Programação Paralela

Parte III

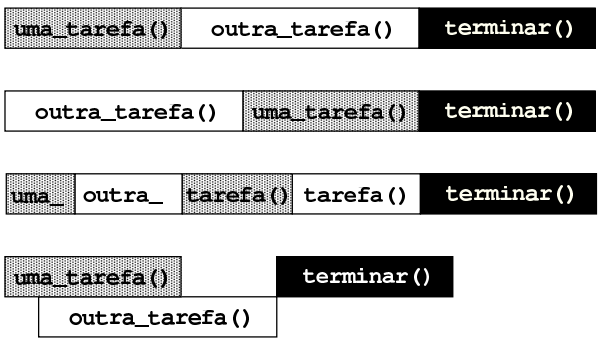
Programação com Pthreads

Ricardo Rocha
ricroc@ncc.up.pt
DCC-FCUP

Tópicos Avançados de Informática
Mestrado em Informática 2003/04

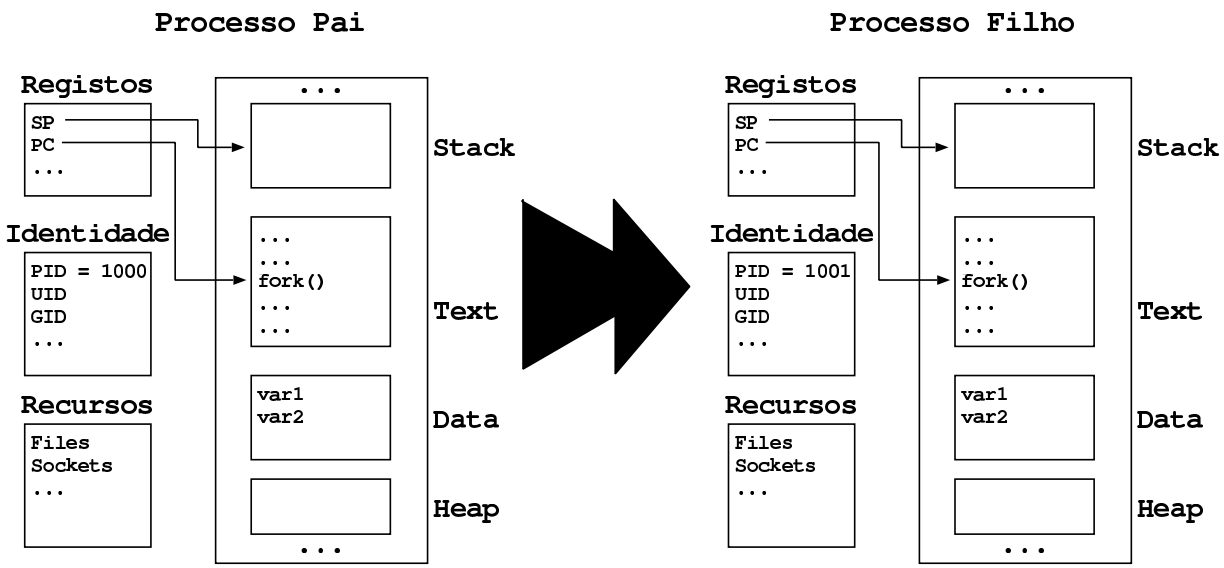
Concorrência ou Paralelismo Potencial

- Concorrência ou paralelismo potencial diz-se quando um programa possui partes de código que podem ser executadas em qualquer ordem sem alterar o resultado final.

