



Universidade Federal
de São João del-Rei

Trabalho Prático 3 - Computação Paralela

Arthur Antunes Santos Silva
Lucas Gonçalves Nojiri

Trabalho Prático 3 da disciplina de Computação Paralela, ministrada pelo professor Rafael Sachetto Oliveira, do curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de São João del-Rei.

São João del Rei
Dezembro de 2023

Sumário

1	Introdução	2
2	Perfil de desempenho sequencial	2
3	Paralelização	3
3.1	Identificação das oportunidades de paralelização	3
3.2	Avaliação dos ganhos com a paralelização	4
4	Paralelização com Threads	5
5	Algoritmo	6
6	Diferenças	8
6.1	Identificação de Números Primos	9
6.2	Cálculo de Divisores	9
6.3	Leitura e Escrita de Arquivos	10
6.4	Avaliação do Desempenho Paralelo	10
7	Conclusão	11
8	Referências	11

1 Introdução

Este relatório descreve o processo de paralelização de um algoritmo de identificação de números primos em um vetor de inteiros. O objetivo deste trabalho é implementar uma versão paralela mestre-escravo desse algoritmo usando o ambiente MPI (Message Passing Interface). O algoritmo lê um vetor de inteiros a partir de um arquivo de entrada (entrada.txt), armazena-o na memória do processo mestre e, em seguida, distribui a tarefa de verificar divisores exatos para processos escravos. Após o processamento, cada escravo retorna a contagem de divisores de cada valor na sua fatia do vetor. O processo mestre, por sua vez, gera um arquivo de saída (saida.txt) contendo o número de divisores de cada elemento do arquivo de entrada na ordem original.

O objetivo final é demonstrar como a paralelização pode ser uma abordagem eficaz para acelerar a identificação de números primos em um grande conjunto de dados, aproveitando ao máximo os recursos computacionais disponíveis. Os recursos utilizados serão OpenMPI e Threads

2 Perfil de desempenho sequencial

Primeiramente foi implementado um algoritmo sequencial. Nesse algoritmo, é lido um arquivo de entrada e carregado os valores contidos nele na memória principal, armazenando-os em um vetor de tamanho S, que representa o número de linhas do arquivo. Em seguida, é chamada uma função que analisa cada valor N presente no vetor. Para cada N, é percorrido os números de 1 até N/2, verificando quais deles são divisores de N. Durante essa verificação, um contador é inicializado em 1, uma vez que todos os números são divisíveis por eles mesmos.

Como esperado, a execução do programa com essa abordagem sequencial é notavelmente lenta. Com isso em mente, antes de avançar com a paralelização, foi implementado uma função dinâmica para fins comparativos a função "Fatora_Prod". Nessa função, é feito a fatoração de N em seus fatores primos e calculado o produto dos expoentes desses fatores primos, somando 1 a cada um deles. Essa técnica nos permite encontrar o número de divisores de N, como exemplificado no caso de 144, que possui 15 divisores.

$$\begin{array}{r|l} 144 & 2 \\ 72 & 2 \\ 36 & 2 \\ 18 & 2 \\ 9 & 3 \\ 3 & 3 \\ \hline 1 & 144 = 2^4 \times 3^2 \end{array}$$



$$(4 + 1) \times (2 + 1) = 5 \times 3 = 15 \text{ divisores}$$

3 Paralelização

3.1 Identificação das oportunidades de paralelização

A oportunidade da paralelização é vista em cada um dos itens listados

Leitura do arquivo de entrada: A leitura do arquivo de entrada "entrada.txt" é feita apenas pelo processo mestre. Essa operação de leitura pode ser paralelizada, distribuindo a carga de leitura entre os processos escravos, especialmente se o arquivo for muito grande.

Verificação de números primos: A função EhPrimo verifica se um número é primo. Essa verificação pode ser paralelizada entre os processos escravos, cada um verificando um subconjunto dos números no vetor. Os resultados podem ser combinados posteriormente.

Cálculo de divisores: A função Divisores calcula o número de divisores de um número. Assim como a verificação de números primos, esse cálculo pode ser paralelizado, distribuindo o cálculo entre os processos escravos.

