



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Departamento de Informática e Matemática Aplicada

Relatório da 1ª Unidade - Grafos

Alexandre Dantas, Andriel Vinicius, Gabriel Carvalho, Maria Paz e
Vinicius de Lima

Professor: Matheus Menezes

10 de outubro de 2025

Sumário

| | |
|--|------------|
| Lista de Figuras | iii |
| Lista de Tabelas | iv |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Especificação da API | 1 |
| 1.1.1 Para Grafos Não Direcionados | 1 |
| 1.1.2 Para Grafos Direcionados (ou Dígrafos) | 2 |
| 1.2 Solução proposta | 2 |
| 1.2.1 Traços | 2 |
| 1.2.2 Iteradores | 2 |
| 1.3 Organização do relatório | 3 |
| 2 Revisão teórica | 4 |
| 3 Representações de Grafos | 6 |
| 3.1 Comparação | 6 |
| 4 Descrição em Pseudocódigo dos Algoritmos da API | 8 |
| 4.1 Dígrafos | 8 |
| 4.2 Grafos Não Direcionados | 9 |
| 4.3 Descrição em Pseudocódigo dos Algoritmos | 9 |
| 4.3.1 Busca em Profundidade (DFS) | 9 |
| 4.3.2 Busca em Largura (BFS) | 9 |
| 4.3.3 Classificação de Arestas | 12 |
| 4.3.4 Componentes Biconexas | 12 |
| 5 Discussion and Analysis | 14 |
| 5.1 A section | 14 |
| 5.2 Significance of the findings | 14 |
| 5.3 Limitations | 14 |
| 5.4 Summary | 14 |
| 6 Testes de performance | 15 |
| 6.1 Metodologia de testes | 15 |
| 6.1.1 Micro Benchmarking estatístico | 16 |
| 6.1.2 Micro Benchmarking de alta precisão | 16 |
| 6.2 Testes realizados | 16 |
| 6.3 Resultados | 19 |
| 6.3.1 Especificações da máquina usada nos testes | 19 |

| | |
|---|-----------|
| <i>SUMÁRIO</i> | ii |
| 6.3.2 Busca em profundidade | 19 |
| 7 Reflection | 25 |
| Referências Bibliográficas | 26 |
| Appendices | 27 |
| A Atividades desenvolvidas por cada integrante | 27 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Um grafo com $V := \{1, 2, 3, 4\}$ e $A := \{(1, 2), (1, 4), (2, 3)\}$ | 4 |
| 2.2 | Um grafo com $V := \{u, v\}$ e $A := \{(u, v)\}$ | 4 |
| 2.3 | Um grafo não direcionado com $V := \{a, b, c\}$ e $A := \{ab, ba, bc, cb\}$ | 5 |
| 2.4 | Um grafo bipartido com $V_1 := \{a, b, c\}$ e $V_2 := \{u, v\}$ | 5 |
| 6.1 | Gráfico de inclinação do Micro Benchmark estatístico da DFS em Rust. | 20 |
| 6.2 | Gráfico de regressão das amostras do Micro Benchmark estatístico da DFS em Rust. | 21 |
| 6.3 | Gráfico de inclinação do Micro Benchmark estatístico da DFS em C++. | 22 |
| 6.4 | Gráfico de regressão das amostras do Micro Benchmark estatístico da DFS em C++. | 23 |
| 6.5 | Gráfico do Micro Benchmark de alta precisão da busca em profundidade. | 24 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Representações de grafos | 7 |
| 6.1 | Especificações do sistema de teste | 19 |
| 6.2 | Tabela de resultados do Micro Benchmark de alta precisão da busca em profundidade. | 23 |

Capítulo 1

Introdução

Este projeto tem como objetivo implementar uma API de algoritmos relacionados a Grafos na linguagem de programação Rust. A especificação da API segue as funcionalidades descritas na definição da Avaliação 01 da disciplina de Grafos, sob o Departamento de Informática e Matemática Aplicada (DIMAp) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Nesta implementação, a especificação da API se materializa em grande parte como *traços* (*traits*) de Rust. Tal conceito é semelhante a noção de *interface* em linguagens como Java e Go e praticamente idêntico ao conceito de *typeclasses* em linguagens como Haskell. O uso de traços permite que a API seja flexível e mantenha fidelidade as definições algébricas, além do mais, permite, por meio da implementação a nível de traço, que o código seja genérico e eficiente para as diversas representações de grafos.

Além dos traços, fizemos grande uso do conceito de *iteradores*, que também surgem a partir de traços, essa abstração permite que o código fique ainda mais reutilizável, sem que a eficiência seja comprometida.

Neste relatório vamos discutir a implementação e apresentar essas vantagens em detalhes. Além disso, vamos demonstrar empiricamente a partir de testes de benchmark que apesar do alto nível de abstração, a eficiência dos algoritmos ainda fica a par de implementações ótimas feitas em C++.

Para assegurar o comportamento esperado dos algoritmos, também implementamos mais de 50 testes unitários que testam e validam as implementações. Entretanto, por causa da extensão dos testes, vamos disponibilizá-los apenas através do código fonte da API.

1.1 Especificação da API

De acordo com a definição da Avaliação 01 a API deve possuir as seguintes funcionalidades:

1.1.1 Para Grafos Não Direcionados

1. Criação do Grafo a partir da Lista de Adjacências.
2. Criação do Grafo a partir da Matriz de Adjacências.
3. Criação do Grafo a partir da Matriz de Incidência.
4. Conversão de matriz de adjacência para lista de Adjacências e vice-versa.
5. Função que calcula o grau de cada vértice.
6. Função que determina se dois vértices são adjacentes.

7. Função que determina o número total de vértices.
8. Função que determina o número total de arestas.
9. Inclusão de um novo vértice usando Lista de Adjacências e Matriz de Adjacências.
10. Exclusão de um vértice existente usando Lista de Adjacências e Matriz de Adjacências.
11. Função que determina se um grafo é conexo ou não.
12. Determinar se um grafo é bipartido.
13. Busca em Largura, a partir de um vértice específico.
14. Busca em Profundidade, com determinação de arestas de retorno, a partir de um vértice em específico.
15. Determinação de articulações e componentes biconexos, utilizando obrigatoriamente a função `lowpt`.

1.1.2 Para Grafos Direcionados (ou Dígrafos)

16. Representação do Dígrafo a partir da Matriz de Adjacências.
17. Representação do Dígrafo a partir da Matriz de Incidência.
18. Determinação do Grafo subjacente.
19. Busca em largura.
20. Busca em profundidade, com determinação de profundidade de entrada de saída de cada vértice, e arestas de árvore, retorno, avanço e cruzamento.

