

Estruturas de Dados Fundamentais

Arranjos e listas encadeadas

Prof. Marcelo de Souza

45RPE – Resolução de Problemas com Estruturas de Dados
Universidade do Estado de Santa Catarina



Leitura principal:

- ▶ Capítulo 3 de [Goodrich et al. \(2014\)](#)¹ – Estruturas de dados fundamentais.

Leitura complementar:

- ▶ Capítulo 4 de [Preiss \(2001\)](#)² – Estruturas de dados fundamentais.
- ▶ Capítulo 2 de [Pereira \(2008\)](#)³ – Listas lineares.

¹Michael T Goodrich et al. (2014). *Data structures and algorithms in Java*. 6ª ed. John Wiley & Sons.

²Bruno R Preiss (2001). *Estruturas de dados e algoritmos: padrões de projetos orientados a objetos com Java*. Campus.

³Silvio do Lago Pereira (2008). *Estruturas de Dados Fundamentais: Conceitos e Aplicações*.

Arranjos

Ou seja, *arrays*/vetores



Arranjos são **estruturas de dados sequenciais**, armazenando sequências finitas e ordenadas de valores de um mesmo tipo. Por exemplo:

- ▶ **Números:** 1, 2, 4, 5, 7, 8, ...
- ▶ **Strings:** "Brasil", "Alemanha", "Croácia", ...
- ▶ **Veículos:** ("Corcel", 1977), ("Fusca", 1968), ("Passat", 1984), ...

Arranjos

Ou seja, *arrays*/vetores



Arranjos são **estruturas de dados sequenciais**, armazenando sequências finitas e ordenadas de valores de um mesmo tipo. Por exemplo:

- ▶ **Números:** 1, 2, 4, 5, 7, 8, ...
- ▶ **Strings:** "Brasil", "Alemanha", "Croácia", ...
- ▶ **Veículos:** ("Corcel", 1977), ("Fusca", 1968), ("Passat", 1984), ...

A principal característica dos arranjos é a **alocação contígua** em memória.

- ▶ **Vantagens:**

- ▶ Fácil de usar;
- ▶ Acesso rápido (tempo constante).

- ▶ **Desvantagens:**

- ▶ Tamanho fixo (aumentar implica copiar elementos);
- ▶ Inserção e remoção [interna] custosas (*shift* de elementos).

Listas simplesmente encadeadas

Encadeamento



Queremos uma estrutura de dados dinâmica que permita **expandir** e **contrair** com eficiência.

Listas simplesmente encadeadas

Encadeamento



Queremos uma estrutura de dados dinâmica que permita **expandir** e **contrair** com eficiência.

Lista encadeada: coleção de nodos formados em uma sequência linear.

Listas simplesmente encadeadas

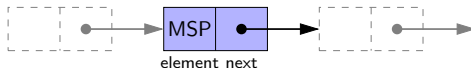
Encadeamento



Queremos uma estrutura de dados dinâmica que permita **expandir** e **contrair** com eficiência.

Lista encadeada: coleção de nodos formados em uma sequência linear.

Lista simplesmente encadeada: cada nodo armazena os dados do elemento e uma referência ao próximo nodo. A alocação em memória **não é contígua**.



Listas simplesmente encadeadas

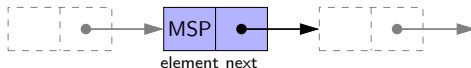
Encadeamento



Queremos uma estrutura de dados dinâmica que permita **expandir** e **contrair** com eficiência.

Lista encadeada: coleção de nodos formados em uma sequência linear.

Lista simplesmente encadeada: cada nodo armazena os dados do elemento e uma referência ao próximo nodo. A alocação em memória **não é contígua**.



Benefícios:

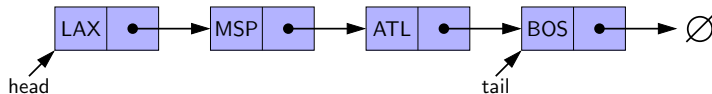
- ▶ Tamanho dinâmico;
- ▶ Consumo de memória dinâmico;
- ▶ Fácil inserção e remoção de elementos.

Listas simplesmente encadeadas

Encadeamento



Exemplo: uma lista simplesmente encadeada para armazenar aeroportos dos EUA.



Elementos:

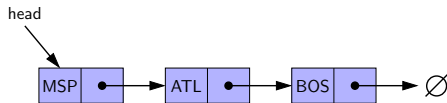
- ▶ head: referência ao primeiro elemento da lista;
- ▶ tail: referência ao último elemento da lista;
- ▶ O próximo elemento do último elemento aponta para null.

Listas simplesmente encadeadas

Operações

Inserção no início

```
newest.next ← head  
head ← newest
```



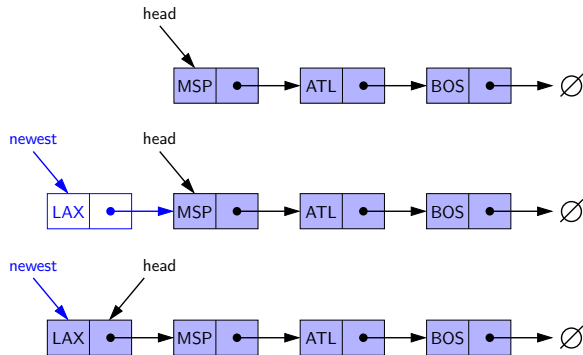
Listas simplesmente encadeadas

Operações

Inserção no início

```
newest.next ← head  
head ← newest
```

Operação em $O(1)$.

