

```
int buffer[N];
int c = 0;
int i = 0, f = 0;
```

Produtor

```
while (true)
  f = (f+1)%N;
  buffer[f]= produz();
  c++;
```

Consumidor

```
while (true)
  i = (i+1)%N;
  consome(buffer [i]);
  c--;
```

Veja código: prod-cons-basico.c

Problemas

1. produtor insere em posição que *ainda* não foi consumida
2. consumidor remove de posição *já* foi consumida

Veja código: prod-cons-basico-bug.c

Algoritmo com espera ocupada

```
int buffer[N];
int c = 0;
int i = 0, f = 0;
```

Produtor

```
while (true)
  while (c == N);
  f = (f+1)%N;
  buffer[f]= produz();
  c++;
```

Consumidor

```
while (true)
  while (c == 0);
  i = (i+1)%N;
  consome(buffer[i]);
  c--;
```

Veja código: prod-cons-basico-busy-wait.c

Condição de disputa

Produtor	Consumidor
`c++;`	`c--;`
`mov rp,c`	`mov rc,c`
`inc rp`	`dec rc`
`mov c,rp`	`mov c,rc`

- Decremento/incremento não são atômicos
- Veja código: prod-cons-basico-race.c

Semáforos

- Semáforos são *contadores especiais* para recursos compartilhados.
- Proposto por Dijkstra (1965)
- Operações básicas (atômicas):
  - decremento (down, wait ou P)
    bloqueia se o contador for nulo
  - incremento (up, signal (post) ou V)
    nunca bloqueia

Semáforos

Comportamento básico

- sem_init(s, 5)
- wait(s)

```
if (s == 0)
   bloqueia_processo();
else s--;
```

- signal(s)

```
if (s == 0 && existe processo bloqueado)
  acorda_processo();
else s++;
```

Produtor-Consumidor com Semáforos

```
semaforo cheio = 0;
semaforo vazio = N;
```

Produtor:

```
while (true)
   wait(vazio);
   f = (f+1)%N;
   buffer[f] = produz();
   signal(cheio);
```

Consumidor:

```
while (true)
   wait(cheio);
   i = (i+1)%N;
   consome(buffer[i]);
   signal(vazio);
```

Veja código: prod-cons-sem.c

Vários produtores e consumidores

```
semaforo cheio = 0, vazio = N;
semaforo lock_prod = 1, lock_cons = 1;
```

Produtor:

```
while (true)
   wait(vazio);
   wait(lock_prod);
   f = (f + 1) % N;
   buffer[f] = produz();
   signal(lock_prod);
   signal(cheio);
```

Consumidor:

```
while (true)
   wait(cheio);
   wait(lock_cons);
   i = (i + 1) % N;
   consome(buffer[i]);
   signal(lock_cons);
   signal(vazio);
```

Vários produtores e consumidores

```
semaforo cheio = 0, vazio = N;
semaforo lock_prod = 1, lock_cons = 1;
```

Produtor:

```
while (true)
   item = produz();
   wait(vazio);
   wait(lock_prod);
   f = (f + 1) % N;
   buffer[f] = item;
   signal(lock_prod);
   signal(cheio);
```

Consumidor:

```
while (true)

   wait(cheio);
   wait(lock_cons);
   i = (i + 1) % N;
   item = buffer[i];
   signal(lock_cons);
   signal(vazio);
   consome(item);
```

Semáforos

- Exclusão mútua
- Sincronização

Mutex locks

⇒ Exclusão mútua

- pthread_mutex_lock
- pthread_mutex_unlock

Variáveis de condição

⇒ Sincronização

- pthread_cond_wait
- pthread_cond_signal
- pthread_cond_broadcast
- precisam ser utilizadas em conjunto com mutex_locks

Thread 0 acorda Thread 1

```
int s;                /* Veja cond_signal.c */
```

Thread 1:

```
mutex_lock(&mutex);
if (preciso_esperar(s))
   cond_wait(&cond, &mutex);
 mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0:

```
mutex_lock(&mutex);
if (devo_acordar_thread_1(s))
   cond_signal(&cond);
mutex_unlock(&mutex);
```

Produtor-Consumidor

```
int c = 0;  /* Contador de posições ocupadas */
mutex_t lock_c; /* lock para o contador */

cond_t pos_vazia;   /* Para o produtor esperar */
cond_t pos_ocupada; /* Para o consumidor esperar */
```

Produtor-Consumidor