1.2 Solução proposta

1.2.1 Traços

Como discutido brevemente no início do capítulo (1), nossa solução se baseia na criação de traços e iteradores que vão implementar os algoritmos descritos na especificação da API (1.1). Um traço define a funcionalidade que um tipo tem e que pode compartilhar com outros tipos (Klabnik et al., 2025b). No nosso caso específico, haverá um traço para grafos não direcionados, chamado de `Graph`, e um traço para grafos direcionados, chamado de `UndirectedGraph`. O traço `UndirectedGraph` herdará as propriedades do traço `Graph`, permitindo que os algoritmos definidos em `Graph` funcionem em `UndirectedGraph`. Essa escolha faz sentido porque na nossa implementação o grafo não direcionado funciona melhor como uma extensão do grafo direcionado.

1.2.2 Iteradores

Quanto ao uso de iteradores, eles serão implementados em algoritmos que envolvem algum tipo de travessia no grafo, como a Busca em Profundidade (DFS) dos itens 14 e 20, e a Busca em Largura (BFS) dos itens 13 e 19. A vantagem de implementar iteradores para esses algoritmos é que outros algoritmos, como a Determinação de Componentes Biconexos, do item 15, fica derivável dessa implementação. Além disso, a implementação em forma de

iteradores permite que possíveis usuários da API tenham acesso ao extenso framework de iteradores que a biblioteca padrão de Rust oferece. Alguns exemplos de uso de iteradores para além da implementação da API, seriam, a determinação de ciclos no grafo, a determinação de menor caminho entre dois vértices, a busca por um vértice específico, uma filtragem de vértices durante a busca, uma modificação do grafo durante a busca, algoritmos de backtracking e outros, tudo isso apenas compondo a implementação inicial. É importante ressaltar, também, que o iterador de Rust não perde desempenho em relação a uma implementação tradicional com loops (Klabnik et al., 2025a; *Zero-cost abstractions: performance of for-loop vs. iterators* — stackoverflow.com, 2018), inclusive podendo ser mais ótimo devido a otimizações do compilador. Essa capacidade lhe dá o apelido de abstração de custo zero.

1.3 Organização do relatório

No capítulo 2, vamos apresentar as definições que vamos usar durante o relatório e construir a base necessária para que o leitor consiga acompanhar a parte teórica em sua totalidade. Nessa seção revisaremos conceitos como definição de grafo, vértices, arestas, adjacência, conectividade e outros.

No capítulo 3, vamos revisar as representações de grafos nas estruturas de dados que temos disponíveis na linguagem de programação, estas são, Lista de Adjacência, Matriz de Adjacência e Matriz de Incidência. Também vamos discorrer um pouco sobre as vantagens e desvantagens de cada uma.

No capítulo 4, vamos descrever em uma linguagem de pseudocódigo a implementação dos algoritmos da especificação da API. Novamente, para preparar o leitor teoricamente para a implementação em Rust.

No capítulo 5, vamos apresentar e discorrer sobre as partes relevantes do código em Rust que implementa a API e consequentemente as representações e algoritmos descritos nos capítulos 3 e 4.

No capítulo 6, vamos demonstrar porque as abstrações utilizadas na implementação é zero custo comparando sua performance com uma implementação tradicional em C++.

No capítulo 7, vamos discutir as possíveis melhorias a nossa API e quais podem ser os futuros próximos passos.

No apêndice A, você poderá consultar as atividades desenvolvidas por cada integrante.

Capítulo 2

Revisão teórica

As definições utilizadas neste projeto foram, em grande parte, retiradas de [Diestel \(2025\)](#), com algumas modificações. Como a implementação dos algoritmos está em inglês, também apresentaremos o correspondente de cada definição em inglês, entre parênteses.

Definição 1 (Grafo). Um *grafo* (*graph*) é uma estrutura $G := (V, A)$ tal que $A \subseteq V^2$ e V é um conjunto de um tipo qualquer. Os elementos de V são denominados *vértices* (*nodes*) e os elementos de A são denominados de *arestas* (*edges*). O jeito tradicional de visualizar um grafo é como uma figura composta de bolas e setas:

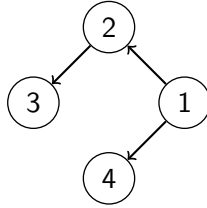


Figura 2.1: Um grafo com $V := \{1, 2, 3, 4\}$ e $A := \{(1, 2), (1, 4), (2, 3)\}$.

Definição 2 (Ordem e Tamanho). O número de vértices de um grafo G é chamado de *ordem* (*order*) e é denotado por $|G|$ – o número de arestas é chamado de *tamanho* (*size*) e é denotado por $\|G\|$. Por exemplo, na Figura 2.1, $|G| = 4$ e $\|G\| = 3$.

Definição 3 (Adjacência). Dizemos que um vértice v é *adjacente*, ou *vizinho*, de um vértice u (*neighbor*) se somente se $(u, v) \in A$, também, denotaremos (u, v) como uv . Visualmente, enxergamos isso como:

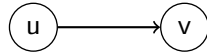


Figura 2.2: Um grafo com $V := \{u, v\}$ e $A := \{(u, v)\}$.

Definição 4 (Conjunto de adjacentes). Num grafo G , o conjunto de todos os vértices adjacentes de u (*neighbors*) é denotado por $A_G(u) := \{v \in V \mid uv \in A\}$. Já o conjunto de todos os vértices que em que v é adjacente será denotado por $\bar{A}_G(u) := \{v \in V \mid vu \in A\}$.

Definição 5 (Grau de um vértice). O *grau de um vértice* v (*node degree*) é o valor correspondente da soma $|A_G(v)| + |\bar{A}_G(v)|$. Também denotamos $|A_G(v)|$ como $d^+(v)$, $|\bar{A}_G(v)|$ como $d^-(v)$ e sua soma como $d(v)$.

Definição 6 (Caminho). Um *caminho* (*path*) é um grafo $C := (V, A)$ que tem a forma:

$$V := \{x_0, x_1, \dots, x_k\} \quad A := \{x_0x_1, x_1x_2, \dots, x_{k-1}x_k\}$$

Dizemos que C é um caminho de x_0 a x_k . Normalmente nos referimos ao caminho como a sequência dos seus vértices, $x_0x_1\dots x_k$.

Definição 7 (Conectividade). Dizemos que um grafo G é conexo (*connected*) se somente se para quaisquer dois vértices u e v , existe um caminho entre eles.

Definição 8 (Grafo não direcionado). Dizemos que um grafo G é *não direcionado* (*undirected*) se somente se A é simétrico, ou seja, se $uv \in A$ então $vu \in A$. O nome não direcionado vem da ideia de que os grafos que viemos discutindo até agora são denominados de *direcionados*, ou simplesmente *dígrafos*. Na literatura é comum apresentar grafo não direcionado como grafo e depois o direcionado como dígrafo, resolvemos inverter a ordem pois assim se traduz melhor nas representações de grafos que vamos implementar. Um grafo não direcionado pode ser visualizado sem a ponta das setas:

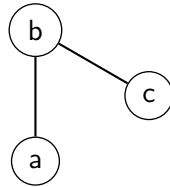


Figura 2.3: Um grafo não direcionado com $V := \{a, b, c\}$ e $A := \{ab, ba, bc, cb\}$

Também é comum omitir a simetria das arestas se pelo contexto for claro que está sendo tratado de um grafo não direcionado, na Figura 2.3, o conjunto de arestas A seria escrito como $\{ab, bc\}$.

