

# Relatorio\_Mandelbrot\_EP2

July 12, 2020

## 1 EP2 - Conjunto de Mandelbrot e paralelização com CUDA e OMPI

Nome	NUSP
Giulia C. de Nardi	10692203
Vitor D. Tamae	10705620
Lucy Anne de Omena Evangelista	11221776
Leonardo Costa Santos	10783142
Alexandre Muller Jones	8038149

Caso não queira rodar novamente os experimentos, **por favor pular para a sessão "Lendo dados"**.

### 1.1 Configuração do ambiente

Atualizando os pacotes Julia

```
[1]: ] up
```

```
Updating registry at `~/.julia/registries/General`
Updating git-repo
`https://github.com/JuliaRegistries/General.git`
[1mFetching: [=====>]
100.0 %.0 %          ] 71.5 %Fetching:
[=====>          ] 79.0 %Fetching:
[=====> ] 95.1 % Resolving
package versions...
Updating `~/.julia/environments/v1.3/Project.toml`
[no changes]
Updating `~/.julia/environments/v1.3/Manifest.toml`
[no changes]
```

Verificando o status dos pacotes, e se há algum problema, com o comando:

```
[2]: ] st
```

```

    Status `~/julia/environments/v1.3/Project.toml`
  [336ed68f] CSV v0.7.3
  [a93c6f00] DataFrames v0.21.4
  [31c24e10] Distributions v0.23.4
  [7073ff75] IJulia v1.21.2
  [b964fa9f] LaTeXStrings v1.1.0
  [8314cec4] PGFPlotsX v1.2.8
  [1a8c2f83] Query v0.12.2
  [f3b207a7] StatsPlots v0.14.6
  [10745b16] Statistics

```

Chamando pacotes que usaremos:

```
[3]: using DataFrames, Query, StatsPlots, Statistics
```

## 1.2 Verificando compilação pelo notebook

```
[4]: ; make mandelbrot_cuda
```

make: 'mandelbrot\_cuda' is up to date.

```
[5]: ; ./mandelbrot_cuda
```

```

usage: ./mandelbrot_seq c_x_min c_x_max c_y_min c_y_max image_size
examples with image_size = 11500:
  Full Picture:      ./mandelbrot_seq -2.5 1.5 -2.0 2.0 11500
  Seahorse Valley:  ./mandelbrot_seq -0.8 -0.7 0.05 0.15 11500
  Elephant Valley:  ./mandelbrot_seq 0.175 0.375 -0.1 0.1 11500
  Triple Spiral Valley: ./mandelbrot_seq

```

```
[6]: ; ./mandelbrot_cuda 0.175 0.375 -0.1 0.1 200 2 2
```

0.138799,0.912681

## 1.3 Funções para realização dos experimentos

A função abaixo recebe parâmetros:

- **mandel**, com o nome da função a ser executada (`./mandelbrot_seq`, `./mandelbrot_opm`, `./mandelbrot_pth`, `./mandelbrot_ompi` ou `./mandelbrot_cuda`);
- **thread**, com o número de threads do programa paralelo, caso a implementação seja em pthreads ou OpenMP;
- **process**, com a quantidade de processos para a implementação em OMPI;
- **grid** e **bloco**, com a dimensão do grid e quantidade de blocos para a implementação em CUDA.

A função executa o programa **mandelbrot** com os parâmetros dados e devolve um **DataFrame** com os resultados.

```

[22]: function measure_mandelbrot(mandel; thread = 0, process = 0, grid = 0, bloco = 0)

    # para este EP só serao feitas comparacoes usando a regioao triple spiral
    mode = `-0.188 -0.012 0.554 0.754` #triple spiral
    size = 4096

    if thread != 0      # PThreads e OpenMP
        if process != 0
            results = parse.(Float64,
                split(chomp(read(`mpirun --hostfile hostfile -np $process ./
→$mandel $mode $size $thread ` , String)), ","))
        else
            results = parse.(Float64,
                split(chomp(read(`./$mandel $mode $size $thread ` , String)),
→",","))
        end

    else

        if process != 0 # OMPI
            results = parse.(Float64,
                split(chomp(read(`mpirun -n $process ./$mandel $mode
→$size ` , String)), ","))
        else

            if grid != 0 # CUDA
                println(grid,bloco)
                results = parse.(Float64,
                    split(chomp(read(`./$mandel $mode $size $grid $bloco ` ,
→String)), ","))

            else # Sequential
                results = parse.(Float64,
                    split(chomp(read(`./$mandel $mode $size` , String)), ","))
            end
        end
    end

    return DataFrame(
        threads = thread,
        processes = process,
        griddim = grid,
        blocos = bloco,
        duration = results[1],
        io_allocation = results[2])
end

```

[22]: `measure_mandelbrot` (generic function with 1 method)

