Estruturas Lineares

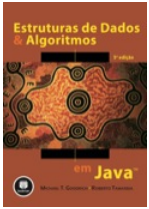
Roland Teodorowitsch

Algoritmos e Estruturas de Dados I - Escola Politécnica - PUCRS

18 de abril de 2024

Introdução

Leitura(s) Recomendada(s)



Seções 3.2 (Listas simplesmente encadeadas), 3.3 (Listas duplamente encadeadas), 6.1 (Listas arranjo), 6.2 (Listas de nodos), 6.4 (Os TADs de lista e o *framework* de coleções)

GOODRICH, Michael T.; TAMASSIA, Roberto. **Estruturas de dados e algoritmos em Java**. Tradução: Bernardo Copstein. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. xxii, 713 p. E-book. ISBN 9788582600191. Tradução de: Data Structures and Algorithms in Java, 5th Edition. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582600191/>. Acesso em: 01 ago. 2023.

Tipos Abstratos de Dados

Abordagem OO

- Princípios da abordagem OO
  - **Abstração**: representação de um objeto do mundo real, "abstraindo-se" os detalhes desnecessários, de forma que o objeto possa ser utilizado sem se preocupar com como ele foi implementado
  - **Encapsulamento**: detalhes da implementação ficam escondidos e a manipulação dos dados acontede através de uma interface pública
  - **Modularidade**: vários componentes que interagem
- Abstração, Encapsulamento, Herança e Polimorfismo são considerados os 4 pilares da POO

Tipos Abstratos de Dados

- A aplicação de abstração ao projeto de estruturas de dados nos leva a **Tipos Abstratos de Dados (TAD)**
- TAD
  - É uma especificação de um conjunto de dados e operações que podem ser executadas sobre esses dados
  - Modelo matemático de estruturas de dados que especifica
    - O tipo dos dados armazenados
    - As operações definidas sobre esses dados
    - Os tipos dos parâmetros dessas operações
- A separação de especificação e implementação permite usar um TAD sem conhecer nada sobre a sua implementação
  - Assim, um TAD pode ter mais de uma implementação

TAD

- Usa “encapsulamento”
- Princípio: esconder detalhes de representação e direcionar o acesso aos objetos abstratos por meio de operações
- A representação fica protegida contra qualquer tentativa de manipulá-la diretamente (só através das operações disponíveis)
- Define o que cada operação faz, mas não como o faz

Tipos Abstratos de Dados

- Resumindo, TAD é uma estrutura de programa que contém
  - A especificação de uma estrutura de dados
  - Um conjunto de operações que podem ser realizadas sobre os dados encapsulados
- Exemplos de TADs
  - Pilhas, Filas, Deques e Listas
- Essas estruturas são classificadas como lineares
  - Representam coleções de elementos linearmente organizados que oferecem métodos para inserir, acessar e remover elementos
  - Têm a ordem interna de seus elementos definida pela forma como são feitas inserções e remoções na estrutura
  - Costumam ter duas extremidades (esquerda e direita; frente e traseira; cabeça e cauda; ...)

Estruturas Lineares

- **Lista**
  - Organiza os dados de maneira "sequencial" (não necessariamente de forma física, mas sempre existe uma ordem lógica entre os elementos)
  - Permite inserção, acesso e remoção de elementos
- **Pilha**
  - Usa a política *LIFO – Last In First Out* (o último elemento que entrou, é o primeiro a sair)
  - Possui apenas uma entrada, chamada de topo, a partir da qual os dados entram e saem dela
- **Fila**
  - Usa a política *FIFO – First In First Out* (o primeiro elemento a entrar será o primeiro a sair)
  - Os elementos entram por um lado ("cauda" ou parte de trás) e saem por outro ("cabeça" ou parte da frente)
- **Deque** (*Double-Ended QUEue*)
  - Os elementos entram e saem por qualquer uma das extremidades (cauda ou cabeça) da lista

Estruturas Lineares

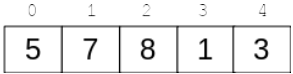
- Permitem representar um conjunto de dados de um mesmo tipo (com alguma afinidade) de forma a preservar a relação de ordem entre seus elementos
- Cada elemento da estrutura é chamado de nó, ou nodo.
- Uma estrutura linear é definida como:
  - Um conjunto de N nós, organizados de forma a refletir a posição relativa dos mesmos
  - Se $N > 0$, os nós da estrutura serão x_1, x_2, ..., x_N,
    - x_1 é o primeiro nó
    - Para $1 < k < N$, o nó x_k é precedido pelo nó x_{k-1} e seguido pelo nó x_{k+1}
    - x_N é o último nó
  - Quando $N = 0$, diz-se que a estrutura está vazia

Exemplos de Estruturas Lineares

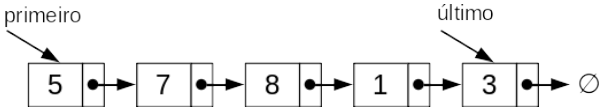
- Pessoas na fila de um caixa (ordem definida pela chegada e posição na fila)
- Pessoas na sala de espera de um consultório (ordem definida pela chegada)
- Conjunto de notas dos alunos de uma turma
- Itens no estoque de uma loja
- Palavras de um texto
- Letras de uma palavra
- Especificação de operações e operandos em uma expressão matemática
- Dias da semana
- Relação de compromissos
- Pilha de livros
- Cartas de um baralho
- etc.

Alocação de Estruturas Lineares

- Estruturas lineares podem ser alocadas de forma:
  - **Sequencial ou Contígua**
    Os nós, além de estarem em uma sequência lógica, também estão **fisicamente em sequência**



  - **Encadeada**
    Os nós são alocados dinamicamente e são ligados entre si, de forma que há uma sequência lógica, mas fisicamente os nós NÃO precisam estar contíguos



- Cada forma tem as suas vantagens e desvantagens

Alocação Sequencial ou Contígua de Estruturas Lineares

- Nós adjacentes na estrutura são armazenados em endereços contíguos na memória física e o tamanho da estrutura é fixo
- A implementação é feita com vetores (arranjos ou *arrays*), que podem ser alocados de forma estática ou dinâmica
- Pode-se trabalhar com vetores parcialmente prenchidos
- O acesso é rápido
- NÃO é possível ter espaços vazios (não utilizados) no meio da estrutura (a não ser no final, para vetores parcialmente preenchidos)
- Inserção e Remoção de elementos no meio exige movimentação de elementos
- Para estruturas alocadas dinamicamente, pode-se: alocar um novo vetor, copiar os elementos do antigo para o novo, desalocar o antigo e passar a usar o novo – mas isto pode ser custoso

Alocação Sequencial ou Contígua de Estruturas Lineares (vetores.cpp)

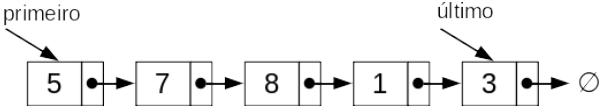
```
#include <iostream>
using namespace std;
int main() {

  int vetorEstatico[10];  // ALOCACAO ESTATICA
  for (int i=0; i<10; ++i) vetorEstatico[i] = i+1;
  for (int i=0; i<10; ++i) cout << vetorEstatico[i] << endl;

  const int TAM_MAX = 10;
  int vetorParcial[TAM_MAX];  // VETOR PARCIALMENTE PREENCHIDO
  int tamAtual = 0;           // tamanho atual do vetor parcialmente preenchido
  for (int i=0; i<TAM_MAX+1; ++i)
      if ( tamAtual < TAM_MAX)
         vetorParcial[ tamAtual++ ] = i+1;
  for (int i=0; i<tamAtual; ++i) cout << vetorParcial[i] << endl;

  int tam;
  cin >> tam;
  int *vetorDinamico = new int[tam];  // ALOCACAO DINAMICA
  for (int i=0; i<tam; ++i) vetorDinamico[i] = i+1;
  for (int i=0; i<tam; ++i) cout << vetorDinamico[i] << endl;
  delete[] vetorDinamico;

  return 0;
}
```

Alocação Sequencial ou Contígua de Estruturas Lineares (vetores2.cpp)

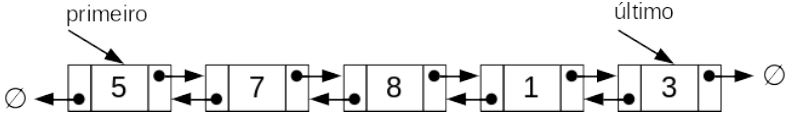
```
#include <iostream>

using namespace std;

int main() {

  const int TAM = 10;
  int *vetorExpansivel = new int[TAM];  // VETOR PARCIALMENTE PREENCHIDO DINAMICAMENTE EXPANSIVEL
  int tamAtual = 0, tam_max = TAM;
  for (int i=0; i<TAM+5; ++i) {
      if ( tamAtual == tam_max) {
         int *novo = new int[tam_max + TAM];
         for (int j=0; j<tamAtual; ++j) novo[j] = vetorExpansivel[j];
         delete[] vetorExpansivel;
         vetorExpansivel = novo;
         tam_max += TAM;
      }
      vetorExpansivel[ tamAtual++ ] = i+1;
  }
  for (int i=0; i<tamAtual; ++i) cout << vetorExpansivel[i] << endl;
  delete[] vetorExpansivel;

  return 0;
}
```

Alocação Encadeada de Estruturas Lineares

- Os elementos da estrutura seguem uma ordem lógica, mas **NÃO estão necessariamente armazenados sequencialmente na memória**
- A relação lógica de ordem é implementada através de uma ligação (referência ou armazenamento de endereço) entre os nodos
- Estruturas lineares encadeadas são chamadas de **listas encadeadas**, sendo que cada nodo pode armazenar uma referência para o próximo elemento (lista simplesmente encadeada)



- Ou para o elemento anterior e para o próximo elemento (lista duplamente encadeada)



- A estrutura pode aumentar e diminuir em tempo de execução

Alocação Encadeada de Estruturas Lineares

- Quando for necessário inserir um elemento na estrutura, deve-se:
  - Alocar um novo nodo
  - Preencher as informações no nodo
  - Inserir o novo nodo em determinada posição da estrutura (o que exige ajustes em alguns encadeamentos)
- Alocação encadeada será útil quando:
  - Não é possível prever o número de entradas de dados em tempo de compilação
  - For mais fácil aplicar determinada operação sobre a estrutura encadeada

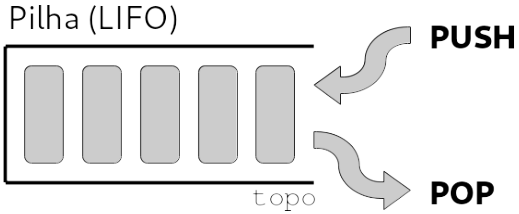
Operações Básicas sobre Estruturas Lineares

- Criação da estrutura
- Destruição da estrutura
- Inserção de um elemento na estrutura
- Remoção de um elemento da estrutura
- Acesso a um elemento da estrutura
- Alteração de um elemento da estrutura
- Combinação de duas ou mais estruturas
- Ordenação dos elementos da estrutura
- Cópia de uma estrutura
- Localização de um nodo através de alguma informação do nodo

Pilha (*Stack*)

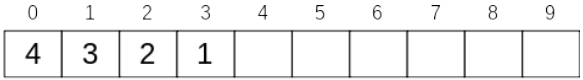
Pilha ou *Stack*

- Usa a política *LIFO – Last In First Out* (o último elemento que entrou, é o primeiro a sair)
- Possui apenas uma entrada, chamada de topo, a partir da qual os dados são inseridos e removidos