Definição 9 (Grafo subjacente). O grafo subjacente (*underlying*) de um grafo direcionado $G := (V, A)$ é o grafo $S := (V, A')$ onde $A' := \{vu \mid uv \in A\} \cup A$.

Definição 10 (Grafo Bipartido). Dizemos que um grafo $G := (V, A)$ é bipartido (*bipartite*) se somente se existem dois conjuntos disjuntos V_1, V_2 tal que $V_1 \cup V_2 = V$, e que para todo $(u, v) \in A$, $(u \in V_1 \text{ e } v \in V_2)$ ou $(u \in V_2 \text{ e } v \in V_1)$, isto é, toda aresta em A conecta um vértice de V_1 a um vértice de V_2 .

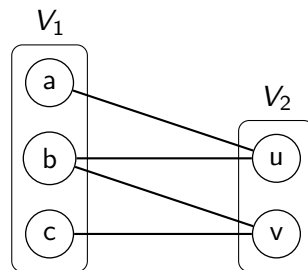


Figura 2.4: Um grafo bipartido com $V_1 := \{a, b, c\}$ e $V_2 := \{u, v\}$

Definição 11 (Grafo Biconexo). Dizemos que um grafo $G := (V, A)$ é biconexo (*biconnected*) se somente se $|G| > 2$ e para todo $v \in V$, o subgrafo de G resultante da remoção de v é conexo, isto é, $G - \{v\}$ é conexo.

Capítulo 3

Representações de Grafos

Existem diversas formas de representar um grafo computacionalmente. Nesta seção serão explanadas as 3 estruturas que usamos ao decorrer do projeto, suas características e casos em que selecionar cada tipo é interessante. As representações de Lista de Adjacência, Matriz de Adjacência e Matriz de Incidência foram retiradas de [1] e de [2].

Definição 12 (Matriz de Adjacência). Uma matriz quadrada M é uma Matriz de Adjacência de um Grafo $G := \{V, A\}$ quando:

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a aresta } (i, j) \in A, \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Definição 13 (Matriz de Incidência). Uma matriz M de dimensões $|V| \times |A|$ é uma Matriz de Incidência de um Grafo $G := \{V, A\}$ quando:

$$M_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{se a aresta } j \text{ sai do vértice } i, \\ 1 & \text{se a aresta } j \text{ entra no vértice } i, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Definição 14 (Lista de Adjacência). Uma Lista de Adjacência L de um Grafo $G := \{V, A\}$ consiste em um vetor de n vetores, um para cada $v \in V$, onde cada "sub-vetor" guarda os vértices u com os quais $(v, u) \in A$. Assim, cada $L[v]$ contém todos os vértices adjacentes a v .

Em [1] a definição de Lista de Adjacência obriga que os "sub-vetores" armazenem ponteiros para vértices. Contudo, neste projeto optamos por simplificar a estrutura destes "sub-vetores" para armazenar diretamente os vértices.

3.1 Comparação

Nesta seção iremos analisar a eficiência das diferentes representações de grafos, utilizando as notações abstratas de Big O e Theta. Nesta comparação será excluída a representação por Matriz de Incidência, tendo em vista sua pouca utilização e praticidade para o andamento do projeto.

Tabela 3.1: Representações de grafos

| Aspecto | L.A | M.A |
|------------------------------|-----------------|---------------|
| Busca de aresta (x, y) | $O(n)$ | $\Theta(1)$ |
| Inserção / Remoção de aresta | $O(n)$ | $\Theta(1)$ |
| Busca em grafo | $\Theta(V + E)$ | $\Theta(V^2)$ |
| Grau de um vértice | $\Theta(1)$ | $O(V)$ |
| Uso de memória | $\Theta(V + E)$ | $\Theta(V^2)$ |

Podemos concluir, portanto, que a Matriz de Adjacência tem como vantagem a eficiência para busca, inserção e deleção de arestas ($\Theta(1)$) pois acessa diretamente a posição em memória, mas não é adequada para grafos grandes dado o custo exponencial de espaço.

Por outro lado, a Lista de Adjacência tem como vantagem o melhor desempenho para travessia e maior economia em espaço, sendo uma escolha adequada para grafos de diversos tamanhos, mas apresenta desempenho pior para operações que alteram a estrutura do grafo.

A Matriz de Incidência, em geral, acaba sendo a escolha menos eficiente para qualquer situação. Portanto, ela obterá pouco destaque neste trabalho e em nossas implementações.

Capítulo 4

Descrição em Pseudocódigo dos Algoritmos da API

Neste capítulo, apresentamos a descrição, em linguagem de pseudocódigo, dos principais algoritmos definidos na especificação da API. O objetivo é proporcionar uma visão clara do funcionamento lógico das rotinas antes de sua implementação em Rust, estabelecendo um elo entre o modelo conceitual e o código-fonte.

Os algoritmos apresentados baseiam-se em uma abstração comum de estruturas de grafos, contemplando tanto grafos não dirigidos quanto grafos dirigidos (dígrafos). Enquanto os primeiros modelam relações bidirecionais entre vértices, os dígrafos representam relações assimétricas, nas quais as arestas possuem direção definida.

4.1 Dígrafos

O `trait Graph` é responsável por explicitar qual assinatura as funções que devem ser implementadas. Tal abordagem é coerente pois, como grafo se trata de um Tipo Abstrato de Dado, a implementação é uma particularização de cada Estrutura de Dados. E dentre as funções solicitadas para que uma estrutura possa implementar o `trait` grafo temos:

- Criar um grafo vazio
- Ordem e tamanho do grafo
- Nós do grafo(atraves de um iterador)
- Adicionar vértices e arestas
- Remover nós e arestas
- Vizinhos de um nós(atraves de um iterador)
- Determinar se o grafo é bipartido
- Grafo subjacente
- Se dois nós compartilham uma aresta
- Grau de um nó
- Iterador a partir de uma BFS

- Iterador a partir de uma DFS
- Classificar arestas

4.2 Grafos Não Direcionados

O `trait UndirectedGraph` estende o conceito de `Graph`, representando grafos em que as arestas não possuem direção. É uma vez que só se pode implementar caso `Graph` já tenha sido implementado anteriormente, a implementação das novas funções é trivial na maioria dos casos, pois recorre às implementações de `Graph`. A API define métodos específicos para:

- Adicionar vértices e arestas;
- Remover vértices e arestas;
- Obter vizinhos de um vértice;
- Determinar se o grafo é conexo
- Grau de um nó
- Iterador a partir de uma BFS
- Iterador a partir de uma DFS
- Identificar componentes biconexas(atraves de um iterador)

4.3 Descrição em Pseudocódigo dos Algoritmos

A seguir, apresentamos os algoritmos da API em pseudocódigo. O objetivo é destacar sua lógica fundamental, sem referência direta à sintaxe de Rust, mas mantendo correspondência com o comportamento esperado dos iteradores.

