Estruturas de Dados I

Filas

Igor Machado Coelho

18/09/2020 - 26/04/2025

1. Filas
2. Tipo Abstrato: Fila
3. Filas Sequenciais
4. Filas Encadeadas
5. Tópico Avançado: Fila com Ponteiro Inteligente
6. Filas na Biblioteca Padrão
7. Análise de Complexidade
8. Agradecimentos

Section 1

Filas

Pré-Requisitos

São requisitos para essa aula:

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

Section 2

Tipo Abstrato: Fila

Fila

A Fila (do inglês *Queue*) é um Tipo Abstrato de Dado (TAD) que pode ser compreendida como vemos no cotidiano.

Na *fila do banco*, por exemplo:

- Só se consegue "entrar" (enfileirar) no *fundo* (ou *fim*) da fila
- Será "atendido" (desenfileirar) quando está na *frente* na fila

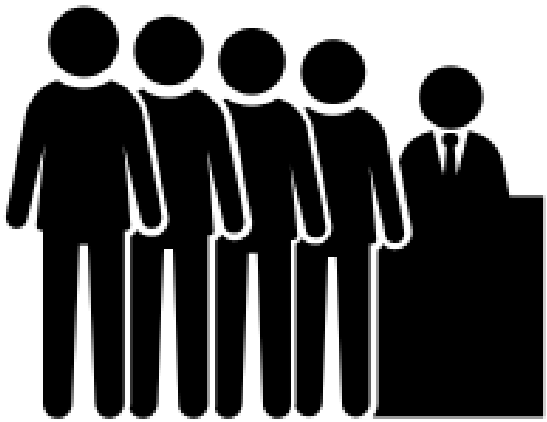


Figure 1: Fila - CC BY 3.0 - thenounproject.com

Filas na computação

Filas são estruturas fundamentais na própria computação.

Por exemplo, quando se envia pacotes de dados a roteadores, tipicamente é respeitada a ordem de chegada das mensagens.

Também são úteis na implementações de mecanismos de busca, como busca em largura para grafos (aulas futuras).

Operações de uma Fila

Uma Fila é uma estrutura de dados linear (assim como estruturas de lista), consistindo de 3 operações básicas:

- frente (*front*)
- enfileira (*enqueue* ou *push*)
- desenfileira (*dequeue* ou *pop*)

Seu comportamento é descrito como FIFO (first-in first-out), ou seja, o *primeiro* elemento a entrar na fila será o *primeiro* a sair.

Implementações

De forma geral, uma fila pode ser implementada utilizando uma lista linear (assim como uma pilha). Porém, tem acesso de direção restrita em ambas extremidades dessa lista: *de um lado entra, do outro lado sai* (um tipo restrito de *deque*).

$$\rightarrow \mid 3 \mid 2 \mid 1 \mid \rightarrow$$

Para o TAD Fila, estudaremos duas formas distintas de implementação: Sequencial e Encadeada.

Section 3

Filas Sequenciais

Filas Sequenciais

As Filas Sequenciais utilizam um array para armazenar os dados. Assim, os dados sempre estarão em um *espaço contíguo* de memória.

Implementação FilaSeq1

Fila sequencial com, no máximo, MAX_N elementos do tipo caractere:

```
constexpr int MAX_N = 100'000; // capacidade máxima da fila
struct FilaSeq1 {
  char v[MAX_N];                // elementos na fila
  int N;                        // num. de elementos na fila
  auto cria()    -> void;       // inicializa agregado
  auto libera()  -> void;       // finaliza agregado
  auto frente()  -> char;
  auto enfileira(char dado) -> void;
  auto desenfileira()       -> char;
  auto tamanho()            -> int;
};
```

Utilização da Fila

Antes de completar as funções pendentes, utilizaremos a `FilaSeq1`:

```
auto main() -> int {
    FilaSeq1 p;
    p.cria();
    p.enfileira('A');
    p.enfileira('B');
    p.enfileira('C');
    println("{}", p.frente());
    println("{}", p.desenfileira());
    p.enfileira('D');
    while(p.tamanho() > 0)
        println("{}", p.desenfileira());
    p.libera();
    return 0;
}
```

Verifique as impressões em tela: *A A B C D*

Implementação FilaSeq1 - Parte 1/2

A operação `cria` inicializa a fila para uso, e a função `libera` desaloca os recursos dinâmicos.

```
auto FilaSeq1::cria() -> void {
    N = 0;
}

auto FilaSeq1::libera() -> void {
    // nenhum recurso dinâmico para desalocar
}
```