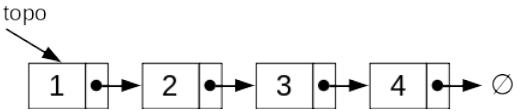
Pilha: Implementações Possíveis

- **Arranjo**

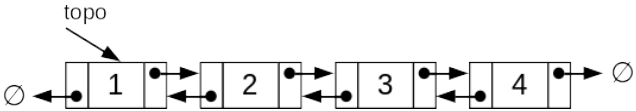


tamMax = 10 / tam = 4 / posTopo = 3 / valTopo = 1

- **Lista Simplesmente Encadeada**



- **Lista Duplamente Encadeada**



Aplicações que Usam Pilha

- Operações de edição de desfazer/refazer
- Histórico de visitação de páginas em navegadores *web* (botão *back*)
- Cadeia de chamada de métodos em interpretadores e máquinas virtuais
- Auxiliar para implementação de outras estruturas de dados e algoritmos
- Implementação de compiladores
- Computação Gráfica (operações com matrizes)
- Manipulação de expressões aritméticas: infixada, pré-fixada, pós-fixada

Manipulação de Expressões Aritméticas

- Expressões aritméticas geralmente são representadas usando a notação infixada

  `2 + 3 * 4 = 14`

  `(2 + 3) * 4 = 20`
- Alternativa 1: Notação polonesa (pré-fixada)
  - Proposta por Jan Iukasiewiscz em 1920
  - Permite escrever expressões aritméticas com precedência implícita
  - Operador aparece antes dos operandos

    `+ 2 * 3 4`

    `* + 2 3 4`
- Alternativa 2: Notação polonesa inversa (pós-fixada)
  - Proposta por Charles Hamblin em 1950
  - Também usa precedência implícita, porém o operandor aparece antes dos operandos

    `2 3 4 * +`

    `2 3 + 4 *`

Exercício

Converta as seguintes expressões na forma infixada para as formas pré-fixada e pós-fixada:

1. Infixada: `(1-2)*(3+4)`
   Pré-fixada:
   Pós-fixada:
2. Infixada: `(2 + 4)/(3 -1)`
   Pré-fixada:
   Pós-fixada:
3. Infixada: `(2+4)/(3-1)*4`
   Pré-fixada:
   Pós-fixada:

Exercício (Resposta)

Converta as seguintes expressões na forma infixada para as formas pré-fixada e pós-fixada:

1. Infixada: `(1-2)*(3+4)`
   Pré-fixada: `* - 1 2 + 3 4`
   Pós-fixada: `1 2 - 3 4 + *`
2. Infixada: `(2 + 4)/(3 - 1)`
   Pré-fixada: `/ + 2 4 - 3 1`
   Pós-fixada: `2 4 + 3 1 - /`
3. Infixada: `(2+4)/(3-1)*4`
   Pré-fixada: `* / + 2 4 - 3 1 4`
   Pós-fixada: `2 4 + 3 1 - / 4 *`

Métodos do TAD Pilha

- `bool push(e)`: insere o elemento no topo da pilha (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se NÃO houver espaço)
- `bool pop(&e)`: remove e retorna (por referência) o elemento do topo da pilha (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, a pilha estiver vazia)
- `bool top(&e)` ou `bool peek(&e)`: retorna (por referência) o elemento do topo da pilha, mas não o remove da pilha (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, a pilha estiver vazia)
- `int size()`: retorna o número de elementos da pilha
- `int maxSize()`: retorna o número máximo de elementos suportado pela pilha
- `bool isEmpty()`: retorna `true`, se a pilha estiver vazia, ou `false`, em caso contrário
- `bool isFull()`: retorna `true`, se a pilha estiver cheia, ou `false`, em caso contrário
- `void clear()`: esvazia a pilha

Exemplo de Implementação: IntStack.hpp

```
#ifndef _INTSTACK_HPP
#define _INTSTACK_HPP

#include <string>

using namespace std;

class IntStack {
private:
  int numElements;
  int maxElements;
  int *stack;
public:
  IntStack(int mxSz = 10);
  ~IntStack();
  int size() const;
  int maxSize() const;
  bool isEmpty() const;
  bool isFull() const;
  void clear();
  bool push(const int e);
  bool pop(int &e);
  bool top(int &e) const;
  string str() const; // APENAS PARA DEPURACAO
};
#endif
```

Exemplo de Implementação: IntStack.cpp

```
#include <sstream>
#include "IntStack.hpp"

IntStack::IntStack(int mxSz) {
  numElements = 0;   maxElements =  ( mxSz < 1 ) ? 10 : mxSz;
  stack = new int[maxElements];
}

IntStack::~IntStack() {  delete[] stack;  }
int IntStack::size() const { return numElements; }
int IntStack::maxSize() const { return maxElements; }
bool IntStack::isEmpty() const { return numElements == 0; }
bool IntStack::isFull() const { return numElements == maxElements; }
void IntStack::clear() { numElements = 0; }

bool IntStack::push(const int e) {
  if ( numElements == maxElements ) return false;
  else { stack[ numElements++ ] = e;  return true; }
}

bool IntStack::pop(int &e) {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  else { e = stack[ --numElements ];  return true; }
}

bool IntStack::top(int &e) const {
  if ( numElements < 1 ) return false;
  else { e = stack[ numElements-1 ];  return true; }
}

string IntStack::str() const {
  int i;   stringstream ss;
  ss << "|";
  for (i=0; i<numElements; ++i) ss << stack[i] << "|";
  for (; i<maxElements; ++i) ss << "␣|";
  return ss.str();
}
```

Exemplo de Implementação: IntStackMain.cpp

```
#include <iostream>
#include "IntStack.hpp"

using namespace std;

void print(IntStack &stack) {
  cout << "␣␣" << stack.str() << "␣␣size=" << stack.size() << "/" << stack.maxSize() << "␣␣top=";
  int t;   bool res = stack.top(t);
  if (res) cout << t; else cout << "X";
  cout << "␣␣isEmpty=" << stack.isEmpty() << "␣␣isFull=" << stack.isFull() << endl;
}

int main() {
  int e;
  bool res;
  cout << "IntStack(4):␣";  IntStack stack(4);  print(stack);
  e = 1;  cout << "push(" << e << "):␣"; res = stack.push(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  e = 2;  cout << "push(" << e << "):␣"; res = stack.push(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  e = 3;  cout << "push(" << e << "):␣"; res = stack.push(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  res = stack.pop(e); cout << "pop(" << e << "):␣␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  e = 4;  cout << "push(" << e << "):␣"; res = stack.push(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(stack);
  e = 5;  cout << "push(" << e << "):␣"; res = stack.push(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(stack);
  e = 6;  cout << "push(" << e << "):␣"; res = stack.push(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(stack);
  res = stack.pop(e); cout << "pop(" << e << "):␣␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  res = stack.pop(e); cout << "pop(" << e << "):␣␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  res = stack.pop(e); cout << "pop(" << e << "):␣␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  res = stack.pop(e); cout << "pop(" << e << "):␣␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  res = stack.pop(e); cout << "pop(X):␣␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(stack);
  e = 7;  cout << "push(" << e << "):␣"; res = stack.push(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(stack);
  cout << "clear():␣OK␣␣";  stack.clear();  print(stack);
  return 0;
}
```

Exemplo de Implementação (Saída)

```
IntStack(4):    | | | | |   size=0/4   top=X   isEmpty=1   isFull=0
push(1): OK     |1| | | |   size=1/4   top=1   isEmpty=0   isFull=0
push(2): OK     |1|2| | |   size=2/4   top=2   isEmpty=0   isFull=0
push(3): OK     |1|2|3| |   size=3/4   top=3   isEmpty=0   isFull=0
pop(3):  OK     |1|2| | |   size=2/4   top=2   isEmpty=0   isFull=0
push(4): OK     |1|2|4| |   size=3/4   top=4   isEmpty=0   isFull=0
push(5): OK     |1|2|4|5|   size=4/4   top=5   isEmpty=0   isFull=1
push(6): ERRO   |1|2|4|5|   size=4/4   top=5   isEmpty=0   isFull=1
pop(5):  OK     |1|2|4| |   size=3/4   top=4   isEmpty=0   isFull=0
pop(4):  OK     |1|2| | |   size=2/4   top=2   isEmpty=0   isFull=0
pop(2):  OK     |1| | | |   size=1/4   top=1   isEmpty=0   isFull=0
pop(1):  OK     | | | | |   size=0/4   top=X   isEmpty=1   isFull=0
pop(X):  ERRO   | | | | |   size=0/4   top=X   isEmpty=1   isFull=0
push(7): OK     |7| | | |   size=1/4   top=7   isEmpty=0   isFull=0
clear(): OK     | | | | |   size=0/4   top=X   isEmpty=1   isFull=0
```

Exercícios

Exercícios 1-3

1. Considerando como base a implementação da classe `IntStack` (apresentadas nas lâminas anteriores), implemente uma classe em C++ para gerenciar uma pilha de caracteres (`CharStack`).
2. Usando a classe `CharStack` (do exercício anterior), escreva um programa em C++, que inverte as letras de cada palavra de um texto terminado por ponto (.), preservando a ordem das palavras. Por exemplo, dado o texto:

   ```
   ETSE OICICREXE E OTIUM LICAF.
   ```

   A saída deve ser:

   ```
   ESTE EXERCICIO E MUITO FACIL.
   ```
3. Implemente uma função em C++ para criar uma nova cópia de uma pilha de caracteres (objeto da classe `CharStack`). A pilha deve ser criada usando `new`, deve ser uma cópia duplicada exatamente igual à pilha original e deve ser retornada como resultado da execução da função. Sua função deve ter o seguinte protótipo:
   `CharStack *copia(CharStack &p);`
   No retorno da função, o conteúdo da pilha recebida como parâmetro deve ser o mesmo da chamada.

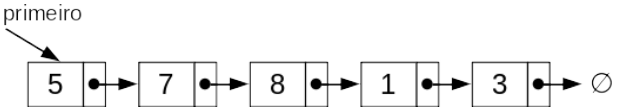
Exercícios 4-5

4. Implemente uma função em C++ para testar se duas pilhas de caracteres (objetos da classe `CharStack`) são iguais. Sua função deve ter o seguinte protótipo:
   `bool saoIguais(CharStack &p1, CharStack &p2);`
   Para que duas pilhas sejam consideradas iguais, elas devem ter o mesmo número de elementos nas mesmas posições; no entanto, o tamanho máximo das pilhas NÃO precisa ser igual. No retorno da função, o conteúdo das pilhas deve ser o mesmo da chamada.
5. Considerando ainda a classe `CharStack`, implemente uma função em C++, usando o conceito de pilha, para testar se uma palavra (`string`) recebida como parâmetro é um palíndromo ou não. Sua função deve ter o seguinte protótipo:
   `bool ehPalindromo(string s);`

Implementando uma Pilha Encadeada

Estruturas Lineares Encadeadas

- Uma estrutura encadeada é uma estrutura composta por nodos, que possuem campos que apontam para outros nodos
- Por exemplo, em uma lista simplesmente encadeada, tipicamente:
  - Há um ponteiro para o primeiro elemento da lista
  - Cada nodo tem um campo que aponta para o próximo elemento da lista
  - O campo de encadeamento do último elemento contém uma referência inválida



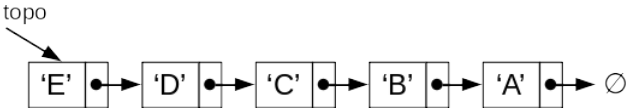
- Ao inserir um elemento, deve-se alocar um nodo, preenchê-lo e colocá-lo na posição desejada na estrutura (ajustando as referências necessárias)
- Ao remover um elemento, é preciso removê-lo (ajustando as referências necessárias) e desalocá-lo

Estruturas Encadeadas em C++

- Pode-se declarar um nodo em C++, para armazenar caracteres, da seguinte forma:

```
struct Node {
  char info;
  Node *next;
  Node(char l) {
    info = l;
    next = nullptr;
  }
};
```

- `nullptr` é usado para indicar uma estrutura vazia ou fim da estrutura
- Exemplo: construção da seguinte pilha simplesmente encadeada



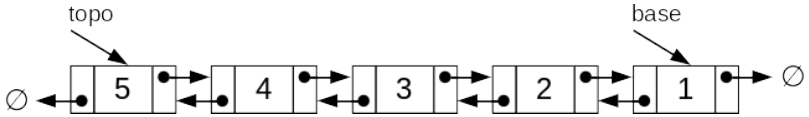
Exemplo: pilha_simplesmente_encadeada.cpp

```
#include <iostream>

using namespace std;

struct Node {
  char info;
  Node *next;
  Node(char i) {  info = i;  next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

int main() {
  Node *nodo1 = new Node('A');
  Node *nodo2 = new Node('B');
  Node *nodo3 = new Node('C');
  Node *nodo4 = new Node('D');
  Node *nodo5 = new Node('E');

  Node *topo  = nodo5;
  nodo5->next = nodo4;
  nodo4->next = nodo3;
  nodo3->next = nodo2;
  nodo2->next = nodo1;

  for (Node *aux = topo; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << aux->info << endl;

  while (topo != nullptr) {
        Node *aux = topo;
        topo = topo->next;
        delete aux;
  }

  return 0;
}
```

Exercícios

Exercícios 6 e 7

6. Modifique o programa da lâmina anterior para que a lista seja criada **com um laço**, exatamente com o mesmo conteúdo e na mesma ordem lógica. Faça as inserções sempre pela mesma extremidade da estrutura encadeada.
7. Usando como modelo o programa da lâmina anterior, construa em C++ a seguinte lista duplamente encadeada. Percorra a lista, mostrando o conteúdo de seus nodos, tanto do início para o fim, quanto do fim para o início.