4.3.1 Busca em Profundidade (DFS)

A busca em profundidade percorre o grafo a partir de um vértice inicial, explorando recursivamente os caminhos até o limite de cada ramo.

Essa lógica permite identificar ciclos, classificar arestas e analisar conectividade de forma eficiente.

4.3.2 Busca em Largura (BFS)

A busca em largura percorre o grafo por camadas, processando primeiro todos os vértices a uma mesma distância do ponto inicial antes de avançar para os níveis seguintes. O pseudocódigo é apresentado abaixo:

O BFS é útil em problemas que requerem a descoberta de caminhos mínimos ou a análise de níveis de distância em grafos.

Algorithm 1 Busca em Profundidade

Entrada $G(V, A)$, $v \in V$ **Saída** $predecessor = []$ (Lista do vizinho de cada vértice)

```
function DFS( $G(V, A)$ ,  $v$ )  
   $predecessor \leftarrow [ ]$   
   $predecessor[v] \leftarrow \text{nulo}$   
  
   $visitado \leftarrow [ ]$   
   $visitado[v] \leftarrow 1$   
  
   $pilha \leftarrow [ ]$   
   $pilha \leftarrow \text{empilhar}(v)$   
  
  while  $pilha.tamanho() > 0$  do  
     $u \leftarrow \text{topo}(pilha)$   
    if  $\exists uw \in A(G)$  e  $visitado[w] \neq 1$  then  
       $predecessor[w] \leftarrow u$   
       $visitado[w] \leftarrow 1$   
       $pilha \leftarrow \text{empilhar}(w)$   
    else  
       $pilha \leftarrow \text{desempilhar}()$   
    end if  
  end while  
  return  $predecessor$   
end function
```

Algorithm 2 Busca em Largura

Entrada $G(V, A)$, $v \in V$ **Saída** $predecessor = []$ (Lista do vizinho de cada vértice)

```
1: function BFS( $G(V, A)$ ,  $v$ )
2:    $predecessor \leftarrow [ ]$ 
3:    $predecessor[v] \leftarrow \text{nulo}$ 

4:    $visitado \leftarrow [ ]$ 
5:    $visitado[v] \leftarrow 1$ 

6:    $fila \leftarrow [ ]$ 
7:    $fila \leftarrow \text{enfileirar}(v)$ 

8:   while  $fila.tamanho() > 0$  do
9:      $u \leftarrow \text{começo}(fila)$ 
10:     $fila \leftarrow \text{desenfileirar}()$ 
11:    for  $v \in u.vizinhos()$  do
12:      if  $visitado[v] \neq 1$  then
13:         $predecessor[v] \leftarrow u$ 
14:         $visitado[v] \leftarrow 1$ 
15:         $fila \leftarrow \text{enfileirar}(v)$ 
16:      end if
17:    end for
18:  end while
19:  return  $predecessor$ 
20: end function
```

4.3.3 Classificação de Arestas

Durante a DFS, é possível classificar as arestas em diferentes categorias, que auxiliam na análise estrutural de dígrafos (grafos orientados):

- **Tree Edge (Árvore):** Conecta um vértice a um filho na DFS.
- **Back Edge (Retorno):** Conecta um vértice a um ancestral, indicando ciclo.
- **Forward Edge (Avanço):** Conecta um vértice a um descendente não filho.
- **Cross Edge (Cruzamento):** Conecta vértices em diferentes ramos da DFS.

4.3.4 Componentes Biconexas

O algoritmo permite identificar componentes biconexas em grafos não direcionados. Mantém pilhas de arestas e tempos de descoberta para determinar subconjuntos de vértices que formam componentes biconexas.

No capítulo seguinte os conceitos abordados neste serão implementados para Lista de Adjacência, Matrix de Adjacência e Matriz de Incidência.

Algorithm 3 Componentes Bicôneas

Entrada $G(V, A)$ **Saída** Conjunto das componentes bicôneas de G

```

1: visitado  $\leftarrow []$ 
2: descoberta  $\leftarrow []$ 
3: baixo  $\leftarrow []$ 
4: pilha  $\leftarrow []$ 
5: componentes  $\leftarrow []$ 
6: tempo  $\leftarrow 0$ 

7: function biconnected( $G(V, A)$ )
8:   for  $v \in V$  do
9:     if visitado[ $v$ ]  $\neq 1$  then
10:      dfs_biconnected( $G, v, \text{pai} = \text{nulo}$ )
11:    end if
12:  end for
13:  return componentes
14: end function

15: function dfs_biconnected( $G, v, \text{pai}$ )
16:  visitado[ $v$ ]  $\leftarrow 1$ 
17:  tempo  $\leftarrow \text{tempo} + 1$ 
18:  descoberta[ $v$ ]  $\leftarrow \text{tempo}$ 
19:  baixo[ $v$ ]  $\leftarrow \text{tempo}$ 

20:  for  $u \in v.\text{vizinhos}()$  do
21:    if visitado[ $u$ ]  $\neq 1$  then
22:      pilha  $\leftarrow \text{empilhar}((v, u))$ 
23:      dfs_biconnected( $G, u, v$ )
24:      baixo[ $v$ ]  $\leftarrow \min(\text{baixo}[v], \text{baixo}[u])$ 
25:      if baixo[ $u$ ]  $\geq \text{descoberta}[v]$  then
26:        temp  $\leftarrow []$ 
27:        while pilha.topo()  $\neq (v, u)$  do
28:          pilha  $\leftarrow \text{desempilhar}()$ 
29:          temp  $\leftarrow \text{adicionar}((v', u'))$ 
30:        end while
31:        componentes  $\leftarrow \text{temp}$ 
32:      end if
33:    else if  $u \neq \text{pai}$  e descoberta[ $u$ ]  $< \text{descoberta}[v]$  then
34:      pilha  $\leftarrow \text{empilhar}((v, u))$ 
35:      baixo[ $v$ ]  $\leftarrow \min(\text{baixo}[v], \text{descoberta}[u])$ 
36:    end if
37:  end for
38: end function

```

Capítulo 5

Discussion and Analysis

Depending on the type of project you are doing, this chapter can be merged with “Results” Chapter as “ Results and Discussion” as suggested by your supervisor.

In the case of software development and the standalone applications, describe the significance of the obtained results/performance of the system.

5.1 A section

The Discussion and Analysis chapter evaluates and analyses the results. It interprets the obtained results.

5.2 Significance of the findings

In this chapter, you should also try to discuss the significance of the results and key findings, in order to enhance the reader’s understanding of the investigated problem

5.3 Limitations

Discuss the key limitations and potential implications or improvements of the findings.

5.4 Summary

Write a summary of this chapter.