Implementação FilaSeq1 - Parte 2/2

A operação `enfileira` em adiciona um novo elemento ao *fundo* da fila. A operação `desenfileira` remove e retorna o elemento na *frente* da fila.

```
// implementação 'FilaSeq1'
auto FilaSeq1::frente() -> char {
    return v[0];    // primeiro sempre 'frente'
}
auto FilaSeq1::enfileira(char dado) -> void {
    v[N] = dado;
    N++;
}
auto FilaSeq1::desenfileira() -> char {
    char r = v[0];                  // 0 é sempre 'frente'
    for (auto i=0; i<N-1; i++) // realmente necessário?
        v[i] = v[i+1];
    N--;
    return r;
}
```

Análise da FilaSeq1

A FilaSeq1 funciona corretamente como TAD Fila, porém causa a realocação de todos elementos da fila *a cada remoção*.

Seria possível evitar tal efeito?

Implementação FilaSeq2

```
constexpr int MAX_N = 100'000; // capacidade máxima da fila
struct FilaSeq2 {
  char v [MAX_N];              // elementos na fila
  int N;                       // num. de elementos na fila
  int inicio;                  // índice inicial da fila
  int fim;                     // índice final da fila
  auto cria()   -> void;       // inicializa agregado
  auto libera() -> void;       // finaliza agregado
  auto frente() -> char;
  auto enfileira(char dado) -> void;
  auto desenfileira()       -> char;
  auto tamanho()            -> int;
};
```

Implementação FilaSeq2: cria() e libera()

A operação `cria` inicializa a fila para uso, e a função `libera` desaloca os recursos dinâmicos.

```
struct FilaSeq2 {
...
auto FilaSeq2::cria() -> void {
    N = 0;        // ou... this->N = 0;
    inicio = 0;
    fim = 0;
}

auto FilaSeq2::libera() -> void {
    // nenhum recurso dinâmico para desalocar
}
...
}
```

Implementação FilaSeq2: frente()

Utilizamos o índice `inicio` para localizar o começo da fila.

```
auto FilaSeq2::frente() -> char {
    return v[inicio];
}

auto FilaSeq2::tamanho() -> int { return N; }
```

Implementação FilaSeq2: enfileira e desenfileira

A operação `enfileira` em adiciona um novo elemento ao *fundo* da fila. A operação `desenfileira` remove e retorna o elemento na *frente* da fila.

```
// implementação 'FilaSeq2'

auto FilaSeq2::enfileira(char dado) -> void {
    v[fim] = dado;              // dado entra no fim
    fim=fim+1;
    N=N+1;                      // ou... this->N++;
}

auto FilaSeq2::desenfileira() -> char {
    char r = v[inicio];
    inicio=inicio+1;
    N=N-1;                      // ou... this->N--;
    return r;
}
```

Exemplo de uso (FilaSeq2)

Considere uma fila sequencial (`MAXN=5`): `FilaSeq2 p; p.cria();`

```
p.inicio: | 0 |     p.v: |   |   |   |   |   |
p.fim:    | 0 |          0   1   2   3   4
```

Agora, enfileiramos `A`, `B` e `C`, e depois desenfileiramos uma vez.

```
p.inicio: | 0 |     p.v: | A |   |   |   |   |
p.fim:    | 1 |          0   1   2   3   4

p.inicio: | 0 |     p.v: | A | B |   |   |   |
p.fim:    | 2 |          0   1   2   3   4

p.inicio: | 0 |     p.v: | A | B | C |   |   |
p.fim:    | 3 |          0   1   2   3   4

p.inicio: | 1 |     p.v: |   | B | C |   |   |
p.fim:    | 3 |          0   1   2   3   4
```

Qual a frente atual da fila? Quais limitações da fila?