A função `run_experiments` recebe os mesmos parâmetros `mandel`, `threads`, `process`, `grid` e `bloco` e um parâmetro adicional `repetitions`, com o número de repetições de cada experimento. A função devolve um `DataFrame` com todos os experimentos.

```
[8]: function run_experiments(mandel, repetitions; threads = [], process = [], grid_
    => [], bloco = [])
    run(`make $mandel`)

    results = DataFrame(
        threads = Int[],
        processes = Int[],
        griddim = Int[],
        blocos = Int[],
        duration = Float64[],
        io_allocation = Float64[])

    if threads != [] # Implementação em OpenMP ou PThreads
        if process == []
            for t in threads
                for r in 1:repetitions
                    append!(results,
                        measure_mandelbrot(mandel, thread = t))
                end
            end
        else
            for p in process
                println("process", p)
                for t in threads
                    println("threads", t)
                    for r in 1: repetitions
                        println("rep", r)
                        append!(results,
                            measure_mandelbrot(mandel, thread = t, process = p))
                    end
                end
            end
        end
    end

    if process != [] # Implementação em OMPI

        for p in process
            println("process",p)
            for r in 1:repetitions
                println("rep",r)
            end
        end
    end
end
```

```

        append!(results,
            measure_mandelbrot(mandel, process = p))
    end
end
else
    if grid != [] # Implementação em CUDA
        println("Started")
        for g in grid
            println("grid: ",g)
            for b in bloco
                println("bloco: ",b)
                for r in 1:repetitions
                    println("rep: ",r)
                    append!(results,
                        measure_mandelbrot(mandel, grid = g, bloco =
→b))
                end
            end
        end
    end

    else
        # Implementação sequencial
        for r in 1:repetitions
            for s in size
                append!(results,
                    measure_mandelbrot(mandel))
            end
        end
    end
end
end
end

return results
end

```

[8]: run\_experiments (generic function with 1 method)

A função `parse_results` recebe um `DataFrame` de resultados, produzido pela função `run_experiments`. A função devolve um `DataFrame` com a média e o intervalo de confiança da média a 95% dos tempos de execução, agrupados por número de threads, processos, dimensão do grid e quantidade de blocos.

```

[9]: function parse_results(results)
    parsed_results = results |>
        @groupby({_.threads, _.processes,_.griddim,_.blocos}) |>
        @map({threads = key(_).threads,
            processes = key(_).processes,

```

```

        griddim = key(_).griddim,
        blocos = key(_).blocos,
        mean_duration = mean(_duration),
        mean_io_allocation = mean(_io_allocation),
        ci_duration = 1.96 * std(_duration),
        ci_io_allocation = 1.96 * std(_io_allocation))} |>
      DataFrame

    return parsed_results
end

```

[9]: parse\_results (generic function with 1 method)

## 1.4 Funções para traçar gráficos

A função abaixo permite que sejam traçadas até 5 séries de dados em um mesmo gráfico do tipo scatter.

```

[98]: pgfplotsx()

function plot_results(x, y, series_label, yerror; x2 = x, y2 = [],
  ↳series_label2 = [], yerror2 = [],
    title = "", xaxis = "Threads", min_thread_power = 0, max_thread_power =
  ↳5, recursive = 0)

  if recursive == 1
    values = [2 ^ x for x in min_thread_power:max_thread_power];
    p = scatter(xaxis = :log2, xlabel = xaxis,
      xticks = [2 ^ x for x in min_thread_power:max_thread_power], title =
  ↳title)

    for v in values

      p = scatter!(filter(row -> row[:blocos] == v, x).griddim,
        filter(row -> row[:blocos] == v, x).mean_duration,
        yerror = filter(row -> row[:blocos] == v, x).ci_duration,
        xaxis = :log2, xlabel = xaxis,
        xticks = [2 ^ x for x in min_thread_power:max_thread_power],
        alpha = 0.6, labels = "$v x $v threads por bloco", legend = :best)

    end

  else

    p = scatter(x, y, xaxis = :log2, xlabel = xaxis, xticks = [2 ^ x for x
  ↳in min_thread_power:max_thread_power],

```

```

        yerror = yerror, alpha = 0.6,
        labels = series_label, legend = :best, title = title)

    if y2 != []
        p = scatter!(x2, y2, xaxis = :log2, xticks = [2 ^ x for x in
→min_thread_power:max_thread_power],
            yerror = yerror2, alpha = 0.6,
            labels = series_label2, legend = :best)
    end
end

return p
end

```

[98]: plot\_results (generic function with 1 method)

## 1.5 Condições para os experimentos

O tamanho da imagem em 4096 e a região como sendo a Triple Spiral Valley estão definidas internamente nas funções.

```

[11]: repetitions = 15;

size = [2^12];
grids = [2 ^ x for x in 3:4];      # CUDA
blocos = [2^x for x in 3:4];      # CUDA
thread = [2 ^ x for x in 0:5];    # OpenMP e PThreads
processes = [2 ^ x for x in 1:6]; # OMPI

```

## 2 Sobre as implementações em CUDA e OMPI

### 2.1 CUDA

Na implementação em CUDA, foi utilizado um grid onde são especificados  $n$  e  $m$ , onde o grid terá dimensão de  $n \times n$  blocos e cada bloco terá  $m \times m$  threads. O número de tarefas (cálculo do número de iterações de uma posição) é calculado de acordo com o número de threads disponíveis. Se o número total de threads for maior do que o número de tarefas, cada thread recebe uma tarefa para ser feita e uma parte fica ociosa. Se o número total de threads for menor, cada thread calculará o número de iterações de sua posição e de seus vizinhos, aumentando o número de vizinhos calculados de acordo com a razão número de tarefas por número de threads.