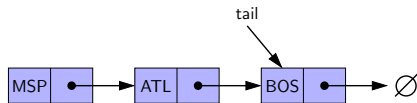


Listas simplesmente encadeadas

Operações

Inserção no final

```
tail.next ← newest  
tail ← newest
```



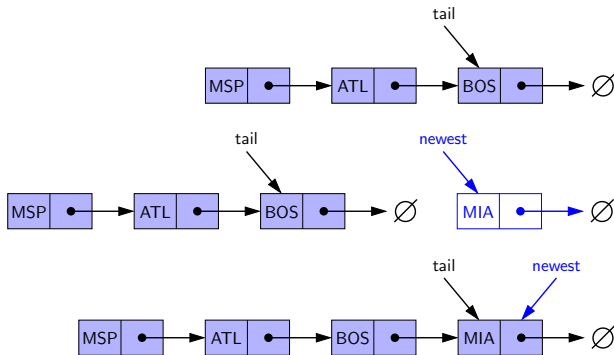
Listas simplesmente encadeadas

Operações

Inserção no final

```
tail.next ← newest  
tail ← newest
```

Operação em $O(1)$.



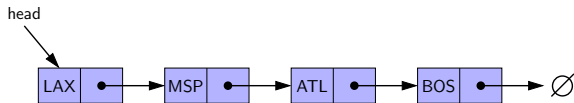
Listas simplesmente encadeadas

Operações



Remoção do início

```
head ← head.next
```



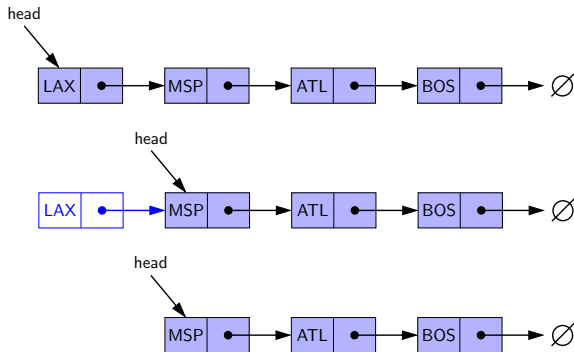
Listas simplesmente encadeadas

Operações

Remoção do início

`head ← head.next`

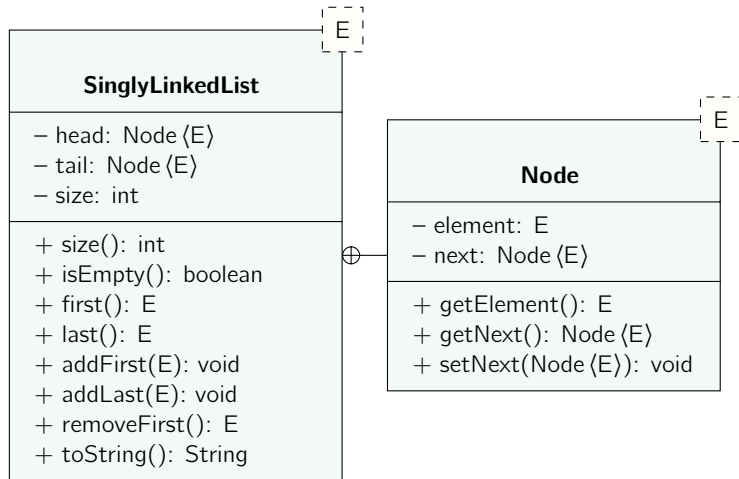
Operação em $O(1)$.





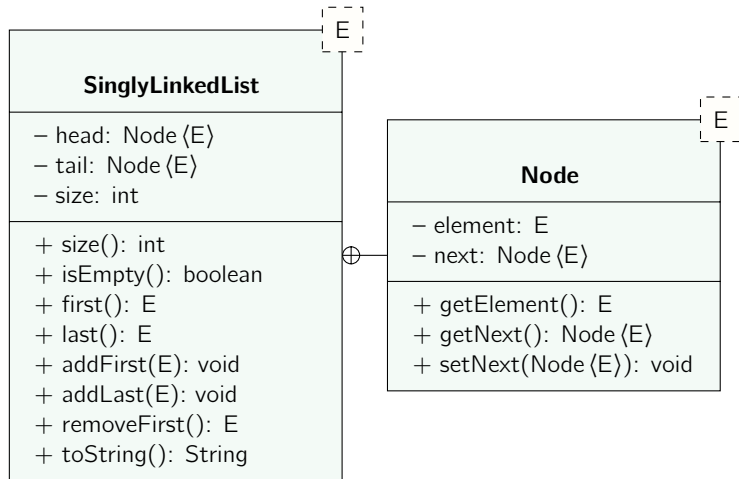
Listas simplesmente encadeadas

Implementação



Listas simplesmente encadeadas

Implementação



Implementação e uso:

```
data-structures
├── base
│   ├── SinglyLinkedList.java
│   └── TestBase.java
```

Veja também:

► Apêndice I



Listas duplamente encadeadas

Conceito e motivação

Problemas do encadeamento simples:

- ▶ Não conseguimos **remover o último nodo** de forma eficiente.
 - ▶ Precisamos atualizar a referência `next` do nodo anterior.
 - ▶ Para chegar no penúltimo, precisamos **percorrer a lista**.
- ▶ Remover um nodo (que não seja o primeiro) tendo apenas a sua referência é custoso.



Listas duplamente encadeadas

Conceito e motivação

Problemas do encadeamento simples:

- ▶ Não conseguimos **remover o último nodo** de forma eficiente.
 - ▶ Precisamos atualizar a referência `next` do nodo anterior.
 - ▶ Para chegar no penúltimo, precisamos **percorrer a lista**.
- ▶ Remover um nodo (que não seja o primeiro) tendo apenas a sua referência é custoso.

