

Caminhos mínimos

Algoritmo de Bellman-Ford

Prof. Edson Alves

2019

Faculdade UnB Gama

1. Algoritmo de Bellman-Ford
2. SPFA

Algoritmo de Bellman-Ford

Caminhos mínimos

- Seja $G(V, E)$ um grafo e $u, v \in V$. Um caminho de u a v é uma sequência de M arestas $p = \{(a_0, a_1), (a_1, a_2), \dots, (a_{M-1}, a_M)\}$ tal que $a_0 = u, a_M = v$ e, para cada par a, b de arestas consecutivas de p , o segundo vértice de a é igual ao primeiro vértice de b
- O conjunto C de todos os caminhos de u a v é dado por

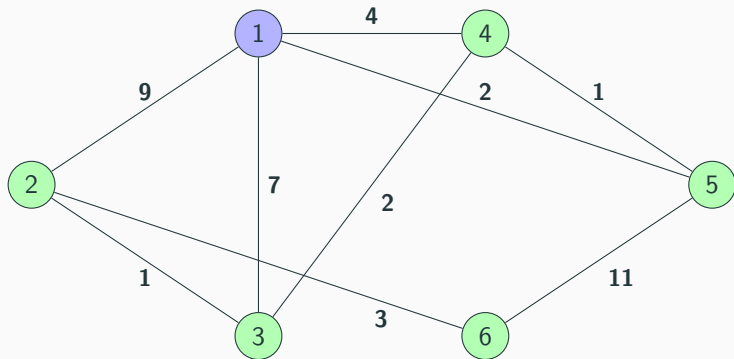
$$C(u, v) = \{p \subset E \mid p \text{ é caminho de } u \text{ a } v\}$$

- Se $C(u, v) \neq \emptyset$, o caminho de custo mínimo, ou simplesmente caminho mínimo, de u a v é um caminho, é o elemento de $m \in C$ tal que a soma dos pesos das arestas da sequência m é a menor possível
- Se o grafo não é ponderado, o caminho mínimo entre u e v pode ser obtido através de uma BFS

Algoritmo de Bellman-Ford

- O algoritmo de Bellman-Ford computa o caminho mínimo de todos os vértices de um grafo a um nó s dado
- É um algoritmo versátil, que pode processar grafos cujas arestas podem ter pesos negativos
- O único tipo de grafo que ele não processa são grafos com ciclos negativos, mas é capaz de detectar tais grafos
- Primeiramente ele inicializa a distância de s a s como zero e as demais distâncias como infinito
- A cada iteração, ele visita todas as arestas na tentativa de encurtar um caminho já existente, até que não seja mais possível esta redução
- A complexidade é $O(VE)$, pois o número de arestas máximo em um caminho mínimo é igual a $V - 1$

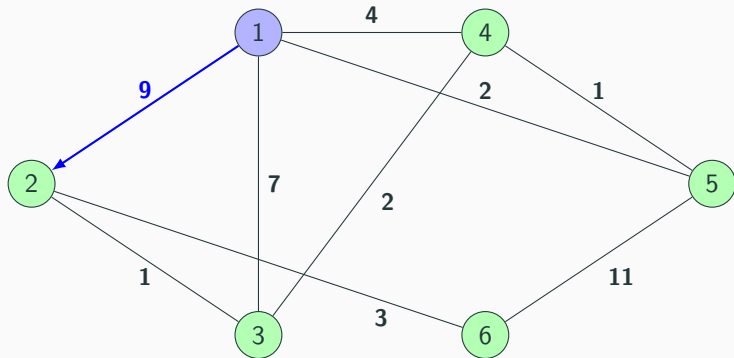
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

	1	2	3	4	5	6
	0	∞	∞	∞	∞	∞

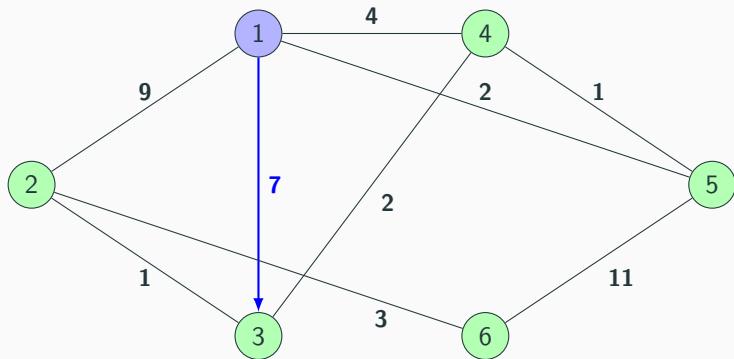
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