É esperado que caso as dimensões do grid e do bloco sejam pequenas demais, o programa se aproxime da implementação sequencial, pois o programa estará sendo menos paralelizado. Por

outro lado, se as dimensões especificadas forem grandes demais, o número de threads sem tarefas será alto e o gerenciamento delas será um processo desnecessário em execução.

Para definir as escolhas de valores para a dimensão do grid e de blocos, vamos de uma thread e bloco, sendo uma implementação basicamente sequencial, até  $2^5 \times 2^5$  blocos com até  $2^5 \times 2^5$  para observar também o efeito da paralelização excessiva no CUDA, ou seja, com menos de uma tarefa disponível por thread ocorrendo ociosidade.

## 2.2 OMPI

A implementação do OMPI foi feita utilizando alocação dinâmica de tarefas. Diferentemente do CUDA, temos um limite bem menor de processos que podem ser utilizados. Portanto, tem maior cabimento uma implementação parecida com a de pThreads, onde cada processo se responsabiliza por uma linha inteira da matriz `image_buffer`, na intenção de não saturar o processo raiz. Este por sua vez (implementada no rank 0) é responsável por administrar os outros processos e assinalar as tarefas. O processo raiz primeiro irá se certificar de que todos os processos estejam trabalhando assinalando novos trabalhos àqueles que estiverem ociosos e logo após esperará que algum deles envie sua resposta calculada. Nesse momento, o processo raiz registra a resposta recebida no `image_buffer` e sinaliza que tal processo se tornou ocioso. A ação se repete até que todas as respostas sejam registradas no `image_buffer`.

Para a implementação feita não é possível executar o programa com apenas um processo. É interessante notar que o programa executará infinitamente sem terminar a tarefa, pois haverá apenas o processo raiz administrando outros processos, que nesse caso são inexistentes, o que fará com que o programa congele. De fato isso pode ser considerado uma desvantagem, porém, do ponto de vista de implementação, a alocação dinâmica de trabalho gera muitos benefícios para valores maiores (e mais usuais) de processos, pois há a garantia de que não haverão processos ociosos continuamente.

Utilizamos os parâmetros de acordo com o enunciado, porém, devido à particularidade do nosso programa de não poder executar com um único processo, ao invés disso testamos com dois processos.

## 3 Gerando e Salvando dados

### 3.1 Mandelbrot sequencial

Realizando as medições para o mandelbrot sequencial:

```
[ ]: results_seq_triplespiral = run_experiments("mandelbrot_seq", repetitions);  
    seq_triplespiral = parse_results(results_seq_triplespiral);
```

### 3.2 Mandelbrot com pthreads

Realizando as medições para o mandelbrot com PThreads:



```
[ ]: results_pth_triplespiral = run_experiments("mandelbrot_pth", repetitions, \
    ↪ threads=thread);
pth_triplespiral = parse_results(results_pth_triplespiral);
```

### 3.3 Mandelbrot com OpenMP

Realizando as medições para o mandelbrot com OpenMP:

```
[ ]: results_omp_triplespiral = run_experiments("mandelbrot_omp", repetitions, \
    ↪ threads=thread);
omp_triplespiral = parse_results(results_omp_triplespiral);
```

### 3.4 Mandelbrot com OMPI

Realizando as medições para o mandelbrot com OMPI:

```
[ ]: results_omp_triplespiral = run_experiments("mandelbrot_omp", repetitions, \
    ↪ process=processes);
omp_triplespiral = parse_results(results_omp_triplespiral);
```

### 3.5 Mandelbrot com CUDA

Realizando as medições para o mandelbrot com CUDA:

```
[ ]: results_cuda_triplespiral = run_experiments("mandelbrot_cuda", repetitions, \
    ↪ grid = grids, bloco = blocos)
cuda_triplespiral = parse_results(results_cuda_triplespiral)
```

### 3.6 Salvando dados

```
[ ]: using CSV

function save_csv_results(results,filename)
    println(filename)
    CSV.write(filename, results)
end
```

```
[ ]: save_csv_results(results_seq_triplespiral,"data/results_seq_triplespiral.csv");
save_csv_results(seq_triplespiral,"data/seq_triplespiral.csv");
```

```
[ ]: save_csv_results(results_omp_triplespiral,"data/results_omp_triplespiral.csv");
save_csv_results(omp_triplespiral,"data/omp_triplespiral.csv");
```

```
[ ]: save_csv_results(results_pth_triplespiral,"data/results_pth_triplespiral.csv");
save_csv_results(pth_triplespiral,"data/pth_triplespiral.csv");

[ ]: save_csv_results(results_ompi_triplespiral,"data/results_ompi_triplespiral.
→csv");
save_csv_results(ompi_triplespiral,"data/ompi_triplespiral.csv");

[ ]: save_csv_results(results_cuda_triplespiral,"data/results_cuda_triplespiral.
→csv");
save_csv_results(cuda_triplespiral,"data/cuda_triplespiral.csv");
```

