Relatório do trabalho da disciplina de Computação de Alto Desempenho

Problema do *Job-Shop*

Ricardo Jorge Louro Azevedo - 17632

Carlos Bruno Machado Martins -18836

João Ricardo Pinto Azevedo - 18845

Mestrado em Engenharia Informática

Julho de 2023



Índice

[1. Introdução 4](#_Toc139286805)

[1.1. Descrição do problema 4](#_Toc139286806)

[1.2. Objetivo 5](#_Toc139286807)

[2. Implementação Sequencial 6](#_Toc139286808)

[3. Implementação Paralela 9](#_Toc139286809)

[3.1. Variáveis globais partilhadas 11](#_Toc139286810)

[3.2. Variáveis locais de cada thread 11](#_Toc139286811)

[3.3. Secções críticas 11](#_Toc139286812)

[3.4. Técnicas de exclusão mútua 12](#_Toc139286813)

[4. Análise de desempenho 13](#_Toc139286814)

[*4.1.* Cálculo do *speedup* 14](#_Toc139286815)

[5. Apresentação de resultados 16](#_Toc139286816)

[6. Conclusão 17](#_Toc139286817)

## Índice de figuras

[Figura 1 - Análise de desempenho das execuções 13](#_Toc139286418)

[Figura 2 - Análise de desempenho do SpeedUp 15](#_Toc139286419)

[Figura 3 - Resultado das implementações 16](#_Toc139286420)

## Índice de tabelas

[Tabela 1 - Testes realizados ao algoritmo 13](#_Toc139286405)

[Tabela 2 - Cálculo do speedup 14](#_Toc139286406)

## Índice de códigos

[Código 1 - Estruturadas de dados utilizadas 6](#_Toc139286408)

[Código 2 - Leitura do número de jobs e máquinas 6](#_Toc139286409)

[Código 3 - Leitura das operações dos jobs 7](#_Toc139286410)

[Código 4 - Implementação sequencial 8](#_Toc139286411)

[Código 5 - Apresentação dos resultados 8](#_Toc139286412)

[Código 6 - Implementação paralela inicial 9](#_Toc139286413)

[Código 7 - Definição do número de threads 10](#_Toc139286414)

[Código 8 - Alteração do ciclo for exterior por omp parallel 10](#_Toc139286415)

[Código 9 - Cálculo do tempo máximo de finalização da operaçao - paralelo 10](#_Toc139286416)

[Código 10 - Secção crítica 12](#_Toc139286417)

# Introdução

Este trabalho prático tem como principal objetivo a utilização das capacidades de programação paralela através do modelo de partilha de memória, para a resolução de um problema de cálculo computacional.

## Descrição do problema

OJob-Shop é um problema que trata a alocação de recursos para a concretização de um trabalho. No problema de Job-Shop existem várias máquinas que conseguem realizar operações. Para se produzir um trabalho (job) é necessário realizar um conjunto de operações, por sequência, em várias máquinas. Como as máquinas não conseguem realizar todas as operações, cada trabalho é uma sequência de operações, em que cada operação tem de ser feita numa máquina específica.

Adicionalmente, porque cada trabalho é distinto dos restantes, a sequência de máquinas de cada trabalho pode não ser a mesma dos restantes trabalhos, i.e., cada trabalho tem a sua própria sequência de máquinas. Contudo, a ordem das máquinas para cada trabalho tem de ser respeitada, i.e., uma operação de um trabalho que deve ser executada numa máquina específica só pode começar quando a operação anterior desse mesmo trabalho já terminou; assim como a operação seguinte do trabalho só pode começar depois da operação atual terminar. Finalmente, realizar uma operação numa máquina demora tempo. Cada operação de cada trabalho demora um tempo específico, que pode ser distinto para cada operação. Uma máquina só consegue fazer uma operação de cada vez, assim, quando começa uma operação, só fica livre para novas operações após esta terminar.

No entanto, identificam-se assim as duas restrições deste problema:

* As operações de cada trabalho têm de ser realizadas por ordem. A segunda operação de um trabalho só pode começar depois da primeira operação do mesmo trabalho estar concluída, e assim sucessivamente para todas as operações seguintes do mesmo trabalho;
* Uma máquina só consegue executar uma operação de cada vez, pelo que havendo duas operações para a mesma máquina, uma só pode começar depois da outra ter terminado.

## Objetivo

O objetivo do problema é apresentar um escalonamento válido, isto é, definir um tempo de início para cada uma das operações (de todos os *jobs*), de modo a cumprir as restrições apresentadas anteriormente como, por exemplo, uma operação só poder começar após a anterior ter terminado.