	1	2	3	4	5	6
	0	9	∞	∞	∞	∞

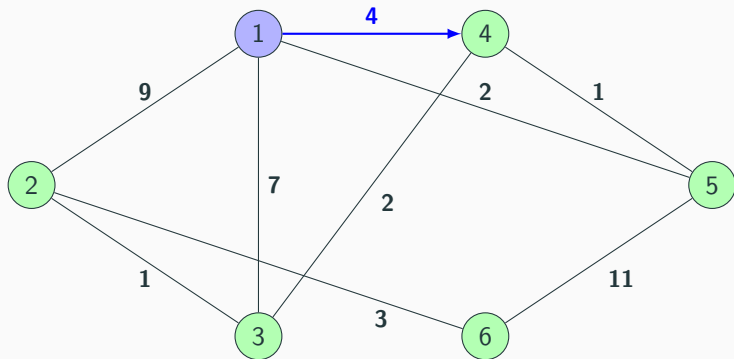
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

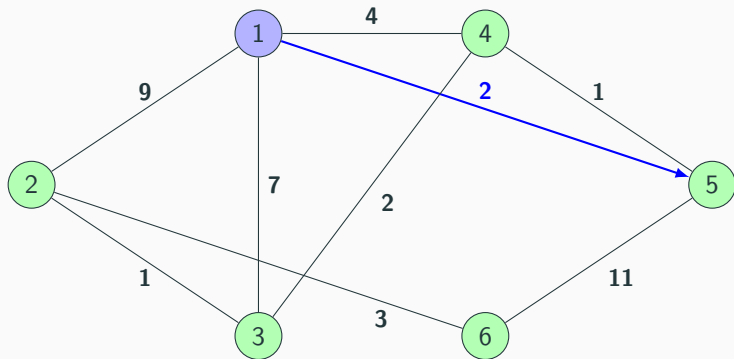
	1	2	3	4	5	6
	0	9	7	∞	∞	∞

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



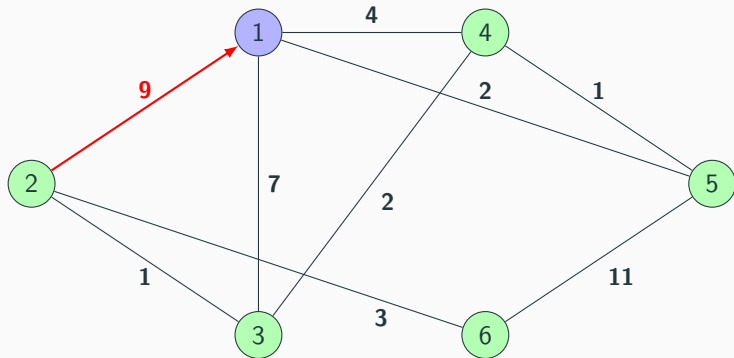
	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	9	7	4	∞	∞

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	9	7	4	2	∞

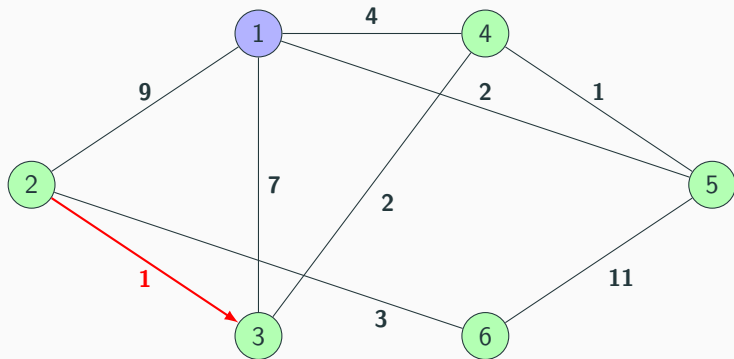
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