Lista duplamente encadeada: cada nodo mantém a referência do anterior (`prev`) e do próximo (`next`) nodos.



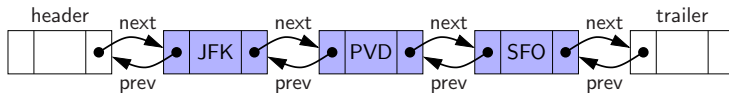
Listas duplamente encadeadas

Conceito e motivação

Problemas do encadeamento simples:

- ▶ Não conseguimos **remover o último nodo** de forma eficiente.
 - ▶ Precisamos atualizar a referência `next` do nodo anterior.
 - ▶ Para chegar no penúltimo, precisamos **percorrer a lista**.
- ▶ Remover um nodo (que não seja o primeiro) tendo apenas a sua referência é custoso.

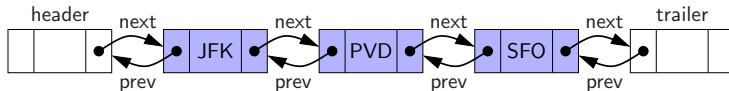
Lista duplamente encadeada: cada nodo mantém a referência do anterior (`prev`) e do próximo (`next`) nodos.



Listas duplamente encadeadas

Sentinelas

Na implementação dessas listas, usamos uma técnica muito útil: uso de **nodos sentinelas**. Trata-se de nodos vazios (“fictícios”) no início (header) e no fim (trailer) da lista.

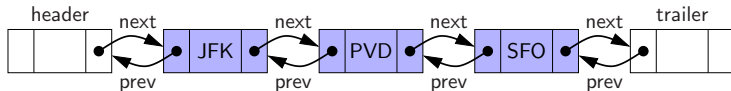


Listas duplamente encadeadas

Sentinelas



Na implementação dessas listas, usamos uma técnica muito útil: uso de **nodos sentinelas**. Trata-se de nodos vazios (“fictícios”) no início (header) e no fim (trailer) da lista.



Facilidades (na implementação):

- ▶ Certeza de que cada nodo possui dois vizinhos;
- ▶ Toda inserção será entre dois nodos.
 - ▶ Nunca inserimos no verdadeiro início ou fim;
 - ▶ Casos excepcionais (lista vazia ou com um nodo) não acontecem.

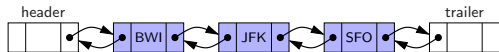


Listas duplamente encadeadas

Operações

Inserção no início

```
newest.prev ← header  
newest.next ← header.next  
header.next.prev ← newest  
header.next ← newest
```



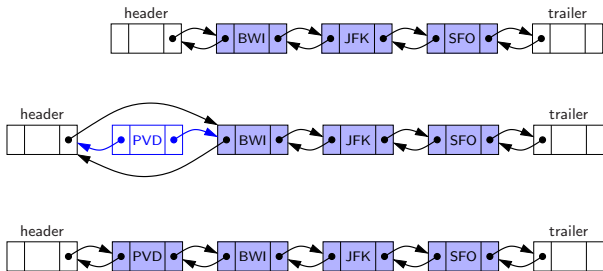
Listas duplamente encadeadas

Operações

Inserção no início

```
newest.prev ← header  
newest.next ← header.next  
header.next.prev ← newest  
header.next ← newest
```

Operação em $\mathcal{O}(1)$.

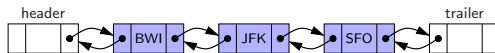


Listas duplamente encadeadas

Operações

Inserção arbitrária (entre A ↔ B)

```
newest.prev ← A  
newest.next ← B  
A.next ← newest  
B.prev ← newest
```



Listas duplamente encadeadas

Operações

Inserção arbitrária (entre A ↔ B)

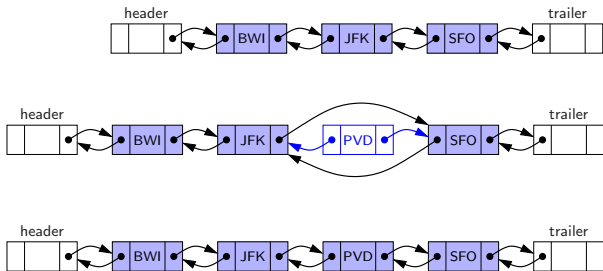
`newest.prev ← A`

`newest.next ← B`

`A.next ← newest`

`B.prev ← newest`

Operação em $O(1)$.



Listas duplamente encadeadas

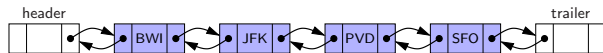
Operações



Remoção (do nodo X)

$X.\text{prev}.\text{next} \leftarrow X.\text{next}$

$X.\text{next}.\text{prev} \leftarrow X.\text{prev}$



Listas duplamente encadeadas

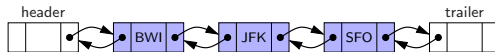
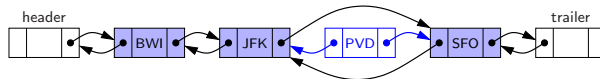
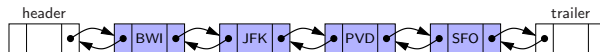
Operações

Remoção (do nodo X)