Exercício 8

8. Usando como ponto de partida a classe `IntStack`, apresentada anteriormente e implementada usando alocação sequencial ou contígua, implemente a classe `IntLinkedStack`, que funciona da mesma forma, porém usando alocação encadeada. Observações:
   - A versão usando alocação encadeada eliminará a necessidade de se trabalhar com um limite máximo de elementos, consequentemente, os métodos `maxSize()` e `isFull()` NÃO farão parte da nova implementação.
   - A definição da classe (arquivo `IntLinkedStack.hpp`) e um programa de teste (arquivo `IntLinkedStackMain.cpp`) estão listados nas lâminas a seguir.

Exercício 8: IntLinkedStack.hpp

```
#ifndef _INTLINKEDSTACK_HPP
#define _INTLINKEDSTACK_HPP
#include <string>
using namespace std;

class IntLinkedStack {
private:
  int numElements;
  struct Node {
    int data;
    Node *next;
    Node(int d) {  data = d;  next = nullptr;  }
  };
  Node *stack;
public:
  IntLinkedStack();
  ~IntLinkedStack();
  void push(const int e);
  bool pop(int &e);
  bool top(int &e) const;
  int size() const;
  bool isEmpty() const;
  void clear();
  string str() const; // APENAS PARA DEPURACAO
};
#endif
```

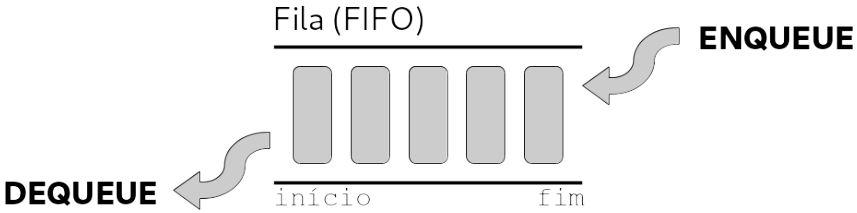
Exercício 8: IntLinkedStackMain.cpp

```
#include <iostream>
#include "IntLinkedStack.hpp"

using namespace std;

void print(IntLinkedStack &stack) {
  cout << "␣␣" << stack.str() << "␣␣size=" << stack.size() << "␣␣top=";
  int t;   bool res = stack.top(t);
  if (res) cout << t; else cout << "X";
  cout << "␣␣isEmpty=" << stack.isEmpty() << endl;
}

int main() {
  int vet[] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9};
  int numElements = sizeof(vet)/sizeof(int);
  IntLinkedStack stack;
  cout << "␣␣␣␣␣␣␣␣␣␣"; print(stack);
  for (int i=0; i<numElements; ++i) {
      cout << "push(" << vet[i] << "):␣␣";
      stack.push( vet[i] );
      print(stack);
  }
  for (int i=0; i<numElements+1; ++i) {
      int e;
      bool res = stack.pop( e );
      if ( !res ) cout << "pop(X):␣␣␣";
      else cout << "pop(" << e << "):␣␣␣";
      print(stack);
  }
  return 0;
}
```

Fila (*Queue*)

Fila ou *Queue*

- Usa a política *FIFO – First In First Out* (o primeiro que entrou, é o primeiro a sair)
- Possui uma entrada (fim), a partir da qual os dados são inseridos, e uma saída (início), a partir da qual os dados são removidos

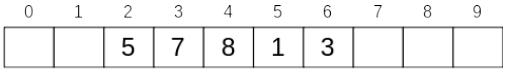


Aplicações que Usam Fila

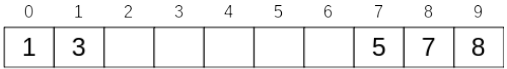
- Desenvolvimento de aplicativos
  - Gerenciamento de transações para aplicativos de lojas, teatros, centros de reserva, etc.
- Simulações
  - Listas de espera na simulação de sistemas de atendimento (banco, supermercado, etc.)
- Sistemas Operacionais
  - Fila de documentos para impressão
  - Escalonamento de processos em um sistema operacional
  - Fila de requisições de acesso a disco
  - Fila de espera por recursos
  - Fila (*buffering*) de mensagens e pacotes
- Estruturas de Dados
  - Suporte na implementação de algoritmos sobre árvores e grafos
- etc.

Fila: Implementações Possíveis

- **Arranjo (*buffer*) circular**

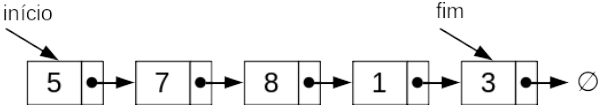


tam = 5 / tamMax = 10 / posInicio = 2 / posFim = 6

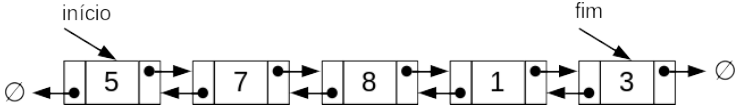


tam = 5 / tamMax = 10 / PosInicio = 7 / posFim = 1

- **Lista Simplesmente Encadeada**



- **Lista Duplamente Encadeada**



Implementação de um Arranjo Circular

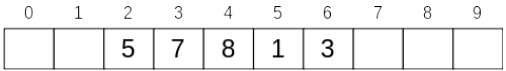
- Usam-se índices para inserção (`insertPos`) e remoção (`removePos`) que percorrem o arranjo (`queue`) de forma "circular"
- Para inserir pode-se usar:

```
queue[ insertPos++ ] = e;
insertPos %= maxElements; // Ou: if ( insertPos == maxElements ) insertPos = 0;
```

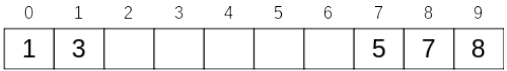
- Para remover pode-se usar:

```
e = queue[ removePos++ ];
removePos %= maxElements; // Ou: if ( removePos == maxElements ) removePos = 0;
```

- Deve-se verificar as situações de arranjo cheio (na inserção) e arranjo vazio (na remoção)
- Exemplos:



tam = 5 / tamMax = 10 / posInicio = 2 / posFim = 6



tam = 5 / tamMax = 10 / PosInicio = 7 / posFim = 1

Métodos do TAD Fila (*Queue*)

- `bool enqueue(e)`: insere o elemento no final da fila (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se NÃO houver espaço)
- `bool dequeue(&e)`: remove e retorna (por referência) o elemento do início da fila (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, a fila estiver vazia)
- `bool head(&e)` ou `bool front(&e)`: retorna (por referência) o elemento do início da fila, mas não o remove da fila (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, a fila estiver vazia)
- `int size()`: retorna o número de elementos da fila
- `int maxSize()`: retorna o número máximo de elementos suportado pela fila
- `bool isEmpty()`: retorna `true`, se a fila estiver vazia, ou `false`, em caso contrário
- `bool isFull()`: retorna `true`, se a fila estiver cheia, ou `false`, em caso contrário
- `void clear()`: esvazia a fila

Exemplo de Implementação: IntQueue.hpp

```
#ifndef _INTQUEUE_HPP
#define _INTQUEUE_HPP

#include <string>

using namespace std;

class IntQueue {
private:
  int numElements, maxElements;
  int insertPos, removePos;
  int *queue;
public:
  IntQueue(int mxSz = 10);
  ~IntQueue();
  int size() const;
  int maxSize() const;
  bool isEmpty() const;
  bool isFull() const;
  void clear();
  bool enqueue(const int e);
  bool dequeue(int &e);
  bool head(int &e) const;
  string str() const; // APENAS PARA DEPURACAO
};
#endif
```

Exemplo de Implementação: IntQueue.cpp

```
#include <sstream>
#include "IntQueue.hpp"

IntQueue::IntQueue(int mxSz) {
  numElements = insertPos = removePos = 0;   maxElements =  ( mxSz < 1 ) ? 10 : mxSz;  queue = new int[maxElements];
}

IntQueue::~IntQueue() {  delete[] queue;  }
int IntQueue::size() const { return numElements; }
int IntQueue::maxSize() const { return maxElements; }
bool IntQueue::isEmpty() const { return numElements == 0; }
bool IntQueue::isFull() const { return numElements == maxElements; }
void IntQueue::clear() { numElements = insertPos = removePos = 0; }

bool IntQueue::enqueue(const int e) {
  if ( numElements == maxElements ) return false;
  else { queue[ insertPos++ ] = e;  insertPos %= maxElements;  ++numElements;  return true; }
}

bool IntQueue::dequeue(int &e) {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  else { e = queue[ removePos++ ];  removePos %= maxElements; --numElements; return true; }
}

bool IntQueue::head(int &e) const {
  if ( numElements < 1 ) return false;
  else { e = queue[ removePos ];  return true; }
}

string IntQueue::str() const {
  stringstream ss;   ss << "|";
  for (int i=0; i<maxElements; ++i)
      if ( (removePos == insertPos && numElements != 0) ||
           (removePos < insertPos && (i >= removePos && i < insertPos)) ||
           (removePos > insertPos && (i >= removePos || i < insertPos)) ) ss << queue[i] << "|";
      else ss << "␣|";
  return ss.str();
}
```

Exemplo de Implementação: IntQueueMain.cpp

```
#include <iostream>
#include "IntQueue.hpp"

using namespace std;

void print(IntQueue &queue) {
  cout << "␣␣" << queue.str() << "␣␣size=" << queue.size() << "/" << queue.maxSize() << "␣␣head=";
  int h;   bool res = queue.head(h);
  if (res) cout << h; else cout << "X";
  cout << "␣␣isEmpty=" << queue.isEmpty() << "␣␣isFull=" << queue.isFull() << endl;
}

int main() {
  int e;
  bool res;
  cout << "IntQueue(4):␣␣␣␣"; IntQueue queue(4); print(queue);
  e = 1;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; res = queue.enqueue(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  e = 2;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; res = queue.enqueue(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  e = 3;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; res = queue.enqueue(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  e = 4;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; res = queue.enqueue(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(queue);
  e = 5;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; res = queue.enqueue(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(queue);
  e = 6;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; res = queue.enqueue(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(X):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  e = 7;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; res = queue.enqueue(e);  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO"); print(queue);
  cout << "clear():␣␣␣␣OK␣␣";  queue.clear();  print(queue);
  return 0;
}
```

Exemplo de Implementação (Saída)

```
IntQueue(4):        | | | | |   size=0/4   head=X   isEmpty=1   isFull=0
enqueue(1): OK      |1| | | |   size=1/4   head=1   isEmpty=0   isFull=0
enqueue(2): OK      |1|2| | |   size=2/4   head=1   isEmpty=0   isFull=0
enqueue(3): OK      |1|2|3| |   size=3/4   head=1   isEmpty=0   isFull=0
dequeue(1): OK      | |2|3| |   size=2/4   head=2   isEmpty=0   isFull=0
enqueue(4): OK      | |2|3|4|   size=3/4   head=2   isEmpty=0   isFull=0
enqueue(5): OK      |5|2|3|4|   size=4/4   head=2   isEmpty=0   isFull=1
enqueue(6): ERRO    |5|2|3|4|   size=4/4   head=2   isEmpty=0   isFull=1
dequeue(2): OK      |5| |3|4|   size=3/4   head=3   isEmpty=0   isFull=0
dequeue(3): OK      |5| | |4|   size=2/4   head=4   isEmpty=0   isFull=0
dequeue(4): OK      |5| | | |   size=1/4   head=5   isEmpty=0   isFull=0
dequeue(5): OK      | | | | |   size=0/4   head=X   isEmpty=1   isFull=0
dequeue(X): ERRO    | | | | |   size=0/4   head=X   isEmpty=1   isFull=0
enqueue(7): OK      | |7| | |   size=1/4   head=7   isEmpty=0   isFull=0
clear():    OK      | | | | |   size=0/4   head=X   isEmpty=1   isFull=0
```

Exercícios

Exercício 9

9. Considere duas estrutura de dados do tipo fila, chamadas `A` e `B`. Na fila `A`, foram inseridos (nessa ordem) os seguintes valores: 10, 20 e 30. E, na fila `B`, foram inseridos (nessa ordem) os seguintes valores: 30, 20 e 10. Para ambas as estruturas, considere as seguintes operações:
   - `dequeue(F)`: que remove um elemento da fila `F` e retorna esse elemento;
   - `enqueue(F, E)`: que insere o elemento `E` na fila `F`;
   - `head(F)`: que retorna o elemento do início da fila, sem removê-lo da estrutura.