Implementação FilaSeq3: enfileira e desenfileira

Consideramos uma *estratégia circular* na capacidade da fila:

```
// implementação 'FilaSeq3'

auto FilaSeq3::enfileira(char dado) -> void {
    v[fim] = dado;              // dado entra no fim
    fim = (fim + 1) % MAX_N; // circular
    N=N+1;                      // ou... this->N++;
}

auto FilaSeq3::desenfileira() -> char {
    char r = v[inicio];
    inicio = (inicio + 1) % MAX_N; // circular
    N=N-1;                         // ou... this->N--;
    return r;
}
```

Exemplo de uso (FilaSeq3)

Considere uma fila sequencial (`MAX_N=5`): `FilaSeq3 p; p.cria();`

```
p.inicio: | 3 |     p.v: |   |   |   |   |   |
p.fim:    | 3 |                  0   1   2   3   4
```

Agora, enfileiramos `A`, `B` e `C`, e depois desenfileiramos uma vez.

```
p.inicio: | 3 |     p.v: |   |   |   | A |   |
p.fim:    | 4 |              0   1   2   3   4

p.inicio: | 3 |     p.v: |   |   |   | A | B |
p.fim:    | 0 |              0   1   2   3   4

p.inicio: | 3 |     p.v: | C |   |   | A | B |
p.fim:    | 1 |              0   1   2   3   4

p.inicio: | 4 |     p.v: | C |   |   |   | B |
p.fim:    | 1 |              0   1   2   3   4
```

Qual a frente atual da fila?

Definição do *Conceito* Fila em C++

O *conceito* de fila somente requer suas três operações básicas. Como consideramos uma *fila genérica* (fila de inteiro, char, etc), definimos um *conceito genérico* chamado `FilaTAD`:

```
template<typename Agregado, typename Tipo>
concept FilaTAD = requires(Agregado a, Tipo t)
{
    // requer operação 'frente'
    { a.frente() };
    // requer operação 'enfileira' sobre tipo 't'
    { a.enfileira(t) };
    // requer operação 'desenfileira'
    { a.desenfileira() };
    // requer operação 'tamanho'
    { a.tamanho() };
};


// verifica se agregado FilaSeq2 satisfaz conceito FilaTAD
```

Análise Preliminar: Fila Sequencial

A Fila Sequencial tem a vantagem de ser bastante simples de implementar, ocupando um espaço constante (na memória) para todas operações.

Porém, existe a limitação física de `MAX_N` posições imposta pela alocação estática, não permitindo que a fila ultrapasse esse limite.

Desafio: implemente uma Fila Sequencial utilizando alocação dinâmica para o vetor `elementos`. Assim, quando não houver espaço para novos elementos, aloque mais espaço na memória (copiando elementos existentes para o novo vetor).

Dica: Experimente a estratégia de *dobrar a capacidade* da fila (quando necessário), e reduzir à metade a capacidade (quando necessário). Essa estratégia é bastante eficiente, mas requer alteração nos métodos `cria`, `libera`, `enfileira` e `desenfileira`.

Section 4

Filas Encadeadas

Filas Encadeadas

A implementação do TAD Fila pode ser feito através de uma *estrutura encadeada* com alocação dinâmica de memória.

A vantagem é não precisar pre-determinar uma capacidade máxima da fila (o limite é a memória do computador!). A desvantagem é o consumo extra de espaço com ponteiros.

Implementação

Fila encadeada, utilizando um agregado `NoFila0` auxiliar:

```
struct NoFila0 {
    char dado;
    NoFila0* prox;
};
```

```
struct FilaEnc0 {
    NoFila0* inicio;    // frente da fila
    int N;
    auto cria() -> void;
    auto libera() -> void;
    auto frente() -> char;
    auto enfileira (char dado) -> void;
    auto desenfileira() -> char;
    auto tamanho() -> int;
};
// verifica agregado FilaEnc0
static_assert(FilaTAD<FilaEnc0, char>);
```

Implementação: Cria e Libera

```
auto FilaEnc0::cria() -> void {
    N = 0;          // zero elementos na fila
    inicio = 0;     // endereço zero de memória
}

auto FilaEnc0::libera() -> void {
    while(N > 0)
        desenfileira(); // limpa a fila
}
```

Implementação: Frente e Tamanho

```
auto FilaEnc0::frente() -> char { return inicio->dado; }

auto FilaEnc0::tamanho() -> int { return N; }
```

Implementação 0: Enfileira

```
auto FilaEnc0::enfileira(char v) -> void{
    auto no = new NoFila0{.dado = v, .prox = 0 };
    if(N == 0) {
        inicio = no;
    } else {
        NoFila0* fim = inicio;
        // localiza ultimo elemento da fila
        while(fim->prox != 0)
            fim = fim->prox;
        // encadeamento do novo elemento
        fim->prox = no;
    }
    N=N+1;                  // ou... this->N++;
}
```

Implementação 0: Desenfileira

```
auto FilaEnc0::desenfileira() -> char {
    NoFila0* p = inicio;     // ponteiro da frente
    inicio = inicio->prox;   // avança fila
    char r = p->dado;        // conteudo da frente
    delete p;                // apaga frente
    N=N-1;  // ou... this->N--;
    return r;
}
```

Análise da Implementação 0

Naturalmente, existe um problema de desempenho ao enfileirar novos elementos. Como corrigir essa limitação?

