Programação Paralela - ELC139

Mandelbrot Set

Rhauani Fazul

2018/1

Sumário

- Mandelbrot Set;
- Análise do problema:
- Solução proposta;
- Análise de desempenho:
  - Speedup;
  - Eficiência;
- Referências.

Mandelbrot Set

- É obtido a partir do conjunto de valores de ***c*** para quais a sucessão de pontos gerados pela equação $Z_{n+1} = Z_n^2 + c$ não tende para o infinito do plano complexo;
- Gera uma imagem *fractal** infinitamente complexa em que, ao aproximá-la (em qualquer intensidade) será possível observar estruturas tão complexas quanto a imagem como um todo.

* Objeto que contém dentro de si próprio cópias menores dele mesmo e essas cópias, por sua vez, contém cópias ainda menores (e assim sucessivamente).

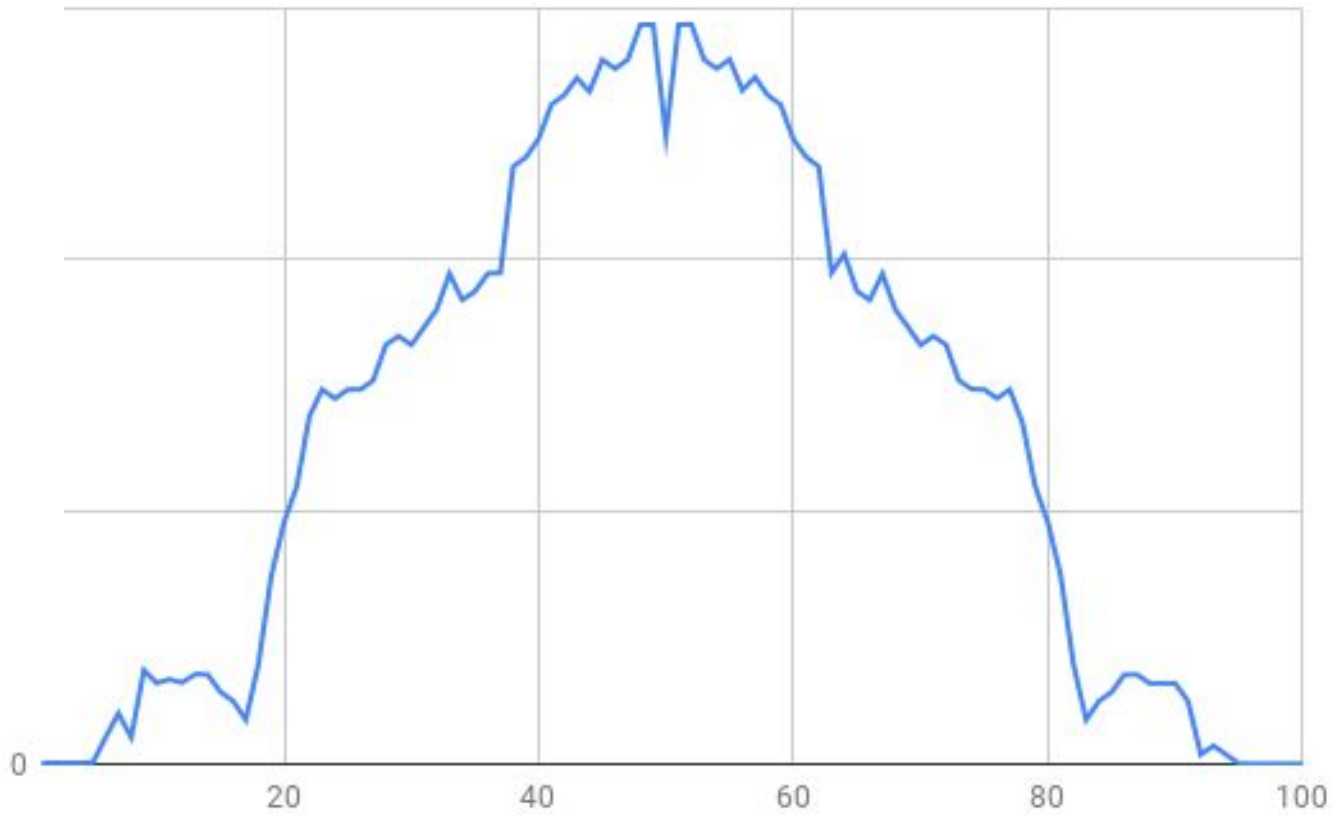
Análise do problema

- Estudo da lógica e estrutura do código base;
- Escolha de uma ferramenta de programação paralela:
  - **OpenMP**;
    - Como chegar ao melhor *speedup*?

