

Estruturas de Dados I

Árvores

Igor Machado Coelho

05/10/2020 - 26/04/2023

- 1 Árvores
- 2 Tipo Abstrato: Árvore
- 3 Implementações
- 4 Operações em Árvores
- 5 Agradecimentos

Section 1

Árvores

Pré-Requisitos

São requisitos para essa aula:

- Introdução/Fundamentos de Programação (em alguma linguagem de programação)
- Interesse em aprender C/C++
- Noções de recursividade
- Noções de tipos de dados
- Noções de listas e encadeamento

Agradecimentos especiais ao prof. Fabiano Oliveira e prof. Fábio Protti, cujos conteúdos didáticos formam a base desses slides

Section 2

Tipo Abstrato: Árvore

Árvore

A Árvore (do inglês *Tree*) é um Tipo Abstrato de Dado (TAD) que pode assumir duas formas:

- árvore T vazia, denotada por $T = \emptyset$
- árvore T composta por:
 - um nó R chamado de *nó raiz*
 - 0 ou mais árvores disjuntas T_1, T_2, \dots , associadas a R ; tais árvores são chamadas de *subárvores*

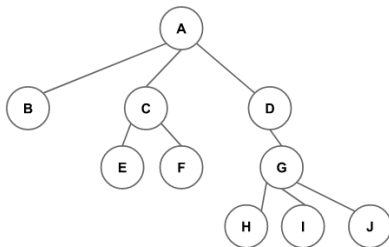


Figure 1: Representação de árvore

Nomenclatura

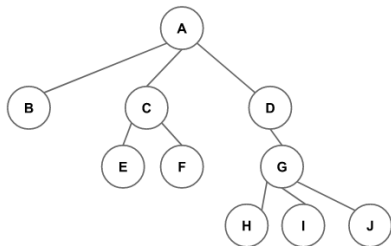
Um conjunto de árvores é chamado *floresta*

Se T é uma árvore com raiz R , então:

- os *nós de T* são todas as raízes de subárvores de R , além da raiz de T
- um nó com 0 filhos é chamado de *folha* (do inglês *leaf*)
- se um nó F é um *filho* de um nó P , denominamos P como *pai* de F
- a raiz é um nó *ancestral* de todos nós da árvore
- todos os nós da árvore são descendentes do nó raiz

Caminhos

Um caminho em uma árvore é uma sequência de nós com relação *filho de* ou *pai de*:

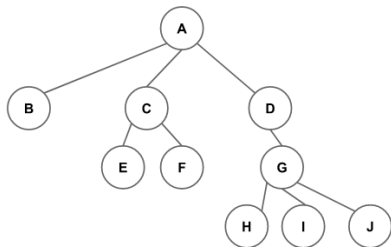


Exemplos:

- E,C,A
- D,G,I
- C,A,D,G

Tamanho de Caminhos e Níveis

O *tamanho de um caminho* consiste no número de nós. O *nível* de um nó é o tamanho de seu caminho até a raiz:

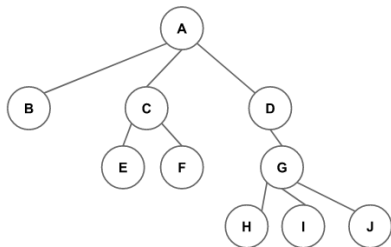


Nível de: A=1; C=2; F=3; H=4.

Desafio: em cursos de Teoria dos Grafos é provado que existe um único caminho conectando dois nós na árvore. *Utilize sua intuição para verificar esta afirmação!*

Alturas

A *altura* de nó X é o tamanho do maior caminho que conecta X a uma folha descendente. Denotamos a altura de X por $h(X)$:



Alturas: $h(B) = 1$; $h(C) = 2$; $h(D) = 3$; $h(A) = 4$.

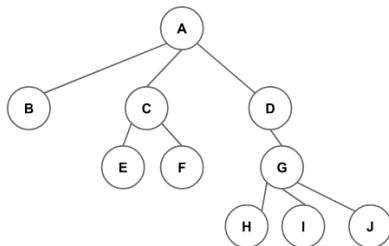
A *altura da árvore* é a altura de sua raiz!