Escrita no arquivo de saída: A escrita no arquivo de saída "saida.txt" também é feita apenas pelo processo mestre. Essa operação de escrita pode ser paralelizada, permitindo que cada processo escravo escreva sua parte dos resultados no arquivo de saída.

```

arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/Computação Paralela$ mpirun -np 1 ./tp1_mpi
Tempo de execução: 1.086165 segundos
arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/Computação Paralela$ mpirun -np 2 ./tp1_mpi
Tempo de execução: 0.539745 segundos
arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/Computação Paralela$ mpirun -np 3 ./tp1_mpi
Tempo de execução: 0.362025 segundos
arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/Computação Paralela$ mpirun -np 4 ./tp1_mpi
Tempo de execução: 0.283880 segundos

```

Figura 1: Execução Algoritmo Paralelo

```

89567853 - 16
56162027 - 4
89110884 - 24
211394401 - 4
147787399 - 2
212490004 - 24
146971856 - 10
172540375 - 32
143159597 - 16
60938341 - 4
127732604 - 12
92667390 - 16
64951198 - 8
85827985 - 8
230744402 - 16
241069066 - 8
242311962 - 8
140723750 - 40
76113752 - 32
97625433 - 8
81198749 - 16
240917528 - 16
217290668 - 48
198979880 - 32
134824578 - 48
126438238 - 16
186583840 - 48
223553113 - 8
181993941 - 6
Tempo de execução -> Fatora_Prod: 21.015625 segundos
arthur@DESKTOP-30G3KEK:/mnt/c/Users/Arthur/Documents/UFSJ/Computação Paralela$

```

Figura 2: Execução Algoritmo Sequencial

3.2 Avaliação dos ganhos com a paralelização

Todos os testes foram executados em duas máquinas diferentes. A primeira com processador Intel Core I5-8250U, 4 núcleos de processamento de 2.50GHz, sistema operacional de 64 bits e memória RAM de 8 GB. E a segunda com processador Ryzen 5 5600g, 6 núcleos de processamento de 3.9GHz, sistema operacional de 64 bits e memória RAM de 16 GB. Em ambas as máquinas não foram encontrados resultados muito diferentes.

Algoritmo Sequencial	Tempo de execução em segundos
Teste 1	22.367823s
Teste 2	21.015625s
Teste 3	20.897621s
Teste 4	21.536489s
Teste 5	22.846241s

Figura 3: Execução Algoritmo Sequencial

Algoritmo Paralelizado	Tempo de execução em segundos
Teste 1 - 1 núcleo	1.251572s
Teste 2 - 2 núcleos	0.535188s
Teste 3 - 3 núcleos	0.355845s
Teste 4 - 4 núcleos	0.263418s

Figura 4: Execução Algoritmo Paralelo

Como se pode observar o Algoritmo Paralelo trás um benefício de desempenho muito maior que o Sequencial. Foi percebido também como a quantidade de núcleos de processamento alterou o resultado final, já que quanto mais núcleos melhor foi a performance final do Algoritmo Paralelo.

4 Paralelização com Threads

O terceiro algoritmo além de utilizar MPI, também utiliza threads no seu processamento. Dessa forma, é muito semelhante ao segundo algoritmo, apenas com algumas mudanças, sendo elas:

Estrutura de dados: Essa estrutura é usada para armazenar dados que serão compartilhados entre as threads. Ela contém informações sobre o intervalo de índices a ser processado, bem como arrays para armazenar números e divisores locais.

Função processar_local: Esta é a função que cada thread executará localmente. Recebe um argumento do tipo ThreadData e processa os números locais, armazenando os resultados nos divisores locais.

Processamento de dados: O processamento local é feito com threads onde aloca memória para arrays de threads e dados de thread. Em seguida, cria threads para processar os dados localmente usando a função processar_local. Em seguida aguarda a conclusão de todas as threads antes de prosseguir.

```
arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/TP3$ mpirun -np 1 ./tp3_mpi
Tempo de execução: 1.034461 segundos
arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/TP3$ mpirun -np 2 ./tp3_mpi
Tempo de execução: 0.517869 segundos
arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/TP3$ mpirun -np 3 ./tp3_mpi
Tempo de execução: 0.447315 segundos
arthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/TP3$ mpirun -np 4 ./tp3_mpi
Tempo de execução: 0.467662 segundos
```

Figura 5: Execução Algoritmo Paralelo com threads

Algoritmo usando Threads	Tempo de execução em segundos
Teste 1 - 1 núcleo	1.034461
Teste 2 - 2 núcleos	0.517869
Teste 3 - 3 núcleos	0.447315
Teste 4 - 4 núcleos	0.467662

Figura 6: Algoritmo Paralelo com threads

5 Algoritmo

Implementação Paralela Mestre-Escravo: O principal objetivo do código é implementar uma versão paralela usando o modelo mestre-escravo com MPI. O mestre é responsável por coordenar o trabalho dos processos escravos.

Identificação de Números Primos: O programa visa identificar números primos em um vetor de N inteiros. Isso é feito na função `EhPrimo`, que verifica se um número é primo.

Cálculo de Divisores: O programa calcula o número de divisores para cada número não primo no vetor. Isso é feito na função `Divisores`.

Leitura e Escrita de Arquivos: O código lê um arquivo de entrada chamado "entrada.txt", realiza o processamento paralelo e escreve os resultados em um arquivo de saída chamado "saida.txt".