$X.\text{prev}.\text{next} \leftarrow X.\text{next}$

$X.\text{next}.\text{prev} \leftarrow X.\text{prev}$

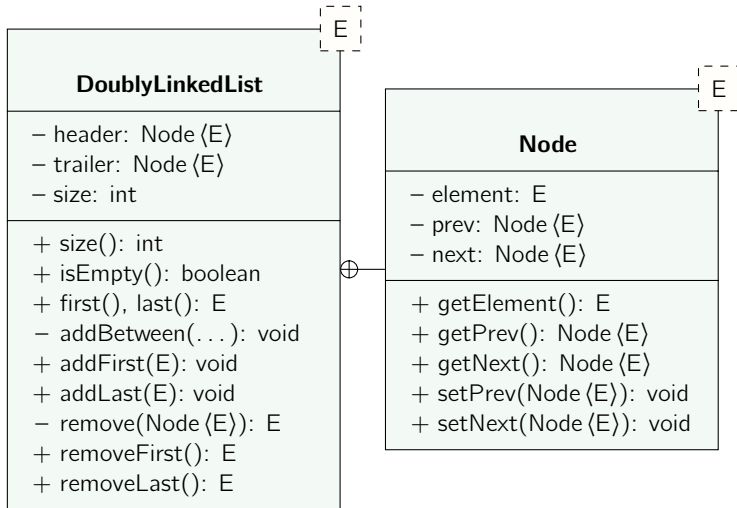
Operação em $\mathcal{O}(1)$.





Listas duplamente encadeadas

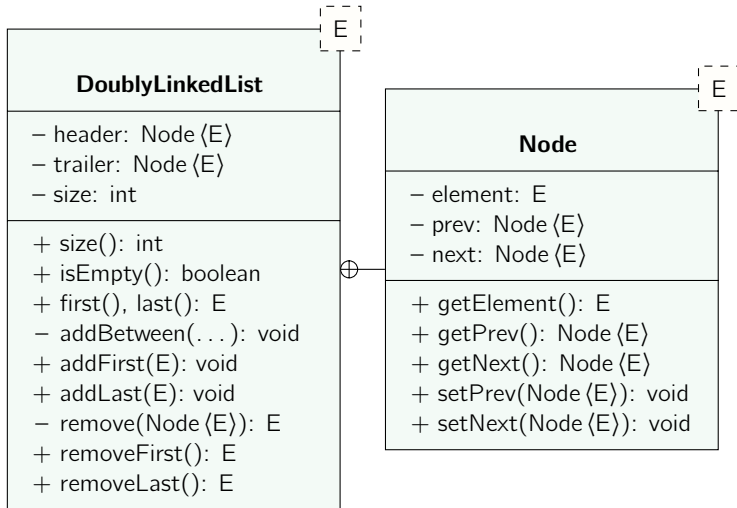
Implementação





Listas duplamente encadeadas

Implementação



Implementação e uso:

```
data-structures
├── base
│   ├── DoublyLinkedList.java
│   └── TestBase.java
```

Veja também:

- ▶ `java.util.LinkedList`
- ▶ Apêndice III



Listas encadeadas circulares

Conceito e motivação

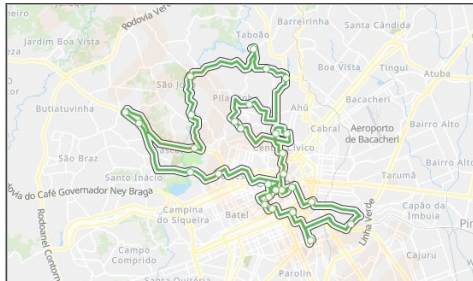
Lista circular: é uma lista encadeada com ordenação cíclica. Ou seja, cada elemento tem um anterior e um seguinte, mas não existe início e fim definidos. Na prática, o “último” elemento aponta para o “primeiro”.

Listas encadeadas circulares

Conceito e motivação

Lista circular: é uma lista encadeada com ordenação cíclica. Ou seja, cada elemento tem um anterior e um seguinte, mas não existe início e fim definidos. Na prática, o “último” elemento aponta para o “primeiro”.

Aplicações: rotas de transporte público (e.g. ônibus).



Listas encadeadas circulares

Conceito e motivação

Lista circular: é uma lista encadeada com ordenação cíclica. Ou seja, cada elemento tem um anterior e um seguinte, mas não existe início e fim definidos. Na prática, o “último” elemento aponta para o “primeiro”.

Aplicações: jogos por turnos.

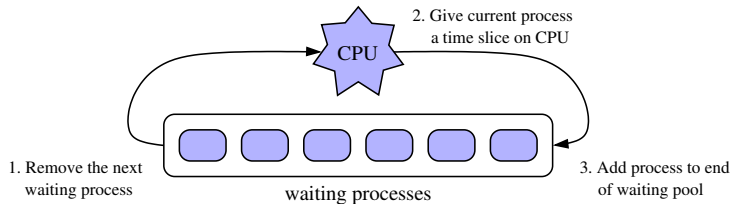


Listas encadeadas circulares

Conceito e motivação

Lista circular: é uma lista encadeada com ordenação cíclica. Ou seja, cada elemento tem um anterior e um seguinte, mas não existe início e fim definidos. Na prática, o “último” elemento aponta para o “primeiro”.

Aplicações: escalonamento de processos.



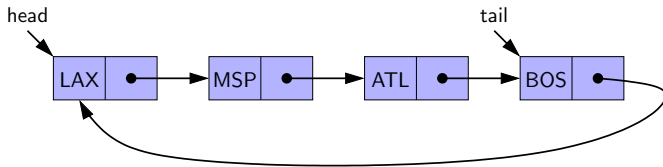


Listas encadeadas circulares

Conceito e motivação

Lista circular: é uma lista encadeada com ordenação cíclica. Ou seja, cada elemento tem um anterior e um seguinte, mas não existe início e fim definidos. Na prática, o “último” elemento aponta para o “primeiro”.

Exemplo: uma lista encadeada circular para armazenar aeroportos dos EUA.