   Quais serão as sequências de elementos nas filas `A` e `B`, após executar a expressão "`enqueue(A, dequeue(A) + dequeue(B) + head(A))`"?

Exercício 10

10. Usando como ponto de partida a classe `IntQueue`, apresentada anteriormente e implementada usando alocação sequencial ou contígua, implemente a classe `IntLinkedQueue`, que funciona da mesma forma, porém usando alocação encadeada. Observações:
    - A versão usando alocação encadeada eliminará a necessidade de se trabalhar com um limite máximo de elementos, consequentemente, os métodos `maxSize()` e `isFull()` NÃO farão parte da nova implementação.
    - A definição da classe (arquivo `IntLinkedQueue.hpp`) e um programa de teste (arquivo `IntLinkedQueueMain.cpp`) estão listados nas lâminas a seguir.

Exercício 10: IntLinkedQueue.hpp

```
#ifndef _INTLINKEDQUEUE_HPP
#define _INTLINKEDQUEUE_HPP
#include <string>
using namespace std;

class IntLinkedQueue {
private:
  int numElements;
  struct Node {
    int data;
    Node *next;
    Node(int d) {  data = d;  next = nullptr;  }
  };
  Node *queueHead, *queueTail;
public:
  IntLinkedQueue();
  ~IntLinkedQueue();
  int size() const;
  bool isEmpty() const;
  void enqueue(const int e);
  bool dequeue(int &e);
  bool head(int &e) const;
  void clear();
  string str() const; // APENAS PARA DEPURACAO
};
#endif
```

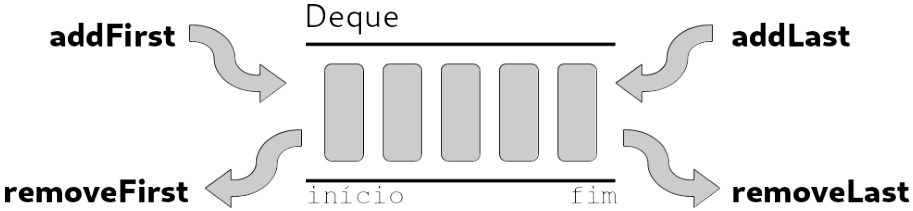
Exercício 10: IntLinkedQueueMain.cpp

```
#include <iostream>
#include "IntLinkedQueue.hpp"

using namespace std;

void print(IntLinkedQueue &queue) {
  cout << "␣␣" << queue.str() << "␣␣size=" << queue.size() << "␣␣head=";
  int h;   bool res = queue.head(h);
  if (res) cout << h; else cout << "X";
  cout << "␣␣isEmpty=" << queue.isEmpty() << endl;
}

int main() {
  int e;
  bool res;
  cout << "IntLinkedQueue:␣";  IntLinkedQueue queue;  print(queue);
  e = 1;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; queue.enqueue(e);  cout << "OK␣␣";  print(queue);
  e = 2;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; queue.enqueue(e);  cout << "OK␣␣";  print(queue);
  e = 3;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; queue.enqueue(e);  cout << "OK␣␣";  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  e = 4;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; queue.enqueue(e);  cout << "OK␣␣"; print(queue);
  e = 5;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; queue.enqueue(e);  cout << "OK␣␣"; print(queue);
  e = 6;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; queue.enqueue(e);  cout << "OK␣␣"; print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(" << e << "):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  res = queue.dequeue(e); cout << "dequeue(X):␣";  cout << (res?"OK␣␣":"ERRO");  print(queue);
  e = 7;  cout << "enqueue(" << e << "):␣"; queue.enqueue(e);  cout << "OK␣␣"; print(queue);
  cout << "clear():␣␣␣␣OK␣␣";  queue.clear();  print(queue);
  return 0;
}
```

Deque

Deque

- É uma abreviação de *Double-Ended QUEue*
- Trata-se de uma estrutura linear de dados, um pouco mais flexível do que pilhas ou filas, que permite inserções e remoções tanto no início quanto no final
- Possui, portanto, duas pontas (`frente` e `traseira` ou `front` e `back`), sendo possível selecionar qual será utilizada tanto para inserção quanto para remoção



Deque: Aplicações e Implementações

- É usado em aplicações onde, por exemplo:
  - Um item é removido da fila e por alguma razão precisa ser reinserido na posição que ocupava anteriormente
  - O último item da fila "desiste" de permanecer nela (por exemplo, devido à demora ou ao tamanho da fila)
- Pode ser implementado da mesma forma que uma fila:
  - Arranjo (*buffer*) circular
  - Lista Simplesmente Encadeada
  - Lista Duplamente Encadeada
- Há implementações bloqueantes, em que a primitiva de inserção fica bloqueada até haver espaço e a primitiva de remoção fica bloqueada até que exista um elemento para ser removido

Métodos do TAD Deque

- `bool addFirst(e)`: insere o elemento no início do deque (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se NÃO houver espaço)
- `bool addLast(e)`: insere o elemento no fim do deque (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se NÃO houver espaço)
- `bool removeFirst(&e)`: remove e retorna (por referência) o elemento do início do deque (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, o deque estiver vazio)
- `bool removeLast(&e)`: remove e retorna (por referência) o elemento do fim do deque (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, o deque estiver vazio)
- `bool first(&e)` ou `bool head(&e)` ou `bool front(&e)`: retorna (por referência) o elemento do início do deque, mas não o remove do deque (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, o deque estiver v
azio)
- `bool last(&e)` ou `bool tail(&e)` ou `bool back(&e)`: retorna (por referência) o elemento do fim do deque, mas não o remove do deque (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, o deque estiver vazio)
- `int size()`: retorna o número de elementos do deque
- `int maxSize()`: retorna o número máximo de elementos suportado pelo deque
- `bool isEmpty()`: retorna `true`, se o deque estiver vazio, ou `false`, em caso contrário
- `bool isFull()`: retorna `true`, se o deque estiver cheio, ou `false`, em caso contrário
- `void clear()`: esvazia o deque

Exercícios

Exercício 11

11 Considere as seguintes declarações para uma estrutura linear duplamente encadeada do tipo deque:

```
struct Node {
  char info;  Node *prev, *next;
  Node(char i) {  info = i;  prev = next = nullptr;  }
};
Node *esquerda = nullptr, *direita = nullptr;
```

E determine o estado final, na ordem correta, dos ponteiros e dos nodos dessa estrutura, depois da execução das seguintes operaçõess:

- Inserir as letras 'D', 'E', 'S', 'C', 'A', 'R', 'T', 'E' e 'S' (nesta ordem), cada uma em um nodo da lista, pela direita;
- Remover 3 letras do deque pela esquerda;
- Remover 4 letras do deque pela direita;
- Inserir as letras 'E', 'D', 'I', 'S', 'O' e 'N' (nesta ordem), cada uma em um nodo da lista, pela esquerda;
- Remover 5 letras do deque pela esquerda;
- Inserir as letras 'R', 'U', 'T', 'H', 'E', 'R', 'F', 'O', 'R' e 'D' (nesta ordem), cada uma em um nodo da lista, pela esquerda;
- Remover 8 letras do deque pela esquerda;
- Inserir as letras 'E', 'I', 'N', 'S', 'T', 'E', 'I' e 'N' (nesta ordem), cada uma em um nodo da lista, pela esquerda;
- Remover 7 letras do deque pela esquerda.

Exercício 12

12. Usando como ponto de partida os códigos apresentados e desenvolvidos anteriormente, implemente a classe `IntDoubleLinkedDeque`, que implementa um deque com uma lista duplamente encadeada.
    Observações:
    - Lembre-se que NÃO haverá necessidade de trabalhar com um limite máximo de elementos, consequentemente, os métodos `maxSize()` e `isFull()` NÃO farão parte da nova implementação.
    - A definição da classe (arquivo `IntDoubleLinkedDeque.hpp`) e um programa de teste (arquivo `IntDoubleLinkedDequeMain.cpp`) estão listados nas lâminas a seguir.

Exercício 12: IntDoubleLinkedDeque.hpp

```
#ifndef _INTDOUBLELINKEDDEQUE_HPP
#define _INTDOUBLELINKEDDEQUE_HPP
#include <string>
using namespace std;

class IntDoubleLinkedDeque {
private:
  int numElements;
  struct Node {
    int data;
    Node *prev, *next;
    Node(int d) {  data = d;  prev = next = nullptr;  }
  };
  Node *front, *back;
public:
  IntDoubleLinkedDeque();
  ~IntDoubleLinkedDeque();
  int size() const;
  bool isEmpty() const;
  void addFirst(const int e);   bool removeFirst(int &e);   bool first(int &e) const;
  void addLast(const int e);    bool removeLast(int &e);    bool last(int &e) const;
  void clear();
  string str() const;         // APENAS PARA DEPURACAO
  string reverseStr() const; // APENAS PARA DEPURACAO
};
#endif
```

Exercício 12: IntDoubleLinkedDequeMain.cpp

```
#include <iostream>
#include "IntDoubleLinkedDeque.hpp"

using namespace std;

void print(IntDoubleLinkedDeque &deque) {
  int h;  bool res;  cout << "␣␣" << deque.str() << "␣␣size=" << deque.size();
  cout << "␣␣first="; res = deque.first(h);  if (res) cout << h; else cout << "X";
  cout << "␣␣last=";  res = deque.last(h);   if (res) cout << h; else cout << "X";
  cout << "␣␣isEmpty=" << deque.isEmpty() << "␣␣reverse=" << deque.reverseStr() << endl;
}

int main() {
  int e;  bool res;
  cout << "IntDoubleLinkedDeque:␣";  IntDoubleLinkedDeque deque;  print(deque);
  e = 6;  cout << "addFirst(" << e << "):␣␣␣␣OK␣␣␣␣"; deque.addFirst(e);  print(deque);
  e = 7;  cout << "addLast(" << e << "):␣␣␣␣␣OK␣␣␣␣"; deque.addLast(e);  print(deque);
  e = 5;  cout << "addFirst(" << e << "):␣␣␣␣OK␣␣␣␣"; deque.addFirst(e);  print(deque);
  e = 8;  cout << "addLast(" << e << "):␣␣␣␣␣OK␣␣␣␣"; deque.addLast(e);  print(deque);
  e = 4;  cout << "addFirst(" << e << "):␣␣␣␣OK␣␣␣␣"; deque.addFirst(e);  print(deque);
  e = 9;  cout << "addLast(" << e << "):␣␣␣␣␣OK␣␣␣␣"; deque.addLast(e);  print(deque);
  res = deque.removeFirst(e); cout << "removeFirst(" << e << "):␣" << (res?"OK␣␣␣␣":"ERRO␣␣"); print(deque);
  res = deque.removeLast(e);  cout << "removeLast(" << e << "):␣␣" << (res?"OK␣␣␣␣":"ERRO␣␣"); print(deque);
  res = deque.removeLast(e);  cout << "removeLast(" << e << "):␣␣" << (res?"OK␣␣␣␣":"ERRO␣␣"); print(deque);
  res = deque.removeFirst(e); cout << "removeFirst(" << e << "):␣" << (res?"OK␣␣␣␣":"ERRO␣␣"); print(deque);
  res = deque.removeLast(e);  cout << "removeLast(" << e << "):␣␣" << (res?"OK␣␣␣␣":"ERRO␣␣"); print(deque);
  res = deque.removeFirst(e); cout << "removeFirst(" << e << "):␣" << (res?"OK␣␣␣␣":"ERRO␣␣"); print(deque);
  res = deque.removeLast(e);  cout << "removeLast(X):␣␣"          << (res?"OK␣␣␣␣":"ERRO␣␣"); print(deque);
  e = 2;  cout << "addLast(" << e << "):␣␣␣␣␣OK␣␣␣␣"; deque.addLast(e);  print(deque);
  cout << "clear():␣␣␣␣␣␣␣␣OK␣␣␣␣";  deque.clear();  print(deque);
  return 0;
}
```