```
int f = 0;
```

Produtor:

```
mutex_lock(&lock_c);
if (c == N)
  cond_wait(&pos_vazia, &lock_c);
f = (f+1)%N;
buffer[f] = produz();
c++;
if (c == 1)
  cond_signal(&pos_ocupada);
mutex_unlock(&lock_c);
```

Produtor-Consumidor

```
int i = 0;
```

Consumidor:

```
mutex_lock(&lock_c);
if (c == 0)
  cond_wait(&pos_ocupada, &lock_c);
i = (i+1)%N;
consome(buffer[i]);
if (c == N-1)
  cond_signal(&pos_vazia);
c--;
mutex_unlock(&lock_c);
```

Produtor-Consumidor

```
cond_t pos_vazia, pos_ocupada; mutex_t lock_v, lock_o;
int i = 0, f = 0, nv = N, no = 0;
```

Produtor:

```
mutex_lock(&lock_v);
if (nv == 0) cond_wait(&pos_vazia, &lock_v);
nv--;
mutex_unlock(&lock_v);
f = (f+1)%N;
buffer[f] = produz();
mutex_lock(&lock_o);
no++;
cond_signal(&pos_ocupada);
mutex_unlock(&lock_o);
```

Produtor-Consumidor

Consumidor:

```
mutex_lock(&lock_o);
if (no == 0) cond_wait(&pos_ocupada, &lock_o);
no--;
mutex_unlock(&lock_o);
i = (i+1)%N;
consome(buffer[i]);
mutex_lock(&lock_v);
nv++;
cond_signal(&pos_vazia);
mutex_unlock(&lock_v);
```

Thread 0 acorda alguma thread

```
int s;            /* Veja cond_signal_n.c */
```

Thread i:

```
mutex_lock(&mutex);
if (preciso_esperar(s))
   cond_wait(&cond, &mutex);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0:

```
mutex_lock(&mutex);
if (devo_acordar_alguma_thread(s))
   cond_signal(&mutex);
mutex_unlock(&mutex);
```

Produtores-Consumidores

Será que funciona?

```
cond_t pos_vazia, pos_ocupada;
mutex_t lock_v, lock_o;
int nv = N, no = 0;

mutex_t lock_i, lock_f;
int i = 0, f = 0;
```

Produtores-Consumidores

Produtor:

```
item = produz();
mutex_lock(&lock_v);
if (nv == 0) cond_wait(&pos_vazia, &lock_v);
nv--;
mutex_unlock(&lock_v);
mutex_lock(&lock_f);
f = (f+1)%N;
buffer[f] = item;
mutex_unlock(&lock_f);
mutex_lock(&lock_o);
no++;
cond_signal(&pos_ocupada);
mutex_unlock(&lock_o);
```

Produtores-Consumidores

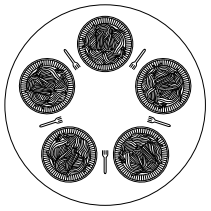
Consumidor:

```
mutex_lock(&lock_o);
if (no == 0) cond_wait(&pos_ocupada, &lock_o);
no--;
mutex_unlock(&lock_o);
mutex_lock(&lock_i);
i = (i+1)%N;
item = buffer[i];
mutex_unlock(&lock_i);
mutex_lock(&lock_v);
nv++;
cond_signal(&pos_vazia);
mutex_unlock(&lock_v);
consome(item);
```

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Filósofos Famintos

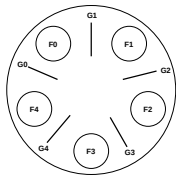
Jantar dos Filósofos



Boas soluções

- ausência de *deadlock*
- ausência de *starvation*
- alto grau de paralelismo

Representação da mesa




```
- T - T - T - T - T -
- T - T - H - T - T -
- T - T  |H|  T - T -
- T - T  |E|  T - T -
```

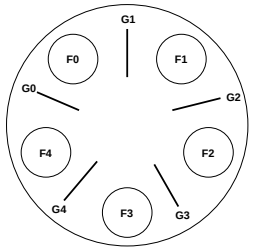
Implementação com Semáforos

Um semáforo por garfo

- sem_init(garfo, 1)
- wait(garfo)
- signal(garfo)