Capítulo 6

Testes de performance

Nessa seção vamos comparar o desempenho da busca em profundidade implementada em Rust com uma versão tradicional implementada em C++, usando bibliotecas *benchmarking* escritas em Rust. O objetivo é mostrar que apesar do alto nível de abstração e flexibilidade da nossa implementação, o desempenho ainda fica próximo de versões tradicionais do algoritmo que não tem a mesma flexibilidade, implementadas em C++.

6.1 Metodologia de testes

Os testes realizados vivem sob duas principais categorias, *Micro Benchmarking* de alta precisão e *Micro Benchmarking* estatístico. Micro benchmarking de alta precisão executa apenas uma vez pedaço de código e mensura estatísticas como, quantidade de instruções realizadas pelo processador, acesso ao cache e uso de RAM. Enquanto, o micro benchmarking estatístico, se refere a múltiplas execuções de um pedaço de código, onde é realizada a coletas de várias amostras, nesse tipo de teste, é mensurado medidas de tendência central e dispersão, como a média e desvio padrão do tempo de execução. Para facilitar a realização desses testes e a coleta de dados, importamos duas bibliotecas públicas escritas em Rust, *Criterion* (n.d.) e *Gunraun* (n.d.) para o Micro Benchmark estatístico e Micro Benchmark de alta precisão respectivamente.

Para viabilizar a coleta de dados de funções em C++ usando as bibliotecas implementadas em Rust, foi necessário criar uma FFI (Foreign Function Interface) para permitir que código C++ interaja com o código das bibliotecas em Rust. Essa implementação, se deu especificando um bloco extern "C" para permitir que as funções sejam identificadas unicamente pelo seu nome, por exemplo:

```
1 extern "C" {  
2 void* mk_adjacency_list(size_t node_amt) { ... }  
3  
4 void add_edge_unchecked(void* graph, size_t n, size_t m) { ... }  
5  
6 void dfs(void* graph, size_t start) { ... }  
7 }
```

Código 6.1: Exemplo de interface FFI escrita em C++

Feito isso, fomos capazes de importar e usar essa interface em código Rust e implementar um encapsulador:

```
1 unsafe extern "C" {  
2     fn mk_adjacency_list(node_amt: usize) -> *mut std::ffi::c_void;
```

```

3     fn add_edge_unchecked(graph: *mut std::ffi::c_void, n: usize, m: usize
4     );
5     fn dfs(graph: *mut std::ffi::c_void, start: usize);
6 }
7 pub struct AdjacencyListCpp {
8     ptr: *mut std::ffi::c_void,
9 }
10
11 impl AdjacencyListCpp {
12     pub fn new(node_amt: usize) -> Self { ... }
13
14     pub fn add_edge_unchecked(&self, n: usize, m: usize) { ... }
15
16     pub fn dfs(&self, start: usize) { ... }
17 }

```

Código 6.2: Exemplo de uso de interface FFI escrita em Rust

Exemplos completos de código são acessíveis no caminho <https://github.com/mpazmarcato/Trabalho-U1-Grafos/tree/main/crates/cpp-api>.

6.1.1 Micro Benchmarking estatístico

O processo de Micro Benchmarking implementado pela biblioteca *Criterion* (n.d.) funciona em quatro etapas, Aquecimento, Medição, Análise e Comparação com o resultado anterior (*Analysis Process - Criterion.rs Documentation — bheisler.github.io, n.d.*). Entretanto, não levaremos em conta o resultado da última etapa. A primeira etapa serve para aquecer o cache da CPU, de forma que seja reduzida a quantidade de casos atípicos na amostra (*Analysis Process - Criterion.rs Documentation — bheisler.github.io, n.d.*). A segunda etapa realiza a medição dos tempos de execução e a terceira etapa realiza o cálculo de estatísticas como média, moda e mediana dos dados medidos.

A biblioteca também gera gráficos automaticamente usando o programa *Gnuplot*. A biblioteca também argumenta que as amostras de bom benchmark deve formar uma linha de regressão quando plotadas num gráfico (*Analysis Process - Criterion.rs Documentation — bheisler.github.io, n.d.*).

6.1.2 Micro Benchmarking de alta precisão

O processo de Micro Benchmarking implementado pela biblioteca *Gungrau* (n.d.), funciona de uma maneira bastante diferente do *Criterion*, este executa um trecho de código apenas uma vez e coleta as estatísticas usando o *Valgrind*. Estas estatísticas incluem quantidade estimada de ciclos da CPU, quantidade de instruções realizadas, quantos acertos de cache L1 e L2 e outros. O processo de configuração e uso é praticamente idêntico ao do *Criterion*.

6.2 Testes realizados

Vamos realizar testes apenas para a Busca em profundidade. Todos os testes serão realizados numa lista de adjacência em grafos completos, ou seja, que há arestas entre todos os nós. Essa escolha advém da ideia de que queremos maximizar o uso de recursos e quantidade de instruções, possivelmente evidenciando as diferenças que favorecem a implementação em C++.

Como não foi apresentada anteriormente, aqui está a implementação da busca em profundidade em C++. Definimos uma classe para a lista de adjacência em C++ e realizamos a

implementação tradicional da busca, tomando o cuidado para pré-alocar a pilha e o dicionário de visitados, assim como a implementação em Rust e para evitar alocações no meio da busca.

```

1 class AdjacencyList {
2     private:
3         std::vector<std::vector<size_t>> data;
4
5     public:
6         AdjacencyList(size_t node_amt) : data(node_amt) {}
7
8         size_t order() { return data.size(); }
9
10        std::vector<size_t>& neighbors(const size_t node) {
11            static std::vector<size_t> empty;
12            return (node < order()) ? data[node] : empty;
13        }
14
15        void dfs(const size_t start) {
16            std::vector<size_t> stack;
17            std::unordered_set<size_t> visited;
18
19            stack.reserve(order());
20            visited.reserve(order());
21
22            stack.push_back(start);
23            visited.insert(start);
24
25            while (!stack.empty()) {
26                const auto current = stack.back();
27                stack.pop_back();
28
29                for (const auto& neighbor : neighbors(current)) {
30                    if (visited.insert(neighbor).second) {
31                        stack.push_back(neighbor);
32                    }
33                }
34            }
35        }
36 };

```

Código 6.3: Implementação da busca em profundidade em C++

O código fonte da geração do grafo e da criação dos testes é a seguinte:

```

1 pub fn create_complete_graph(size: usize) -> AdjacencyMatrix {
2     let mut matrix = vec![vec![0; size]; size];
3     for (i, row) in matrix.iter_mut().enumerate() {
4         for (j, val) in row.iter_mut().enumerate() {
5             if i != j {
6                 *val = 1;
7             }
8         }
9     }
10    AdjacencyMatrix(matrix)
11 }

