Programação Paralela e Distribuída

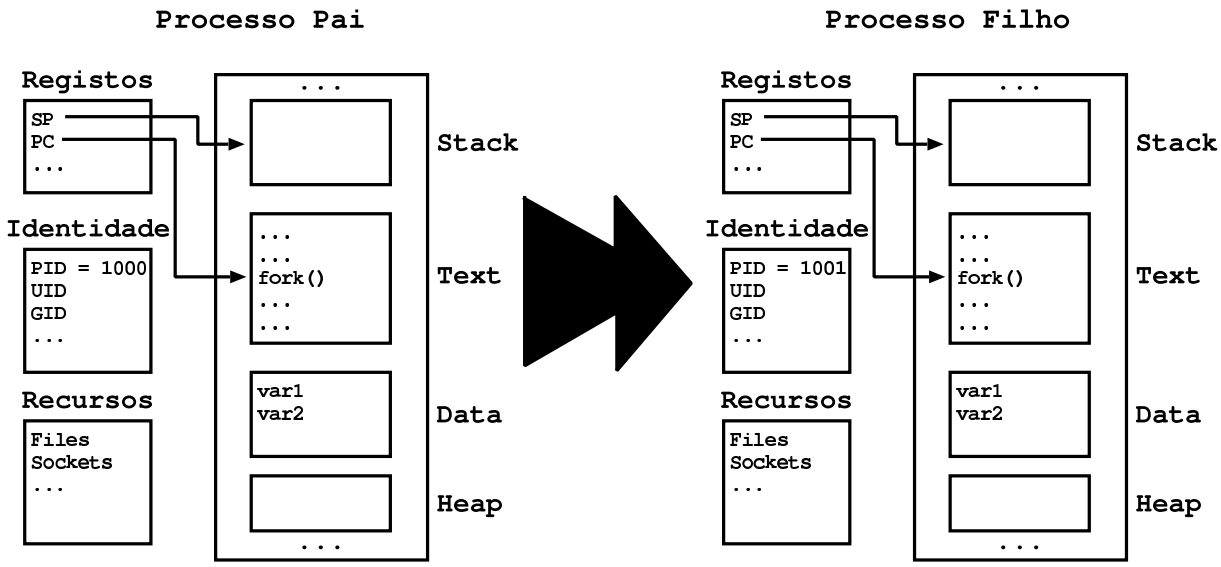
Programação em Memória Partilhada com o Pthreads

Concorrência ou Paralelismo Potencial

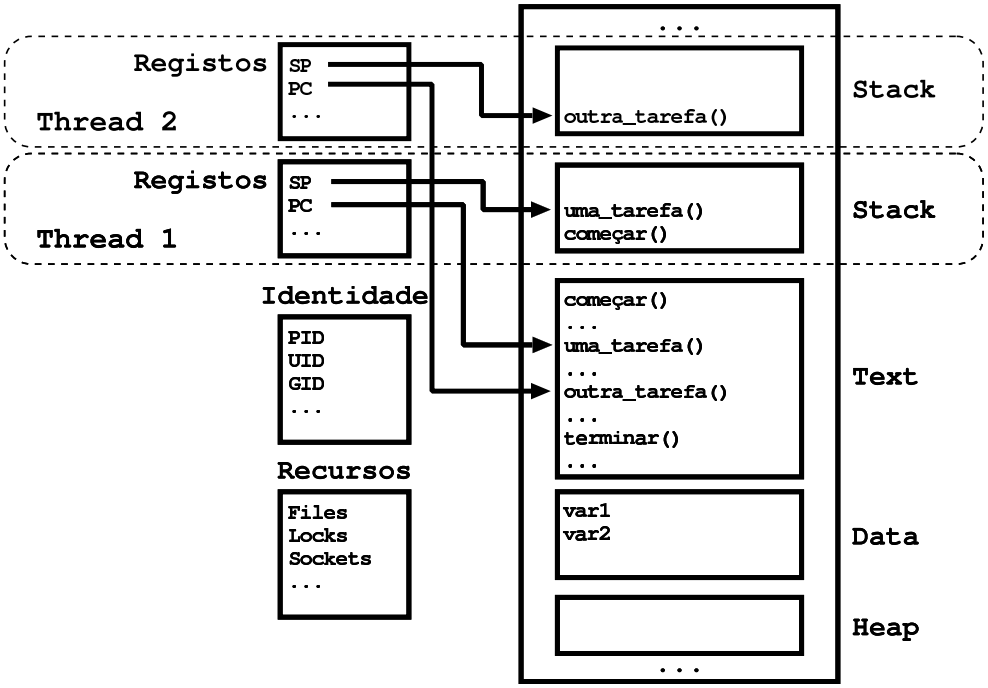
- Concorrência ou paralelismo potencial diz-se quando um programa possui tarefas que podem ser executadas em qualquer ordem sem alterar o resultado final.