- Escolha do ponto de paralelização:
  - **Laço mais externo** (linhas da matriz) tende a apresentar melhores resultados quando paralelizado.
- Divisão de trabalho:
  - As iterações do laço possuem uma carga de trabalho homogênea? **Não!**

Análise do problema

- Ao medir o tempo gasto em cada iteração do laço, percebeu-se uma tendência do tipo:



- Iterações centrais tendem a serem mais trabalhosas que as iterações iniciais e finais.

Análise do problema

- Com isso, é esperado que a divisão de trabalho convencional do OpenMP* não seja a melhor escolha para este problema;
- Uma distribuição “esparsa” das iterações entre as *threads* pode vir a ser mais satisfatória;
- Realizou-se o *profiling* do programa, comparando:
  - **#pragma omp parallel for schedule(static)**
  - **#pragma omp parallel for schedule(static, 1)**

    - equivalendo a:

```
#pragma omp parallel
for (int i = tid; i < N; i += tid)
```

* estática e com *chunk size* = (total iterações / *nthreads)*

Análise do problema

- **#pragma omp parallel for schedule(static)**

Profile Part	Called
PID 10442, section 1, thread 1	5 856 184
PID 10442, section 1, thread 2	30 980 024
PID 10442, section 1, thread 3	31 898 928
PID 10442, section 1, thread 4	6 658 862

- **#pragma omp parallel for schedule(static, 1)**

Profile Part	Called
PID 10374, section 1, thread 1	18 716 652
PID 10374, section 1, thread 2	18 830 204
PID 10374, section 1, thread 3	19 016 552
PID 10374, section 1, thread 4	18 830 590

Mais “justo”!

Solução proposta

```
1   #pragma omp parallel for schedule(static, 1)
2   for (int r = 0; r < max_row; r++) {
3       for (int c = 0; c < max_column; c++) {
4           complex<float> z;
5           int n = 0;
6           while ( (abs(z) < 2) && (++n < max_n) )
7               z = pow(z, 2) + decltype(z) (
8                                   (float) c * 2 / max_column - 1.5,
9                                   (float) r * 2 / max_row - 1
10                              );
11          mat[r][c] = (n == max_n) ? '#' : '.';
12      }
13  }
```

Solução proposta

- Código disponível em: https://goo.gl/itFjhf
- Compilação:
  - Makefile:

```
$ make
```

  - Diretamente:

```
$ g++ -O3 -std=c++11 -fopenmp -o mandelbrot mandelbrot.cpp -Wall
```

- Execução:

```
$ ./mandelbrot <linhas> <colunas> <iterações>
```

Análise de desempenho

- Medição de tempo
  - Header: **<chrono>**
  - Clock: **high_resolution_clock**

```
typedef std::chrono::high_resolution_clock Clock;

auto t_start = Clock::now();
/* cálcula mandelbrot set */
auto t_end = Clock::now();

duration_cast<nanoseconds>(t_end - t_start).count();
                /*  <microseconds>
                    <milliseconds>
                            ....          */
```

Análise de desempenho

- Bateria de testes (30 execuções para cada configuração):

#	LINHAS	COLUNAS	ITERAÇÕES
A1	100	100	100
A2	100	100	1000
A3	100	100	10000
A4	100	100	100000

#	LINHAS	COLUNAS	ITERAÇÕES
B1	200	200	200
B2	200	200	2000
B3	200	200	20000
B4	200	200	200000

Análise de desempenho

- Médias dos tempos obtidos com a versão sequencial:

#	TEMPO (seg)
A1 { 100, 100, 100 }	0.0337
A2 { 100, 100, 1000 }	0.2748
A3 { 100, 100, 10000 }	2.6755
A4 { 100, 100, 100000 }	26.7032

#	TEMPO (seg)
B1 { 200, 200, 200 }	0.2359
B2 { 200, 200, 2000 }	2.169
B3 { 200, 200, 20000 }	21.439
B4 { 200, 200, 200000 }	213.3276