Filósofos famintos

Um semáforo por garfo

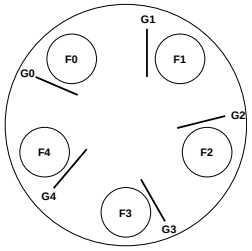


Implementação simplista

Filósofo i:

```
while (true)
   pensa();
   wait(garfo[i]);
   wait(garfo[(i+1) % N]);
   come();
   signal(garfo[i]);
   signal(garfo[(i+1) % N]);
```

Deadlock



Veja códigos: deadlock.c e deadlock-bug-exibicao.c

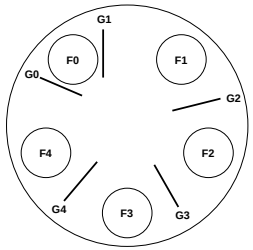
Outra tentativa...

```
semaforo lock = 1;
```

Filósofo i:

```
while (true)
   pensa();
   wait(lock);
   wait(garfo[i]);
   wait(garfo[(i+1) % N]);
   come();
   signal(garfo[(i+1) % N]);
   signal(garfo[i]);
   signal(lock);
```

Baixíssimo paralelismo



Veja código: `sem_central.c`

O que acontece se lock == 2?

```
semaforo lock = 2;
```

Filósofo i:

```
while (true)
   pensa();
   wait(lock);
   wait(garfo[i]);
   wait(garfo[(i+1) % N]);
   come();
   signal(garfo[(i+1) % N]);
   signal(garfo[i]);
   signal(lock);
```

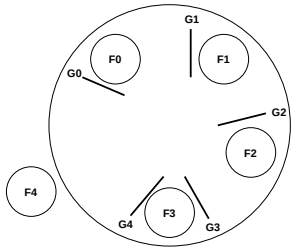
Menos lugares à mesa

```
semaforo lugar_mesa = 4;
```

Filósofo i:

```
while (true)
   pensa();
   wait(lugar_mesa);
   wait(garfo[i]);
   wait(garfo[(i+1) % N]);
   come();
   signal(garfo[(i+1) % N]);
   signal(garfo[i]);
   signal(lugar_mesa);
```

Menos lugares à mesa

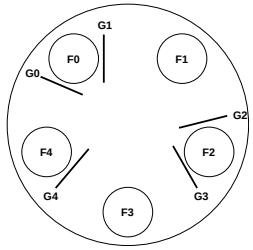


Veja código: `limite_lugares.c`

Solução assimétrica

```
while (true)
   pensa();
   if (i % 2 == 0)
      wait(garfo[i]);
      wait(garfo[(i+1) % N]);
   else
      wait(garfo[(i+1) % N]);
      wait(garfo[i]);
   come();
   signal(garfo[(i+1) % N]);
   signal(garfo[i]);
```

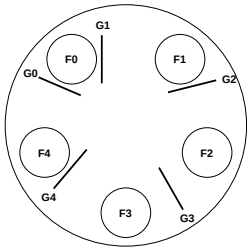
Solução assimétrica



Veja código: `assimetrica.c`

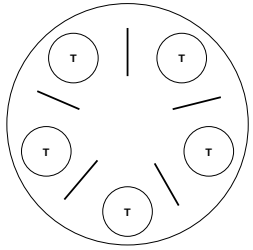
Solução assimétrica

Baixo paralelismo?!



Filósofos famintos

Um semáforo por filósofo



Solução do livro Tanenbaum

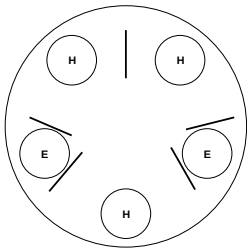
```
semaforo lock;
semaforo filosofo[N] = {0, 0, 0, ..., 0}
int estado[N] = {T, T, T, ...,T}
```

Filósofo i:

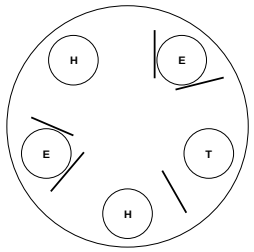
```
while (true)
   pensa();
   pega_garfos();
   come();
   solta_garfos();
```

```
testa_garfos(int i)
  if (estado[i] == H && estado[fil_esq] != E &&
      estado[fil_dir] != E)
      estado[i] = E;
      signal(filosofo[i]);

pega_garfos()              solta_garfos()
  wait(lock);                wait(lock);
  estado[i] = H;             estado[i] = T;
  testa_garfos(i);           testa_garfos(fil_esq);
  signal(lock);              testa_garfos(fil_dir);
  wait(filosofo[i]);         signal(lock);
```