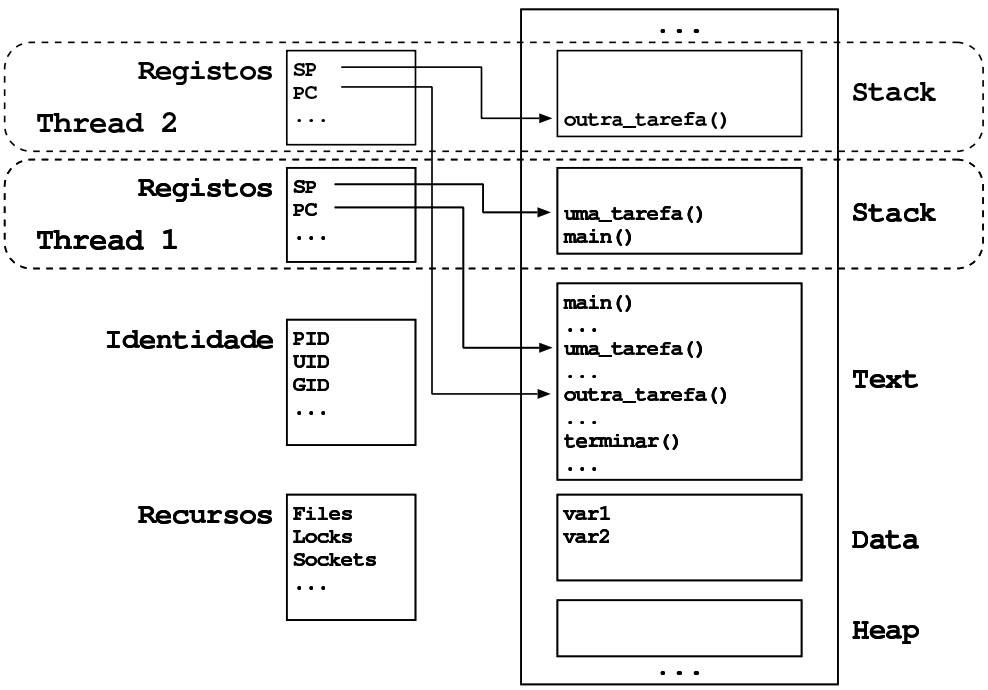


- Uma razão óbvia para explorar concorrência é conseguir executar mais rapidamente o programa em máquinas multiprocessador.
- Existem, no entanto, mais situações em que o paralelismo potencial de um programa pode ser explorado: operações de I/O, ocorrência assíncrona de eventos, escalonamento de tarefas em tempo-real, etc...

Concorrência com Processos



Concorrência com Processos Multithreaded



Processos Multithreaded

Processo = Conjunto de Threads + Conjunto de Recursos

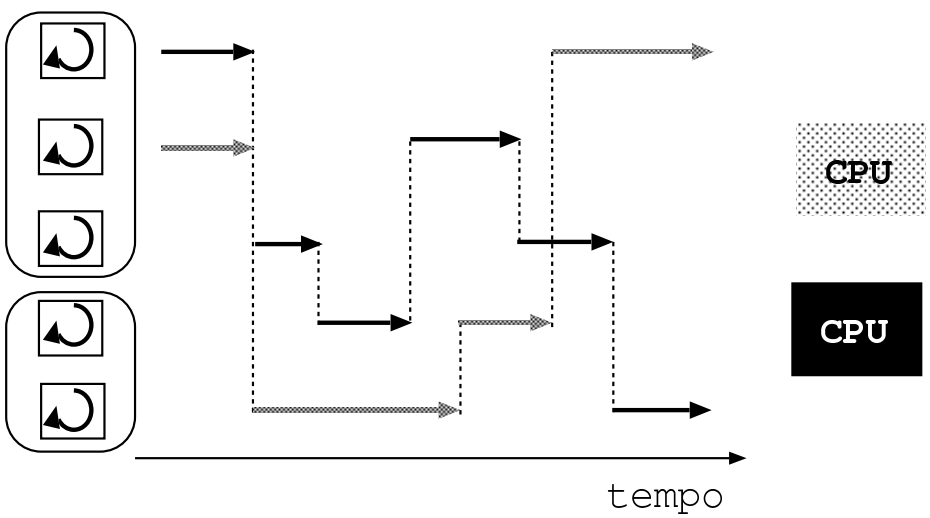
- Um thread representa um fluxo de execução sequencial dentro do processo.
- O *conjunto de recursos* do processo é partilhado pelo conjunto dos threads: espaço de endereçamento, ficheiros abertos, identidade do utilizador, etc.

O thread propriamente dito é representado pelos seguintes recursos privados:

- Stack (pilha de execução)
- Stack pointer
- Program Counter
- Registos de contexto
- etc...

Execução de Threads

Todos os threads de um processo podem ser executados concorrentemente e em diferentes processadores (caso existam).



Multithreading

Um sistema diz-se *multithreading* se divide um processo em threads, cada um a executar de forma independente.

Vantagens e inconvenientes:

- **(+)** Elimina espaços de endereçamento múltiplos (e quase idênticos), permitindo reduzir a carga de memória do sistema e melhorar o tempo de resposta dos programas.
- **(+)** A partilha do espaço de endereçamento permite utilizar mecanismos de sincronização mais eficientes e trocas de contexto entre threads mais rápidas do que entre processos.
- **(+)** Facilita a estruturação dos programas. Grande parte dos programas são intrinsecamente estruturados em múltiplas unidades de execução.
- **(–)** A partilha transparente de recursos exige do programador cuidados redobrados de sincronização.