## 4 Lendo dados

```
[12]: using CSV

function read_csv_results(filename)
    results=CSV.read(filename)
    return results
end
```

[12]: read\_csv\_results (generic function with 1 method)

Os gráficos iniciados por "results" são aqueles que não possuem suas informações agregadas (como média e intervalo de confiança). Carregando os dataframes gerados, para testes futuros:

```
[30]: seq_triplespiral=read_csv_results("data/seq_triplespiral.csv");
omp_triplespiral=read_csv_results("data/omp_triplespiral.csv");
pth_triplespiral=read_csv_results("data/pth_triplespiral.csv");
ompi_triplespiral=read_csv_results("data/ompi_triplespiral.csv");
cuda_triplespiral=read_csv_results("data/cuda_triplespiral.csv");
```

```
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
 @ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
 @ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
 @ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
 @ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
 @ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
```

```
[31]: results_seq_triplespiral=read_csv_results("data/results_seq_triplespiral.csv");
results_omp_triplespiral=read_csv_results("data/results_omp_triplespiral.csv");
results_pth_triplespiral=read_csv_results("data/results_pth_triplespiral.csv");
results_ompi_triplespiral=read_csv_results("data/results_ompi_triplespiral.
↳csv");
results_cuda_triplespiral=read_csv_results("data/results_cuda_triplespiral.
↳csv");
```

```
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
@ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
@ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
@ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
@ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
Warning: `CSV.read(input; kw...)` is deprecated in favor of
`DataFrame!(CSV.File(input; kw...))`
@ CSV /home/lune/.julia/packages/CSV/W9RT2/src/CSV.jl:40
```

## 5 Comparando desempenho

### 5.1 Sequencial

```
[38]: seq_triplespiral
```

```
[38]:
```

	threads	processes	griddim	blocos	mean_duration	mean_io_allocation	ci_duration
	Int64	Int64	Int64	Int64	Float64	Float64	Float64
1	0	0	0	0	22.8507	23.4183	2.84466 ...

Vemos que o tempo do algoritmo sequencial executa em aproximadamente 23 segundos, o que utilizaremos como marca para comparar com os resultados da paralelização.

### 5.2 OpenMP

```
[41]: omp_triplespiral
```

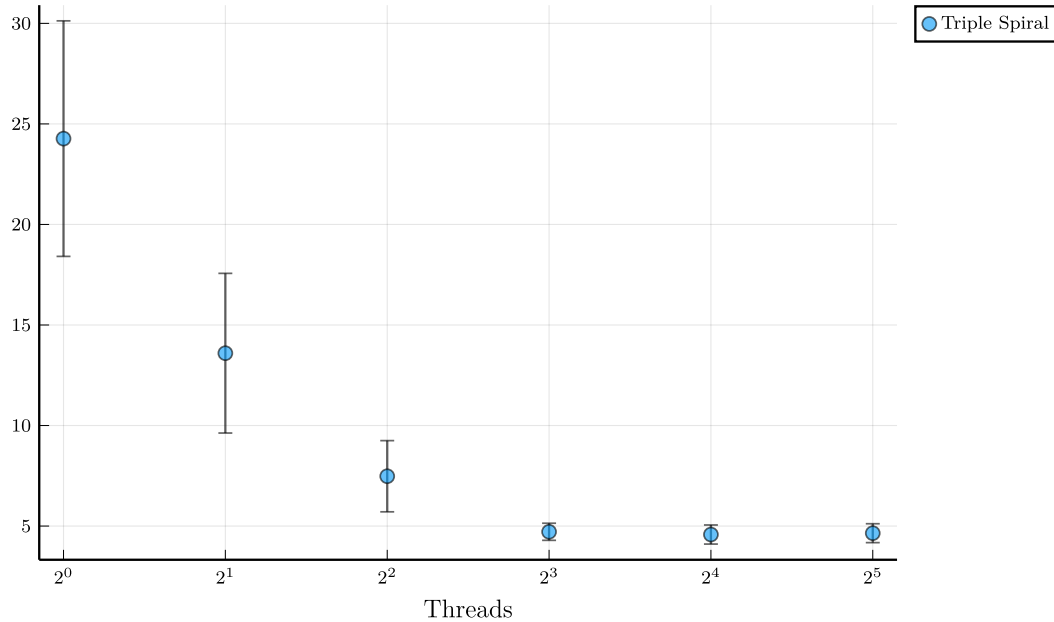
```
[41]:
```

	threads	processes	griddim	blocos	mean_duration	mean_io_alocation	ci_duration	
	Int64	Int64	Int64	Int64	Float64	Float64	Float64	
1	1	0	0	0	24.2683	24.8182	5.85721	...
2	2	0	0	0	13.597	14.2058	3.97046	...
3	4	0	0	0	7.47859	8.01289	1.7702	...
4	8	0	0	0	4.71604	5.28662	0.424891	...
5	16	0	0	0	4.57927	5.16605	0.474447	...
6	32	0	0	0	4.64606	5.22027	0.470139	...

```
[39]: plot_results(omp_triplespiral.threads, omp_triplespiral.mean_duration, "Triple_
↳Spiral",
        omp_triplespiral.ci_duration,
        title = "Desempenho por Threads nas regiões para implementação em OpenMP",
↳max_thread_power = 5)
```

[39]:

Desempenho por Threads nas regiões para implementação em OpenMP



Com a implementação do mandelbrot com o OpenMP. Podemos observar uma melhora considerável no tempo de execução. Também percebemos que o tempo de execução converge para aproximadamente 5 segundos, com 2<sup>3</sup> threads ou mais.