Listas encadeadas circulares

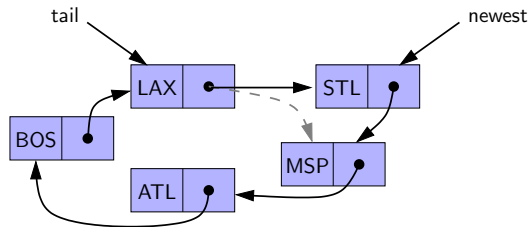
Operações

Inserção no início (após o tail)

```
newest.next ← tail.next
```

```
tail.next ← newest
```

$O(1)$



Listas encadeadas circulares

Operações

Inserção no início (após o tail)

```
newest.next ← tail.next
```

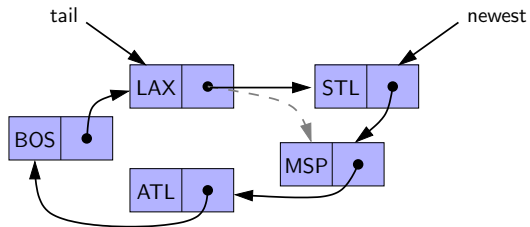
```
tail.next ← newest  $O(1)$ 
```

Inserção no final (novo tail)

```
newest.next ← tail.next
```

```
tail.next ← newest
```

```
tail ← tail.next  $O(1)$ 
```



Listas encadeadas circulares

Operações

Inserção no início (após o tail)

```
newest.next ← tail.next
```

```
tail.next ← newest  $O(1)$ 
```

Inserção no final (novo tail)

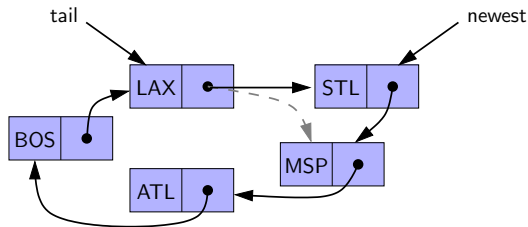
```
newest.next ← tail.next
```

```
tail.next ← newest
```

```
tail ← tail.next  $O(1)$ 
```

Remoção do início (após o tail)

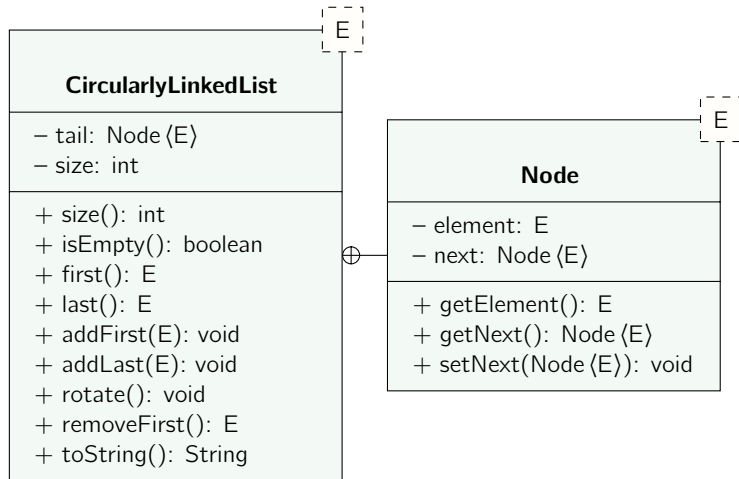
```
tail.next ← tail.next.next  $O(1)$ 
```





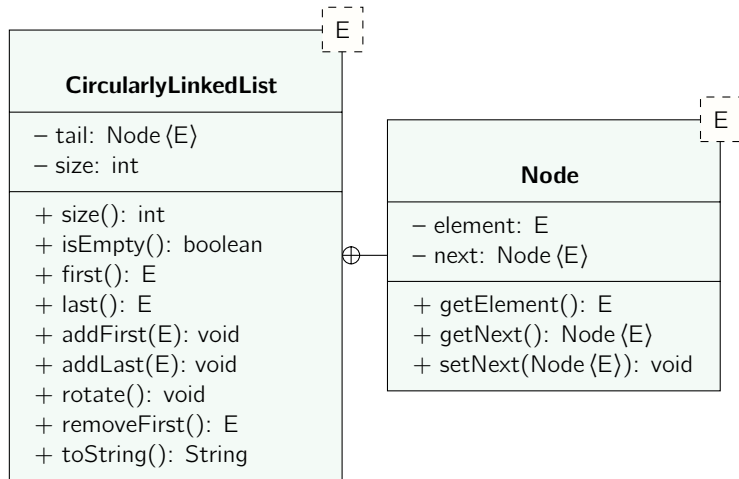
Listas encadeadas circulares

Implementação



Listas encadeadas circulares

Implementação



Implementação e uso:

```
data-structures
├── base
│   ├── CircLinkedList.java
│   └── TestBase.java
```

Veja também:

► Apêndice II

Apêndices



Apêndice I

Implementação de listas simplesmente encadeadas

```
1  public class SinglyLinkedList<E> {
2
3      private static class Node<E> {
4          private E element;
5          private Node<E> next;
6
7          public Node(E e, Node<E> n) {
8              element = e;
9              next = n;
10         }
11
12         public E getElement() { return element; }
13         public Node<E> getNext() { return next; }
14         public void setNext(Node<E> n) { next = n; }
15     }
16
17     private Node<E> head = null;
18     private Node<E> tail = null;
19     private int size = 0;
20
21     // ...
22 }
```

Apêndice I

Implementação de listas simplesmente encadeadas

```
1 public class SinglyLinkedList<E> {
2
3     private static class Node<E> {
4         private E element;
5         private Node<E> next;
6
7         public Node(E e, Node<E> n) {
8             element = e;
9             next = n;
10        }
11
12        public E getElement() { return element; }
13        public Node<E> getNext() { return next; }
14        public void setNext(Node<E> n) { next = n; }
15    }
16
17    private Node<E> head = null;
18    private Node<E> tail = null;
19    private int size = 0;
20
21    // ...
22 }
```

Detalhes:

- ▶ Usamos **genéricos** (<E>) para suportar qualquer tipo de dados.
 - ▶ e.g., podemos ter uma lista de inteiros, Strings, veículos, ...
- ▶ A classe Node define um nodo, que contém um elemento e uma referência ao próximo nodo da lista.
 - ▶ Node é uma **nested class**, pois queremos encapsular o nodo.
- ▶ A lista contém referências para o primeiro e último nodos (head e tail) e o seu tamanho (número de nodos), inicialmente zero.