O Modelo Pthreads ou POSIX Threads

- Como é que um programa pode ser desenhado para executar múltiplos threads dentro de um processo?
- É necessário um modelo que suporte a criação e manipulação de tarefas cuja execução possa ser intercalada ou executada em paralelo.
- Pthreads, Mach Threads e NT Threads são exemplos desses modelos.
- O modelo Pthreads pertence à família POSIX (Portable Operating System Interface) e define um conjunto de rotinas (biblioteca) estandardizadas para manipulação de threads.
- As definições da biblioteca Pthreads encontram-se em `pthread.h` e a sua implementação em `libpthread.so`. Sendo assim, para compilar um programa com threads é necessário incluir o cabeçalho `#include <pthread.h>` no início do programa e compilá-lo com a opção `-lpthread`.

Criação de Threads

Quando se inicia um programa, um thread é desde logo criado (*main thread*). Outros threads podem ser criados através de:

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

- pthread_create() cria um novo thread que inicia a sua execução na função indicada por `start_routine` com o argumento indicado em `arg`. Em caso de sucesso instancia `thread` com o identificador do novo thread e retorna 0, senão retorna um código de erro.

Criação de Threads

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

- thread é o identificado do novo thread.
- attr permite especificar atributos de como o novo thread deve interagir com o resto do programa. Se `NULL` o novo thread é criado com os atributos por defeito. Os threads possuem atributos como política de escalonamento, prioridade, tipo de estado, etc, que podem ser definidos por invocação de funções adequadas, como por exemplo `pthread_attr_setdetachstate()`.
- start_routine é a função inicial que o novo thread deve executar.
- arg é o argumento único a passar à função `start_routine()`. Múltiplos argumentos podem ser passados recorrendo a uma estrutura de dados e utilizando o endereço da estrutura como único argumento.

Junção de Threads (ou Sincronização Bloqueante)

Tal como com os processos, por vezes é necessário esperar que um dado thread termine antes de continuar a execução. Com processos essa sincronização é conseguida pelas funções `wait()` e `waitpid()`. Com threads a função é `pthread_join()`.

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

- pthread_join() suspende a execução até que o thread `th` termine. Assim que termine, `thread_return` é instanciado com o valor de retorno de `th` e `pthread_join()` retorna 0, senão retorna um código de erro.
- th é o identificador do thread a esperar que termine.
- thread_return é o valor de retorno do thread `th`. Se o valor de retorno for desprezável indique `NULL`.

Terminar Threads

Por defeito, existem 2 formas de um thread terminar:

- A função que iniciou o thread retorna.
- A função `main()` retorna ou algum thread chama a função `exit()`. Nestes dois casos todos os threads terminam.

Um outro modo de um thread terminar é este invocar directamente a função `pthread_exit()`.

```
void pthread_exit(void *retval);
```

- pthread_exit() termina o thread corrente.
- retval é o valor de retorno do thread.

Joinable Versus Detached Threads

- Um thread pode estar num dos seguintes estados: *joinable* ou *detached*.
- O estado de um thread apenas condiciona o modo como este termina.
- Quando um *joinable thread* termina, parte do seu estado é mantido pelo sistema (identificador do thread e stack) até que um outro thread chame `pthread_join()` para obter o seu valor de retorno. Só então os recursos do thread são totalmente libertados.
- Os recursos de um *detached thread* são totalmente libertados logo que este termina. Qualquer chamada posterior a `pthread_join()` retorna um erro.
- Um thread pode ser criado como *joinable* ou como *detached* (ver atributos da função `pthread_create()`). Por defeito, os threads são criados como *joinable*. É também possível mudar dinamicamente o estado do thread para *detached*.

Joinable Versus Detached Threads

Mudar o estado de um thread para *detached*:

```
int pthread_detach(pthread_t th);
```

- pthread_detach() retorna 0 se OK, valor positivo se erro.
- th é o identificado do thread a colocar *detached*.

Obter o identificador do thread corrente:

```
pthread_t pthread_self(void);
```

- pthread_self() retorna o identificador do thread corrente.

Integração Numérica com Threads (integra_threads.c)

```
float somas[NTHREADS];

main() {
  pthread_t thread[NTHREADS];
  float soma;
  int i;

  for (i = 0; i < NTHREADS; i++)
    pthread_create(&thread[i], NULL, integral, (void *)i);
  soma = 0;
  for (i = 0; i < NTHREADS; i++) {
    pthread_join(thread[i], NULL);  // main thread sincroniza com os restantes
    soma += somas[i];
  }
  printf("Area total= %f\n", H * (soma + (f(B) - f(A)) / 2));
}

void *integral(void *region_ptr) {
  int region = (int) region_ptr;
  ...
  somas[region] = soma_parcial;
  return NULL;
}
```


Cuidados a ter na Utilização de Threads

- Passar endereços de variáveis em pthread_create() pode ser perigoso!

```
main () {
  ...
  for (i = 0; i < NTHREADS; i++)
    pthread_create(&thread[i], NULL, integral, (void *)&i);
  ...
}

void *integral(void *region_ptr) {
  int region = *((int *) region_ptr);
  ...
}
```

- A variável `i` pode ser alterada no main thread antes de ser lida pelo novo thread!