# Implementação Sequencial

A abordagem escolhida para atribuição de tempos de início das operações passou pela utilização de um conjunto de ciclos *for* e utilização de *structs.* As *structs* utilizadas podem ser visualizadas no excerto de figura 1.



Código 1 - Estruturadas de dados utilizadas

De modo a receber o número de *jobs* e de máquinas de um ficheiro de *input* recebido no primeiro argumento, após a invocação do script, foi desenvolvido o excerto de código apresentado na figura 2.



Código 2 - Leitura do número de jobs e máquinas

Após a leitura do número de jobs e de máquinas, era necessário, também, ler as operações que compunham os jobs. Para tal foi desenvolvido o excerto de código apresentado abaixo, na figura 3.



Código 3 - Leitura das operações dos jobs

Como referido anteriormente, foram criadas estruturas de dados para as máquinas, operações e conjuntos de operações (*jobs)*. Posto isto, foram inicializadas todas as máquinas como não-ocupadas e atribuído o seu identificador, utilizando um ciclo *for*.

Seguidamente, foi utilizado um *nested for* com três outros ciclos *for* dentro:

* O exterior iterava sobre as máquinas, que correspondem às linhas do ficheiro.
* O primeiro ciclo *for* interior é responsável pela gestão das operações. Começa por verificar se a máquina pretendida para a realização da operação atual (correspondente à iteração), está ocupada:
  + Caso não esteja, o tempo inicial do *job* é definido com o tempo máximo e o tempo de finalização da operação é equivalente ao tempo de início da operação atual mais o tempo necessário para finalizar a operação atual. Por fim, a máquina responsável pela operação é marcada como ocupada e o tempo até ao qual a máquina irá estar ocupada é equivalente ao tempo de finalização referido anteriormente.
  + Caso esteja, o tempo inicial da operação é equivalente ao tempo até ao qual a máquina estaria ocupada e o tempo final da operação seria equivalente ao tempo inicial da operação mais a respetiva duração. Por fim, a máquina é marcada como ocupada e o tempo até ao qual a máquina estaria ocupada é igual ao tempo de finalização da operação.
* O segundo ciclo *for* interior é responsável pelo *reset* das propriedades das máquinas, isto é, quando as operações de um certo *job* já foram definidas o estado das máquinas passa a livre e o tempo de finalização das mesmas também.
* O terceiro ciclo *for* interior é responsável por atualizar a variável que guarda o tempo máximo de finalização da operação. Esta variável é utilizada para definir o tempo de início de uma operação quando a máquina está livre.

No excerto de código da figura 4, apresentado abaixo, está presente o código da abordagem descrita anteriormente.



Código 4 - Implementação sequencial

Por fim, de modo a apresentar os resultados foi realizado um mero ciclo *for* que percorria as estruturas pretendidas e apresentava os seus valores. Além disso, como era requisito a criação de um ficheiro de *output* com os resultados, o segundo argumento após a chamada do *script* é o nome do ficheiro onde queremos guardar o resultado.



Código 5 - Apresentação dos resultados

# Implementação Paralela

De modo a realizar a paralelização do problema foi utilizada a biblioteca *OpenMP* tendo em conta que a adaptação de aplicações sequenciais é relativamente fácil utilizando a mesma.

Durante o processo de conversão do problema de sequencial para paralelo tivemos alguns problemas, nomeadamente, de condição de corrida. Para combater os mesmos, utilizamoso *pragma critical* e o *pragma barrier*, mas nem assim foi possível resolver a condição de corrida.



Código 6 - Implementação paralela inicial

De modo a dar a volta a este problema foi decidido que, por defeito, cada *thread* será responsável por um *job*. Caso o utilizador defina um número de *threads* em específico, esse mesmo número será utilizado. Para tal, deve simplesmente introduzir o número de *threads* no terceiro argumento aquando da invocação da *script*.



Código 7 - Definição do número de threads

Relativamente à *thread* responsável por *job*, foi definida uma secção paralela em que o compilador tem conhecimento que o bloco de código subsequente deve ser executado em paralelo com as várias *threads*. Para definição desta secção foi tirado proveito do *pragma omp parallel* com especificação do número de *threads* a utilizar.

Tendo então, a secção paralela criada, procedemos com a utilização da função *omp\_get\_thread\_num()*, que retorna o identificador da *thread* atual. Posto isto, foi criada uma variável que guarda este identificador que vai atuar como o número do *job.*

De seguida, mantivemos apenas o ciclo *for* que percorre todas as máquinas existentes e o que percorre os *jobs* foi substituído pelo código da figura 8, devido ao problema exposto anteriormente.