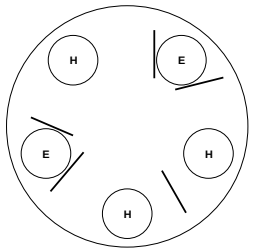
Alto paralelismo



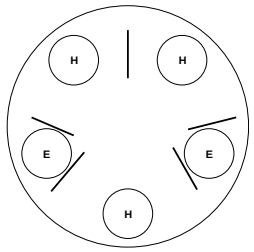
Alto paralelismo



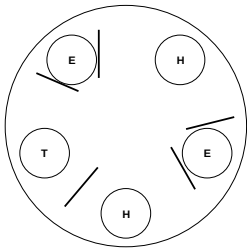
Alto paralelismo



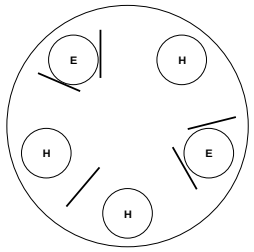
Alto paralelismo



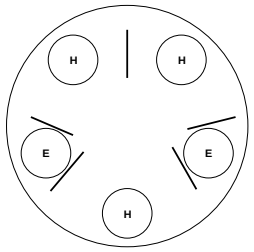
Alto paralelismo



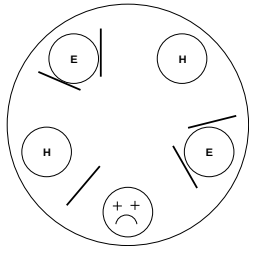
Alto paralelismo



Alto paralelismo



Starvation



Como matar os filósofos de fome?

- É preciso ajustar os tempos.
- Veja o código: tanen-4-2.c e tanen-5-1.c
- Como implementar tanen-8-2.c?

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Mutex locks simples, recursivos e com verificação de erros

Mutex locks

⇒ Exclusão mútua

- pthread_mutex_lock
- pthread_mutex_unlock

Variáveis de condição

⇒ Sincronização

- pthread_cond_wait
- pthread_cond_signal
- pthread_cond_broadcast
- precisam ser utilizadas em conjunto com mutex_locks

Thread 0 acorda Thread 1

```
int s;                  /* Veja cond_signal.c */
```

Thread 1:

```
mutex_lock(&mutex);
if (preciso_esperar(s))
   cond_wait(&cond, &mutex);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0:

```
mutex_lock(&mutex);
if (devo_acordar_thread_1(s))
   cond_signal(&cond);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0 acorda todas as threads

```
int s;          /* Veja cond_broadcast.c */
```

Thread i:

```
mutex_lock(&mutex);
if (preciso_esperar(s))
   cond_wait(&cond, &mutex);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0:

```
mutex_lock(&mutex);
if (devo_acordar_todas_as_threads(s))
   cond_broadcast(&cond);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0 acorda todas as threads

mas algumas delas voltam a dormir

```
int s;            /* Veja cond_broadcast2.c */
```

Thread i:

```
mutex_lock(&mutex);
while (preciso_esperar(s))  /* <===== */
   cond_wait(&cond, &mutex);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0:

```
mutex_lock(&mutex);
if (devo_acordar_todas_as_threads(s))
   cond_broadcast(&cond);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0 acorda 1 (ou +) threads

```
int s;            /* Veja cond_signal_n.c */
```

Thread i:

```
mutex_lock(&mutex);
while (preciso_esperar(s))
   cond_wait(&cond, &mutex);
mutex_unlock(&mutex);
```

Thread 0:

```
mutex_lock(&mutex);
if (devo_acordar_pelo_menos_uma_thread(s))
   cond_signal(&mutex);
mutex_unlock(&mutex);
```

Importância do teste com while

- Cenário 1: Implementação não garante que apenas uma thread será acordada
- Cenário 2:
  - Thread i vai dormir pois C é verdadeira
  - Thread j acorda thread i pois torna C falsa
  - Thread k pega o lock e torna C verdadeira
  - Thread i executa de maneira inconsistente
  - Veja o código `teste_cond_wait.c`

Locks simples

Estrutura protegida por um mutex lock

```
typedef struct estrutura {
     mutex_t lock;
     Tipo1 campo1;
     Tipo2 campo2;
     Tipo3 campo3;
} Estrutura;
```

- Como escrever as funções que fazem acesso a estes campos?