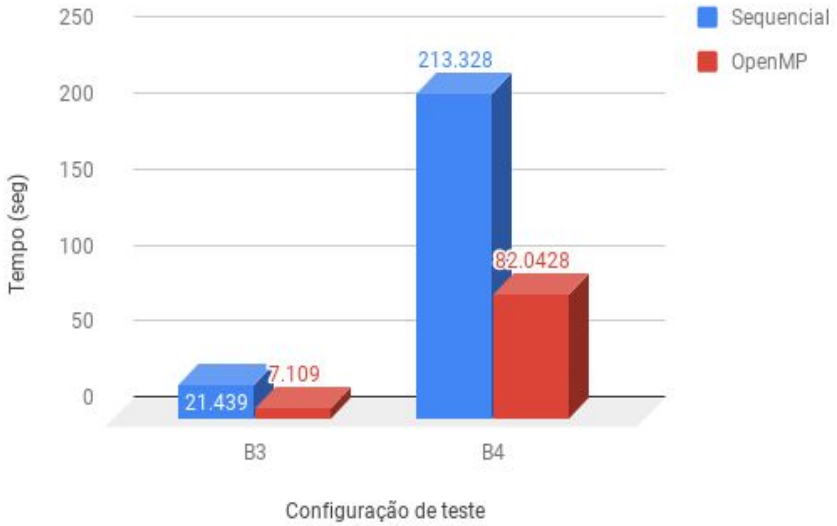
Análise de desempenho

- Médias dos tempos obtidos com a versão paralelizada com OpenMP (4 *threads*):

#	TEMPO (seg)
A1 { 100, 100, 100 }	0.0099
A2 { 100, 100, 1000 }	0.086
A3 { 100, 100, 10000 }	0.8146
A4 { 100, 100, 100000 }	9.3019

#	TEMPO (seg)
B1 { 200, 200, 200 }	0.0711
B2 { 200, 200, 2000 }	0.6608
B3 { 200, 200, 20000 }	7.109
B4 { 200, 200, 200000 }	82.0428