Apêndice I

Implementação de listas simplesmente encadeadas



Métodos `size` e `isEmpty`:

```
1 public int size() { return size; }  
2 public boolean isEmpty() { return size == 0; }
```



Métodos size e isEmpty:

```
1 public int size() { return size; }
2 public boolean isEmpty() { return size == 0; }
```

Métodos first e last:

```
1 public E first() {
2     if (isEmpty()) return null;
3     return head.getElement();
4 }
5
6 public E last() {
7     if (isEmpty()) return null;
8     return tail.getElement();
9 }
```

Note que:

- ▶ O método retorna o elemento armazenado pelo primeiro (ou último) nodo.
- ▶ A estrutura da lista (Node) é transparente (encapsulada).



Apêndice I

Implementação de listas simplesmente encadeadas

Método addFirst:

```
1 public void addFirst(E e) {  
2     head = new Node<>(e, head);  
3     if (size == 0)  
4         tail = head;  
5     size++;  
6 }
```

- ▶ Criamos um novo nodo para armazenar o elemento, que passa a ser o novo head e aponta para o antigo head.
- ▶ Caso a lista esteja vazia, ele é o novo tail.

Apêndice I

Implementação de listas simplesmente encadeadas



Método addFirst:

```
1 public void addFirst(E e) {  
2     head = new Node<>(e, head);  
3     if (size == 0)  
4         tail = head;  
5     size++;  
6 }
```

- ▶ Criamos um novo nodo para armazenar o elemento, que passa a ser o novo head e aponta para o antigo head.
- ▶ Caso a lista esteja vazia, ele é o novo tail.

Método addLast:

```
1 public void addLast(E e) {  
2     Node<E> newest = new Node<>(e, null);  
3     if (isEmpty())  
4         head = newest;  
5     else  
6         tail.setNext(newest);  
7     tail = newest;  
8     size++;  
9 }
```

- ▶ O novo nodo (newest) passa a ser o próximo nodo do atual tail, antes de assumir a posição do tail.
- ▶ Caso a lista esteja vazia, o novo nodo passa a ser o head e o tail.



Apêndice I

Implementação de listas simplesmente encadeadas

Método removeFirst:

```
1 public E removeFirst() {  
2     if (isEmpty()) return null;  
3     E answer = head.getElement();  
4     head = head.getNext();  
5     size--;  
6     if (size == 0) tail = null;  
7     return answer;  
8 }
```

- ▶ Retorna o elemento do nodo removido.
- ▶ O nodo head passa a ser o próximo nodo do head atual.
- ▶ Se a remoção deixa a lista vazia, o tail passa a ser null.

Apêndice I

Implementação de listas simplesmente encadeadas



Método removeFirst:

```
1 public E removeFirst() {
2     if (isEmpty()) return null;
3     E answer = head.getElement();
4     head = head.getNext();
5     size--;
6     if (size == 0) tail = null;
7     return answer;
8 }
```

- ▶ Retorna o elemento do nodo removido.
- ▶ O nodo head passa a ser o próximo nodo do head atual.
- ▶ Se a remoção deixa a lista vazia, o tail passa a ser null.

Método toString:

```
1 public String toString() {
2     StringBuilder sb = new StringBuilder("(");
3     Node<E> walk = head;
4     while (walk != null) {
5         sb.append(walk.getElement());
6         if (walk != tail) sb.append(", ");
7         walk = walk.getNext();
8     }
9     sb.append(")");
10    return sb.toString();
11 }
```

- ▶ Percorremos a estrutura com um while, visitando um nodo por vez.
- ▶ Para cada nodo, recuperamos seu elemento e o adicionamos na string de resultado.
- ▶ O próximo nodo do tail é null, o que viola a condição do while e interrompe a execução do laço.



Apêndice II

Implementação de listas encadeadas circulares

```
1  public class CircularlyLinkedList<E> {
2
3      // Definição da classe Node [...]
4
5      private Node<E> tail = null;
6      private int size = 0;
7
8      public int size() { return size; }
9      public boolean isEmpty() { return size == 0; }
10
11     public E first() {
12         if (isEmpty()) return null;
13         return tail.getNext().getElement();
14     }
15
16     public E last() {
17         if (isEmpty()) return null;
18         return tail.getElement();
19     }
20
21     //...
22 }
```

Apêndice II

Implementação de listas encadeadas circulares

```
1  public class CircularlyLinkedList<E> {
2
3      // Definição da classe Node [...]
4
5      private Node<E> tail = null;
6      private int size = 0;
7
8      public int size() { return size; }
9      public boolean isEmpty() { return size == 0; }
10
11     public E first() {
12         if (isEmpty()) return null;
13         return tail.getNext().getElement();
14     }
15
16     public E last() {
17         if (isEmpty()) return null;
18         return tail.getElement();
19     }
20
21     //...
22 }
```

Detalhes:

- ▶ Usamos a mesma classe aninhada Node e o tipo genérico <E>.
- ▶ Só mantemos referência ao “último” elemento da lista (tail). O método last retorna o elemento do tail, enquanto o método first retorna o elemento de tail.getNext().
- ▶ Caso haja somente um elemento na lista, tail.getNext() é o mesmo que tail, pois esse único nodo referencia a si mesmo como próximo (visto que a lista é circular).