Código 8 - Alteração do ciclo for exterior por omp parallel

Findada a execução do ciclo *for* que percorre as máquinas, é então invocada uma barreira, utilizando o *pragma omp barrier*, de modo a sincronizar as *threads*. De seguida, é realizado o *reset* ao estado das máquinas e é calculado o tempo máximo de finalização das operações. Tendo em conta que foi removido um ciclo *for* que percorria os *jobs*, este processo também sofreu uma alteração mínima. Em vez de ter dois ciclos *for*, passou a ter apenas um e recebe o valor da *thread* atual no seu lugar.



Código 9 - Cálculo do tempo máximo de finalização da operaçao - paralelo

## Variáveis globais partilhadas

Ao longo do código implementado na componente paralela, podemos identificar um conjunto de variáveis globais partilhadas, sendo elas:

* ***Machines*** – Representa uma estrutura que armazena as informações sobre as máquinas como o id, estado (ocupada ou livre) e o tempo que demorou a realizar a operação.
* ***InitialTime*** - Representa uma matriz bidimensional que armazena os tempos iniciais das operações para cada job e máquina.
* ***EndTime*** - Representa numa matriz bidimensional os tempos de finalização das operações para cada job e máquina
* ***MaxEndTime*** - Uma variável inteira que armazena o tempo máximo de término entre todas as operações.

## Variáveis locais de cada thread

Ao longo do código implementado na componente paralela, podemos identificar uma variável local de cada thread, sendo ela:

* ***jobThread***– Representa uma variável local que armazena o índice da linha (job) atribuída a thread.

## Secções críticas

A secção crítica presente no código desenvolvido acontece quando uma *thread* verifica se a máquina está ocupada e realiza a atualização dos tempos iniciais e de finalização.

Esta verificação e atualização terá de ser feita com precaução para evitar condições de corrida. Para tal, foi utilizado o código *#pragma omp critical* de modo a criar uma secção crítica no bloco de código que realiza operações de leitura e escrita. As variáveis envolvidas nessa seção são:

* ***machines[jobs[row].operations[m].machineId].isWorking:*** a variável *isWorking* da estrutura *Machine* indica se uma máquina está ocupada ou livre.
* ***machines[jobs[row].operations[m].machineId].endTime:*** a variável *endTime* da estrutura *Machine* que armazena o tempo que levou a realizar a última operação na máquina.



Código 10 - Secção crítica

## Técnicas de exclusão mútua

A técnica de exclusão mútua utilizada para impedir que múltiplas *threads* executem secções críticas em simultâneo esta salvaguarda através do código *#pragma omp critical*. Este garante que apenas uma *thread* de cada vez pode realizar operações de leitura ou escrita nas variáveis. Isto evita condições de corrida e garante que os tempos finais e iniciais sejam atualizados corretamente.

# Análise de desempenho

No âmbito da análise de desempenho do algoritmo desenvolvido foram realizados um conjunto de testes tanto para a versão sequencial e para a versão paralela. Cada teste foi realizado sete vezes e o valor final apresentado para o teste é a média de duração de cada um dos mesmos.

Na tabela 1, apresentada abaixo, é possível verificar os tempos de cada iteração, juntamente com a duração média de cada teste. Para efeitos de compreensão, P1 representa uma execução da implementação paralela com 1 *thread*.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Threads\**  **Tempo(s)** | **Iteração 1** | **Iteração 2** | **Iteração 3** | **Iteração 4** | **Iteração 5** | **Iteração 6** | **Iteração 7** | **Média** |
| **Sequencial** | 0.0140 | 0.0120 | 0.0170 | 0.0170 | 0.0160 | 0.0090 | 0.0170 | 0.0160 |
| **P1** | 0.0070 | 0.0030 | 0.0020 | 0.0110 | 0.0150 | 0.0030 | 0.0020 | 0.0030 |
| **P2** | 0.0050 | 0.0100 | 0.0080 | 0.0100 | 0.0070 | 0.0080 | 0.0060 | 0.0080 |
| **P3** | 0.0150 | 0.0060 | 0.0150 | 0.0140 | 0.0110 | 0.0040 | 0.0170 | 0.0140 |
| **P4** | 0.0090 | 0.0020 | 0.0030 | 0.0080 | 0.0070 | 0.0030 | 0.0060 | 0.0060 |
| **P5** | 0.0170 | 0.0140 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0040 | 0.0100 |
| **P6** | 0.0030 | 0.0120 | 0.0040 | 0.0150 | 0.0150 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0040 |

Tabela 1 - Testes realizados ao algoritmo

Como é possível, verificar pela tabela 1 as execuções existem algumas médias que levantam algumas suspeitas como é o caso de, por exemplo, o primeiro teste (P1). Isto acontece pelo simples facto de termos definido que cada *thread* seria responsável pelo escalonamento de um *job* e, sendo que temos apenas uma *thread* o algoritmo trata, apenas, do escalonamento de um *job*.