Análise de desempenho



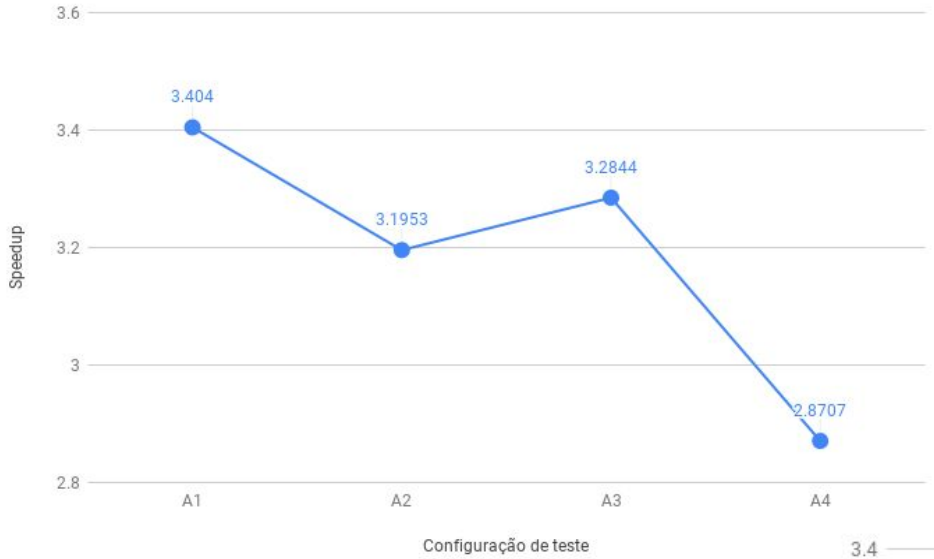
Speedup

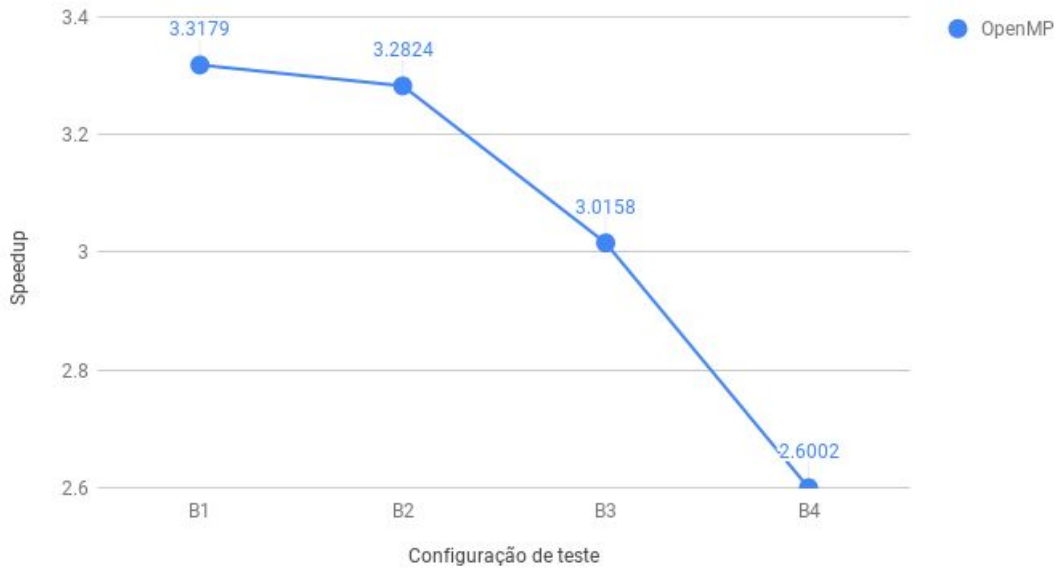
$$S(p) = \frac{t_s}{t_p}$$

#	TEMPO (seg)
A1 { 100, 100, 100 }	3.404
A2 { 100, 100, 1000 }	3.1953
A3 { 100, 100, 10000 }	3.2844
A4 { 100, 100, 100000 }	2.8707

#	TEMPO (seg)
B1 { 200, 200, 200 }	3.3179
B2 { 200, 200, 2000 }	3.2824
B3 { 200, 200, 20000 }	3.0158
B4 { 200, 200, 200000 }	2.6002

Speedup


OpenMP
3.6
3.4
3.2
3
2.8
Speedup
3.404
3.1953
3.2844
2.8707
A1
A2
A3
A4
Configuração de teste


OpenMP
3.4
3.2
3
2.8
2.6
Speedup
3.3179
3.2824
3.0158
2.6002
B1
B2
B3
B4
Configuração de teste