Implementação 1

Fila encadeada, utilizando um agregado `NoFila1` auxiliar:

```
struct NoFila1 {
    char dado;
    NoFila1* prox;
};
```

```
struct FilaEnc1 {
    NoFila1* inicio;    // frente da fila
    NoFila1* fim;       // fundo da fila
    int N;
    auto cria()    -> void;
    auto libera()  -> void;
    auto frente()  -> char;
    auto enfileira (char dado) -> void;
    auto desenfileira()        -> char;
    auto tamanho()             -> int;
};
// verifica agregado FilaEnc1
static_assert(FilaTAD<FilaEnc1, char>);
```

Implementação: Cria e Libera

```
auto FilaEnc1::cria() -> void {
    N = 0;          // zero elementos na fila
    inicio = 0;     // endereço zero de memória
    fim = 0;        // endereço zero de memória
}

auto FilaEnc1::libera() -> void {
    while(N > 0)
        desenfileira(); // limpa a fila
}
```

Exemplo de uso

Variável local do tipo Fila Encadeada:

```
FilaEnc1 p;
p.cria();
```

Visualização da memória

p.N: 0 **p.inicio: 0** **p.fim: 0** *frente* $\leftarrow \epsilon$

0	4	...	100	104	108	112	116	...	8GiB

Implementação: Frente e Tamanho

```
auto FilaEnc1::frente() -> char { return inicio->dado; }

auto FilaEnc1::tamanho() -> int { return N; }
```

Implementação: Enfileira

```
auto FilaEnc1::enfileira(char v) -> void {
    auto no = new NoFila1{.dado = v, .prox = 0 };
    if(N == 0)  {  inicio = fim = no;          }
    else        {  fim->prox = no; fim = no;   }
    N=N+1;  // ou... this->N++;
}
```

Na memória: p.enfileira('A'); p.enfileira('B');

p.N: 0 **p.inicio: 0** **p.fim: 0** *frente* $\leftarrow \epsilon$

0	4	...	100	104	108	112	116	...	8GiB

p.N: 1 **p.inicio: 112** **p.fim: 112** *frente* $\leftarrow A$

						A	0		
0	4	...	100	104	108	112	116	...	8GiB

p.N: 2 **p.inicio: 112** **p.fim: 100** *frente* $\leftarrow A \leftarrow B$

			B	0		A	100		
0	4	...	100	104	108	112	116	...	8GiB

Implementação: Desenfileira

```
auto FilaEnc1::desenfileira() -> char {
    NoFila1* p   = inicio; // ponteiro da frente
    inicio = inicio->prox; // avança fila
    char r = p->dado;      // conteudo da frente
    delete p;              // apaga frente
    N=N-1;    // ou... this->N--;
    if(N == 0) { fim = 0; }
    return r;
}
```

Na memória: `p.desenfileira();`

p.N: 2 **p.inicio: 112** **p.fim: 100** *frente* $\leftarrow A \leftarrow B$

				B	0			A	100							
0		4	...	100	104	108		112	116		...	8GiB				

p.N: 1 **p.inicio: 100** **p.fim: 100** *frente* $\leftarrow B$

				B	0											
0		4	...	100	104	108		112	116		...	8GiB				

Section 5

Tópico Avançado: Fila com Ponteiro Inteligente

Filas Encadeadas com Ponteiros Inteligentes

A implementação do TAD Fila pode ser feito através de uma *estrutura encadeada* com alocação dinâmica de memória segura, através de *smart pointers*.

Assim, não corre-se o risco de perder memória pela falta de `delete` ou `free()`.

Vamos considerar o seguinte "atalho" `uptr` para um `unique_ptr`:

```
template<typename T>
using uptr = std::unique_ptr<T>;
```

Padrão `make_` ao invés de `new`

Importante: ao invés de criar um `uptr` com `new`, usaremos o padrão `std::make_unique`.