```

Código 6.4: Código fonte da geração do grafo completo

Micro Benchmarking estatístico

Realizamos 3 testes performando a busca num grafo completo, os testes se diferenciam pela ordem do grafo gerado. Foram gerados grafos com 500 nós, 1000 e 2000 nós.

```

1 fn bench_dfs_comparison(c: &mut Criterion) {
2     let sizes = vec![500, 1000, 2000];
3
4     let mut group = c.benchmark_group("dfs");
5
6     for size in sizes {
7         let g = create_complete_graph(size);
8         let rust_list = AdjacencyList::from_adjacency_matrix(&g);
9         let cpp_list = AdjacencyListCpp::from_adjacency_matrix(&g);
10
11         group.bench_with_input(
12             BenchmarkId::new("rust", size),
13             &size,
14             |b, _| b.iter(|| rust_list.dfs(0).for_each(|_| ()))
15         );
16
17         group.bench_with_input(
18             BenchmarkId::new("cpp", size),
19             &size,
20             |b, _| b.iter(|| cpp_list.dfs(0))
21         );
22     }
23
24     group.finish();
25 }
26
27 criterion_group! {
28     name = benches;
29     config = Criterion::default()
30         .measurement_time(std::time::Duration::from_secs(30));
31     targets = bench_dfs_comparison
32 }
33
34 criterion_main!(benches);

```

Código 6.5: Código fonte dos testes de Micro Benchmark estatístico da DFS.

Micro Benchmarking de alta precisão

No Micro Benchmark de alta precisão, foi realizado apenas um teste da busca em profundidade para um grafo completo com 1000 nós. É importante ressaltar que a parte do código que é responsável pela inicialização do grafo também é mensurada no teste, pois é uma limitação da biblioteca. O código que implementa o Micro Benchmark é o seguinte:

```

1 fn setup() -> AdjacencyList {
2     AdjacencyList::from_adjacency_matrix(&create_complete_graph(1000))
3 }
4
5 fn cpp_setup() -> AdjacencyListCpp {
6     AdjacencyListCpp::from_adjacency_matrix(&create_complete_graph(1000))
7 }
8
9 #[library_benchmark]
10 fn single_shot_dfs() {
11     setup().dfs(black_box(0)).for_each(|_| ())
12 }
13
14 #[library_benchmark]
15 fn single_shot_cpp_dfs() {
16     cpp_setup().dfs(black_box(0))

```

```
17 }
18
19 library_benchmark_group! {
20     name = bench_dfs_group;
21     benchmarks = single_shot_dfs, single_shot_cpp_dfs
22 }
23
24 main!(library_benchmark_groups = bench_dfs_group);
```

Código 6.6: Código dos testes de Micro Benchmark de alta precisão da implementação da DFS.

Na código 6.6, Note o uso da função `black_box` na chamada das duas buscas (linhas 11 e 16), ela serve para que o compilador não pré-calcule a computação realizada pela DFS. O mesmo não precisa no Micro Benchmark estatístico pois o tipo da variável `group` na código 6.5 já garante isso automaticamente.

6.3 Resultados

6.3.1 Especificações da máquina usada nos testes

Para realizar os testes, usamos um computador com as seguintes configurações:

Tabela 6.1: Especificações do sistema de teste

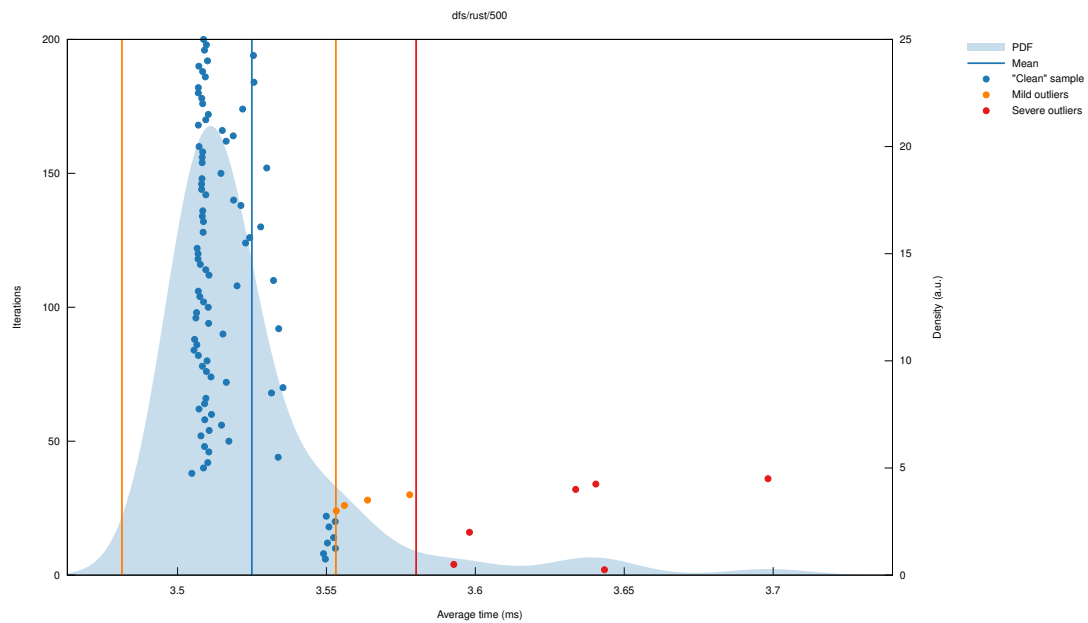
| | | |
|----------|---------------------|----------------------------|
| Hardware | Processador | AMD Ryzen 9 5900XT |
| | GPU | Nvidia Geforce RTX 4060 Ti |
| | RAM | 32GB RAM |
| Software | Sistema Operacional | Arch Linux x86_64 |
| | Kernel | Linux 6.17.1-arch-1-1 |
| | Compilador Rust | rustc 1.90.0 (2025-09-14) |
| | Versão do Cargo | 1.90.0 (2025-07-30) |
| | Compilador C++ | clang 20.1.8 |
| | Versão do Valgrind | 3.25.1 |

6.3.2 Busca em profundidade

Micro Benchmark estatístico

Começaremos pelos testes de Micro Benchmarking estatístico, que exibem estatísticas sobre o tempo de execução dos algoritmos coletadas de várias iterações, ou amostras. Como as proporções das versões de um grafo com 500, 1000 e 2000 nós foram parecidas, nesse texto exibiremos apenas o resultado do benchmark de um grafo com 500 nós. Portanto, tivemos:

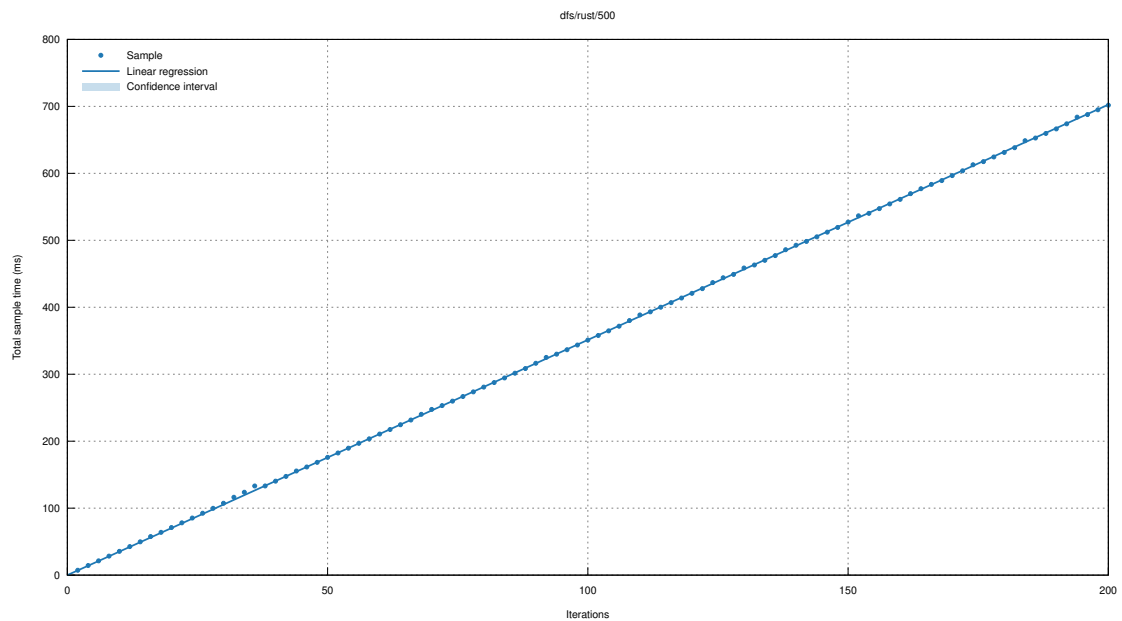
Figura 6.1: Gráfico de inclinação do Micro Benchmark estatístico da DFS em Rust.



Na figura 6.1, os pontos azuis são amostras "limpas", os pontos vermelhos representam casos atípicos severos, os pontos amarelos representam casos atípicos médios, seguindo o método de Tukey (*Criterion*, n.d.), as retas amarelas e vermelhas representam as cotas superiores e inferiores dessas medidas. O fundo azul representa a função de probabilidade desse teste e a reta azul representa a média, nesse caso, em torno de 3.54 ms.

Para validar se o benchmark foi bom, analisemos a reta de regressão das amostras desse teste:

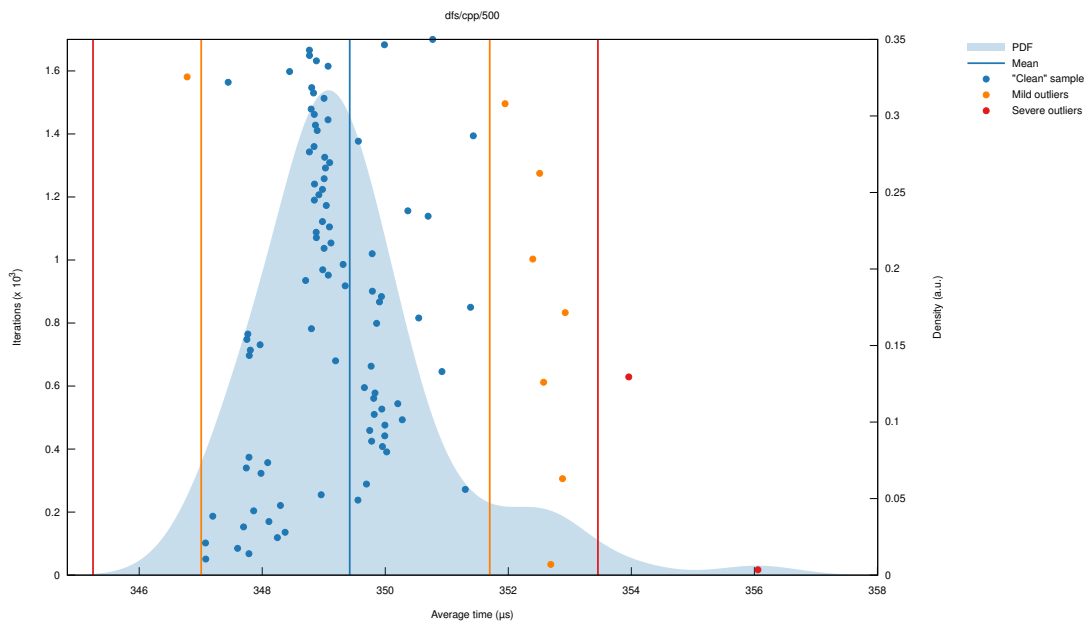
Figura 6.2: Gráfico de regressão das amostras do Micro Benchmark estatístico da DFS em Rust.



Na figura 6.2, os pontos azuis representam as amostras coletadas e a linha azul representa a reta de regressão sobre as amostras. Se o teste produz uma reta de regressão que grosseiramente passa por todas as amostras, o teste é considerado um bom benchmark (*Criterion*, n.d.), o que nesse caso é verdade.

Quanto aos teste realizado na implementação em C++, obtivemos o seguinte:

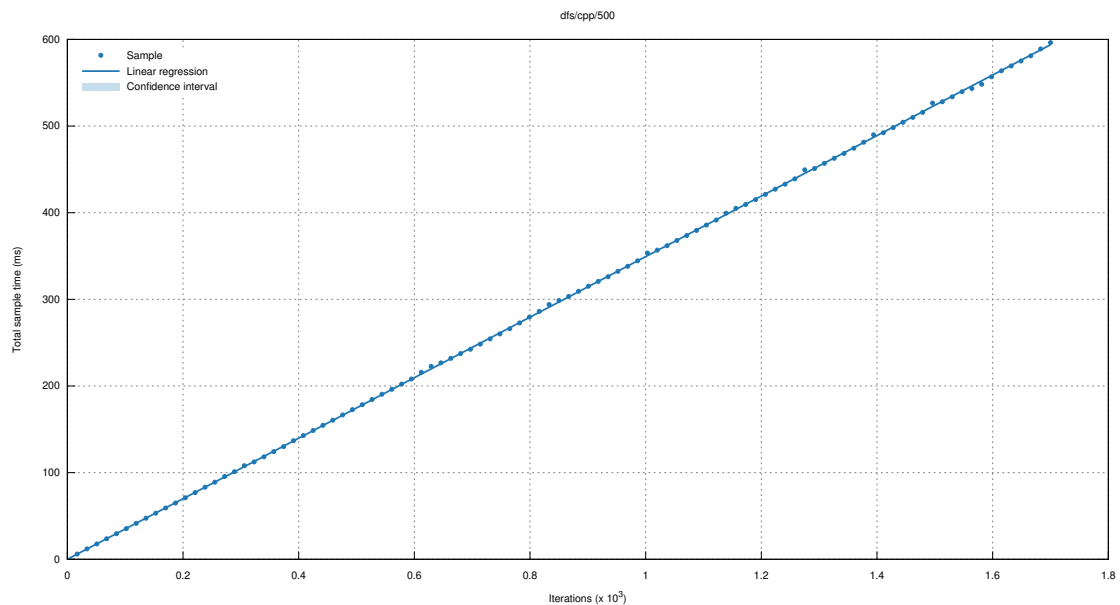
Figura 6.3: Gráfico de inclinação do Micro Benchmark estatístico da DFS em C++.