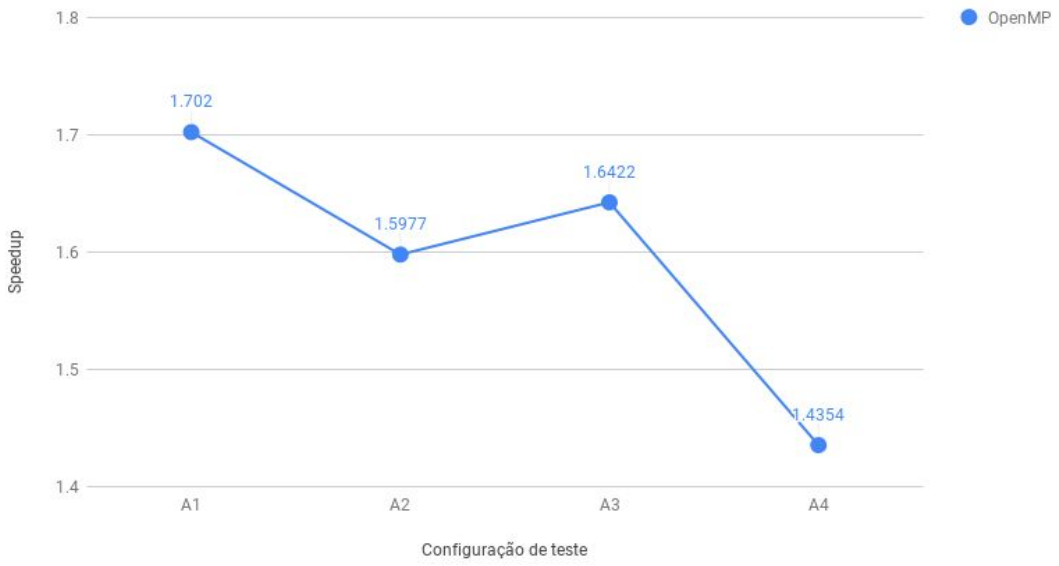
Eficiência

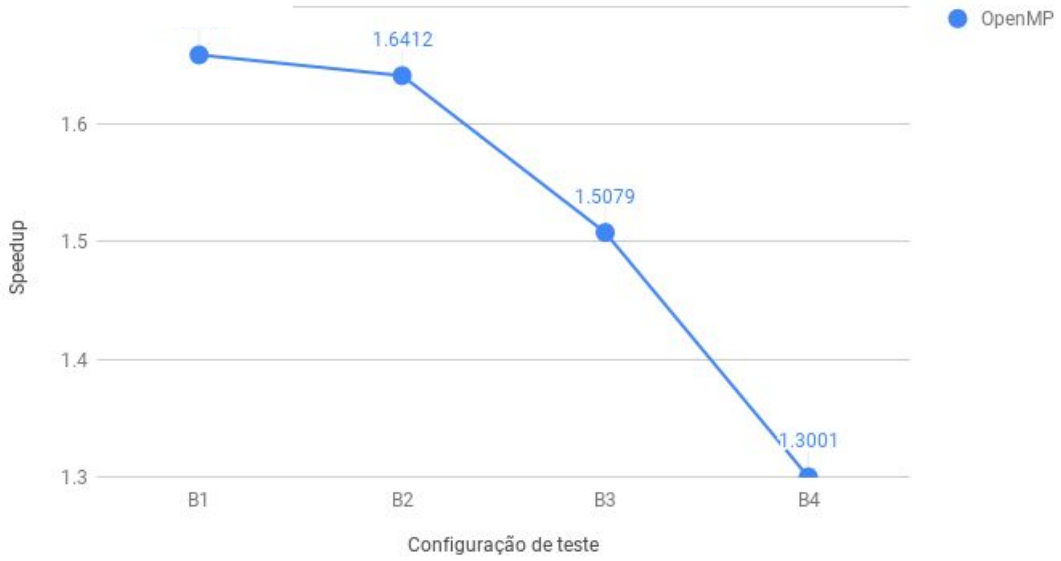
$$E = \frac{S(p)}{p}$$

#	TEMPO (seg)
A1 { 100, 100, 100 }	1.702
A2 { 100, 100, 1000 }	1.5977
A3 { 100, 100, 10000 }	1.6422
A4 { 100, 100, 100000 }	1.4354

#	TEMPO (seg)
B1 { 200, 200, 200 }	1.6589
B2 { 200, 200, 2000 }	1.6412
B3 { 200, 200, 20000 }	1.5079
B4 { 200, 200, 200000 }	1.3001

Eficiência

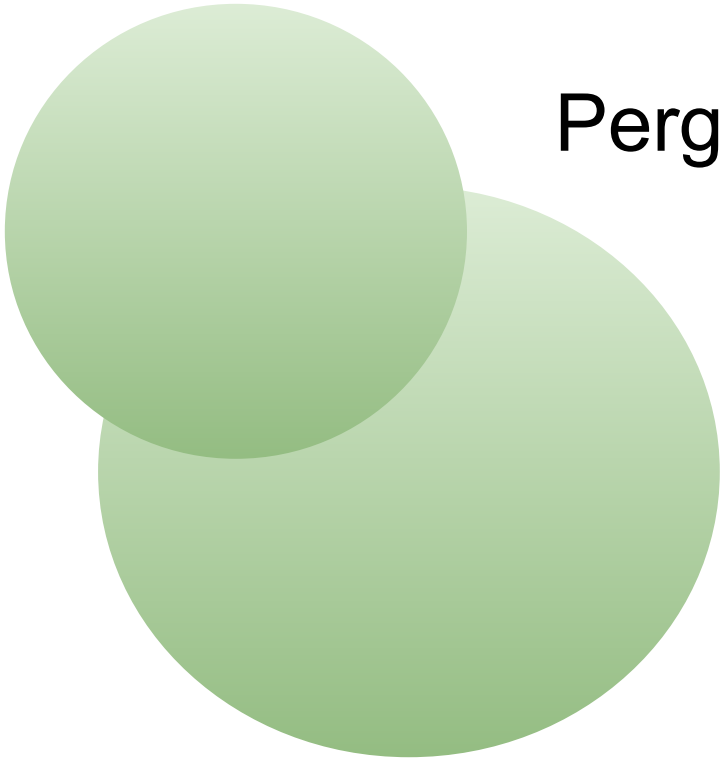

OpenMP
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
Speedup
1.702
1.5977
1.6422
1.4354
A1
A2
A3
A4
Configuração de teste


OpenMP
1.6
1.5
1.4
1.3
Speedup
1.6412
1.5079
1.3001
B1
B2
B3
B4
Configuração de teste

Referências

- Andrew Williams. **Computing the Mandelbrot set**. https://goo.gl/apnk2A
- Lawrence Livermore National Laboratory. ***OpenMP***. https://goo.gl/o2wTxR
- Mark Bull. ***OpenMP Tips, Tricks and Gotchas***. https://goo.gl/L9Xhyp
- Math - The University of Utah**. The Mandelbrot Set**. https://goo.gl/XQeJ4Y
- OpenMP. ***OpenMP C and C++ Application Program Interface***. https://goo.gl/wPbQCn
- OpenMP. ***Summary of OpenMP 3.0 C/C++ Syntax***. https://goo.gl/VdvSpi
- SBAC-PAD/WSCAD. **Problems Set**. https://goo.gl/Ef51T7
- SBAC-PAD/WSCAD. **12th Marathon of Parallel Programming**. https://goo.gl/eZX5gR
- Wikipedia. **Mandelbrot set**. https://goo.gl/u7CjRR

Obrigado!



Perguntas?