No exemplo, $h(T) = h(A) = 4$.

Aridade

Uma árvore é dita *ordenada* se há uma ordem associada aos filhos de cada nó.

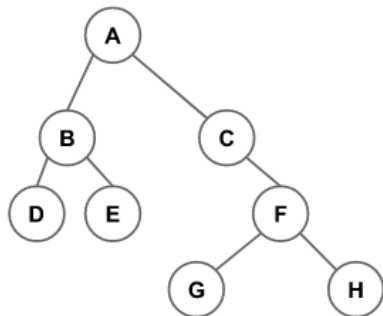
Uma árvore é dita *m-ária* se cada nó é *limitado a um máximo* de m filhos.



A árvore acima é ternária (podendo também ser 4-ária, 5-ária, 6-ária, ...), mas *não é binária!*

Filho esquerdo e direito

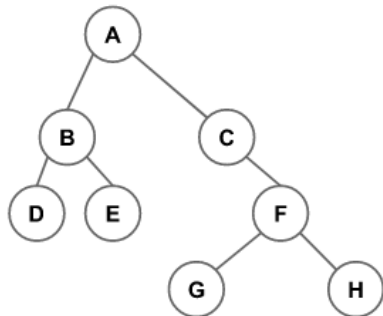
Em *árvores binárias ordenadas* de raiz R , a primeira subárvore de cada nó é denominada *subárvore à esquerda de R* (cuja raiz se chama *filho esquerdo*), e a segunda é a *subárvore à direita de R* (cuja raiz se chama *filho direito*).



Exemplo: B é filho esquerdo e C é filho direito de A

Estritamente m -ária

Uma árvore *estritamente m -ária* é aquela na qual cada nó possui *exatamente* 0 ou m filhos.

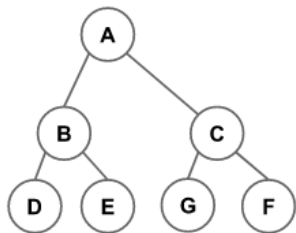


Exemplo: Considere a inclusão de um filho à esquerda de C.

Observação: Chamada pelo NIST de full binary tree, embora também seja preferivelmente chamada de *própria* (ou *proper*).

Árvore Cheia ou Perfeita

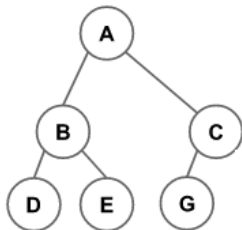
Uma *árvore m-ária cheia* (ou *perfeita*) é aquela na qual todo nó com alguma subárvore vazia está no *último nível*.



Observação: Chamada pelo NIST de *perfect binary tree* (ou *perfect k-ary tree*), embora também seja chamada de *full* ou, preferencialmente *perfect*.

Árvore Completa

Uma *árvore m-ária completa* é aquela na qual todo nó com alguma subárvore vazia está no *último ou penúltimo níveis*, estando os nós do *último nível completamente preenchidos da esquerda para a direita*.



Observação: Chamada pelo NIST de complete binary tree. Note que alguns autores consideram essa mesma definição para árvores cheias ou perfeitas. *O ponto fundamental é a facilidade de implementação em vetores (vide próximos slides).* [Knuth97]¹

¹[Knuth97] Donald E. Knuth, The Art of Computer Programming, Addison-Wesley, volumes 1 and 2, 2nd edition, 1997.

Desafios

- 1 Qual a altura máxima de uma árvore binária com n nós?
- 2 Qual a altura máxima de uma árvore estritamente binária com n nós?
- 3 Qual a altura mínima de uma árvore binária com n nós?
- 4 Numa árvore binária cheia com n nós, qual o número de nós no último nível?

Desafios

- 1 Qual a altura máxima de uma árvore binária com n nós?
- 2 Qual a altura máxima de uma árvore estritamente binária com n nós?
- 3 Qual a altura mínima de uma árvore binária com n nós?
- 4 Numa árvore binária cheia com n nós, qual o número de nós no último nível?