Cuidados a ter na Utilização de Threads

- Retornar directamente o valor calculado nem sempre é possível!

```
main () {
  ...
  for (i = 0; i < NTHREADS; i++) {
    float soma_parcial;
    pthread_join(thread[i], (void *)&soma_parcial);
    soma += soma_parcial;
  }
  ...
}

void *integral(void *region_ptr) {
  float soma_parcial;
  ...
  // gcc error: cannot convert to a pointer type
  return ((void *) soma_parcial);
}
```

- Se o valor a retornar for por exemplo do tipo `float`, o compilador não consegue converter para um apontador.

Cuidados a ter na Utilização de Threads

- Retornar endereços de variáveis locais pode originar erros ou um *segmentation fault*!

```
main () {
  ...
  for (i = 0; i < NTHREADS; i++) {
    float *soma_parcial;
    pthread_join(thread[i], (void *)&soma_parcial);
    soma += *soma_parcial;
  }
  ...
}

void *integral(void *region_ptr) {
  float soma_parcial;
  ...
  // gcc warning: function returns address of local variable
  return ((void *) &soma_parcial);
}
```

- Como a função termina, o endereço de memória da variável local `soma_parcial` fica fora de âmbito.

Cuidados a ter na Utilização de Threads

- Mesmo utilizando a função pthread_exit() o problema acontece!

```
void *integral(void *region_ptr) {
  float soma_parcial;
  ...
  pthread_exit((void *) &soma_parcial);
}
```

- O endereço de memória da variável local `soma_parcial` fica igualmente fora de âmbito quando o main thread sincroniza através da chamada `pthread_join()`.

Sincronização e Regiões Críticas

- A principal causa da ocorrência de erros na programação de threads está relacionada com o facto dos dados serem todos partilhados. Apesar de este ser um aspectos mais poderosos da utilização de threads, também pode ser um dos mais perigosos.
- O problema existe quando dois ou mais threads tentam aceder/alterar as mesmas estruturas de dados (***race conditions***).
- Existem dois tipos principais de sincronização:
  - **Mutexs:** para situações de curta duração.
  - **Variáveis de Condição:** para situações em que o tempo de espera não é previsível (pode depender da ocorrência de um evento).

Mutexs (MUTual EXclusion locks)

Um mutex é um lock que apenas pode estar na posse de um thread de cada vez, garantindo exclusão mútua. Os restantes threads que tentem aceder ao lock ficam bloqueados até que este seja libertado.

```
int pthread_mutex_init(pthread_mutex_t *mutex,
                       pthread_mutexattr_t *mutexattr);
```

- pthread_mutex_init() inicia um mutex. Retorna 0 se OK, valor positivo se erro.
- mutex é a variável que representa o mutex.
- mutexattr permite especificar atributos do mutex. Se NULL o mutex é iniciado com os atributos por defeito.

```
pthread_mutex_t mutex;
pthread_mutex_init(&mutex, NULL);
```

- Outra foram de iniciar um mutex (se estaticamente alocado) com os atributos por defeito é a seguinte:

```
pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
```


Operações sobre Mutexs

Obter o lock no mutex:

```
int pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mutex);
```

Libertar o lock:

```
int pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mutex);
```

Faz tentativa de obter o lock mas não bloqueia caso não seja possível:

```
int pthread_mutex_trylock(pthread_mutex_t *mutex);
```

- Todas as funções retornam 0 se OK, valor positivo se erro.
- mutex é a variável que representa o mutex.

Integração Numérica com Mutexs (integra_mutex.c)

```
pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
float soma;

main() {
  pthread_t thread[NTHREADS];
  int i;

  soma = 0;
  for (i = 0; i < NTHREADS; i++)
    pthread_create(&thread[i], NULL, integral, (void *)i);
  for (i = 0; i < NTHREADS; i++)
    pthread_join(thread[i], NULL);
  printf("Area total= %f\n", H * (soma + (f(B) - f(A)) / 2));
}

void *integral(void *region_ptr) {
  ...
  pthread_mutex_lock(&mutex);
  soma += soma_parcial;
  pthread_mutex_unlock(&mutex);
  return NULL;
}
```