Locks simples

Funções atômicas

```
void funcao1(Estrutura *e) {
   mutex_lock(&e->lock);
   /* ... */
   mutex_unlock(&e->lock);
}

void funcao2(Estrutura *e) {
   mutex_lock(&e->lock);
   /* ... */
   mutex_unlock(&e->lock);
}
```

Locks simples

E se funcao2 invocasse funcao1?

```
void funcao2(Estrutura *e) {
   mutex_lock(&e->lock);
   /* ... */
   if (condicao)
       funcao1(e);
   /* ... */
   mutex_unlock(&e->lock);
}
```

Deadlock de uma thread só

```
void f() {
  mutex_lock(&lock);
  mutex_lock(&lock);
}
```

Veja o código: deadlock.c

Locks simples

E se funcao2 invocasse funcao1?

Possíveis soluções:

- Replicação de código
- Função auxiliar não atômica

```
void funcao1(Estrutura *e) {
     mutex_lock(&e->lock);
     aux_funcao1(e);
     mutex_unlock(&e->lock);
   }
```

Locks recursivos

```
void f() {
  mutex_lock(&lock);
  /* faz alguma coisa */
  mutex_unlock(&lock);
}

void g() {
  mutex_lock(&lock);
  f();
  /* faz outra coisa */
  mutex_unlock(&lock);
}
```

Locks recursivos

Implementação a partir de locks simples e variáveis de condição

```
typedef struct {
  pthread_t thr;
  cond_t cond;
  mutex_t lock;
  int c;
} rec_mutex_t;
```

rec_mutex_lock()

```
int rec_mutex_lock(rec_mutex_t *rec_m) {
  pthread_mutex_lock(&rec_m->lock);
  if (rec_m->c == 0) {  /* Lock livre */
    rec_m->c = 1;
    rec_m->thr = pthread_self();
  } else  /* Mesma thread */
    if (pthread_equal(rec_m->thr,
                      pthread_self()))
        rec_m->c++;
    else {
     /* Thread deve esperar */
```

rec_mutex_lock()

```
  else {
     /* Thread deve esperar */
     while (rec_m->c != 0)
       pthread_cond_wait(&rec_m->cond,
                         &rec_m->lock);
     rec_m->thr = pthread_self();
     rec_m->c = 1;
  }
  pthread_mutex_unlock(&rec_m->lock);
  return 0;
}
```

rec_mutex_unlock()

```
int rec_mutex_unlock(rec_mutex_t *rec_m) {
  pthread_mutex_lock(&rec_m->lock);
  rec_m->c--;
  if (rec_m->c == 0)
    pthread_cond_signal(&rec_m->cond);
  pthread_mutex_unlock(&rec_m->lock);
  return 0;
}
```

Verificação de erros

rec_mutex_unlock()

```
int rec_mutex_unlock(rec_mutex_t *rec_m) {
  pthread_mutex_lock(&rec_m->lock);
  if (rec_m->c == 0 ||
      !pthread_equal(rec_m->thr,
                     pthread_self())) {
      pthread_mutex_unlock(&rec_m->lock_var);
      return ERROR;
  }
  else
    /* ... */
```

Locks recursivos

Implementação reduzida

```
typedef struct {
  pthread_t thr;
  mutex_t lock;
  int c;
} rec_mutex_t;
```

rec_mutex_lock()

```
int rec_mutex_lock(rec_mutex_t *rec_m) {
  if (!pthread_equal(rec_m->thr,
                     pthread_self())) {
    pthread_mutex_lock(&rec_m->lock);
    rec_m->thr = pthread_self();
    rec_m->c = 1;
  }
  else
    rec_m->c++;
  return 0;
}
```

rec_mutex_unlock()

```
int rec_mutex_unlock(rec_mutex_t *rec_m) {
  if (!pthread_equal(rec_m->thr, pthread_self())
      || rec_m->c == 0)
     return ERROR;
  rec_m->c--;
  if (rec_m->c == 0)
     pthread_mutex_unlock(&rec_m->lock);
  return 0;
}
```

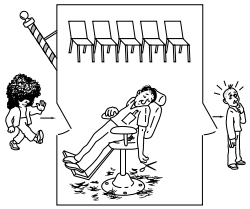
- A implementação reduzida tem comportamento equivalente à primeira?
- Veja o código pthread_mutex_lock.c
- Quando que as variáveis de condição são imprescindíveis?