Com isso, podemos afirmar que a melhor quantidade de threads para a implementação com OpenMP é de 8 threads, por utilizar menos recursos computacionais e ainda obtendo o tempo de execução ótimo.

### 5.3 PThreads

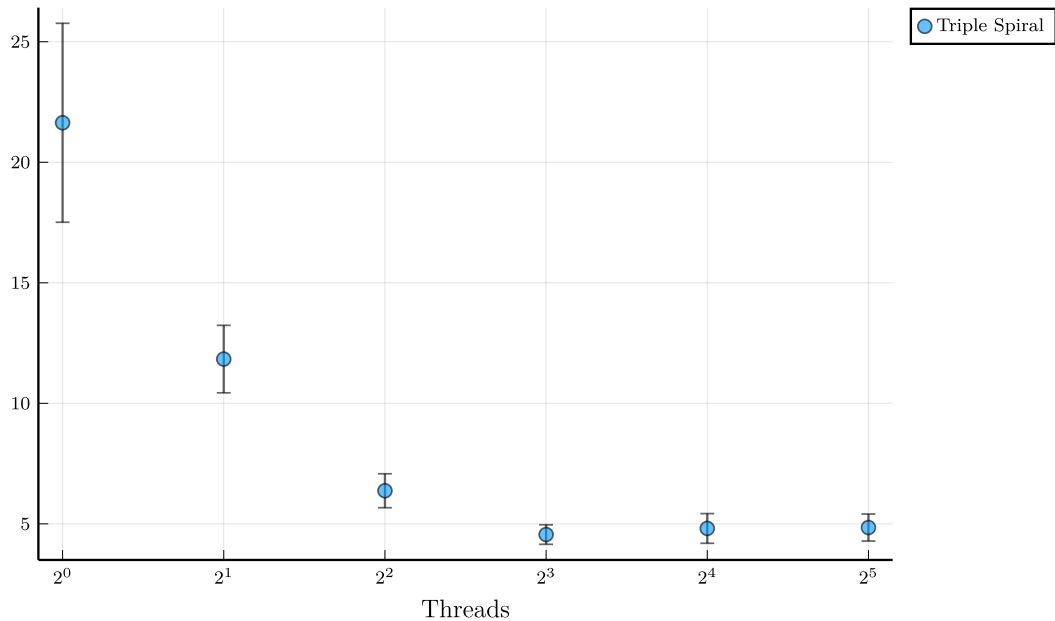
[40]: pth\_triplespiral

[40]:

	threads	processes	griddim	blocos	mean_duration	mean_io_allocation	ci_duration	
	Int64	Int64	Int64	Int64	Float64	Float64	Float64	
1	1	0	0	0	21.6387	22.2595	4.12705	...
2	2	0	0	0	11.835	12.4012	1.39972	...
3	4	0	0	0	6.37354	6.85628	0.70408	...
4	8	0	0	0	4.5561	5.09227	0.40529	...
5	16	0	0	0	4.80984	5.41049	0.615975	...
6	32	0	0	0	4.84709	5.43311	0.561177	...

[35]: plot\_results(pth\_triplespiral.threads, pth\_triplespiral.mean\_duration, "Triple\_↪Spiral",  
 pth\_triplespiral.ci\_duration,  
 title = "Desempenho por Threads nas regiões para implementação em\_↪PThreads", max\_thread\_power = 5)

[35]: Desempenho por Threads nas regiões para implementação em PThreads



Obtemos resultados similares à implementação com OpenMP, também obtendo valor ótimo com o uso de  $2^3$  threads, e com tempo de execução de cerca de 4.5 segundos.