Fila de Tarefas com Mutexs

```
pthread_mutex_t flag_mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
int flag_is_set = FALSE;

void *thread_function (void *thread_arg) {
  while (1) {
    pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
    if (flag_is_set) {
      get_work_and_update_flag();
      pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
      do_work();
    } else
      pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
  }
  return NULL;
}

void set_flag() {
  pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
  flag_is_set = TRUE;
  pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
}
```

Variáveis de Condição

- Os mutexs permitem prevenir acessos simultâneos a variáveis partilhadas. No entanto, por vezes o uso de mutexs pode ser bastante ineficiente.
- Se pretendermos realizar uma dada tarefa apenas quando uma dada variável tome um certo valor, temos que consultar sucessivamente a variável até que esta tome o valor pretendido.
- Em lugar de testar exaustivamente uma variável, o ideal era adormecer o thread enquanto a condição pretendida não sucede.
- As variáveis de condição permitem adormecer um thread até que uma dada condição suceda.

Variáveis de Condição

Ao contrário dos semáforos, as variáveis de condição não têm contadores. Se um thread A sinalizar uma variável de condição antes de um outro thread B estar à espera, o sinal perde-se. O thread B ao sincronizar mais tarde nessa variável, deverá ficar à espera que um outro thread volte a sinalizar a variável de condição.

```
int pthread_cond_init(pthread_cond_t *cond, pthread_condattr_t
                      *cond_attr);
```

- pthread_con_init() inicia uma variável de condição. Retorna 0 se OK, valor positivo se erro.

Variáveis de Condição

```
int pthread_cond_init(pthread_cond_t *cond, pthread_condattr_t
                      *cond_attr);
```

- cond representa a variável de condição.
- cond_attr permite especificar atributos da variável de condição. Se NULL é iniciada com os atributos por defeito.

```
pthread_cond_t cond;
pthread_cond_init(&cond, NULL);
```

- Outra foram de iniciar uma variável de condição (se estaticamente alocada) com os atributos por defeito é a seguinte:

```
pthread_cond_t cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER;
```


Sinalizar uma Variável de Condição

```
int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cond);
```

- pthread_cond_signal() acorda um dos threads bloqueado na variável cond. Caso existam vários threads bloqueados, apenas um é acordado (não é especificado qual).

```
int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cond);
```

- pthread_cond_broadcast() acorda todos os threads que possam estar bloqueados na variável cond.
- Em ambos os casos, se nenhum thread estiver bloqueado na variável especificada, nada acontece.
- Ambas as funções retornam 0 se OK, valor positivo se erro.

Bloquear numa Variável de Condição

A uma variável de condição está sempre associado um mutex. Isto acontece de modo a garantir que entre o testar de uma dada condição e o activar da espera sobre uma variável de condição, nenhum outro thread sinaliza a variável de condição, o que poderia originar a perca desse mesmo sinal.

```
int pthread_cond_wait(pthread_cond_t *cond, pthread_mutex_t
                      *mutex);
```

- pthread_cond_wait() bloqueia o thread na variável de condição cond. A execução do thread é suspensa e este deixa de consumir tempo de CPU.
- pthread_cond_wait() de um modo atómico liberta o mutex (tal como se executasse pthread_unlock_mutex()) e bloqueia na variável de condição cond até que esta seja sinalizada. Isto requer, obviamente, que se obtenha o lock sobre o mutex antes de invocar a função.
- Quando a variável é sinalizada e o thread é acordado, pthread_cond_wait() readquire o lock no mutex (tal como se executasse pthread_lock_mutex()) antes de regressar à execução.

Fila de Tarefas com Variáveis de Condição

```
pthread_cond_t flag_cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER;
pthread_mutex_t flag_mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
int flag_is_set = FALSE;

void *thread_function (void *thread_arg) {
  while (1) {
    pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
    while (!flag_is_set)  // faz loop enquanto flag_is_set é FALSE
      pthread_cond_wait(&flag_cond, &flag_mutex);
    get_work_and_update_flag();
    pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
    do_work();
  }
  return NULL;
}

void set_flag() {
  pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
  flag_is_set = TRUE;
  pthread_cond_signal(&flag_cond);
  pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
}
```

Thread-Specific Data

Existem duas soluções básicas para associar dados a um thread durante toda a execução:

- Guardar os dados numa estrutura global associada com o thread.
- Passar os dados como argumento em todas as funções que o thread invoque.

No entanto, em algumas circunstâncias, nenhuma das soluções funciona. Vejamos o que acontece se pretendermos reescrever uma biblioteca/módulo de funções para suportar multithreading (***trhread-safe functions***).