O gráfico da figura 6.3 segue as mesmas especificações do gráfico da figura 6.1, discutida anteriormente. Nesse caso, o tempo médio de execução do algoritmo é aproximadamente 349 ms, sendo 10 vezes mais rápida do que a versão em Rust, algo que se mantém consistente independente do tamanho do grafo.

Quanto ao gráfico de regressão das amostras, ele segue o padrão do teste realizado no código em Rust:

Figura 6.4: Gráfico de regressão das amostras do Micro Benchmark estatístico da DFS em C++.



Micro Benchmark de alta precisão

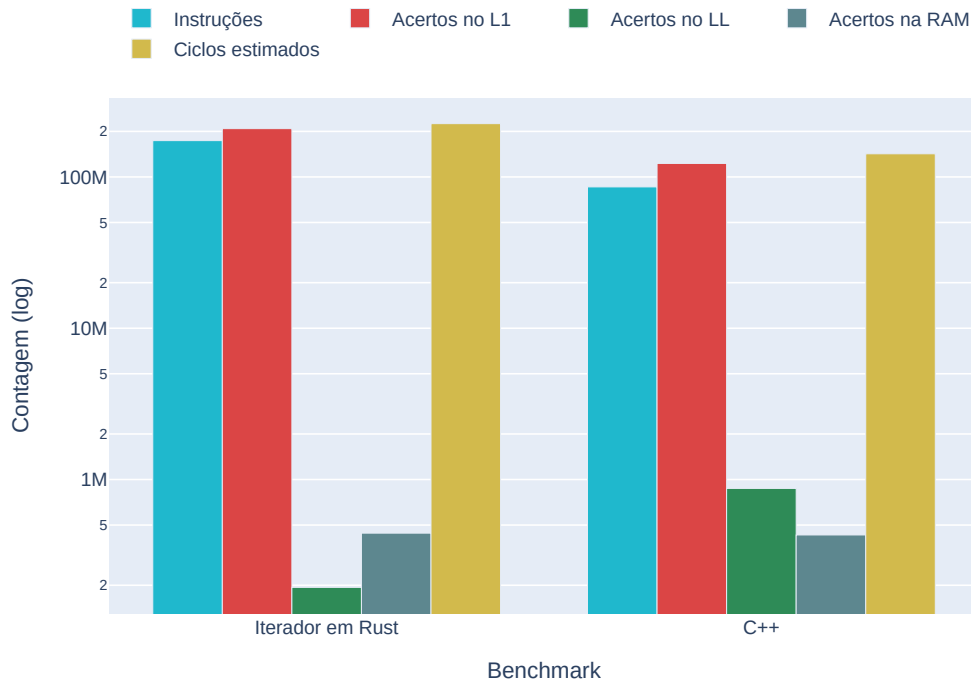
Nos testes de Micro Benchmarking de alta precisão tivemos os seguintes resultados:

Tabela 6.2: Tabela de resultados do Micro Benchmark de alta precisão da busca em profundidade.

| Métricas | C++ | Iterador em Rust |
|-------------------------------|-----------|------------------|
| Quantidade de instruções | 85926683 | 173801339 |
| Acertos no Cache L1 | 122803778 | 208565341 |
| Acertos no Cache LL | 873133 | 193603 |
| Acertos na RAM | 429925 | 441938 |
| Quantidade de ciclos estimada | 142216818 | 225001186 |

Em forma de gráfico, tivemos:

Figura 6.5: Gráfico do Micro Benchmark de alta precisão da busca em profundidade.



Na tabela 6.2 é possível perceber que a versão em C++ realiza em torno de 2 vezes menos a quantidade de instruções que a versão em Rust faz. Entretanto também é possível notar que a versão em Rust usa mais o cache L1, em torno de 1.7 vezes mais, e bem menos o cache LL em relação a versão em C++, em torno de 4.5 vezes menos, indicando que o uso de cache é mais otimizado na versão em Rust. Também é possível notar que a versão em C++ precisa de 1.5 vezes menos ciclos na CPU para terminar sua computação. Isso significa que, mesmo aproveitando o cache, a versão da DFS em forma de iteradores em Rust precisou de mais instruções para completar, o que é razoável dado a flexibilidade do uso dessa implementação.

Capítulo 7

Reflection

Write a short paragraph on the substantial learning experience. This can include your decision-making approach in problem-solving.

Some hints: You obviously learned how to use different programming languages, write reports in \LaTeX and use other technical tools. In this section, we are more interested in what you thought about the experience. Take some time to think and reflect on your individual project as an experience, rather than just a list of technical skills and knowledge. You may describe things you have learned from the research approach and strategy, the process of identifying and solving a problem, the process research inquiry, and the understanding of the impact of the project on your learning experience and future work.

Also think in terms of:

- what knowledge and skills you have developed
- what challenges you faced, but was not able to overcome
- what you could do this project differently if the same or similar problem would come
- rationalize the divisions from your initial planed aims and objectives.

A good reflective summary could be approximately 300–500 words long, but this is just a recommendation.

Note: The next chapter is “**References**,” which will be automatically generated if you are using BibTeX referencing method. This template uses BibTeX referencing. Also, note that there is difference between “References” and “Bibliography.” The list of “References” strictly only contain the list of articles, paper, and content you have cited (i.e., refereed) in the report. Whereas Bibliography is a list that contains the list of articles, paper, and content you have cited in the report plus the list of articles, paper, and content you have read in order to gain knowledge from. We recommend to use only the list of “References.”

Referências Bibliográficas

Analysis Process - Criterion.rs Documentation — *bheisler.github.io* (n.d.).

URL: <https://bheisler.github.io/criterion.rs/book/analysis.html>

Criterion (n.d.).

URL: <https://github.com/bheisler/criterion.rs>

Diestel, R. (2025), *Graph theory*, Vol. 173, Springer Nature.

Gungraun (n.d.).

URL: <https://github.com/gungraun/gungraun>

Klabnik, S., Nichols, C., Krycho, C. and Rust Community (2025a), 'Comparing Performance: Loops vs. Iterators - The Rust Programming Language'.

URL: <https://doc.rust-lang.org/book/ch13-04-performance.html>

Klabnik, S., Nichols, C., Krycho, C. and Rust Community (2025b), 'Traits: Defining Shared Behavior - The Rust Programming Language'.

URL: <https://doc.rust-lang.org/book/ch10-02-traits.html>

Zero-cost abstractions: performance of for-loop vs. iterators — *stackoverflow.com* (2018).

URL: <https://stackoverflow.com/questions/52906921/zero-cost-abstractions-performance-of-for-loop-vs-iterators>

Apêndice A

Atividades desenvolvidas por cada integrante