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática

1s2008

Barbeiro Dorminhoco

Barbeiro Dorminhoco



Barbeiro Dorminhoco

- Se não há clientes, o barbeiro adormece;
- Se a cadeira do barbeiro estiver livre, um cliente pode ser atendido imediatamente;
- O cliente espera pelo barbeiro se houver uma cadeira de espera vazia.
- Se não tive onde sentar, o cliente vai embora...

Cadeiras da sala de espera

- Se não tiver onde sentar, o cliente vai embora...
- Esta abordagem funciona?

```
semaforo cadeiras = 5;
wait(cadeiras);
```

Cadeiras da sala de espera

- Esta abordagem funciona?

```
semaforo cadeiras = 5;
if (sem_getvalue(cadeiras) > 0)
  wait(cadeiras);
```

Cadeiras da sala de espera

```
mutex_lock mutex;
int cadeiras = 5;

mutex_lock(mutex);
if (cadeiras > 0)
  cadeiras--;
  mutex_unlock(mutex);
  entra_na_barbearia();
else
   mutex_unlock(mutex);
   desiste_de_cortar_o_cabelo();
```

Clientes só esperam nas cadeiras

```
semaforo cadeiras = 5;

if (trywait(cadeiras) == 0)
  entra_na_barbearia();
else
  desiste_de_cortar_o_cabelo();
```

Disputa pela cadeira do barbeiro

```
semaforo cadeiras = 5;
semaforo cad_barbeiro = 1;

if (trywait(cadeiras) == 0)
   wait(cad_barbeiro);
```

- Todo cliente precisa passar pela sala de espera?

Disputa pela cadeira do barbeiro

```
semaforo cadeiras = 5;
semaforo cad_barbeiro = 1;

if (trywait(cad_barbeiro) == 0)
  if (trywait(cadeiras) == 0)
     wait(cad_barbeiro);
```

- Esta abordagem é justa?

Iniciando o corte

```
semaforo cadeiras = 5;
semaforo cad_barbeiro = 1;

if (trywait(cadeiras) == 0)
   wait(cad_barbeiro);
```

- Como avisar o barbeiro que você está esperando?

Iniciando o corte

```
semaforo cadeiras = 5;
semaforo cad_barbeiro = 1;

if (trywait(cadeiras) == 0)
   wait(cad_barbeiro);
```

- Como avisar o barbeiro que você está esperando?

Iniciando o corte

```
semaforo cadeiras = 5;
semaforo cad_barbeiro = 1;
semaforo cliente_cadeira = 0;

if (trywait(cadeiras) == 0)
   wait(cad_barbeiro);
   signal(cliente_cadeira);
```

- E os outros clientes?

Cortando o cabelo

```
semaforo cadeiras = 5;
semaforo cad_barbeiro = 1;
semaforo cliente_cadeira = 0;

if (trywait(cadeiras) == 0)
   wait(cad_barbeiro);
   signal(cadeiras);
   signal(cliente_cadeira);
```

- Quem decide que o corte acabou?

Cliente

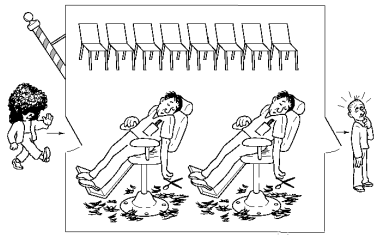
```
if (trywait(cadeiras) == 0)
   wait(cad_barbeiro);
   signal(cadeiras);
   signal(cliente_cadeira);
   wait(cabelo_cortado);
   signal(cad_barbeiro);
```

Barbeiro

```
semaforo cabelo_cortado = 0;
semaforo cliente_cadeira = 0;

while (true)
  wait(cliente_cadeira);
  corta_cabelo();
  signal(cabelo_cortado);
```

- Veja o código barbeiro.c
- Como implementar um cineminha?

Múltiplos Barbeiros Dorminhocos



Múltiplos Barbeiros Dorminhocos

- Vários semáforos semelhantes ao problema anterior

```
semaforo cadeiras = N_CADEIRAS_ESPERA;
semaforo cad_barbeiro[N_BARBEIROS] =
                        {0, 0, 0, ..., 0};
semaforo cabelo_cortado[N_BARBEIROS] =
                        {0, 0, 0, ..., 0};
semaforo cliente_cadeira[N_BARBEIROS] =
                        {0, 0, 0, ..., 0};
```

Múltiplos Barbeiros Dorminhocos

- O cliente precisa saber qual é o identificador do barbeiro disponível.
- Problema análogo a fila única em bancos com visor para chamar os clientes.