Avaliação do Desempenho Paralelo: O código mede o tempo de execução no processo mestre e relata os ganhos de desempenho obtidos com a paralelização.

Função `processar_local`: Cada thread é criada para processar uma parte dos dados locais, especificamente um intervalo determinado pelos índices `start_index` e `end_index` na estrutura `ThreadData`. A função `processar_local` verifica se cada número no intervalo é primo usando a função `EhPrimo` e, em caso afirmativo, define o número de divisores como 2. Caso contrário, calcula o número de divisores usando a função `Divisores`. Os resultados são armazenados no array `divisores_local` da estrutura `ThreadData`.

Criação e Execução de Threads na Função Principal (`main`): Antes de iniciar o processamento local, a função principal aloca espaço para arrays de threads (`pthread_t`) e estruturas de dados locais (`ThreadData`). Em seguida, um loop é usado para criar e executar threads para processar dados locais. Cada thread recebe uma estrutura `ThreadData` que contém os dados locais a serem processados. Após a criação das threads, a função principal aguarda a conclusão de todas as threads usando `pthread_join`.

Liberação de Recursos: Após a conclusão do processamento, a função principal libera a memória alocada para as estruturas e os arrays de threads.

Ganho de Desempenho: O ganho de desempenho obtido com a paralelização depende da natureza do problema e do hardware subjacente. Ao distribuir o trabalho entre processos e, dentro de cada processo, entre threads, o código tenta aproveitar a paralelização em diferentes níveis. No entanto, o benefício real da paralelização depende da quantidade de trabalho que pode ser executada simultaneamente e da sobrecarga introduzida pela coordenação entre processos e threads.

Tempo de Execução: O tempo de execução total do programa é medido usando `MPI_Wtime()` e exibido apenas pelo processo mestre. A medição do tempo de execução fornece uma indicação do desempenho global do programa em relação à versão sequencial.

Considerações: A eficácia da paralelização depende do tamanho dos dados de entrada, da complexidade do processamento e da arquitetura do hardware. Em alguns casos, o custo da coordenação entre processos e threads pode superar os benefícios da paralelização, especialmente para conjuntos de dados pequenos.

```
74302056 - 64
197814962 - 16
28647456 - 24
75771806 - 8
196378320 - 80
218262466 - 8
79818830 - 64
108676359 - 48
89567853 - 16
56162027 - 4
89110884 - 24
211394401 - 4
147787399 - 2
212490004 - 24
146971856 - 10
172540375 - 32
143159597 - 16
60938341 - 4
127732604 - 12
92667390 - 16
64951198 - 8
85827985 - 8
230744402 - 16
241069066 - 8
242311962 - 8
140723750 - 40
76113752 - 32
97625433 - 8
81198749 - 16
240917528 - 16
217290668 - 48
198979880 - 32
134824578 - 48
126438238 - 16
186583840 - 48
223553113 - 8
181993941 - 6
Tempo de execução -> Fatora_Prod: 55.455587 segundosarthur99@arthur99-Aspire-A515-51G:~/Documentos/TP3$
```

Figura 7: Sequencial com threads

O uso de threads no código visa melhorar o desempenho ao executar a fatoração de produtos de forma paralela. Dividindo a lista de números entre várias threads, o programa busca otimizar a utilização dos recursos de processamento disponíveis em sistemas multi-core, resultando em uma potencial redução do tempo total de execução.

Cada thread opera de maneira independente em uma porção específica da lista, permitindo a execução simultânea de operações de fatoração e, conseqüentemente, um possível aumento na eficiência em comparação com uma abordagem sequencial.

6 Diferenças

Paralelismo e Concorrência: Sem Threads: Em um programa sequencial, as instruções são executadas uma após a outra em uma única linha de execução. Com Threads: As threads podem executar diferentes partes do código simultaneamente, proporcionando potencial para paralelismo.

Exploração de Recursos: Sem Threads: A execução é restrita a um único núcleo ou processador. Com Threads: Em sistemas com múltiplos núcleos, as threads podem ser distribuídas entre os núcleos, explorando melhor os recursos do hardware.

Compartilhamento de Recursos: Sem Threads: Recursos, como variáveis, são geralmente locais e não compartilhados entre diferentes partes do código. Com Threads: Threads podem compartilhar variáveis e recursos, exigindo mecanismos de sincronização para garantir o acesso seguro e evitar condições de corrida.

Comunicação entre Tarefas: Sem Threads: A comunicação entre diferentes partes do programa pode exigir o uso de variáveis globais ou passagem explícita de parâmetros. Com Threads: As threads podem compartilhar dados diretamente e se comunicar mais eficientemente.

Complexidade e Sincronização: Sem Threads: Programas sequenciais podem ser mais simples de entender e depurar. Com Threads: Introduz a complexidade da sincronização para evitar problemas como condições de corrida, deadlock e inanição.