Solução: n , $(n + 1)/2$, $\lceil \lg(n + 1) \rceil$, $(n + 1)/2$

Section 3

Implementações

Implementações de Árvores

Apresentaremos dois tipos de implementação para o TAD Árvore: Sequencial e Encadeada.

Note que, nesse momento, não apresentaremos *operações* sobre o TAD Árvore, focando somente em sua *representação interna*. A razão é que existem diversos tipos específicos de árvores, que apresentam operações distintas no TAD, de acordo com seu propósito.

Implementação Encadeada 1 (m -ária)

Consideramos uma implementação de árvore m -ária, com alocação encadeada de nós (alocação interna sequencial para filhos).

```
constexpr int M = 3;      // aridade M=3 (ternária)
class NoEnc1
{
public:
    char chave             // dado armazenado
    NoEnc1* nosFilhos[M]; // ponteiros para filhos
};

class ArvoreEnc1
{
public:
    NoEnc1* raiz;         // raiz da árvore
};
```

Implementação Encadeada 1 (m -ária)

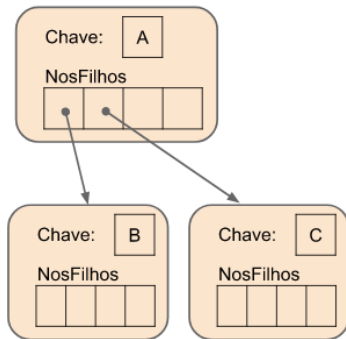


Figure 2: Ilustração NoEnc1. Crédito: Fabiano Oliveira

Implementação Encadeada 2 (m -ária)

Consideramos uma implementação de árvore m -ária, com alocação encadeada de nós.

```
constexpr int M = 3;           // aridade M=3 (ternária)
class NoEnc2
{
public:
    char chave;                 // dado armazenado
    NoEnc2* prox;              // proximo elemento
    NoEnc2* nosFilhos;         // ponteiro único para filhos
};

class ArvoreEnc2
{
public:
    NoEnc2* raiz;              // raiz da árvore
};
```

Implementação Encadeada 2 (m -ária)

Consideramos uma implementação de árvore m -ária, com alocação encadeada de nós.

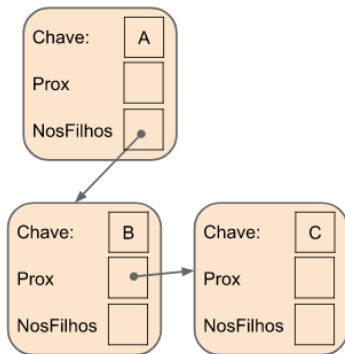


Figure 3: Ilustração NoEnc2. Crédito: Fabiano Oliveira

Implementação Encadeada 3 (binária)

Note que podemos reescrever os ponteiros de NoEnc2 com os termos `esq` e `dir` (nó esquerdo e nó direito).

```
class NoEnc3
{
public:
    char chave;           // dado armazenado
    NoEnc3* esq;         // filho esquerdo
    NoEnc3* dir;         // filho direito
};
```

```
class ArvoreEnc3
{
public:
    NoEnc3* raiz;       // raiz da árvore
};
```


Implementação Encadeada 3 (binária)

Consideramos uma implementação de árvore binária, com alocação encadeada de nós.

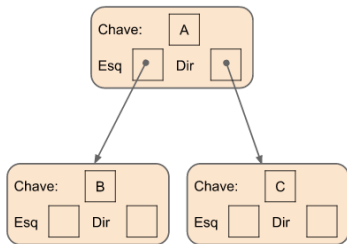


Figure 4: Ilustração NoEnc3. Crédito: Fabiano Oliveira

Implementação Encadeada 4 (binária) - unique_ptr

Note que podemos reescrever os ponteiros de NoEnc3 utilizando unique_ptr, para maior segurança:

```
class NoEnc4
{
public:
    char chave;           // dado armazenado
    std::unique_ptr<NoEnc4> esq; // filho esquerdo
    std::unique_ptr<NoEnc4> dir; // filho direito
};
```

```
class ArvoreEnc4
{
public:
    std::unique_ptr<NoEnc4> raiz; // raiz da árvore
};
```

Conversão para Árvores Binárias

Observamos pelas implementações NoEnc2 e NoEnc3 que uma árvore *m*-ária *qualquer* pode ser convertida para uma árvore binária. Isso reforça a importância do estudo de implementações eficientes para árvores binárias.