Apêndice II

Implementação de listas encadeadas circulares



Método rotate:

```
1  public void rotate() {  
2      if (tail != null)  
3          tail = tail.getNext();  
4  }
```



Método rotate:

```
1 public void rotate() {  
2     if (tail != null)  
3         tail = tail.getNext();  
4 }
```

Métodos addFirst e addLast:

```
1 public void addFirst(E e) {  
2     if (size == 0) {  
3         tail = new Node<>(e, null);  
4         tail.setNext(tail);  
5     } else {  
6         Node<E> newest = new Node<>(e, tail.getNext());  
7         tail.setNext(newest);  
8     }  
9     size++;  
10 }  
11  
12 public void addLast(E e) {  
13     addFirst(e);  
14     rotate();  
15 }
```

No método addFirst:

- ▶ Caso seja o primeiro elemento, ele passa a ser o tail e aponta a si mesmo.
- ▶ Caso contrário, o novo nodo é o próximo do tail atual e passa a ser o novo tail.

No método addLast:

- ▶ Após adicionar o elemento como primeiro (addFirst), atualizamos o tail.



Apêndice II

Implementação de listas encadeadas circulares

Método removeFirst:

```
1 public E removeFirst() {  
2     if (isEmpty()) return null;  
3     Node<E> head = tail.getNext();  
4     if (head == tail) tail = null;  
5     else tail.setNext(head.getNext());  
6     size--;  
7     return head.getElement();  
8 }
```

- ▶ Se head for igual ao tail, só há um elemento na lista e o tail passa a ser null.
- ▶ Caso contrário, o próximo nodo do head é o novo tail, removendo o head.
- ▶ Ao final, retorna o elemento do head.

Apêndice II

Implementação de listas encadeadas circulares



Método removeFirst:

```
1 public E removeFirst() {
2     if (isEmpty()) return null;
3     Node<E> head = tail.getNext();
4     if (head == tail) tail = null;
5     else tail.setNext(head.getNext());
6     size--;
7     return head.getElement();
8 }
```

- ▶ Se head for igual ao tail, só há um elemento na lista e o tail passa a ser null.
- ▶ Caso contrário, o próximo nodo do head é o novo tail, removendo o head.
- ▶ Ao final, retorna o elemento do head.

Método toString:

```
1 public String toString() {
2     if (tail == null) return "()";
3     StringBuilder sb = new StringBuilder("(");
4     Node<E> walk = tail;
5     do {
6         walk = walk.getNext();
7         sb.append(walk.getElement());
8         if (walk != tail) sb.append(", ");
9     } while (walk != tail);
10    sb.append(")");
11    return sb.toString();
12 }
```

- ▶ O critério de parada do percurso muda, pois sempre haverá um próximo nodo (i.e. getNext() nunca será null em uma lista não vazia).
- ▶ O percurso inicia pelo tail e termina quando retorna ao tail (percurso completo).



Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas

```
1  public class DoublyLinkedList<E> {
2
3      private static class Node<E> {
4          private E element;
5          private Node<E> prev, next;
6
7          public Node(E e, Node<E> p, Node<E> n) {
8              element = e;
9              prev = p;
10             next = n;
11         }
12
13         public E getElement() { return element; }
14         public Node<E> getPrev() { return prev; }
15         public Node<E> getNext() { return next; }
16
17         public void setPrev(Node<E> p) { prev = p; }
18         public void setNext(Node<E> n) { next = n; }
19     }
20
21     private Node<E> header, trailer;
22     private int size = 0;
23
24     // ...
25 }
```


Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas

```
1 public class DoublyLinkedList<E> {
2
3     private static class Node<E> {
4         private E element;
5         private Node<E> prev, next;
6
7         public Node(E e, Node<E> p, Node<E> n) {
8             element = e;
9             prev = p;
10            next = n;
11        }
12
13        public E getElement() { return element; }
14        public Node<E> getPrev() { return prev; }
15        public Node<E> getNext() { return next; }
16
17        public void setPrev(Node<E> p) { prev = p; }
18        public void setNext(Node<E> n) { next = n; }
19    }
20
21    private Node<E> header, trailer;
22    private int size = 0;
23
24    // ...
25 }
```

Detalhes:

- ▶ A classe Node agora define referências para os nodos anterior (prev) e próximo (next).
- ▶ O método construtor dessa classe recebe não só o elemento (e), mas também os nodos vizinhos (p e n).
- ▶ São definidos *setters* e *getters* para o elemento e para cada nodo vizinho.
- ▶ A lista agora possui os nodos sentinela (header e trailer) e não possui referências para início e fim.
 - ▶ O primeiro elemento da lista está em `header.getNext()` e o último elemento está em `trailer.getPrev()`.

Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas



Método construtor:

```
1 public DoublyLinkedList() {  
2     header = new Node<>(null, null, null);  
3     trailer = new Node<>(null, header, null);  
4     header.setNext(trailer);  
5 }
```

- ▶ Inicialmente a lista contém os nodos sentinela, que referenciam um ao outro.
- ▶ O next do header é o trailer; o prev do trailer é o header.

Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas



Método construtor:

```
1 public DoublyLinkedList() {  
2     header = new Node<>(null, null, null);  
3     trailer = new Node<>(null, header, null);  
4     header.setNext(trailer);  
5 }
```

- ▶ Inicialmente a lista contém os nodos sentinela, que referenciam um ao outro.
- ▶ O next do header é o trailer; o prev do trailer é o header.