Thread-Specific Data

```
int fd;

init_module( ... ) {
  ...
  fd = open("module.log", O_RDWR | O_CREAT | O_TRUNC,  S_IRUSR | S_IWUSR);
  ...
}

use_module( ... ) {
  ...
  write(fd, ...);
  ...
}
```

- Por um lado não queremos redefinir os argumentos das funções e por outro lado não sabemos o número adequado de estruturas globais a utilizar.

Chaves

Para resolver a situação o standard Pthreads introduz o conceito de chave (***key***), um tipo de apontador que associa dados com threads. Apesar de durante a execução todos os threads referirem uma mesma chave, cada um acede a dados diferentes.

```
int pthread_key_create(pthread_key_t *key, void
          (*destr_function) (void *));
```

- pthread_key_create() aloca uma nova chave em todos os threads em execução e inicia-as com `NULL`. Se novos threads forem entretanto criados, todas as chaves do sistema são igualmente alocadas para os novos threads e iniciadas com `NULL`.
- key é o identificador da chave a alocar.
- destr_function, se não `NULL`, especifica uma função a ser executada no caso de o thread corrente terminar, em que o argumento da função é o valor associado com a chave `key`.

Iniciação Única

```
int pthread_once(pthread_once_t *once_control, void
          (*init_routine) (void));
```

- pthread_once() é um mecanismo para garantir que um determinado código de iniciação não é executado mais do que uma vez. A primeira vez que `pthread_once()` é executado para um dado argumento de controle `once_control`, a função `init_routine` é executada. Subsequentes chamadas a `pthread_once()` com o mesmo argumento de controle não fazem nada.
- once_control é o argumento de controle. Deve ser estaticamente iniciado com `PTHREAD_ONCE_INIT`.

```
pthread_once_t once_control = PTHREAD_ONCE_INIT;
```

- init_routine é a função a executar não mais do que uma vez.

Operações com Chaves

Instanciar uma chave:

```
int pthread_setspecific(pthread_key_t key, const void *pointer);
```

- pthread_setspecific() instancia a chave `key` do thread corrente com o valor `pointer`.

Ler o valor de uma chave:

```
void * pthread_getspecific(pthread_key_t key);
```

- pthread_getspecific() retorna o valor associado com a chave `key` do thread corrente.

Thread-Specific Data (module_key.c)

```
pthread_once_t fd_once = PTHREAD_ONCE_INIT;
pthread_key_t fd_key;

init_module( ... ) {
  int fd;
  ...
  pthread_once(&fd_once, module_once);
  sprintf(filename, "module_t%d.log", (int) pthread_self());
  fd = open(filename, O_RDWR | O_CREAT | O_TRUNC,  S_IRUSR | S_IWUSR);
  pthread_setspecific(fd_key, (void *) fd);
  ...
}

use_module( ... ) {
  int fd = (int) pthread_getspecific(fd_key);
  ...
  write(fd, ...);
  ...
}

void module_once (void) { pthread_key_create(&fd_key, module_destructor); }

void module_destructor (void *fd) { close((int)fd); }
```

Implementações do Pthreads

As implementações do Pthreads podem dividir-se em 3 categorias:

- **User Threads:** implementações geridas ao nível do espaço do utilizador.
- **Kernel Threads:** implementações geridas ao nível do kernel.
- **Two-Level Scheduler ou Lightweight Processes (LWPs):** implementações híbridas.

Cada uma das implementações condiciona de modo diferente o modo de escalonamento e performance dos threads de um programa.

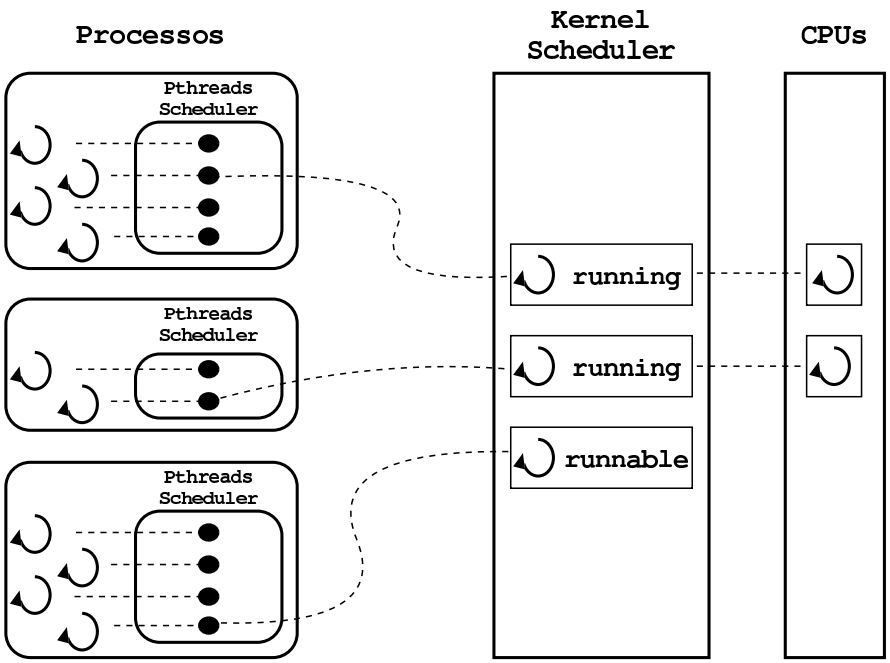
No entanto, todas as implementações disponibilizam o objectivo base do paradigma: **concorrência**.