- Uma razão óbvia para explorar concorrência é conseguir reduzir o tempo de execução dos programas em máquinas multiprocessador.
- Existem, no entanto, outras 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



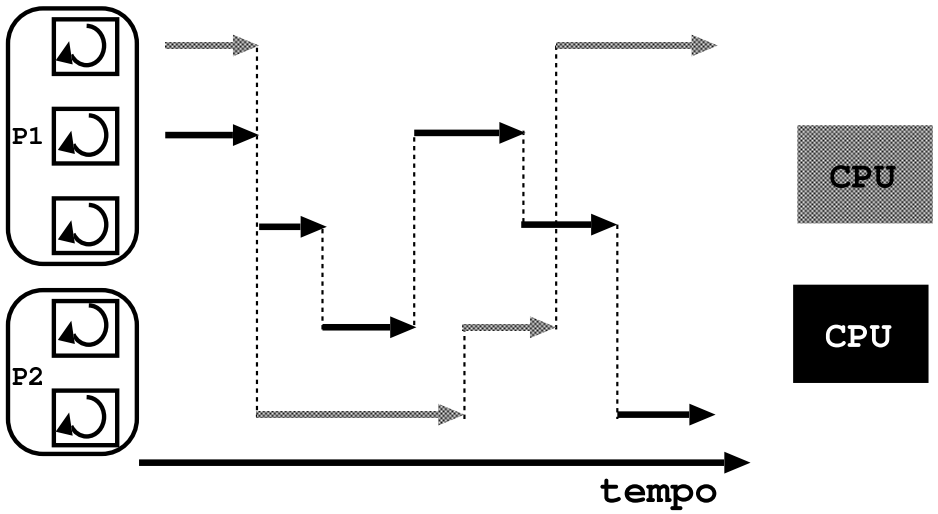
Processos Multithreaded

Processo = Conjunto de *Threads* + Conjunto de Recursos

- Um *thread* representa um fluxo de execução sequencial dentro do processo.
- A cada *thread* está associado uma pilha de execução (*stack*) e um conjunto de registos de contexto, tais como o *stack pointer* e o *program counter*.
- Os restantes recursos do processo são partilhados pelo conjunto dos *threads*: espaço de endereçamento, ficheiros abertos, identidade do utilizador, etc.

Execução de Processos Multithreaded

- Todos os *threads* de um processo podem ser executados concorrentemente e em diferentes processadores, caso existam.



Multithreading: Vantagens e Inconvenientes

- **(+)** Facilita a estruturação dos programas. Grande parte dos programas são intrinsecamente estruturados em múltiplas unidades de execução.
- **(+)** Elimina espaços de endereçamento múltiplos, 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.
- **(–)** A partilha transparente de recursos exige do programador cuidados redobrados de sincronização.

O Modelo POSIX Threads (Pthreads)

- 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) 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 *th, 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 th com o identificador do novo *thread* e retorna 0, senão retorna um código de erro.