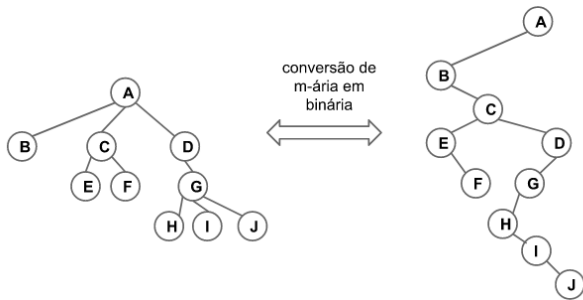


Figure 5: Conversão de Aridade. Crédito: Fabiano Oliveira

Implementação Sequencial

As Árvores com Implementação Sequencial utilizam um array para armazenar os dados. Assim, os dados sempre estarão em um *espaço contíguo* de memória.

Desafio: quanto espaço é necessário para armazenar uma *árvore qualquer* com altura h ?

Implementação ArvoreSeq1

Consideraremos uma árvore sequencial com, no máximo, MAX_N elementos do tipo caractere.

```
constexpr int MAX_N = 50; // capacidade máxima da árvore
class ArvoreSeq1
{
public:
    char elem [MAX_N];      // elementos na fila
};
```

Desafio: Quantos níveis *cabem* nessa árvore? $\lceil \log_2(50 + 1) \rceil = 6$

Desafios na ArvoreSeq1

Note que, para esse fim, somente as *árvores completas* terão maior eficiência, utilizando uma *representação por níveis*.

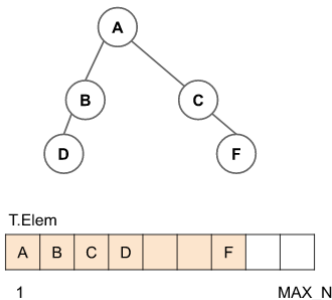


Figure 6: Representação por Níveis. Crédito: Fabiano Oliveira

Desafio: onde fica o primeiro elemento de cada nível da árvore T ?

Localização na ArvoreSeq1

Dado um nó V na posição i da árvore sequencial T , em que posição estão:

- o pai de V ?
- os filhos de V ?



Figure 7: Localização por Níveis. Crédito: Fabiano Oliveira

Localização na ArvoreSeq1

Dado um nó V na posição i da árvore sequencial T , em que posição estão:

- o pai de V ?
- os filhos de V ?



Figure 7: Localização por Níveis. Crédito: Fabiano Oliveira

Resposta: considerando contagem $1..MAX_N$, estarão respectivamente nas posições $\lfloor i/2 \rfloor$ (pai), $2i$ e $2i + 1$ (filhos).

Desafio: considere a contagem $0..MAX_N-1$ e refaça o cálculo.

Localização na ArvoreSeq1

Dado um nó V na posição i da árvore sequencial T , em que posição estão:

- o pai de V ?
- os filhos de V ?

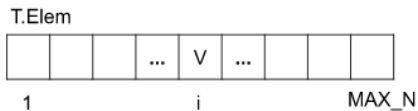


Figure 7: Localização por Níveis. Crédito: Fabiano Oliveira

Resposta: considerando contagem $1..MAX_N$, estarão respectivamente nas posições $\lfloor i/2 \rfloor$ (pai), $2i$ e $2i + 1$ (filhos).

Desafio: considere a contagem $0..MAX_N-1$ e refaça o cálculo.

Solução: posições $\lfloor (i - 1)/2 \rfloor$ (pai), $2i + 1$ e $2i + 2$ (filhos).