User Threads

Modo de funcionamento:

- São executados e geridos no espaço do utilizador, no âmbito de um processo, sem estarem visíveis para o kernel do sistema.
- A libraria Pthreads implementa toda a política de escalonamento e multiplexagem dos contextos de execução. O kernel não tem a noção de threads, continua apenas a escalonar processos.

User Threads



User Threads

Vantagens e inconvenientes:

- **(+)** São mais fáceis de implementar pois não interferem com o kernel.
- **(+)** São bastante eficientes, pois não envolvem o kernel para sincronização.
- **(+)** São escalares, pois a criação de mais e mais threads não sobrecarrega o sistema.
- **(–)** Threads de um mesmo processo competem entre si pelo tempo de CPU e não entre todos os threads/processos existentes no sistema.
- **(–)** Em máquinas multiprocessador não é possível ter threads de um mesmo processo em paralelo.

Implementações:

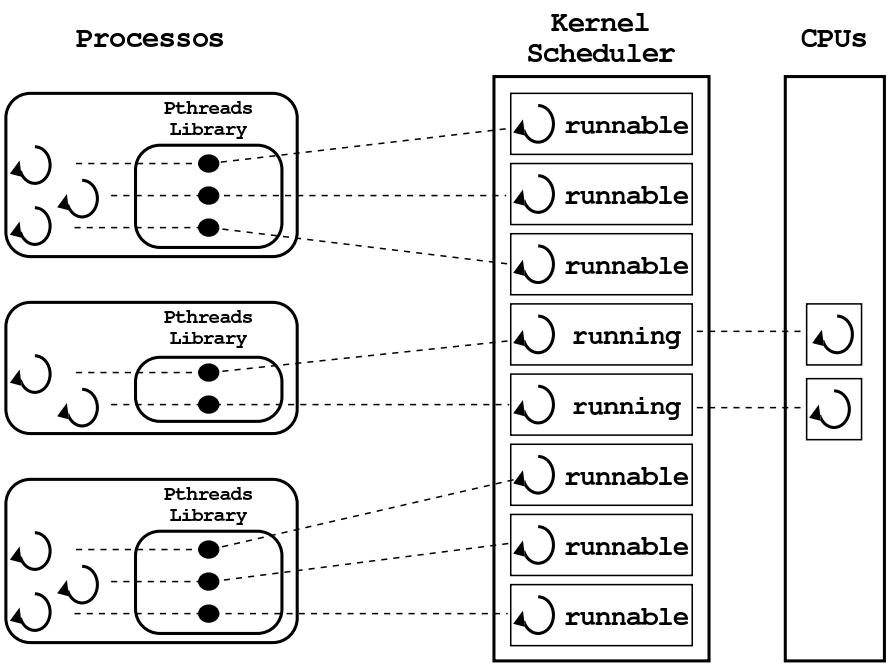
- Digital OpenVMS (anteriores à versão 7.0)

Kernel Threads

Modo de funcionamento:

- São executados e geridos pelo kernel como se fossem processos.
- O kernel é o responsável pela multiplexagem do contexto de execução de cada thread. Como tal, alguma informação tradicionalmente associada a processos, como sejam a prioridade de escalonamento, atribuição de CPU para execução, conjunto de registos guardados, é igualmente necessária para gerir threads.

Kernel Threads



Kernel Threads

Vantagens e inconvenientes:

- **(+)** Todos os threads do sistema competem entre si pelo tempo de CPU e não entre os threads do mesmo processo.
- **(+)** Em máquinas multiprocessador é possível executar threads de um mesmo processo em paralelo.
- **(–)** Requer um maior esforço de implementação.
- **(–)** Apesar de menos dispendiosa que a criação de um processo, a criação e manutenção de novos threads acarreta algum custo ao sistema. Este custo pode ser desnecessário se o nosso programa não correr em máquinas multiprocessador (provavelmente user threads seria suficiente).
- **(–)** São menos escalares, já que o manuseamento de bastantes threads pode degradar consideravelmente a performance do sistema.