Criação de Threads

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

- th 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()` ou `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 Threads x 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 Threads x 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 identificador 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 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 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 na Utilização de Threads

- Retornar endereços de variáveis locais pode originar erros ou *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 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 problemáticos.
- 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

- Um mutex (MUTual EXclusion) 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);
```

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

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 I

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

void *thread_function (void *thread_arg) {
  while (TRUE) {
    pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
    if (flag_is_set) {
      get_task();
      if (no_more_tasks())
        flag_is_set = FALSE;
      pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
      do_work();
    } else
      pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
  }
}

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

Fila de Tarefas com Mutexs II

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

void *thread_function (void *thread_arg) {
  while (TRUE) {
    while (flag_is_set == FALSE);  // faz loop enquanto flag_is_set é FALSE
    pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
    if (flag_is_set) {
      get_task();
      if (no_more_tasks())
        flag_is_set = FALSE;
      pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
      do_work();
    } else
      pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
  }
}

void new_task() {
  pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
  put_task();
  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 *threads* 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* bloqueados 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.
- `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 (TRUE) {
    pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
    while (flag_is_set == FALSE)  // faz loop enquanto flag_is_set é FALSE
      pthread_cond_wait(&flag_cond, &flag_mutex);
    get_task();
    if (no_more_tasks())
      flag_is_set = FALSE;
    pthread_mutex_unlock(&flag_mutex);
    do_work();
  }
}

void new_task() {
  pthread_mutex_lock(&flag_mutex);
  put_task();
  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 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 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); }
```

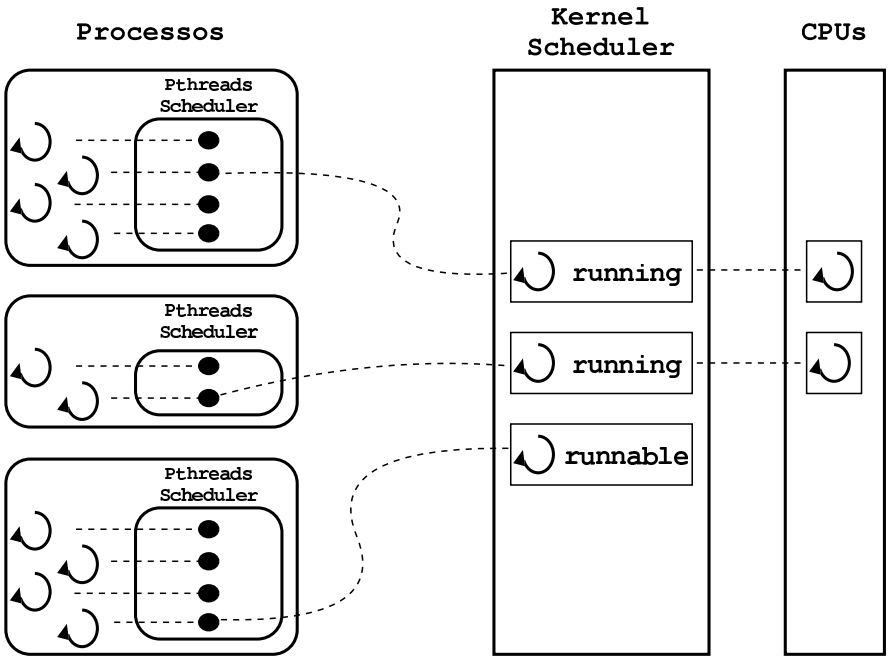

Implementações do Pthreads

- 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 Threads ou Lightweight Processes:** 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

- São executados e geridos no espaço do utilizador, no âmbito de um processo, sem estarem visíveis para o *kernel* do sistema.
- A biblioteca 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.
- Implementações:
  - Digital OpenVMS (anteriores à versão 7.0)