## 5.4 OMPI

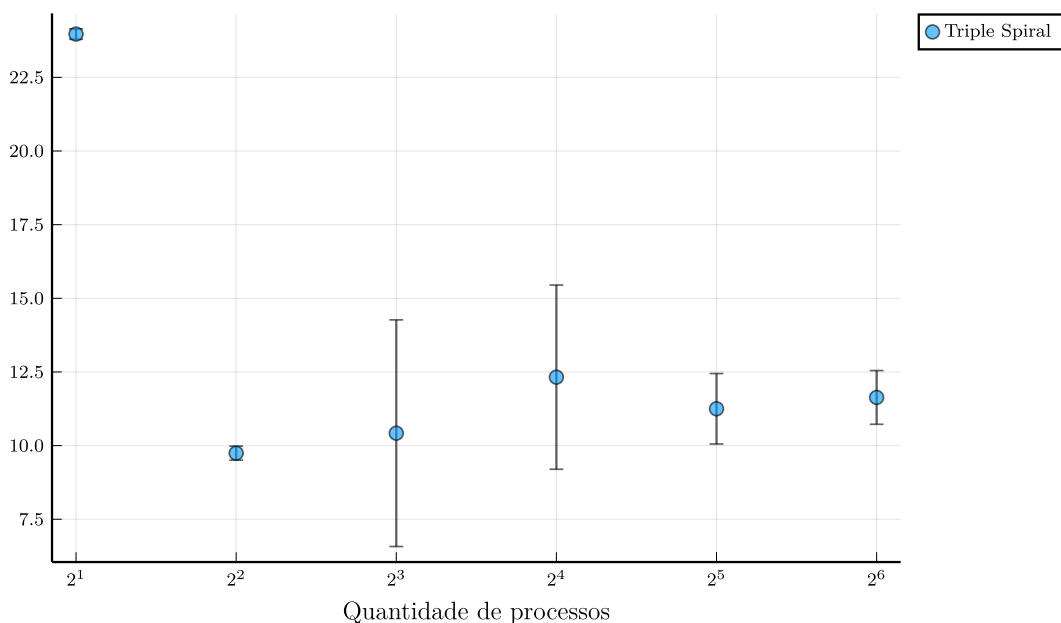
[47]: `ompi_triplespiral`

[47]:

	threads	processes	griddim	blocos	mean_duration	mean_io_allocation	ci_duration	
	Int64	Int64	Int64	Int64	Float64	Float64	Float64	
1	0	2	0	0	23.9692	24.682	0.176358	...
2	0	4	0	0	9.74403	10.4945	0.237506	...
3	0	8	0	0	10.4214	11.7664	3.84695	...
4	0	16	0	0	12.3236	15.3467	3.12606	...
5	0	32	0	0	11.2501	17.122	1.19614	...
6	0	64	0	0	11.6354	23.2792	0.911987	...

[48]: `plot_results(ompi_triplespiral.processes, ompi_triplespiral.mean_duration, ↵  
↵ "Triple Spiral",  
ompi_triplespiral.ci_duration,  
title = "Desempenho por quantidade de Processos para implementação em OMPI",  
xaxis = "Quantidade de processos", max_thread_power = 6)`

[48]: Desempenho por quantidade de Processos para implementação em OMPI



Vemos que o primeiro ponto, com 2 processos, obtém tempo de execução muito acima dos outros. Isso ocorre porque só há um processo realizando a tarefa de cálculos para o mandelbrot, sendo a outra responsável pelo gerenciamento. Justamente por isso, seu tempo de execução é muito próximo do tempo de execução da implementação sequencial. Lembrando que, pelo mesmo motivo, não testamos o algoritmo com um processo pela inexistência de processos trabalhadores nesse caso, de acordo com a

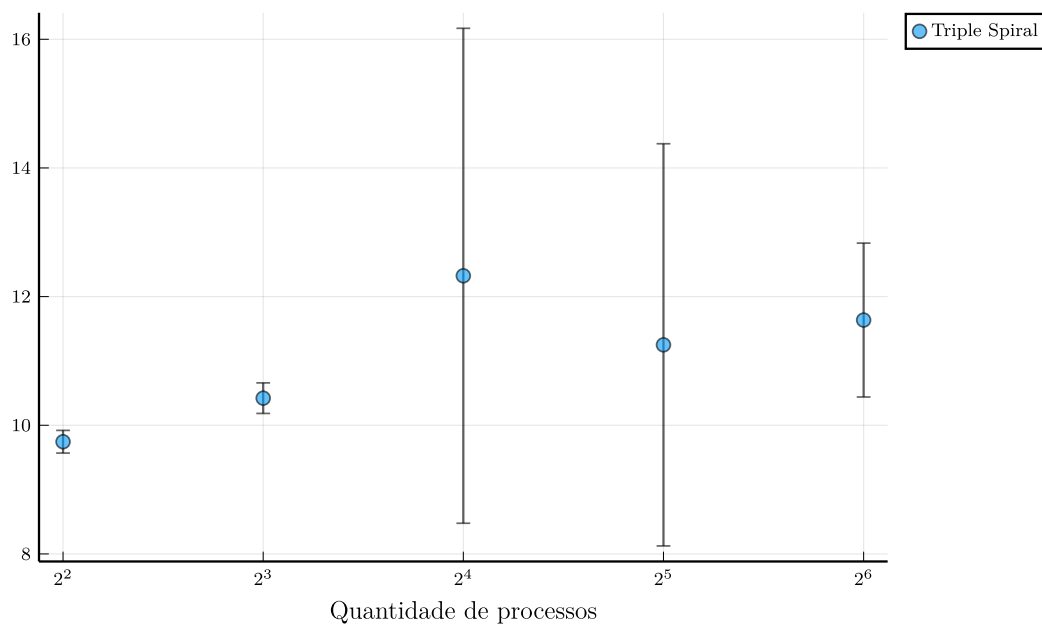
nossa implementação.