Métodos first e last:

```
1 public E first() {  
2     if (isEmpty()) return null;  
3     return header.getNext().getElement();  
4 }  
5  
6 public E last() {  
7     if (isEmpty()) return null;  
8     return trailer.getPrev().getElement();  
9 }
```



Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas

Método addBetween:

```
1 private void addBetween(E e, Node<E> p, Node<E> n) {  
2     Node<E> newest = new Node<>(e, p, n);  
3     p.setNext(newest);  
4     n.setPrev(newest);  
5     size++;  
6 }
```

- ▶ Método genérico e encapsulado (privado) para inserir um novo nodo com o elemento desejado entre dois nodos vizinhos.
- ▶ Método auxiliar para qualquer inserção.

Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas



Método addBetween:

```
1 private void addBetween(E e, Node<E> p, Node<E> n) {  
2     Node<E> newest = new Node<>(e, p, n);  
3     p.setNext(newest);  
4     n.setPrev(newest);  
5     size++;  
6 }
```

- ▶ Método genérico e encapsulado (privado) para inserir um novo nodo com o elemento desejado entre dois nodos vizinhos.
- ▶ Método auxiliar para qualquer inserção.

Métodos addFirst e addLast:

```
1 public void addFirst(E e) {  
2     addBetween(e, header, header.getNext());  
3 }  
4  
5 public void addLast(E e) {  
6     addBetween(e, trailer.getPrev(), trailer);  
7 }
```

- ▶ Usam o método addBetween para inserir no início (entre header e seu sucessor) e no final (entre trailer e seu antecessor).
- ▶ **Nota:** com sentinelas, não é necessário checar se a lista é vazia ou se tem só um nodo.

Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas

Método remove:

```
1 private E remove(Node<E> node) {  
2     Node<E> predecessor = node.getPrev();  
3     Node<E> successor = node.getNext();  
4     predecessor.setNext(successor);  
5     successor.setPrev(predecessor);  
6     size--;  
7     return node.getElement();  
8 }
```

- ▶ Método genérico e encapsulado (privado) para remover um nodo, atualizando as referências entre seus vizinhos. O novo next do predecessor é o sucessor; o novo prev do sucessor é o predecessor.
- ▶ Método auxiliar para qualquer remoção.

Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas



Método remove:

```
1 private E remove(Node<E> node) {
2     Node<E> predecessor = node.getPrev();
3     Node<E> successor = node.getNext();
4     predecessor.setNext(successor);
5     successor.setPrev(predecessor);
6     size--;
7     return node.getElement();
8 }
```

- ▶ Método genérico e encapsulado (privado) para remover um nodo, atualizando as referências entre seus vizinhos. O novo next do predecessor é o sucessor; o novo prev do sucessor é o predecessor.
- ▶ Método auxiliar para qualquer remoção.

Métodos removeFirst e removeLast:

```
1 public E removeFirst() {
2     if (isEmpty()) return null;
3     return remove(header.getNext());
4 }
5
6 public E removeLast() {
7     if (isEmpty()) return null;
8     return remove(trailer.getPrev());
9 }
```

- ▶ Usam o método remove para remover o primeiro (header.getNext()) e o último (trailer.getPrev()) nodos.
- ▶ **Nota:** com sentinelas, o processo é o mesmo para qualquer nodo sendo removido.

Apêndice III

Implementação de listas duplamente encadeadas



Método toString:

```
1  public String toString() {
2      StringBuilder sb = new StringBuilder("(");
3      Node<E> walk = header.getNext();
4      while (walk != trailer) {
5          sb.append(walk.getElement());
6          walk = walk.getNext();
7          if (walk != trailer)
8              sb.append(", ");
9      }
10     sb.append(")");
11     return sb.toString();
12 }
```

► O percurso termina quando walk é igual ao trailer.



Na comparação de objetos, o Java compara os ponteiros. Em vez disso, podemos sobrescrever o método `equals` para comparar os elementos armazenados na lista.

```
1  public boolean equals(Object o) {
2      if (o == null) return false;
3      if (getClass() != o.getClass()) return false;
4      SinglyLinkedList other = (SinglyLinkedList) o;
5      if (size != other.size) return false;
6      Node<E> walkA = head;
7      Node<E> walkB = other.head;
8      while (walkA != null) {
9          if (!walkA.getElement().equals(walkB.getElement()))
10             return false;
11             walkA = walkA.getNext();
12             walkB = walkB.getNext();
13         }
14         return true;
15     }
```

Cuidados: referência nula, classes distintas, tamanho da lista.



Objetos em Java são copiados por referência. Em vez disso, podemos clonar uma lista (1) implementando a interface `Cloneable` e (2) sobrecrescendo o método `clone`.

```
1  public class SinglyLinkedList<E> implements Cloneable {
2      //...
3      public SinglyLinkedList<E> clone() throws CloneNotSupportedException {
4          SinglyLinkedList<E> other = (SinglyLinkedList<E>) super.clone();
5          if (size > 0) {
6              other.head = new Node<>(head.getElement(), null);
7              Node<E> walk = head.getNext();
8              Node<E> otherTail = other.head;
9              while (walk != null) {
10                 Node<E> newest = new Node<>(walk.getElement(), null);
11                 otherTail.setNext(newest);
12                 otherTail = newest;
13                 walk = walk.getNext();
14             }
15         }
16         return other;
17     }
18 }
```

Nota: o elemento também pode ser clonado, se necessário/desejado.

45RPE – Resolução de Problemas com Estruturas de Dados
Prof. Marcelo de Souza