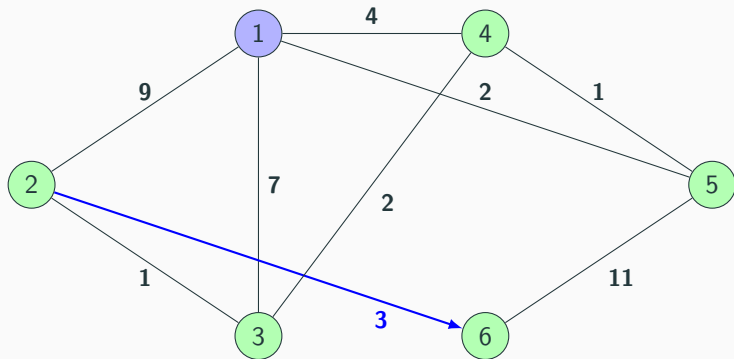
	1	2	3	4	5	6
	0	9	7	4	2	∞

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	9	7	4	2	∞

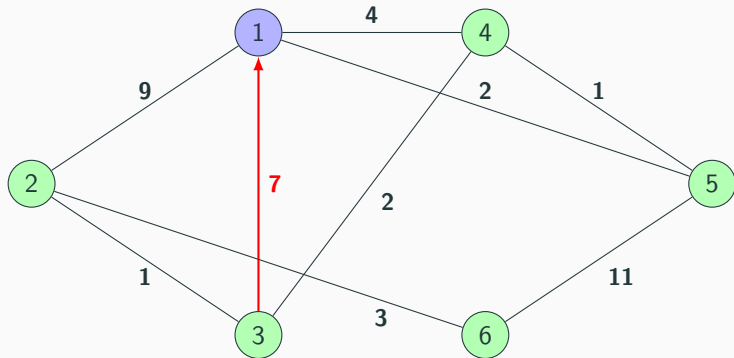
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

	1	2	3	4	5	6
	0	9	7	4	2	12

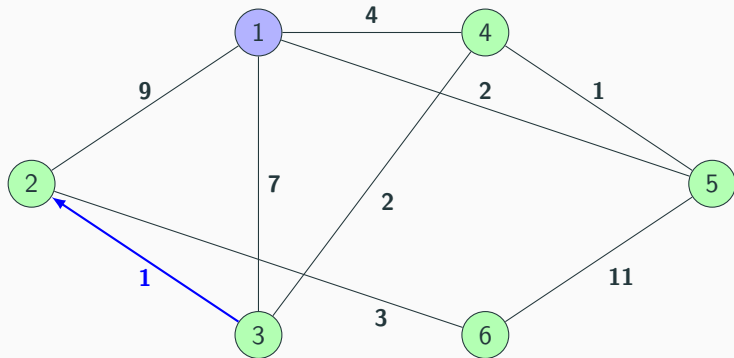
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

	1	2	3	4	5	6
	0	9	7	4	2	12

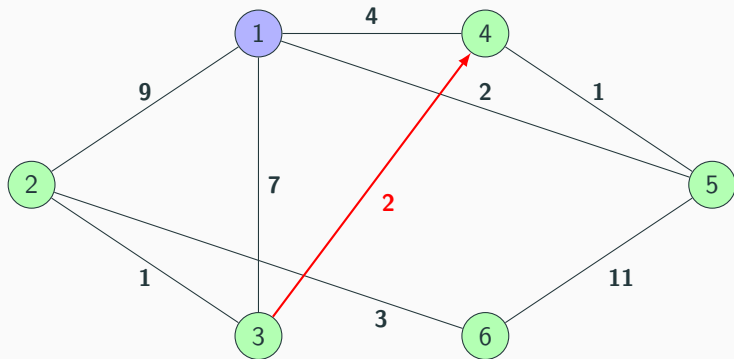
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

	1	2	3	4	5	6
	0	8	7	4	2	12

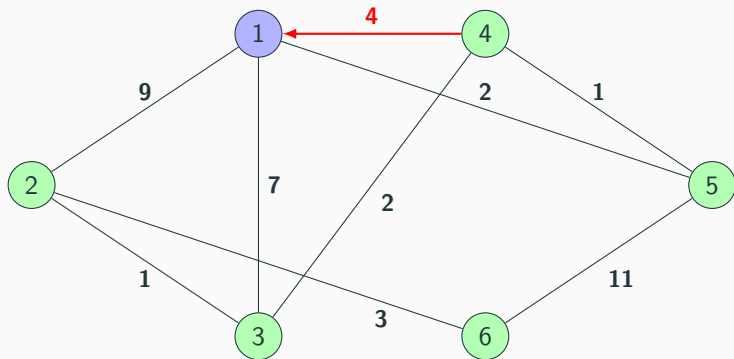
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