Lista

Lista

- Uma lista é uma estrutura de dados que agrupa informações referentes a um conjunto de elementos relacionados entre si
- Há uma ordem lógica entre os elementos, que não corresponde necessariamente à ordem física
- A inserção e exclusão em uma lista é menos restritiva do que em pilhas, filas ou deques
- Isto significa que uma implementação de lista poderia ser usada para criar e gerenciar pilhas, filas e deques

Operações sobre Listas

- Algumas operações básicas sobre listas, envolvendo elementos (nodos), são:
  - Inserção (no início, no fim ou em uma posição específica)
  - Remoção (no início, no fim ou em uma posição específica)
  - Busca e acesso (através de índice ou através da informação de algum campo)
  - Alteração
- Também é comum aplicar operações sobre toda a lista, tais como:
  - Combinação de duas ou mais listas em uma única lista (concatenação ou *merge*)
  - Ordenação da lista segundo determinado critério

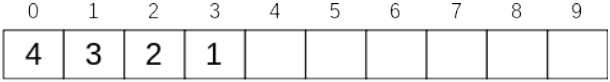
Opções de Implementação

- Usando arranjos
  - Maior desempenho no acesso
  - Apresentam maior dificuldade de inserção e remoção no início ou no meio
- Usando estruturas encadeadas
  - Menor desempenho no acesso
  - Muito mais flexível para inserir e remover nodos
  - Podem ser: simplesmente encadeadas, duplamente encadeadas, simplesmente encadeadas e circulares, duplamente encadeadas e circulares

Lista com Arranjo

Lista com Arranjo

- Consiste em um número fixo de posições **contíguas** e para o armazenamento de elementos do mesmo tipo
- Possui acesso direto facilitado e rápido, ou seja, o tempo de acesso é constante para qualquer elemento
- A inserção e a remoção de nodos no início ou no meio do arranjo tem alto custo, pois requer a movimentação de nodos ou para abrir espaço ou para evitar espaços não utilizados
- Geralmente é preciso definir o número máximo de elementos que serão armazenados (mudar esse tamanho pode ser possível, mas será custoso)

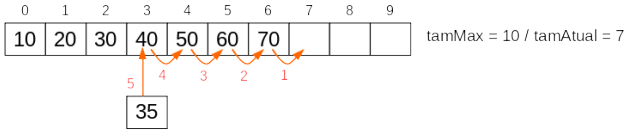


Métodos para um TAD Lista com Arranjo

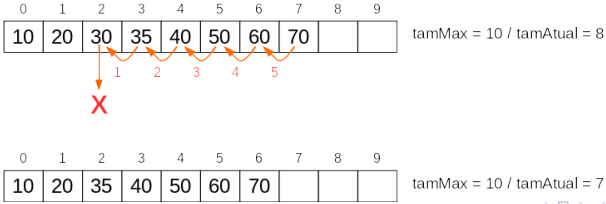
- `bool add(e)`: insere o elemento no final da lista (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se NÃO houver espaço)
- `bool add(index,e)`: insere o elemento em um índice específico da lista (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se NÃO houver espaço)
- `bool get(index, &e)`: retorna (por referência) o elemento do índice especificado (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se o índice for inválido)
- `bool set(index, e)`: atribui o elemento para a posição do índice especificado (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se o índice for inválido)
- `bool remove(index)`: remove o elemento do índice especificado da lista (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se o índice for inválido)
- `int size()`: retorna o número de elementos da lista
- `int maxSize()`: retorna o número máximo de elementos suportado pela lista
- `bool isEmpty()`: retorna `true`, se a lista estiver vazia, ou `false`, em caso contrário
- `bool isFull()`: retorna `true`, se a lista estiver cheia, ou `false`, em caso contrário
- `bool contains(e)`: retorna `true`, se o elemento existir na lista, ou `false`, em caso contrário
- `int indexOf(e)`: retorna o índice da primeira ocorrência do elemento na lista, se o elemento existir na lista, ou -1 em caso contrário
- `int indexOf(pos,e)`: retorna o índice da próxima ocorrência do elemento na lista a partir da posição especificada, se o elemento existir, ou -1 em caso contrário
- `void clear()`: esvazia a lista

Lista com Arranjo: Inserção e Exclusão

- Inserção: `arrayList->add(3,35)`



- Exclusão: `arrayList->remove(2)`



Exercício

Exercício 13

12. Usando como base a descrição dos métodos de um TAD Lista com Arranjo, implemente os métodos da classe `StringArrayList`, que implementa uma lista com um arranjo de tamanho predefinido. O arquivo de cabeçalho para esta classe (`StringArrayList.hpp`) e um programa de teste (`StringArrayListMain.cpp`).

Exercício 13: StringArrayList.hpp

```
#ifndef _STRINGARRAYLIST_HPP
#define _STRINGARRAYLIST_HPP

#include <string>

using namespace std;

class StringArrayList {
private:
  int numElements;
  int maxElements;
  string *list;
public:
  StringArrayList(int mxSz = 10);
  ~StringArrayList();
  void clear();
  int size() const;
  int maxSize() const;
  bool isEmpty() const;
  bool isFull() const;
  bool add(const string &s);
  bool add(const int index, const string &s);
  bool remove(const int index);
  bool get(const int index, string &s);
  bool set(const int index, const string &s);
  bool contains(const string &s);
  int indexOf(const string &s);
  int indexOf(int index, const string &s);
  string str() const;
};
#endif
```

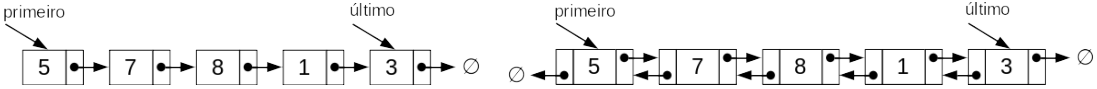
Exercício 13: StringArrayListMain.cpp

```
#include <iostream>
#include "StringArrayList.hpp"

int main() {
  StringArrayList *l = new StringArrayList(28);
  if ( l->maxSize() != 28 || !l->isEmpty() ) cerr << "ERR001" << endl;
  string saudacao[] = { "Bom ", "dia, ", "pessoal!", "Bom ", "dia, ", "Bom "};
  int tamSaudacao = sizeof(saudacao) / sizeof(string);
  l->add(saudacao[1]);  l->add(saudacao[2]);  l->add(0,saudacao[0]);  l->add(saudacao[3]);  l->add(saudacao[4]);  l->add(saudacao[5]);
  if ( l->contains("teste") ) cerr << "ERR002" << endl;
  if ( !l->contains(saudacao[0]) || !l->contains(saudacao[1]) || !l->contains(saudacao[2]) ) cerr << "ERR003" << endl;
  for (int i=0; i<l->size(); ++i) if ( l->indexOf(i,saudacao[i]) != i ) cerr << "ERR004" << endl;
  if ( l->indexOf(saudacao[0])!=0 || l->indexOf(saudacao[1])!=1 || l->indexOf(saudacao[2])!=2) cerr << "ERR005" << endl;
  l->remove( l->size()-1 );  l->remove( l->size()-1 );  l->remove( l->size()-1 );
  cout << l->str() << endl;
  if ( l->size() != 3 || l->isFull() || l->isEmpty() ) cerr << "ERR006" << endl;
  for (int i=0; i<l->size(); ++i) {  string s;  bool res = l->get(i,s);  if ( !res || s != saudacao[i] ) cerr << "ERR007" << endl;  }
  l->add("dinâmica.");  l->remove(1);          l->remove(0);          l->remove(0);
  l->add(0,"Lista ");   l->add(1,"ligada ");   l->add(2,"é ");        l->add(3,"uma ");        l->add(4,"estrutura ");
  l->add(5,"de ");      l->add(6,"dados ");    l->add(7,"estranha ");  l->add(8,"e ");        l->remove(7);
  l->add(7,"linear ");  l->add(2,"ou ");       l->add(3,"lista ");     l->add(4,"encadeada ");
  cout << l->str() << endl;
  if ( l->size() != 13 || l->isFull() || l->isEmpty() ) cerr << "ERR008" << endl;
  l->clear();
  if ( l->str()!= "" || l->size()!=0 || l->maxSize() != 28 || !l->isEmpty() ) cerr << "ERR009" << endl;
  string palavras[] = { "apontam ", "que ", "referências ", "duas ", "ou ", "uma ", "também ", "e ", "dados ", "contém ", "nodo ",
                        "cada ", "que ", "sendo ", "nodos, ", "de ", "sequência ", "uma ", "por ", "composta ", "é ", "Ela " };
  int tamPalavras = sizeof(palavras) / sizeof(string);
  for (int i=0; i<tamPalavras; ++i) l->add("?");
  for (int i=tamPalavras-1; i>=0; --i) l->set(tamPalavras-1-i,palavras[i]);
  if ( l->size() != 22 || l->isFull() || l->isEmpty() ) cerr << "ERR010" << endl;
  l->add("anterior ");  l->add("ou ");  l->add("posterior.");  l->add(22,"para ");  l->add(23,"o ");  l->add(24,"nodo ");
  cout << l->str() << endl;
  if ( l->size() != 28 || !l->isFull() || l->isEmpty() || l->add(".") || l->add(0,".") ) cerr << "ERR011" << endl;
  delete l;
  return 0;
}
```

Lista Encadeada

Lista Encadeada

- Armazena elementos do mesmo tipo em uma estrutura formada por nodos (não necessariamente contíguos na memória), cada nodo contendo uma referência para o nodo seguinte (lista simplesmente encadeada) e eventualmente também uma referência para o nodo anterior (lista duplamente encadeada)



- Para acessar determinado elemento, será preciso percorrer a lista...
- No entanto, inserir elementos na lista ou removê-los não exigirá deslocamentos de nodos, apenas ajustes em algumas poucas referências!