User Threads



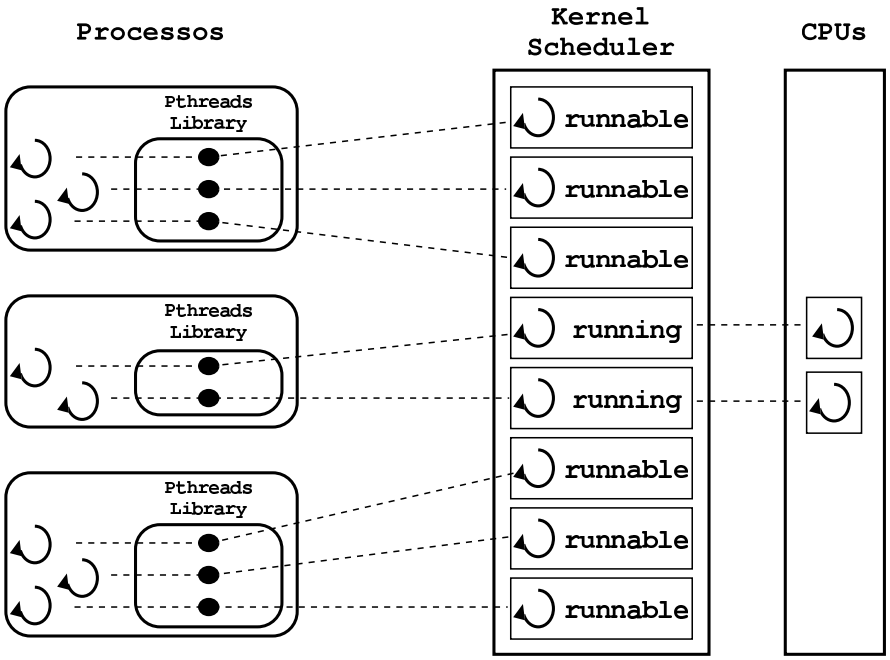
User Threads: Vantagens e Inconvenientes

- **(+)** 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.

Kernel Threads

- 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*.
- Implementações:
  - GNU/Linux
  - Digital UNIX pre-Version 4.0

Kernel Threads



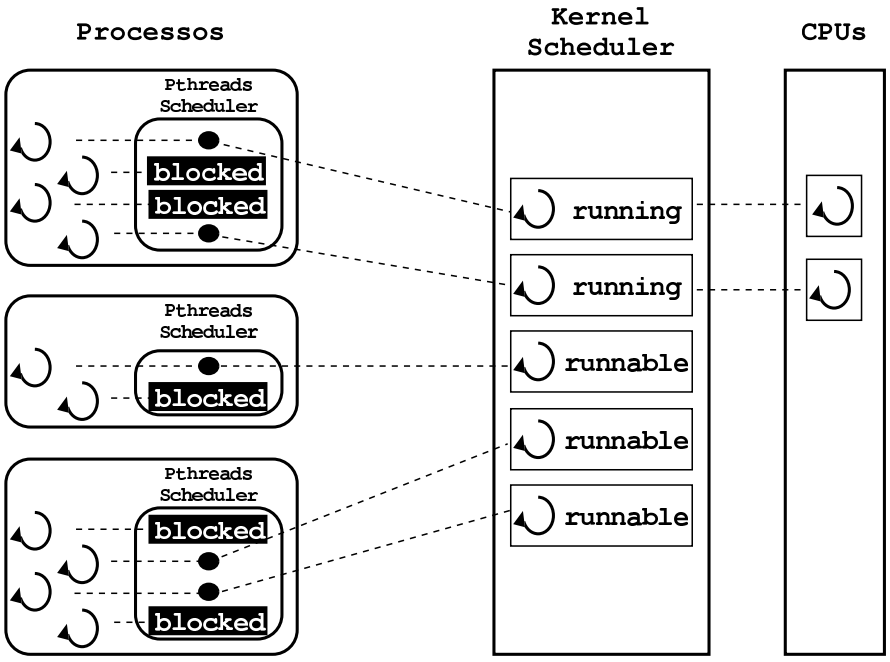
Kernel Threads: Vantagens e Inconvenientes

- **(+)** 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.

Two-Level Scheduler Threads

- São executados e geridos em cooperação entre a biblioteca 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.
- Implementações:
  - Solaris
  - Digital OpenVMS 7.0
  - Digital UNIX 4.0

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*.

Processos x 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 grossa/média, enquanto que os *threads* são indicados para problemas de granularidade fina.
- 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.