Implementações:

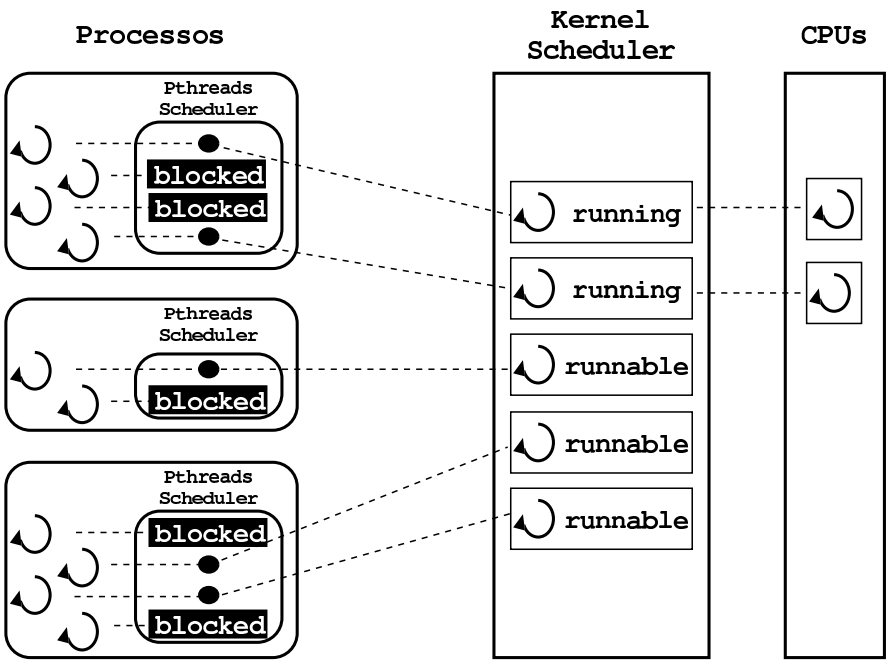
- GNU/Linux
- Digital UNIX pre-Version 4.0

Two-Level Scheduler Threads

Modo de funcionamento:

- São executados e geridos em cooperação entre a libraria Pthreads e o kernel. Ambos mantêm estruturas de dados para representar user e kernel threads respectivamente.
- Utiliza dois níveis de controlo em que conjuntos de user threads são mapeados sobre kernel threads que por sua vez são escalados para execução nos processadores do sistema.
- O programador escreve o seu programa em termos de user threads e pode especificar quantos kernel threads vão estar associados ao processo.

Two-Level Scheduler Threads



Two-Level Scheduler Threads

Vantagens e inconvenientes:

- **(+)** O melhor dos dois mundos: boa performance e baixos custos de criação/manutenção.
- **(–)** Complexidade do sistema que se reflecte quando o programador necessita de fazer debugging.

Implementações:

- Solaris
- Digital OpenVMS 7.0
- Digital UNIX 4.0

Processos Versus Threads

- Todos os threads num programa executam o mesmo executável. Um processo filho pode executar um programa diferente se invocar a função exec.
- Um thread vagabundo pode corromper as estruturas de dados de todos os outros threads. Um processo vagabundo não consegue fazer isso porque o seu espaço de endereçamento é privado.
- A memória a copiar na criação de um novo processo acrescenta um peso maior ao sistema do que na criação de um novo thread. No entanto, a cópia é retardada o mais possível e apenas é efectuada se a memória for alterada. Isto diminui, de certa forma, o custo a pagar nos casos em que o processo filho apenas lê dados.
- A utilização de processos é mais indicada em problemas de granularidade alta, enquanto que os threads são indicados para problemas de baixa granularidade.
- Partilhar dados entre threads é trivial porque estes partilham a mesma memória. Partilhar dados entre processos requer a utilização de uma das técnicas de comunicação entre processos (IPC). Apesar de mais penoso, isto torna a utilização de múltiplos processos menos susceptível de erros de concorrência.

Bibliografia

- ***Advanced Linux Programming.*** M. Mitchell, J. Oldham, A. Samuel. New Riders. `http://www.advancedlinuxprogramming.com` **(Capítulo 4. Biblioteca ref. 344)**
- ***Pthreads Programming.*** B. Nichols, D. Buttlar, J.P. Farrell. O'Reilly. **(Capítulos 1, 3, 4 (págs 109–128) e 6 (págs 193–202). Biblioteca ref. 201)**