Mostrando o desempenho usando o OMPI desconsiderando o primeiro ponto, de dois processos, para comparar melhor os outros:

```
[49]: plot_results(filter(row -> row[:processes] > 2, ompi_triplespiral).processes,
    filter(row -> row[:processes] > 2, ompi_triplespiral).mean_duration,
    ↪ "Triple Spiral",
    ompi_triplespiral.ci_duration, title = "Desempenho por quantidade de
    ↪ Processos para implementação em OMPI",
    xaxis = "Quantidade de processos", max_thread_power = 6)
```

[49]:

Desempenho por quantidade de Processos para implementação em OMPI



Verificamos que obtemos o melhor resultado para o OMPI com 4 processos, por obter uma menor média para o tempo de execução (pouco abaixo de 10 segundos), e um menor intervalo de confiança, considerando uma melhor estabilidade dos resultados. A implementação com 4 processos utiliza menos recursos computacionais e ainda obtendo o tempo de execução ótimo.

Entretanto, o seu tempo de execução ótimo está acima dos valores obtidos com a implementação em PThreads e OpenMP, sendo praticamente o dobro.

## 5.5 CUDA

```
[90]: show(cuda_triplespiral, allrows=true)
```

36x8 DataFrame. Omitted printing of 3 columns

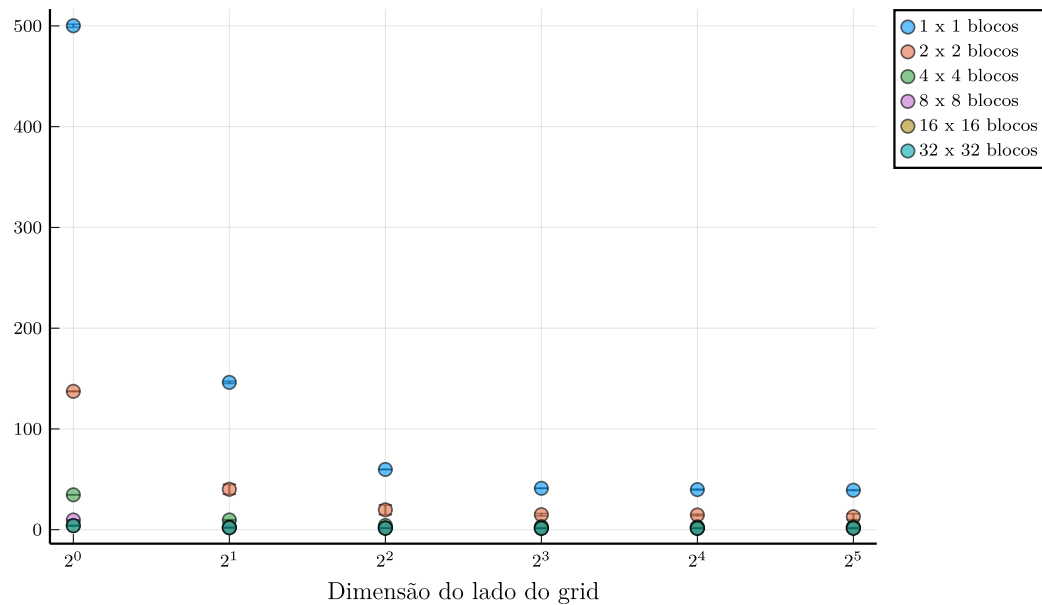
Row	threads	processes	griddim	blocos	mean_duration
	Int64	Int64	Int64		
Int64	Float64				
1	0	0	1	1	500.155
2	0	0	1	2	137.326
3	0	0	1	4	34.6314
4	0	0	1	8	9.6373
5	0	0	1	16	4.01391
6	0	0	1	32	4.00061
7	0	0	2	1	146.228
8	0	0	2	2	40.0978
9	0	0	2	4	9.65971
10	0	0	2	8	2.44255
11	0	0	2	16	2.01074
12	0	0	2	32	2.00005
13	0	0	4	1	59.7982
14	0	0	4	2	19.749
15	0	0	4	4	4.17819
16	0	0	4	8	1.58303
17	0	0	4	16	1.60105
18	0	0	4	32	1.50717
19	0	0	8	1	41.0983
20	0	0	8	2	14.8778
21	0	0	8	4	3.01465
22	0	0	8	8	1.4775
23	0	0	8	16	1.44746
24	0	0	8	32	1.38246
25	0	0	16	1	39.7963
26	0	0	16	2	14.6227
27	0	0	16	4	2.83315
28	0	0	16	8	1.43918
29	0	0	16	16	1.40601
30	0	0	16	32	1.38351
31	0	0	32	1	39.2154
32	0	0	32	2	12.8826
33	0	0	32	4	2.75149
34	0	0	32	8	1.67288
35	0	0	32	16	1.52181
36	0	0	32	32	1.45586

```
[93]: plot_results(cuda_triplespiral, cuda_triplespiral, "blocos", cuda_triplespiral,
↳ recursive = 1,
    title = "Desempenho por Tamanho do grid e blocos para implementação em
↳ CUDA",
    xaxis = "Dimensão do lado do grid", max_thread_power = 6, min_thread_power)
```



[93]:

### Desempenho por Tamanho do grid e blocos para implementação em CUDA



Podemos ver que a implementação utilizando CUDA apresenta resultados muito variados de acordo com os parâmetros, obtendo com ela os melhores e piores tempos. Lembramos que a dimensão do lado do grid se refere ao valor  $n$  do grid de tamanho  $n \times n$ , correspondente ao número de blocos por linha. É importante ressaltar que os intervalos de confiança estão sendo exibidos, porém devido à escala são difíceis de serem observados.