Overhead de Threads: Sem Threads: Menos overhead em termos de criação, gerenciamento e sincronização. Com Threads: A criação e gerenciamento de threads podem adicionar overhead ao programa.

Escalabilidade: Sem Threads: Limitado à escalabilidade oferecida por uma única linha de execução. Com Threads: Potencial para maior escalabilidade em sistemas com vários núcleos.

Reatividade: Sem Threads: Uma operação demorada pode bloquear toda a execução. Com Threads: Outras threads podem continuar a execução enquanto uma thread está bloqueada, melhorando a reatividade.

Programação Concorrente vs. Paralela: Sem Threads: Programação sequencial tradicional. Com Threads: Introduz a necessidade de lidar com a concorrência e paralelismo, o que pode exigir um raciocínio mais cuidadoso sobre a lógica do programa.

6.1 Identificação de Números Primos

```
1  int EhPrimo(int num) {
2  if (num <= 1) {
3  // Se for menor ou igual a 1, não é primo.
4      return 0;
5  }
6  for (int i = 2; i * i <= num; i++) {
7      if (num % i == 0) {
8          // Se for divisível por algum número, não é primo.
9          return 0;
10     }
11 }
12 return 1; // É primo.
13 }
```

6.2 Cálculo de Divisores

```
1  int Divisores(int num) {
2  int count = 1;
3  for (int i = 1; i <= sqrt(num); i++) {
4      if (num % i == 0) {
5          // Incrementa o contador para cada divisor encontrado.
6          count += 2;
7      }
8  }
9  if (sqrt(num) == (int)sqrt(num)) {
10 // Reduz 1 se o número for quadrado perfeito.
11     count--;
12 }
13 return count;
14 }
```

6.3 Leitura e Escrita de Arquivos

```
1 MPI_File file;
2 MPI_File_open(MPI_COMM_WORLD,
3   "entrada.txt",
4   MPI_MODE_RDONLY,
5   MPI_INFO_NULL,
6   &file);
7
8 // ...
9
10 MPI_File out_file;
11 MPI_File_open(MPI_COMM_WORLD,
12   "saida.txt",
13   MPI_MODE_CREATE | MPI_MODE_WRONLY,
14   MPI_INFO_NULL, &out_file);
15
```

6.4 Avaliação do Desempenho Paralelo

```
1 if (process_rank == MESTRE) {
2     printf("Tempo de execução: %f segundos\n",
3     end_time - start_time);
4 }
5
```

7 Conclusão

Neste trabalho, foi realizada a paralelização de um algoritmo de identificação de números primos em um vetor de inteiros utilizando a biblioteca MPI. O algoritmo foi originalmente sequencial, lento e ineficiente para grandes conjuntos de dados, o que motivou a busca por estratégias de paralelização.

O perfil de desempenho sequencial revelou que a maior parte do tempo de execução estava relacionada às operações de verificação de números primos e cálculo de divisores. Isso indicou claramente as oportunidades de paralelização nesses aspectos.

A implementação paralela seguiu a estratégia mestre-escravo, onde o mestre é responsável pela coordenação do trabalho dos processos escravos. O vetor de inteiros foi lido a partir de um arquivo de entrada, carregado na memória do processo mestre e distribuído entre os processos escravos para processamento paralelo. Após o processamento, os resultados foram coletados no mestre e escritos em um arquivo de saída.

A paralelização permitiu uma considerável melhoria no desempenho do algoritmo, especialmente quando lidando com conjuntos de dados maiores. A divisão do trabalho entre os processos escravos reduziu significativamente o tempo de processamento em comparação com a versão sequencial. A medição do tempo de execução no processo mestre permitiu avaliar os ganhos da paralelização.

As threads oferecem uma abordagem de paralelização em que múltiplos threads compartilham o mesmo espaço de memória, potencialmente resultando em uma comunicação mais eficiente e redução da sobrecarga, se comparada à comunicação interprocessos, como observado no caso do MPI. A habilidade de compartilhar dados de maneira mais direta entre threads pode conduzir a uma utilização mais eficaz dos recursos computacionais e, em determinadas circunstâncias, a uma execução mais eficiente.

Em resumo, este trabalho demonstrou como a paralelização, em particular a estratégia mestre-escravo com MPI, pode ser uma abordagem eficaz para acelerar a identificação de números primos em grandes conjuntos de dados, aproveitando os recursos computacionais disponíveis. No entanto, a paralelização também introduz desafios na coordenação de tarefas e na minimização da sobrecarga de comunicação, que devem ser cuidadosamente considerados para obter um desempenho ótimo.

8 Referências

<https://www.open-mpi.org/>

<https://mpitutorial.com/>

<https://www.codingame.com/playgrounds/54443/openmp/hello-openmp>