Figura 1 - Análise de desempenho das execuções

## Cálculo do *speedup*

O objetivo principal da programação paralela é reduzir o tempo de computação obtendo o mesmo resultado comparativamente a uma execução sequencial.

A métrica utilizada para calcular o desempenho de um programa paralelo relativamente a um programa sequencial é o *SpeedUp* (S). O *speedup* divide o T1, que é o tempo de uma execução paralela com TP, que é o tempo de execução paralela onde P é o número de *threads*.

Na Tabela 3 temos o cálculo do *speedup* tendo por base os valores de tempo de execução para cada uma das *threads*, apresentados na tabela 1.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Threads** | **Tempo(s)** | **Speedup** |
|  |
| **Sequencial** | 0,016 | 1 |  |
| **P1** | 0,003 | 5,3 |  |
| **P2** | 0,008 | 2 |  |
| **P3** | 0,014 | 1,1 |  |
| **P4** | 0,006 | 2,7 |  |
| **P5** | 0,01 | 1,6 |  |
| **P6** | 0,004 | 4 |  |

Tabela 2 –Cálculo do speedup

Com base nos valores da Tabela 2:

* **Sequencial:** Nesse caso, não há paralelismo, pois a execução é feita de forma sequencial. Portanto, o Speedup é igual a 1, já que estamos a comparar o tempo sequencial com o próprio.
* **P1:** Com uma única thread (P1), o tempo de execução diminui para 0,003 segundos, tendo como resultado um Speedup de 5,3 em relação ao tempo sequencial. Isso ocorre porque o processamento paralelo pode dividir o trabalho em várias tarefas, reduzindo o tempo de execução.
* **P2:** Com duas threads (P2), o tempo de execução aumenta para 0,008 segundos, tendo como resultado um Speedup de 2 em relação ao tempo sequencial. Nesse caso, a adição de uma segunda thread pode ter causado algum overhead, como a necessidade de sincronização entre as threads ou a divisão menos eficiente do trabalho.
* **P3:** Com três threads (P3), o tempo de execução aumenta ainda mais para 0,014 segundos, tendo como resultado um Speedup de apenas 1,1 em relação ao tempo sequencial. Aqui, o aumento no tempo de execução pode ser explicado pela sobrecarga adicional causada pela coordenação e sincronização de três threads, o que pode ter reduzido a eficiência do paralelismo.
* **P4:** Com quatro threads (P4), o tempo de execução diminui novamente para 0,006 segundos tendo como resultado um Speedup de 2,7 em relação ao tempo sequencial. A adição de mais uma thread pode ter permitido uma divisão mais eficiente do trabalho levando a um melhor desempenho.
* **P5:** Com cinco threads (P5), o tempo de execução aumenta um pouco para 0,01 segundos, tendo como resultado um Speedup de 1,6 em relação ao tempo sequencial. A adição de uma quinta thread pode ter causado uma sobrecarga adicional e talvez não tenha sido tão eficiente quanto a adição da quarta thread.
* **P6:** Com seis threads (P6), o tempo de execução diminui para 0,004 segundos, tendo como resultado um Speedup de 4 em relação ao tempo sequencial. A adição da sexta thread parece ter levado a um melhor desempenho, e permitiu uma divisão mais eficiente do trabalho.

Figura 2 - Análise de desempenho do SpeedUp

# Apresentação de resultados

Como mencionámos nos capítulos [implementação paralela](#_Implementação_Paralela) e [análise de desempenho](#_Análise_de_desempenho), tivemos problemas com a secção crítica. A solução realizada de modo a implementar a secção crítica não funcionou como esperado e, para além disso, criou-nos uma restrição no programa, a da necessidade de ter uma *thread* por *job*.

Posto isto, não conseguimos obter o mesmo resultado em ambas as implementações. Na figura 2 é possível verificar os resultados de ambas as implementações para o ficheiro com 6 *jobs* e 6 máquinas.

Uma imagem com texto, captura de ecrã, Tipo de letra, livro

Descrição gerada automaticamente

Figura 3 - Resultado das implementações

# Conclusão

A realização deste trabalho foi bastante custosa, mas, sem dúvida nenhuma, necessária, porque era desenvolvimento em C e, particularmente, desenvolvimento de algoritmia era algo que nenhum dos elementos do grupo realizava há algum tempo.

Posto isto, tivemos alguns problemas na implementação desta solução sendo o principal a não obtenção do mesmo resultado nas implementações sequencial e paralela devido a uma condição de corrida que não conseguimos resolver.

Apesar de tudo, consideramos que durante a realização deste trabalho prático conseguimos consolidar parte dos conhecimentos assimilados durante as aulas e conseguimos apresentar uma solução para o problema.