Fim implementações

Fim parte de implementações.

Section 4

Operações em Árvores

Percursos em Árvores

Como “imprimir” uma árvore?

Estruturas lineares tem uma intuição mais direta para o conceito de impressão, mas para estruturas arbóreas isso já não é tão direto. Além da impressão, muitas vezes é desejável efetuar outras operações ou *visitas* em nós de uma árvore.

Operações de *Percursos em Árvore* (do inglês, *tree traversals*) apresentam uma solução para isso:

- Percurso de pré-ordem (do inglês, *preorder*)
- Percurso de pós-ordem (do inglês, *postorder*)
- Percurso em-ordem ou ordem simétrica (do inglês, *inorder*)

Percursos: definições e aplicações

No percurso de *pré-ordem*, o nó é visitado primeiro, depois os filhos esquerdos, e finalmente, são visitados os filhos direitos.

- **Aplicação:** impressão da ordem de visita (pilha de execução) para algoritmos recursivos em árvore.

No percurso de *pós-ordem*, os filhos esquerdos são visitados primeiro, depois os filhos direitos, e finalmente o nó é visitado.

- **Aplicação:** calcular altura de um nó (note que a altura de um nó depende da altura de seus filhos).

No percurso *em-ordem*, os filhos esquerdos são visitados primeiro, depois o nó é visitado, e finalmente os filhos direitos são visitados.

- **Aplicação:** impressão “visual” da árvore como caracteres na tela (desafio!). Visita ordenada em árvores com propriedades de busca e mapas (próxima aula).

Percurso Pré-ordem

```
void preordem(auto* no) {  
    if(no) {  
        printf("%c\n", no->chave); // operação ou "visita"  
        preordem(no->esq);  
        preordem(no->dir);  
    }  
}
```

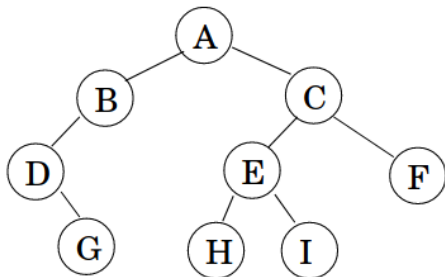


Figure 8: Percurso de Pré-ordem: A B D G C E H I F

Pratique: Pré-ordem

Apresente o percurso de pré-ordem para as árvores abaixo:

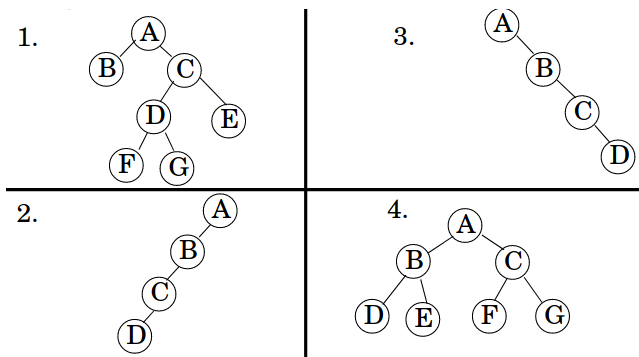


Figure 9: Execício de Pré-ordem

Pratique: Pré-ordem

Apresente o percurso de pré-ordem para as árvores abaixo:

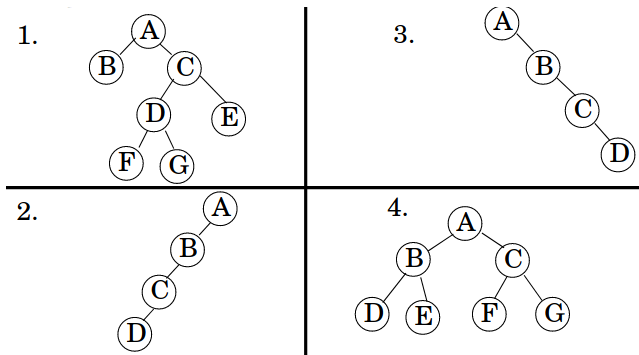


Figure 9: Exercício de Pré-ordem

Solução: 1. ABCDFGE 2. ABCD 3. ABCD 4. ABDECFG

Percurso Pós-ordem

```
void posordem(auto* no) {  
    if(no) {  
        posordem(no->esq);  
        posordem(no->dir);  
        printf("%c\n", no->chave); // operação ou "visita"  
    }  
}
```