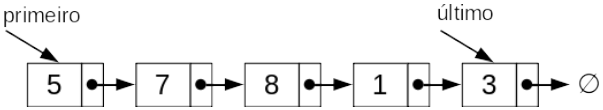
Métodos para um TAD Lista Encadeada

- `int size()`: retorna o número de elementos da lista
- `bool isEmpty()`: retorna `true`, se a lista estiver vazia, ou `false`, em caso contrário
- `void clear()`: esvazia a lista
- `void push_front(e)`: insere o elemento no início da lista
- `void push_back(e)`: insere o elemento no final da lista
- `bool insert(index, e)`: insere o elemento no índice especificado da lista
- `bool pop_front()`: remove o elemento do início da lista (retorna `false` se a lista estiver vazia)
- `bool pop_back()`: remove o elemento do final da lista (retorna `false` se a lista estiver vazia)
- `bool remove(index)`: remove o elemento do índice especificado da lista (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se o índice for inválido)
- `bool get(index, &e)`: retorna (por referência) o elemento do índice especificado (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se o índice for inválido)
- `bool set(index, e)`: atribui o elemento para a posição do índice especificado (retorna `true`, em caso de sucesso, ou `false`, se o índice for inválido)
- `bool contains(e)`: retorna `true`, se o elemento existir na lista, ou `false`, em caso contrário
- `int indexOf(e)`: retorna o índice da primeira ocorrência do elemento na lista, ou -1 se o elemento não existir
- `int indexOf(pos,e)`: retorna o índice da próxima ocorrência do elemento na lista a partir da posição especificada, ou -1 se o elemento não existir a partir dessa posição

Lista Simplesmente Encadeada

Lista Simplesmente Encadeada

- É uma estrutura encadeada onde cada nodo, além da informação, guarda apenas uma referência para o próximo nodo



- Em C++, usando `struct`, seria possível declarar, por exemplo, uma lista simplesmente encadeada de valores inteiros usando:

```
struct Node {
  int info;
  Node *next;
  Node(int i) {  info = i;  next = nullptr;  }
};
```

- Pode-se trabalhar com dois ponteiros, um para o início (por exemplo, `head`) e outro (opcional, mas desejável) para o fim da lista (por exemplo, `tail`)

```
Node *head = nullptr, *tail = nullptr;
```

Lista Simplesmente Encadeada

- Inserir ou remover em uma lista simplesmente encadeada exige localizar o elemento anterior, o que pode exigir percorrer a lista a partir do início
  - Inserir ou remover no meio de uma lista duplamente encadeada é mais simples
- Para inserir em uma lista encadeada é preciso: alocar um novo nodo, inserir as informações nele e encadeá-lo na lista
- Para remover de uma lista encadeada é preciso: recuperar a informação (se necessário), ajustar os encadeamentos da lista e desalocar o nodo
- Operações em listas simplesmente encadeadas
  - Inserção no início: simples
  - Inserção no meio: exige referência para o elemento anterior
  - Inserção no final: simples
  - Remoção do início: simples
  - Remoção do meio: exige referência para o elemento anterior
  - Remoção do final: exige referência para o elemento anterior

Lista Simplesmente Encadeada: Inserção

- Inserção no início

```
Node *node = new Node(info);
node->next = head;
head = node;
if ( tail == nullptr ) tail = node;
```

- Inserção no meio

```
// aux aponta para nodo antes do qual se quer inserir
// ant aponta para nodo anterior a aux
Node *node = new Node(info);
ant->next = node;
node->next = aux;
```

- Inserção no final

```
Node *node = new Node(info);
tail->next = node;
tail = node;
```

Lista Simplesmente Encadeada: Remoção

- Remoção do início

```
if ( head != nullptr ) {
   Node *aux = head;
   head = head->next;
   if ( head == nullptr ) tail = nullptr;
   delete aux;
}
```

- Remoção do meio

```
// aux aponta para nodo que se quer remover
// ant aponta para nodo anterior a aux
ant->next = aux->next;
if ( aux->next == nullptr ) tail = ant;
delete aux;
```

- Remoção do final

```
// ant aponta para nodo anterior a tail
ant->next = nullptr;
delete tail;
tail = ant;
```

Exercícios

Exercício 14

14 Considere o código abaixo, que cria uma lista simplesmente encadeada formada por 4 nodos, respectivamente, com as letras 'B', 'C', 'E' e 'F' como conteúdo. Modifique este código para inserir na lista, **no ponto indicado no código**, um nodo com a letra 'D', na posição correta da lista, mantendo-se a ordem alfabética crescente. Depois, teste o seu código (e adapte-o se necessário) para inserir, na posição correta, tanto a letra 'A' quanto a letra 'G'.

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct Node {
  char info;  Node *next;
  Node(char i) {  info = i;  next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

int main() {
  Node *head = nullptr, *tail = nullptr;  // Criação
  for (char l='B'; l<='F'; l++) {
      if (l == 'D') continue; // Evita que o Node com a info 'D' seja inserido na lista...
      Node *aux = new Node(l);
      if ( tail == nullptr ) {  head = tail = aux;  }
      else {  tail->next = aux;  tail = aux;  }
  }

  // Coloque a solução aqui!

  cout << "head-->";  // Exibição
  for (Node *aux = head; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << "|" << aux->info << (aux->next==nullptr?"|X| ":"|| ->");
  cout << " <--tail" << endl;
  while ( head != nullptr ) {  Node *aux = head;  head = head->next;  delete aux;  }  // Desalocação
  return 0;
}
```

Exercício 15

15 Considere o código abaixo, que cria uma lista simplesmente encadeada formada por 5 nodos, respectivamente, com as letras 'A', 'D', 'C', 'B' e 'E' como conteúdo. Modifique este código para trocar, **no ponto indicado no código**, a posição dos nodos que contêm 'D' e 'B' na lista.

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct Node {
  char info;  Node *next;
  Node(char i) {  info = i;  next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

int main() {
  string s = "ADCBE";  Node *head = nullptr, *tail = nullptr;  // Criação
  for (int i=0; i<s.length(); ++i) {
      Node *aux = new Node( s[i] );
      if ( tail == nullptr ) {  head = tail = aux;  }
      else {  tail->next = aux;  tail = aux;  }
  }

  // Coloque a solução aqui!

  cout << "head-->";  // Exibição
  for (Node *aux = head; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << "|" << aux->info << (aux->next==nullptr?"|X| ":"|| ->");
  cout << " <--tail" << endl;
  while (head != nullptr) {  Node *aux = head;  head = head->next;  delete aux;  }  // Desalocação
  return 0;
}
```

Exercício 16

16. Implemente uma aplicação para gerenciar uma **lista simplesmente encadeada** em que os nós armazenam uma letra (`char`) e um ponteiro para o próximo elemento. A aplicação deve permitir interativamente a inserção de letras na lista a partir de um pequeno conjunto de operações fornecidas pela entrada padrão (terminal). As operações e seus parâmetros são indicadas pelos seguintes caracteres:
    - '<' (menor) e letra: insere a letra especificada no início da lista;
    - '>' (maior) e letra: insere a letra especificada no fim da lista;
    - '+' (mais), letra e índice: insere a letra especificada no índice especificado da lista;
    - '{' (abre-chaves): remove a letra/nodo do início da lista (imprime "ERRO" se a lista estiver vazia);
    - '}' (fecha-chaves): remove a letra/nodo do final da lista (imprime "ERRO" se a lista estiver vazia);
    - '-' (menos) e índice: remove o elemento no índice especificado (imprime "ERRO" se o índice for inválido);
    - '.' (ponto): encerra a aplicação.

    No laço principal da sua aplicação, sempre antes de ler a especificação de uma operação, mostre o conteúdo da lista. Use o arquivo `exercicio16.input` (dentro do arquivo `src.zip`) como entrada para testar o seu programa.

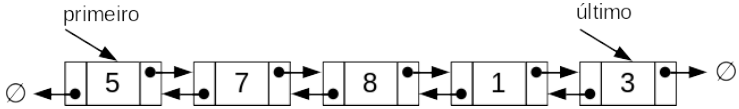
Exercício 16: exercicio16-template.cpp

```cpp
#include <iostream>

using namespace std;

struct Node {
  char info;  Node *next;
  Node(char i) {  info = i;  next = nullptr;  }
};

int main() {
  Node *head = nullptr, *tail = nullptr, *aux;  char c;  bool fim = false;  unsigned pos;
  cout << "'<' = PUSH_FRONT / '>' = PUSH_BACK / '{' = POP_FRONT / '}' = POP_BACK '+' = INSERT / '-' = REMOVE / '.' = QUIT" << endl;
  while (!fim) {
    aux = head;  // Mostra a lista
    while ( aux != nullptr ) {  cout << "|" << aux->info;  aux = aux->next;  }
    cout << "|" << endl;
    cin >> c;
    switch(c) {
      case '<':  cin >> c;          /* ... */  break;
      case '>':  cin >> c;          /* ... */  break;
      case '+':  cin >> c >> pos;   /* ... */  break;
      case '}':                     /* ... */  break;
      case '{':                     /* ... */  break;
      case '-':  cin >> pos;        /* ... */  break;
      case '.':  fim = true;                   break;
    }
  }
  while ( head != nullptr ) {  aux = head;  head = head->next;  delete aux; } // Desaloca a lista
  return 0;
}
```

Lista Duplamente Encadeada

Lista Duplamente Encadeada

- É uma estrutura encadeada onde cada nodo, além da informação, guarda uma referência para o próximo nodo e uma referência para o nodo anterior



- Em C++, usando `struct`, seria possível declarar, por exemplo, uma lista simplesmente encadeada de valores inteiros usando:

```
struct Node {
  int info;
  Node *prev, *next;
  Node(int i) {  info = i;  prev = next = nullptr;  }
};
```

- Também são usados dois ponteiros, um para o início (por exemplo, `head`) e outro (opcional, mas desejável) para o fim da lista (por exemplo, `tail`)

```
Node *head = nullptr, *tail = nullptr;
```

Lista Duplamente Encadeada

- Para inserir ou remover em uma lista duplamente encadeada basta ter a posição de inserção ou remoção, NÃO sendo necessário percorrer a lista a partir do início
  - É mais fácicl inserir ou remover em uma lista duplamente encadeada do que em uma lista simplesmente encadeada
- Para inserir em uma lista encadeada é preciso: alocar um novo nodo, inserir as informações nele e encadeá-lo na lista
- Para remover de uma lista encadeada é preciso: recuperar a informação (se necessário), ajustar os encadeamentos da lista e desalocar o nodo

Lista Duplamente Encadeada: Inserção

- Inserção no início

```
Node *node = new Node(info);
if ( head == nullptr ) { head = tail = node; }
else {
  node->next = head;
  head->prev = node;
  head = node;
}
```

- Inserção no meio

```
// aux aponta para nodo antes do qual se quer inserir
Node *node = new Node(info);
node->prev = aux->prev;
node->next = aux;
(aux->prev)->next = node;
aux->prev = node;
```

- Inserção no final

```
Node *node = new Node(info);
node->prev = tail;
tail->next = node;
tail = node;
```

Lista Duplamente Encadeada: Remoção

- Remoção do início

```
if ( head != nullptr ) {
   Node *aux = head;
   head = head->next;
   if ( head == nullptr ) tail = nullptr;
   else head->prev = nullptr;
   delete aux;
}
```

- Remoção do meio

```
// aux aponta para nodo que se quer remover
(aux->prev)->next = aux->next;
if ( aux->next == nullptr ) tail = aux->prev;
else (aux->next)->prev = aux->prev;
delete aux;
```

- Remoção do final

```
Node *aux = tail;
tail = tail->prev;
if ( tail == nullptr )  head = nullptr;
else tail->next = nullptr;
delete aux;
```

Exercícios

Exercício 17

17 Considere uma **lista simplesmente encadeada**, com referências para o início e para o final, cujos nodos foram declarados da seguinte forma:

```
struct Node {
  int info;  Node *next;
  Node(int i) {  info = i;  next = nullptr;  }
};
```

Implemente uma função que recebe os ponteiros para o início e para o final da lista (por referência) e inverte a lista. A função deve ter o seguinte protótipo:

```
void reverse(Node **head, Node **tail);
```

18 Considere uma **lista duplamente encadeada**, com referências para o início e para o final, cujos nodos foram declarados da seguinte forma:

```
struct Node {
  int info;  Node *prev, *next;
  Node(int i) {  info = i;  prev = next = nullptr;  }
};
```

Implemente uma função que recebe os ponteiros para o início e para o final da lista (por referência) e inverte a lista. A função deve ter o seguinte protótipo:

```
void reverse(Node **head, Node **tail);
```

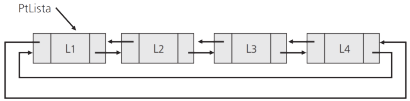
Lista Circular

Lista Circular

- Uma lista circular é um tipo especial de estrutura encadeada onde o último elemento aponta para o primeiro (não usando-se, neste caso, `nullptr` para indicar o final da lista)
- É possível ter listas circulares:
  - Simplesmente encadeadas: a busca somente ocorre em um sentido

```
struct Node {
  int info;  Node *next;
  Node(int i) {  info = i;  next = nullptr;  }
};
```

  - Duplamente encadeadas: a busca pode ocorrer em qualquer sentido




```
struct Node {
  int info;  Node *prev, *next;
  Node(int i) {  info = i;  prev = next = nullptr;  }
};
```

Lista Circular

- Observe que nada muda nas declarações em relação às versões não circulares
- Se a lista circular é duplamente encadeada, NÃO há a necessidade de um ponteiro para o final da listas
- Com listas circulares simplesmente encadeadas, um ponteiro para o final da lista é desejável
- Exemplo de aplicação: **Lista de processos prontos para serem executados em um sistema operacional com algoritmo de escalonamento *Round Robin***
  - *Round Robin* é um escalonamento preemptivo que divide uniformemente o tempo da UCP entre todos os processos prontos para a execução
  - Processos são mantidos em uma lista de prontos circular e duplamente encadeada
  - Cada processo tem uma fatia de tempo máxima (*time slice* ou *quantum*) para usar o processador
  - Se o processo termina a sua computação antes do final da fatia de tempo, ele sai da lista
  - Se o processo usa toda a sua fatia de tempo, o ponteiro da lista é apontado para o próximo processo

Créditos

Créditos

- Estas lâminas contêm trechos inspirados em materiais criados e disponibilizados pelos professores Isabel Harb Manssour e Iaçanã Ianiski Weber.