Modelando o visor

- Variável para armazenar identificadores:

```
int visor;
```

- Barbeiros executam escritas
  - Um barbeiro só pode escrever se o barbeiro anterior já atendeu um cliente;
- Clientes executam leituras
  - Apenas um cliente pode ser atendido de cada vez.

Múltiplos Barbeiros Dorminhocos

- O cliente precisa saber qual é o identificador do barbeiro disponível.
- Problema análogo a fila única em bancos com visor para chamar os clientes.

```
semaforo escreve_visor = 1;
semaforo le_visor = 0;
int visor;
```

Barbeiro

```
while (true)
  wait(escreve_visor);
  visor = id_barbeiro;
  signal(le_visor);
  wait(cliente_cadeira[id_barbeiro]);
  corta_cabelo();
  signal(cabelo_cortado[id_barbeiro]);
```

Cliente

```
if (trywait(cadeiras) == 0)
   signal(cadeiras);
   wait(le_visor);
   minha_cadeira = visor;
   signal(escreve_visor);
   wait(cad_barbeiro[minha_cadeira]);
   signal(cliente_cadeira[minha_cadeira]);
   wait(cabelo_cortado[minha_cadeira]);
   signal(cad_barbeiro[minha_cadeira]);
```

- Podemos eliminar cad_barbeiro?

Múltiplos Barbeiros Dorminhocos

- Como implementar um cineminha?
- Como você implementaria este problema utilizando locks e variáveis de condição?

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Leitores e escritores

Leitores e escritores

```
semaforo sem_dados = 1;
```
Leitor:
```
   while(true)
      wait(sem_dados);
      le_dados();
      signal(sem_dados);
```
Escritor:
```
   while(true)
      wait(sem_dados);
      escreve_dados();
      signal(sem_dados);
```

Leitores e escritores

- Problema: apenas um leitor pode fazer acesso ao banco de dados por vez
- Veja o código: l-e-sem-concorrencia.c
- Possível solução: permitir o acesso simultâneo a vários leitores

Vários leitores simultâneos

```
semaforo sem_dados = 1, sem_nl = 1;
int nl; /* Leitores ativos num dado instante */
```
Leitor:
```
   while(true)
      wait(sem_nl);
      nl++; if (nl == 1) wait(sem_dados);
      signal(sem_nl);
      le_dados();
      wait(sem_nl);
      nl--; if (nl == 0) signal(sem_dados);
      signal(sem_nl);
```

Vários leitores simultâneos

- Problema: os escritores podem morrer de fome
- Veja o código: l-e-starvation.c
- Como escrever este código usando locks e variáveis de condição?
- Como implementar variações desta abordagem?

Leitores simultâneos

Locks e variáveis de condição

Primeira tentativa

```
int nl = 0;      /* Número de leitores ativos */
mutex_t lock_nl; /* Lock para o contador nl   */

mutex_t lock_dados; /* Lock para os dados     */
```

Leitor

```
mutex_lock(&lock_nl);
nl++;
if (nl == 1) mutex_lock(&lock_dados);
mutex_unlock(&lock_nl);
le_dados();
mutex_lock(&lock_nl);
nl--;
if (nl == 0)
  mutex_unlock(&lock_dados);
mutex_unlock(&lock_nl);
```

Leitores simultâneos

- Problema: Uma thread leitora faz o lock e outra faz o unlock
- Veja o código: l-e-lock.c
- Tipos de lock:
  - FAST
  - RECURSIVE
  - ERROR CHECKING

Leitores simultâneos

Locks e variáveis de condição

Segunda tentativa

```
mutex_t lock_dados; /* Controle dos dados */
boolean bloq_leitura = false;

mutex_t lock_nl; /* Lock para o contador  */
int nl = 0;      /* Número de leitores ativos */
```

Leitor

```
mutex_lock(&lock_nl);
nl++;
if (nl == 1)
   mutex_lock(&lock_dados);
   bloq_leitura = true;
   mutex_unlock(&lock_dados);
mutex_unlock(&lock_nl);
le_dados();
/* ... */
```