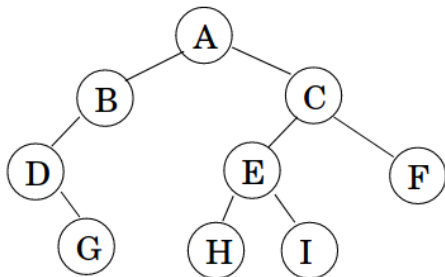


Figure 10: Percurso de Pós-ordem: G D B H I E F C A

Pratique: Pós-ordem

Apresente o percurso de pós-ordem para as árvores abaixo:

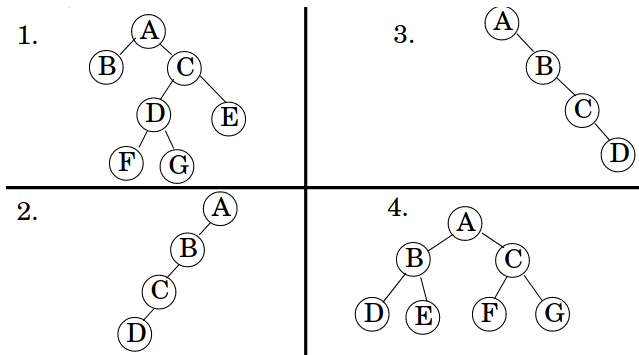


Figure 11: Exercício de Pós-ordem

Pratique: Pós-ordem

Apresente o percurso de pós-ordem para as árvores abaixo:

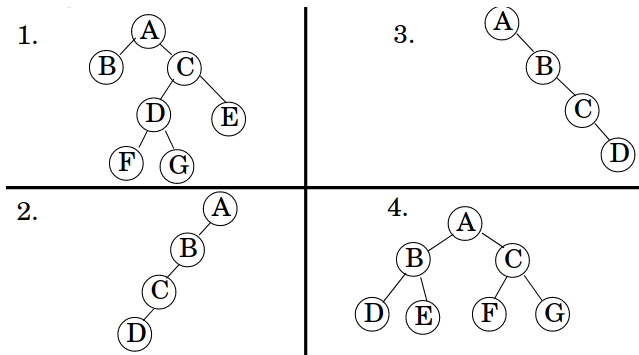


Figure 11: Exercício de Pós-ordem

Solução: 1. BFGDECA 2. DCBA 3. DCBA 4. DEBFGCA

Percurso Em-ordem (ordem simétrica)

```
void emordem(auto* no) {  
    if(no) {  
        emordem(no->esq);  
        printf("%c\n", no->chave); // operação ou "visita"  
        emordem(no->dir);  
    }  
}
```

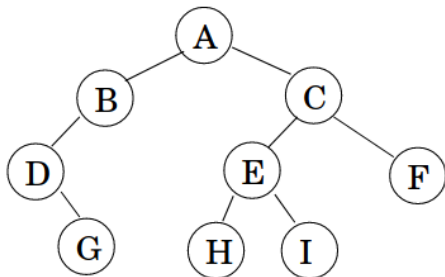


Figure 12: Percurso de ordem simétrica: DGBAHEICF

Pratique: Em-ordem

Apresente o percurso de ordem simétrica para as árvores abaixo:

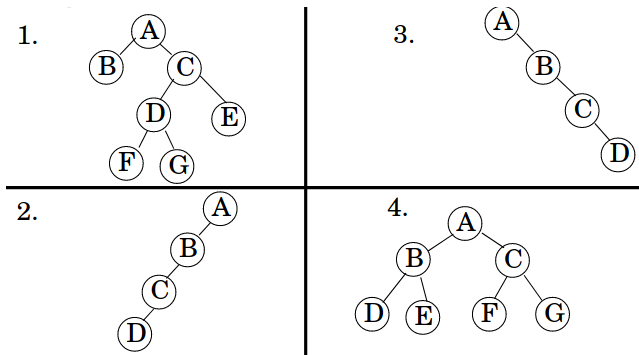


Figure 13: Exercício de Ordem Simétrica

Pratique: Em-ordem

Apresente o percurso de ordem simétrica para as árvores abaixo:

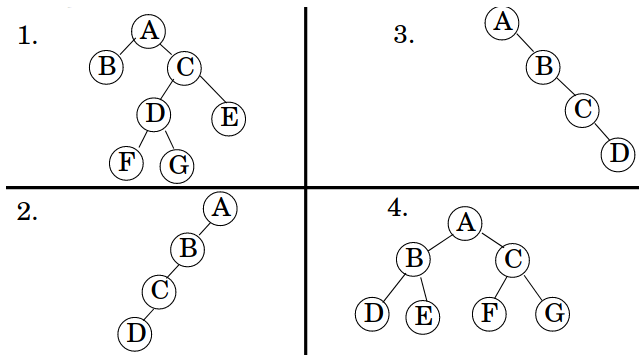


Figure 13: Exercício de Ordem Simétrica

Solução: 1. BAFDGCE 2. DCBA 3. ABCD 4. DBEAFCG

Fim percursos

Fim parte de percursos.

Bibliografia Recomendada

Além da bibliografia do curso, recomendamos para esse tópico:

- Szwarcfiter, J.L.; Markenzon, L. Estruturas de Dados e seus Algoritmos. Rio de Janeiro, LTC, 1994. Bibliografia Adicional:
- Cerqueira, R.; Celes, W.; Rangel, J.L. Introdução a estruturas de dados: com técnicas de programação em C. Editora, 2004.
- Cormen, T.H.; Leiserson, C.E.; Rivest, R.L.; Stein Algoritmos: Teoria e Prática. Ed. Campus, 2002.
- Cormen, T.H.; Leiserson, C.E.; Rivest, R.L.; Stein, C. Introduction to Algorithms, 3rd ed.. The MIT Press, 2009.
- Preiss, B.R. Estruturas de Dados e Algoritmos Ed. Campus, 2000;
- Knuth, D.E. The Art of Computer Programming - Vols I e III. 2nd Edition. Addison Wesley, 1973.
- Graham, R.L., Knuth, D.E., Patashnik, O. Matemática Concreta. Segunda Edição, Rio de Janeiro, LTC, 1995.
- Livro “The C++ Programming Language” de Bjarne Stroustrup
- Dicas e normas C++: <https://github.com/isocpp/CppCoreGuidelines>

Section 5

Agradecimentos

Pessoas

Em especial, agradeço aos colegas que elaboraram bons materiais, como o prof. Fabiano Oliveira (IME-UERJ), e o prof. Jayme Szwarcfiter cujos conceitos formam o cerne desses slides.

Estendo os agradecimentos aos demais colegas que colaboraram com a elaboração do material do curso de Pesquisa Operacional, que abriu caminho para verificação prática dessa tecnologia de slides.

Software

Esse material de curso só é possível graças aos inúmeros projetos de código-aberto que são necessários a ele, incluindo:

- pandoc
- LaTeX
- GNU/Linux
- git
- markdown-preview-enhanced (github)
- visual studio code
- atom
- revealjs
- gromit-mpx (screen drawing tool)
- xournal (screen drawing tool)
- ...

Empresas

Agradecimento especial a empresas que suportam projetos livres envolvidos nesse curso:

- github
- gitlab
- microsoft
- google
- ...

Reprodução do material

Esses slides foram escritos utilizando pandoc, segundo o tutorial ilectures:

- <https://igormcoelho.github.io/ilectures-pandoc/>

Exceto expressamente mencionado (com as devidas ressalvas ao material cedido por colegas), a licença será Creative Commons.

Licença: CC-BY 4.0 2020

Igor Machado Coelho

This Slide Is Intentionally Blank (for goomit-mpx)