Soluções

Exercício 1: CharStack.hpp

```
#ifndef _CHARSTACK_HPP
#define _CHARSTACK_HPP

#include <string>

using namespace std;

class CharStack {
private:
  int numElements;
  int maxElements;
  char *stack;
public:
  CharStack(int mxSz = 10);
  ~CharStack();
  bool push(const char e);
  bool pop(char &e);
  bool top(char &e) const;
  int size() const;
  int maxSize() const;
  bool isEmpty() const;
  bool isFull() const;
  void clear();
  string str() const; // APENAS PARA DEPURACAO
};
#endif
```

Exercício 1: CharStack.cpp

```cpp
#include <sstream>
#include "CharStack.hpp"

CharStack::CharStack(int mxSz) {
  numElements = 0;   maxElements =  ( mxSz < 1 ) ? 10 : mxSz;
  stack = new char[maxElements];
}

CharStack::~CharStack() {  delete[] stack;  }

bool CharStack::push(const char e) {
  if ( numElements == maxElements ) return false;
  else { stack[ numElements++ ] = e;  return true; }
}

bool CharStack::pop(char &e) {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  else { e = stack[ --numElements ];  return true; }
}

bool CharStack::top(char &e) const {
  if ( numElements < 1 ) return false;
  else { e = stack[ numElements-1 ];  return true; }
}

int CharStack::size() const { return numElements; }
int CharStack::maxSize() const { return maxElements; }
bool CharStack::isEmpty() const { return numElements == 0; }
bool CharStack::isFull() const { return numElements == maxElements; }
void CharStack::clear() { numElements = 0; }

string CharStack::str() const {
  int i;   stringstream ss;
  ss << "|";
  for (i=0; i<numElements; ++i) ss << stack[i] << "|";
  for (; i<maxElements; ++i) ss << "␣|";
  return ss.str();
}
```

Exercício 2: exercicio02.cpp

```
#include <iostream>
#include "CharStack.hpp"

using namespace std;

string invertePalavrasDaFrase(string frase) {
  char ch;
  CharStack stack(frase.length());
  string res = "";
  for (int i=0; i<frase.size(); ++i) {
      char c = frase[i];
      if (c == '.' || c == ' ') {
         while ( stack.pop(ch) ) res += ch;
         res += c;
      }
      else if ( !stack.push(c) ) cerr << "ERRO!" << endl;
  }
  while ( stack.pop(ch) ) res += ch;
  return res;
}

int main() {
  string frase1 = "ETSE␣OICICREXE␣E␣OTIUM␣LICAF.";
  cout << frase1 << endl;
  cout << invertePalavrasDaFrase(frase1) << endl;
  return 0;
}
```

Exercício 3: exercicio03.cpp

```
#include <iostream>
#include "CharStack.hpp"

using namespace std;

CharStack *copia(CharStack &p) {
  char c;
  int tam = p.size(), tamMax = p.maxSize();
  CharStack *res = new CharStack(tamMax);
  CharStack *aux = new CharStack(tam);
  while ( !p.isEmpty() ) {  p.pop(c);  aux->push(c);  }
  while ( !aux->isEmpty() ) {  aux->pop(c);  p.push(c);  res->push(c);  }
  delete aux;
  return res;
}

int main() {
  CharStack p1(28), *p2;
  for (int i=0; i<26; ++i) {  char c = 'A'+i;  p1.push(c);  }
  cout << "p1: " << p1.str() << "  " << p1.size() << "/" << p1.maxSize() << endl;
  cout << "Copiando..." << endl;
  p2 = copia(p1);
  cout << "p1: " << p1.str() << "  " << p1.size() << "/" << p1.maxSize() << endl;
  cout << "p2: " << p2->str() << "  " << p2->size() << "/" << p2->maxSize() << endl;
  delete p2;
  return 0;
}
```

Exercício 4: exercicio04.cpp

```
#include <iostream>
#include "CharStack.hpp"

using namespace std;

bool saoIguais(CharStack &p1, CharStack &p2) {
  int tam = p1.size();
  if ( tam != p2.size() ) return false;
  CharStack *aux = new CharStack(tam);
  bool res = true;
  while (tam > 0) {
        char t1, t2;  p1.pop(t1);  p2.pop(t2);
        if (t1 != t2) {  p1.push(t1); p2.push(t2);  res = false;  break;  }
        aux->push(t1);
        --tam;
  }
  while ( !aux->isEmpty() ) {  char c;  aux->pop(c);  p1.push(c);  p2.push(c);  }
  delete aux;
  return res;
}

int main() {
  CharStack p1(10), p2(15), p3(20), p4(5);
  for (int i=0; i<5; ++i) {  char c = 'A'+i;  p1.push(c);  p2.push(c);  p3.push(c);  p4.push(c);  }
  p1.push('F');  p2.push('G');  p3.push('F');
  for (int i=0; i<3; ++i) {  char c = 'H'+i;  p1.push(c);  p2.push(c);  p3.push(c);  p4.push(c);  }
  cout << "p1:␣" << p1.str() << endl << "p2:␣" << p2.str() << endl << "p3:␣" << p3.str() << endl << "p4:␣" << p4.str() << endl;
  cout << "p1␣==␣p2?␣" << (saoIguais(p1,p2)?"S":"N") << endl;
  cout << "p1␣==␣p3?␣" << (saoIguais(p1,p3)?"S":"N") << endl;
  cout << "p1␣==␣p4?␣" << (saoIguais(p1,p4)?"S":"N") << endl;
  cout << "p2␣==␣p3?␣" << (saoIguais(p2,p3)?"S":"N") << endl;
  cout << "p2␣==␣p4?␣" << (saoIguais(p2,p4)?"S":"N") << endl;
  cout << "p3␣==␣p4?␣" << (saoIguais(p3,p4)?"S":"N") << endl;
  cout << "p1:␣" << p1.str() << endl << "p2:␣" << p2.str() << endl << "p3:␣" << p3.str() << endl << "p4:␣" << p4.str() << endl;
  return 0;
}
```

Exercício 5: exercicio05.cpp

```
#include <iostream>
#include "CharStack.hpp"

using namespace std;

bool ehPalindromo(string s) {
  CharStack p( s.size() );
  char c;
  string sInv = "";
  for (int i=0; i<s.size(); ++i)
      p.push(s[i]);
  while ( !p.isEmpty() ) {  p.pop(c);  sInv.append(1,c);  }
  return s == sInv;
}

int main() {
  string s;
  s = "ABASEDOTETODESABA";  cout << s << ": " << (ehPalindromo(s)?"PALINDROMO":"-") << endl;
  s = "LUZAZUL";            cout << s << ": " << (ehPalindromo(s)?"PALINDROMO":"-") << endl;
  s = "oloboamaobolo";      cout << s << ": " << (ehPalindromo(s)?"PALINDROMO":"-") << endl;
  s = "ABCDEDCB";           cout << s << ": " << (ehPalindromo(s)?"PALINDROMO":"-") << endl;
  return 0;
}
```

Exercício 6: pilha_simplesmente_encadeada2.cpp

```cpp
#include <iostream>

using namespace std;

struct Node {
  char info;
  Node *next;
  Node(char i) {  info = i;  next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

int main() {
  Node *topo = nullptr;
  for (char c = 'A'; c <= 'E'; ++c) {
      Node *aux = new Node(c);
      aux->next = topo;
      topo = aux;
  }

  for (Node *aux = topo; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << aux->info << endl;

  while (topo != nullptr) {
        Node *aux = topo;
        topo = topo->next;
        delete aux;
  }

  return 0;
}
```

Exercício 7: pilha_duplamente_encadeada.cpp

```cpp
#include <iostream>

using namespace std;

struct Node {
  int info;
  Node *prev, *next;
  Node(int i) {  info = i;  prev = next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruído..." << endl;  }
};

int main() {
  Node *node1 = new Node(1);
  Node *node2 = new Node(2);
  Node *node3 = new Node(3);
  Node *node4 = new Node(4);
  Node *node5 = new Node(5);

  Node *topo  = node5;       node5->next = node4;
  node4->prev = node5;       node4->next = node3;
  node3->prev = node4;       node3->next = node2;
  node2->prev = node3;       node2->next = node1;
  node1->prev = node2;       Node *base  = node1;

  for (Node *aux = topo; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << aux->info << endl;
  for (Node *aux = base; aux != nullptr; aux = aux->prev)
      cout << aux->info << endl;

  while (topo != nullptr) {
        Node *aux = topo;
        topo = topo->next;
        delete aux;
  }

  return 0;
}
```

Exercício 8: IntLinkedStack.cpp

```cpp
#include <sstream>
#include "IntLinkedStack.hpp"

IntLinkedStack::IntLinkedStack() {  numElements = 0;  stack = nullptr;  }
IntLinkedStack::~IntLinkedStack() {  clear();  }
int IntLinkedStack::size() const {  return numElements;  }
bool IntLinkedStack::isEmpty() const {  return numElements == 0;  }

void IntLinkedStack::push(const int e) {
  Node *aux = new Node(e);
  aux->next = stack;   stack = aux;
  ++numElements;
}

bool IntLinkedStack::pop(int &e) {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  --numElements;       e = stack->data;
  Node *aux = stack;   stack = stack->next;    delete aux;
  return true;
}

bool IntLinkedStack::top(int &e) const {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  else {  e = stack->data;  return true;  }
}

void IntLinkedStack::clear() {
  while (stack != nullptr) {  Node *aux = stack;   stack = stack->next;   delete aux;  }
  numElements = 0;
}

string IntLinkedStack::str() const {
  stringstream ss;
  ss << "|";
  for (Node *aux = stack; aux != nullptr; aux = aux->next)
      ss << aux->data << "|";
  return ss.str();
}
```

Exercício 9

```
// inicial
A = { 10, 20, 30 }   B = { 30, 20, 10 }

// após dequeue(A) tem-se "10 + dequeue(B) + head(A)"
A = { 20, 30 }       B = { 30, 20, 10 }

// após dequeue(B) tem-se "10 + 30 + head(A)"
A = { 20, 30 }       B = { 20, 10 }

// após head(A) tem-se "10 + 30 + 20 = 60"
A = { 20, 30 }       B = { 20, 10 }

// resposta final, após "enqueue(A, 60)"
A = { 20, 30, 60 }   B = { 20, 10 }
```