Leitor

```
/* ...*/
le_dados();
mutex_lock(&lock_nl);
nl--;
if (nl == 0)
   mutex_lock(&lock_dados);
   bloq_leitura = false;
   cond_signal(&cond_dados);
   mutex_unlock(&lock_dados);
mutex_unlock(&lock_nl);
```

Escritor

```
mutex_lock(&lock_dados);
while (bloq_leitura)
  cond_wait(&cond_dados, &lock_dados);
escreve_dados();
cond_signal(&cond_dados);
mutex_unlock(&lock_dados);
```

Leitores simultâneos

Locks e variáveis de condição

Terceira tentativa

```
cond_t  cond_dados; /* Espera pelos dados */

mutex_t lock_cont; /* Lock para os contadores  */
int nl = 0;  /* Número de leitores ativos */
int ne = 0;  /* Número de escritores ativos */
```

Veja o código: l-e-broadcast.c

Leitor

```
mutex_lock(&lock_cont);
while (ne > 0)
  cond_wait(&cond_dados, &lock_cont);
nl++;
mutex_unlock(&lock_cont);
le_dados();
mutex_lock(&lock_cont);
nl--;
if (nl == 0)
  cond_signal(&cond_dados);
mutex_unlock(&lock_cont);
```

Escritor

```
mutex_lock(&lock_cont);
while (nl > 0 || ne > 0)
  cond_wait(&cond_dados, &lock_cont);
ne++;
mutex_unlock(&lock_cont);
escreve_dados();
mutex_lock(&lock_cont);
ne--;
cond_broadcast(&cond_dados);
mutex_unlock(&lock_cont);
```

Leitores e escritores

Prioridade para os escritores

```
int nl = 0;  /* Número de leitores */
int ne = 0;  /* Número de escritores */
int nw = 0;  /* Número de escritores esperando */
mutex_t lock_cont;
cond_t cond_esc, cond_leit;
```

Veja o código: l-e-broadcast2.c

Leitor

```
mutex_lock(&lock_cont);
while (ne > 0 || nw > 0)
  cond_wait(&cond_leit, &lock_cont);
nl++;
mutex_unlock(&lock_cont);
/* Leitura */
mutex_lock(&lock_cont);
nl--;
if (nl == 0 && nw > 0)
  cond_signal(&cond_esc);
mutex_unlock(&lock_cont);
```

Escritor

```
mutex_lock(&lock_cont);
nw++;
while (nl > 0 || ne > 0)
  cond_wait(&cond_esc, &lock_cont);
nw--; ne++;
mutex_unlock(&lock_cont);
/* Escrita */
mutex_lock(&lock_cont);
ne--;
if (nw > 0)
  cond_signal(&cond_esc);
else
  cond_broadcast(&cond_leit);
mutex_unlock(&lock_cont);
```

Leitores e escritores

Como implementar um bom compromisso?

- Ausência de starvation
- Leitores simultâneos

Leitores e escritores

RWLock

- pthread_rwlock_rdlock(pthread_rwlock_t *rwlock);
- pthread_rwlock_wrlock(pthread_rwlock_t *rwlock);
- pthread_rwlock_unlock(pthread_rwlock_t *rwlock);

- Qual é a política implementada?

MC514–Sistemas Operacionais: Teoria e Prática
1s2008

Processos: fork

fork()

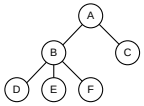
- Cria um novo processo, que executará o mesmo código
- Retorna
  PID do processo criado para o pai e
  0 para o processo filho

Espaços de endereçamento distintos

```
if (fork() == 0)
  s = 0;
  printf("Filho: &s=%p s=%d\n", &s, s);
} else {
  s = 1;
  printf("Pai: &s=%p s=%d\n", &s, s);
}
```

- Veja o código: fork0.c

Hierarquia de processos



Como implementar uma arquitetura como esta utilizando a chamada fork?

- Veja os códigos: fork1.c fork2.c fork3.c

wait()

```
pid_t wait(int *status);
```

- Aguarda pela morte de um filho.
- Bloqueia o processamento
- Retorna o pid do filho morto
- `status` indica causa da morte
- Veja os códigos: wait1.c, wait2.c e getppid.c

waitpid()

```
pid_t waitpid(pid_t pid, int *status,
              int options);
```

- Aguarda pela morte de um filho.
  - Específico `pid = PID`
  - Qualquer `pid = -1`
- Versão não bloqueante (options = `WNOHANG`)
- Veja o código waitpid1.c