Implementação

Fila encadeada, utilizando um agregado `NoFila1` auxiliar:

```
struct NoFila2 {
  char dado;
  uptr<NoFila2> prox;
};
```

```
struct FilaEnc2 {
  uptr<NoFila2> inicio; // frente da fila
  NoFila2* fim;         // fundo da fila
  int N;
  auto cria()   -> void;
  auto libera() -> void;
  auto frente() -> char;
  auto enfileira (char dado) -> void;
  auto desenfileira()        -> char;
  auto tamanho()             -> int;
};
// verifica agregado FilaEnc2
static_assert(FilaTAD<FilaEnc2, char>);
```

Implementação: Cria e Libera

```
auto FilaEnc2::cria() -> void {
    N = 0;          // zero elementos na fila
    // inicio = 0; // desnecessário...
    fim = 0;        // endereço zero de memória
}

auto FilaEnc2::libera() -> void {
    // inicio.reset(); fim=0; N=0;   // stackoverflow!
    while(N > 0)         // previne stackoverflow no unique_ptr
        desenfileira(); // limpa a fila
}
```

Implementação: Frente e Tamanho

```
auto FilaEnc2::frente() -> char { return inicio->dado; }

auto FilaEnc2::tamanho() -> int { return N; }
```

Implementação: Enfileira e Desenfileira

```
auto FilaEnc2::enfileira(char v) -> void {
    auto no = std::make_unique<NoFila2>(
        NoFila2{.dado = v, .prox = std::nullptr}
    );
    if(N == 0){inicio = std::move(no); fim = inicio.get();    }
    else    {fim->prox = std::move(no); fim = fim->prox.get();}
    N=N+1;  // ou... this->N++;
}

auto FilaEnc2::desenfileira() -> char {
    char r = p->dado;                    // conteudo da frente
    inicio = std::move(inicio->prox); // avança
    N=N-1;  // ou... this->N--;
    if(N==0){ fim = 0; }                 // corrige ponteiro 'fim
    return r;
}
```

Análise Preliminar: Fila Encadeada

A Fila Encadeada é flexível em relação ao espaço de memória, permitindo maior ou menor utilização.

Como desvantagem tende a ter acessos de memória ligeiramente mais lentos, devido ao espalhamento dos elementos por toda a memória do computador (perdendo as vantagens de acesso rápido na *memória cache*, por exemplo).

Também é considerada como desvantagem o gasto de espaço extra com ponteiros em cada elemento, o que não acontece na Fila Sequencial.

Alternativamente ao `unique_ptr` e sua contrapartida em ponteiro nativo C, é possível utilizar `shared_ptr` para ambos ponteiros de `inicio` e `fim`. Isso traz uma simplificação ao projeto, mas perde-se um pouco de eficiência dada a natureza de contagem de referências do `shared_ptr`.

Section 6

Filas na Biblioteca Padrão

Uso da std::queue

Em C/C++, é possível utilizar implementações *prontas* do TAD Fila. A vantagem é a grande eficiência computacional e amplo conjunto de testes, evitando erros de implementação.

Na STL, faça `#include<queue>` e use métodos `push`, `pop` e `front`.

```
import std;
// #include<queue>                  // inclui fila genérica
// #include<print>                  // inclui print
auto main() -> int {
    std::queue<char> p;                  // fila de char
    p.push('A');
    p.push('B');
    std::println("{}", p.front());  // imprime A
    p.pop();
    std::println("{}", p.front());  // imprime B
    return 0;
}
```

Definindo um TAD para `std::queue`

Desafio: escreva um *conceito* (utilizando o recurso C++ `concept bool`) para o `std::queue` da STL, considerando operações `push`, `pop` e `front`.

Dica: Utilize o *conceito* `FilaTAD` apresentado no curso, e faça os devidos ajustes. Verifique se `std::queue` passa no teste com `static_assert`.

Você pode compilar o código proposto (começando pelo slide anterior em um arquivo chamado `main_fila.cpp`) através do comando:

```
g++ --std=c++23 main_fila.cpp -o appFila
```

Fim implementações

Fim parte de implementações.

Section 7

Análise de Complexidade

Fila: Revisão Geral

- Para que serve uma fila?
- Quais são os 3 métodos de uma fila?
- Qual é a complexidade de cada método em uma Fila Sequencial?
- Qual é a complexidade de cada método em uma Fila Encadeada?
- Quais as vantagens e desvantagens de cada implementação de fila?

Bibliografia Recomendada

Além da bibliografia do curso, recomendamos para esse tópico:

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

Section 8

Agradecimentos

Pessoas

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

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

Software

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

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

Empresas

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

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

Reprodução do material

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

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

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

Licença: CC-BY 4.0 2020

Igor Machado Coelho

This Slide Is Intentionally Blank (for goomit-mpx)