Exercício 10: IntLinkedQueue.cpp

```cpp
#include <sstream>
#include "IntLinkedQueue.hpp"

IntLinkedQueue::IntLinkedQueue() {  numElements = 0;  queueHead = queueTail = nullptr;  }
IntLinkedQueue::~IntLinkedQueue() {  clear();  }
int IntLinkedQueue::size() const {  return numElements;  }
bool IntLinkedQueue::isEmpty() const {  return numElements==0;  }

void IntLinkedQueue::enqueue(const int e) {
  Node *aux = new Node(e);
  if ( queueHead == nullptr) {  queueHead = queueTail = aux;  }
  else {  queueTail->next = aux;   queueTail = aux;  }
  ++numElements;
}

bool IntLinkedQueue::dequeue(int &e) {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  --numElements;  e = queueHead->data;  Node *aux = queueHead;  queueHead = queueHead->next;  delete aux;
  return true;
}

bool IntLinkedQueue::head(int &e) const {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  else {  e = queueHead->data;  return true; }
}

void IntLinkedQueue::clear() {
  while (queueHead != nullptr) {  Node *aux = queueHead;   queueHead = queueHead->next;   delete aux;  }
  numElements = 0;
}

string IntLinkedQueue::str() const {
  stringstream ss;
  ss << "|";
  for (Node *aux = queueHead; aux != nullptr; aux = aux->next)
      ss << aux->data << "|";
  return ss.str();
}
```

Exercício 11

```
esquerda --> || <-- direita

esquerda --> |'D'|'E'|'S'|'C'|'A'|'R'|'T'|'E'|'S'| <-- direita
esquerda --> |'C'|'A'|'R'|'T'|'E'|'S'| <-- direita
esquerda --> |'C'|'A'| <-- direita
esquerda --> |'N'|'O'|'S'|'I'|'D'|'E'|'C'|'A'| <-- direita
esquerda --> |'E'|'C'|'A'| <-- direita
esquerda --> |'D'|'R'|'O'|'F'|'R'|'E'|'H'|'T'|'U'|'R'|'E'|'C'|'A'| <-- direita
esquerda --> |'U'|'R'|'E'|'C'|'A'| <-- direita
esquerda --> |'N'|'I'|'E'|'T'|'S'|'N'|'I'|'E'|'U'|'R'|'E'|'C'|'A'| <-- direita

esquerda --> |'E'|'U'|'R'|'E'|'C'|'A'| <-- direita
```

Exercício 12: IntDoubleLinkedDeque.cpp

```cpp
#include <sstream>
#include "IntDoubleLinkedDeque.hpp"

IntDoubleLinkedDeque::IntDoubleLinkedDeque() {  numElements = 0;  front = back = nullptr;  }
IntDoubleLinkedDeque::~IntDoubleLinkedDeque() {  clear();  }
int IntDoubleLinkedDeque::size() const {  return numElements;  }
bool IntDoubleLinkedDeque::isEmpty() const {  return numElements == 0;  }

void IntDoubleLinkedDeque::addFirst(const int e) {
  Node *aux = new Node(e);
  if ( front == nullptr) {  front = back = aux;  }
  else {  front->prev = aux;  aux->next = front;  front = aux;  }
  ++numElements;
}

void IntDoubleLinkedDeque::addLast(const int e) {
  Node *aux = new Node(e);
  if ( front == nullptr) {  front = back = aux;  }
  else {  aux->prev = back;  back->next = aux;  back = aux;  }
  ++numElements;
}

bool IntDoubleLinkedDeque::removeFirst(int &e) {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  --numElements;  e = front->data;  Node *aux = front;  front = front->next;  delete aux;
  if ( front == nullptr) back = nullptr;
  else front->prev = nullptr;
  return true;
}

bool IntDoubleLinkedDeque::removeLast(int &e) {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  --numElements;  e = back->data;  Node *aux = back;  back = back->prev;  delete aux;
  if ( back == nullptr ) front = nullptr;
  else back->next = nullptr;
  return true;
}
```

Exercício 12: IntDoubleLinkedDeque.cpp (continuação)

```
bool IntDoubleLinkedDeque::first(int &e) const {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  else {  e = front->data;  return true; }
}

bool IntDoubleLinkedDeque::last(int &e) const {
  if ( numElements == 0 ) return false;
  else {  e = back->data;  return true; }
}

void IntDoubleLinkedDeque::clear() {
  while (front != nullptr) {  Node *aux = front;   front = front->next;   delete aux;  }
  numElements = 0;  back = nullptr;
}

string IntDoubleLinkedDeque::str() const {
  stringstream ss;
  ss << "|";
  for (Node *aux = front; aux != nullptr; aux = aux->next)
      ss << aux->data << "|";
  return ss.str();
}

string IntDoubleLinkedDeque::reverseStr() const {
  stringstream ss;
  ss << "|";
  for (Node *aux = back; aux != nullptr; aux = aux->prev)
      ss << aux->data << "|";
  return ss.str();
}
```

Exercício 13: StringArrayList.cpp

```cpp
#include <sstream>
#include "StringArrayList.hpp"

using namespace std;

StringArrayList::StringArrayList(int mxSz) {
  numElements = 0;  maxElements = ( mxSz < 1 ) ? 10 : mxSz;
  list = new string[maxElements];
}

StringArrayList::~StringArrayList() { delete[] list; }
void StringArrayList::clear() { numElements = 0; }
int StringArrayList::size() const { return numElements; }
int StringArrayList::maxSize() const { return maxElements; }
bool StringArrayList::isEmpty() const { return numElements == 0; }
bool StringArrayList::isFull() const { return numElements == maxElements; }

bool StringArrayList::add(const string &s) {
  if (numElements >= maxElements) return false;
  list[ numElements++ ] = s;
  return true;
}

bool StringArrayList::add(const int index, const string &s) {
  if (numElements >= maxElements) return false;
  for (int i=numElements; i>index; --i)
      list[i] = list[i-1];
  list[index] = s;
  ++numElements;
  return true;
}

bool StringArrayList::remove(const int index) {
  if (index < 0 || index >= numElements) return false;
  --numElements;
  for (int i=index; i<numElements; ++i) list[i] = list[i+1];
  return true;
}
```

Exercício 13: StringArrayList.cpp (continuação)

```
bool StringArrayList::get(const int index, string &s) {
  if (index < 0 || index >= numElements) return false;
  s = list[index];
  return true;
}

bool StringArrayList::set(const int index, const string &s) {
  if (index < 0 || index >= numElements) return false;
  list[index] = s;
  return true;
}

bool StringArrayList::contains(const string &s) {
  for (int i=0; i<numElements; ++i) if (list[i] == s) return true;
  return false;
}

int StringArrayList::indexOf(const string &s) {
  return indexOf(0,s);
}

int StringArrayList::indexOf(int index, const string &s) {
  if ( index < 0 || index >= numElements ) return -1;
  for (int i=index; i<numElements; ++i) if (list[i] == s) return i;
  return -1;
}

string StringArrayList::str() const {
  int i;   stringstream ss;
  for (i=0; i<numElements; ++i) ss << list[i];
  return ss.str();
}
```

Exercício 14: exercicio14-solucao.cpp

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct Node {
  char info;  Node *next;
  Node(char i) {  info = i;  next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

int main() {
  Node *head = nullptr, *tail = nullptr;  // Criação
  for (char l='B'; l<='F'; l++) {
      if (l == 'D') continue; // Evita que o Node com a info 'C' seja inserido na lista...
      Node *aux = new Node(l);
      if ( tail == nullptr ) {  head = tail = aux;  }
      else {  tail->next = aux;  tail = aux;  }
  }

  // Solução
  Node *novo = new Node('G'), *prev = nullptr, *aux = head;
  while ( aux != nullptr && aux->info < novo->info ) {  prev = aux;  aux = aux->next;  }
  if ( prev == nullptr ) {  novo->next = head;  head = novo;  }      // Inserção no início
  else if ( aux == nullptr ) {  prev->next = novo;  tail = novo;  }  // Inserção no final
  else {  prev->next = novo;  novo->next = aux;  }                   // Inserção no meio

  cout << "head-->";  // Exibição
  for (Node *aux = head; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << "|" << aux->info << (aux->next==nullptr?"|X| ":"|| ->");
  cout << " <--tail" << endl;
  while (head != nullptr) {  Node *aux = head;  head = head->next;  delete aux;  }  // Desalocação
  return 0;
}
```

Exercício 15: exercicio15-solucao.cpp

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct Node {
  char info;  Node *next;
  Node(char i) {  info = i;  next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

int main() {
  string s = "ADCBE";  Node *head = nullptr, *tail = nullptr;  // Criação
  for (int i=0; i<s.length(); ++i) {
      Node *aux = new Node( s[i] );
      if ( tail == nullptr ) {  head = tail = aux;  }
      else {  tail->next = aux;  tail = aux;  }
  }

  // Solução
  Node *prev_d = head,               *nodo_d = prev_d->next,
       *prev_b = head->next->next,  *nodo_b = prev_b->next;
  prev_d->next = nodo_b;     prev_b->next = nodo_d;
  Node *aux = nodo_b->next;  nodo_b->next = nodo_d->next;  nodo_d->next = aux;

  cout << "head-->";  // Exibição
  for (Node *aux = head; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << "|" << aux->info << (aux->next==nullptr?"|X| ":"|| ->");
  cout << " <--tail" << endl;
  while (head != nullptr) {  Node *aux = head;  head = head->next;  delete aux;  }  // Desalocação
  return 0;
}
```

Exercício 17: exercicio17.cpp

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct Node {
  int info;  Node *next;
  Node(int i) {  info = i;  next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

void reverse(Node **head, Node **tail) {
  Node *newHead = nullptr, *newTail = nullptr;
  while ( *head != nullptr ) {
        Node *aux = *head;  *head = (*head)->next;  // Retira o primeiro da lista
        aux->next = newHead;  newHead = aux;  if ( newTail == nullptr ) newTail = aux;  // Insere ele no início da "
  }
  *head = newHead;  *tail = newTail;
}

int main() {
  Node *head = nullptr, *tail = nullptr;  // Criação
  for (int i=10; i<=50; i+=10) {  // Insere 10, 20, 30, 40, 50 pelo final da lista
      Node *aux = new Node( i );
      if ( tail == nullptr ) {  head = tail = aux;  }
      else {  tail->next = aux;  tail = aux;  }
  }
  reverse(&head, &tail);
  cout << "head-->";  // Exibição a partir do início: 50, 40, 30, 20, 10
  for (Node *aux = head; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << "|" << aux->info << (aux->next==nullptr?"|X| ":"|| ->");
  cout << " <--tail" << endl;
  while (head != nullptr) {  Node *aux = head;  head = head->next;  delete aux;  }  // Desalocação
  return 0;
}
```

Exercício 18: exercicio18.cpp

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct Node {
  int info;  Node *prev, *next;
  Node(int i) {  info = i;  prev = next = nullptr;  cout << "+ Node(" << info << ") criado..." << endl;  }
  ~Node() {  cout << "- Node(" << info << ") destruido..." << endl;  }
};

void reverse(Node **head, Node **tail) {
  Node *aux = *head;
  while ( aux != nullptr ) {
        Node *sw = aux->prev;  aux->prev = aux->next;  aux->next = sw;
        aux = aux->prev;
  }
  Node *sw = *head;  *head = *tail;  *tail = sw;
}

int main() {
  Node *head = nullptr, *tail = nullptr;  // Criação
  for (int i=10; i<=50; i+=10) {  // Insere 10, 20, 30, 40, 50 pelo final da lista
      Node *aux = new Node( i );
      if ( tail == nullptr ) {  head = tail = aux;  }
      else {  aux->prev = tail; tail->next = aux;  tail = aux;  }
  }
  reverse(&head, &tail);
  cout << "head-->";  // Exibição a partir do início: 50, 40, 30, 20, 10
  for (Node *aux = head; aux != nullptr; aux = aux->next)
      cout << (aux->prev==nullptr?"|X|":"<==>|") << aux->info << (aux->next==nullptr?"|X|":"|");
  cout << "<--tail" << endl;
  cout << "tail-->";  // Exibição a partir do final: 10, 20, 30, 40, 50
  for (Node *aux = tail; aux != nullptr; aux = aux->prev)
      cout << (aux->next==nullptr?"|X|":"<==>|") << aux->info << (aux->prev==nullptr?"|X|":"|");
  cout << "<--head" << endl;
  while (head != nullptr) {  Node *aux = head;  head = head->next;  delete aux;  }  // Desalocação
  return 0;
}
```