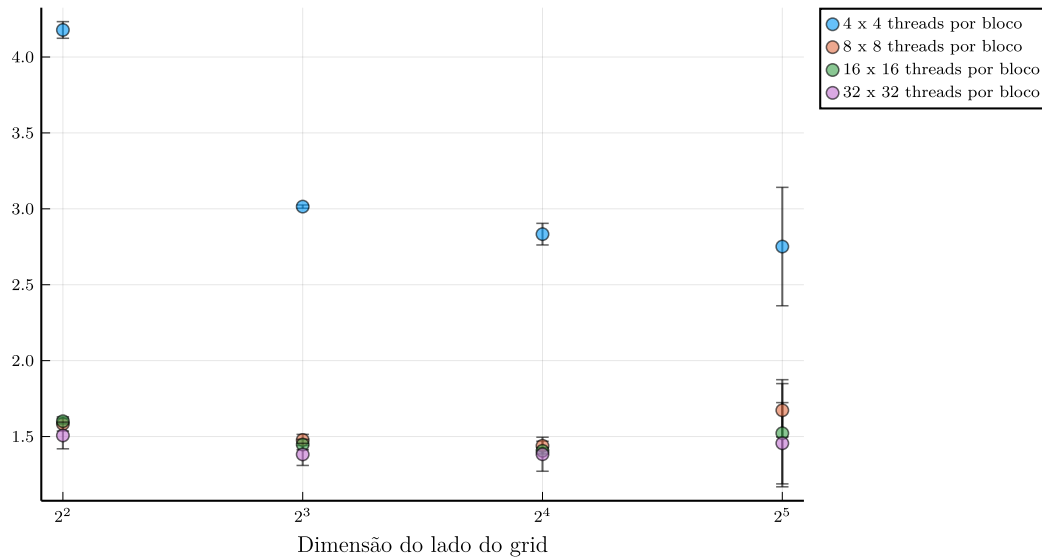
Observamos que para pequenos valores de dimensão do lado do grid há um tempo de execução muito alto até mesmo em relação à implementação sequencial (cerca de 20 vezes mais alto). Isso se dá pelo fato da GPU ser otimizada para realizar tarefas com menor carga de trabalho e maior paralelização, ao invés de poucas tarefas com alta carga de trabalho. Pelo mesmo motivo, para valores maiores da dimensão do lado do grid obtemos melhores resultados, chegando a aproximadamente 1.4 segundos nas suas melhores configurações.

Para visualizarmos melhor a relação entre dimensão do grid e blocos, desconsideramos os dois primeiros valores para a dimensão do lado do grid, obtendo o seguinte gráfico:

```
[99]: plot_results(filter(row -> row[:griddim] >= 4, cuda_triplespiral),  
    ↪ cuda_triplespiral,  
    ↪ "blocos", cuda_triplespiral, recursive = 1,  
    ↪ title = "Desempenho por Tamanho do grid e blocos para implementação em  
    ↪ CUDA",  
    ↪ xaxis = "Dimensão do lado do grid", max_thread_power = 6, min_thread_power  
    ↪ = 2)
```

[99] :

Desempenho por Tamanho do grid e blocos para implementação em CUDA



Verificamos que para todos as dimensões do lado do grid, obtemos melhor tempo de execução com  $32 \times 32$  threads por bloco. Observando o desempenho geral com o CUDA, podemos afirmar que com um grid de  $8 \times 8$  e  $16 \times 16$  blocos obtemos tempos ótimos praticamente indistinguíveis entre si. Para maior valor da dimensão do lado do grid, obtemos um desempenho com maior intervalo de confiança, ou seja, menor consistência no tempo de execução. Acreditamos que isso se dá devido ao manejo de threads ociosas quando o grid é extenso.

## 6 Conclusão geral

Com a realização desse exercício programa, observamos como a paralelização em geral melhora o desempenho do programa. Desta forma passamos de uma média de tempo de 23 segundos com a implementação sequencial para uma média de até 4.5 segundos com a implementação paralelizada em PThreads e em OpenMP.

Neste EP em específico foram implementados os algoritmos de mandelbrot paralelizados com as ferramentas de OMPI e CUDA, e verificamos que a utilização de GPU melhora consideravelmente o tempo de execução. Por análise de gráficos e tabelas, encontramos os melhores parâmetros para chegarmos a um tempo de execução ótimo. Os melhores resultados obtidos para as implementações são: uma média de 1.4 segundos para implementação em CUDA com dimensão do grid em  $16 \times 16$  e  $32 \times 32$  threads, e uma média de 9.8 segundos em OMPI com 4 processos. Essa grande diferença de desempenho ao se utilizar o CUDA mostra como uma otimização de hardware pode trazer muitos benefícios.