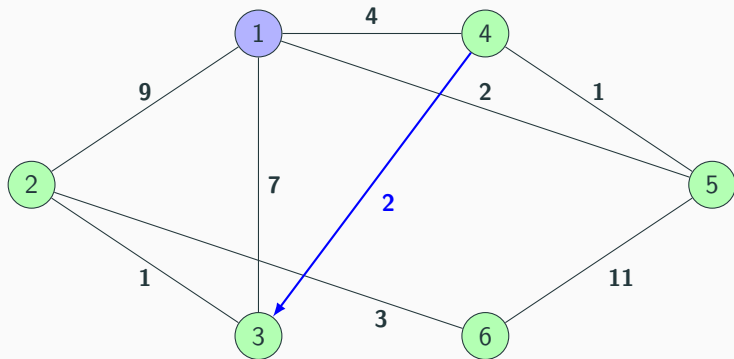
	1	2	3	4	5	6
	0	8	7	4	2	12

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	8	7	4	2	12

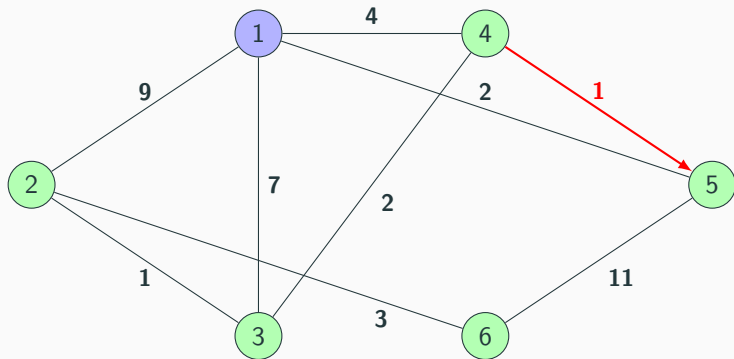
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

	1	2	3	4	5	6
	0	8	6	4	2	12

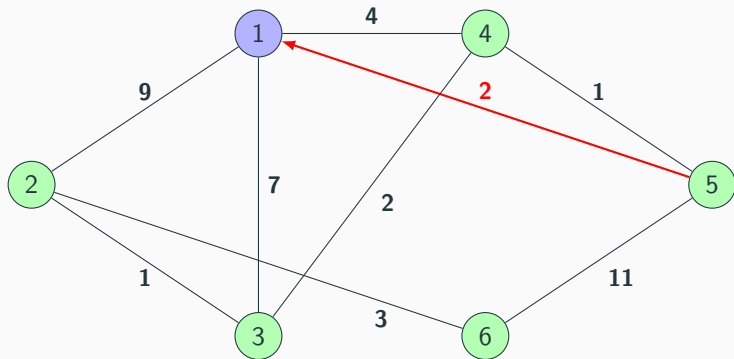
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

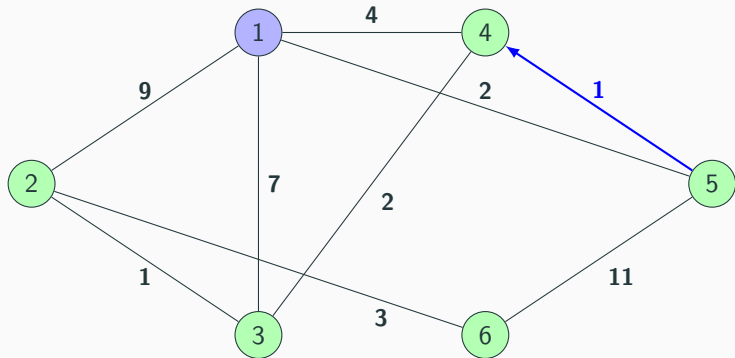
	1	2	3	4	5	6
	0	8	6	4	2	12

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



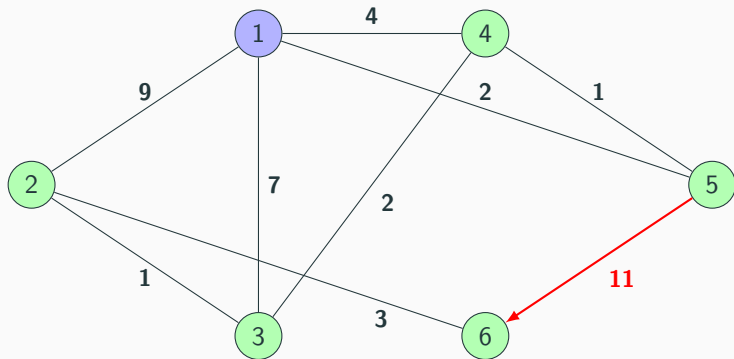
	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	8	6	4	2	12

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	8	6	3	2	12

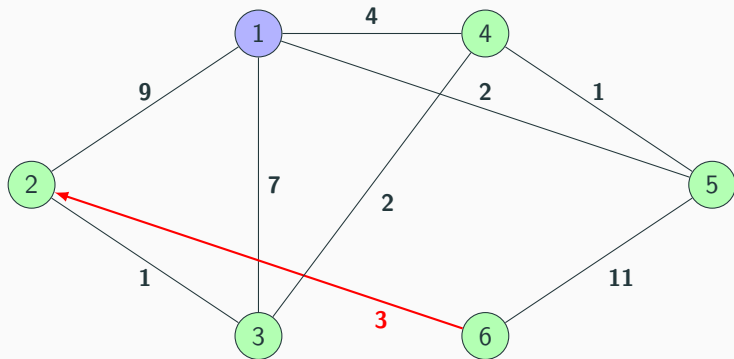
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

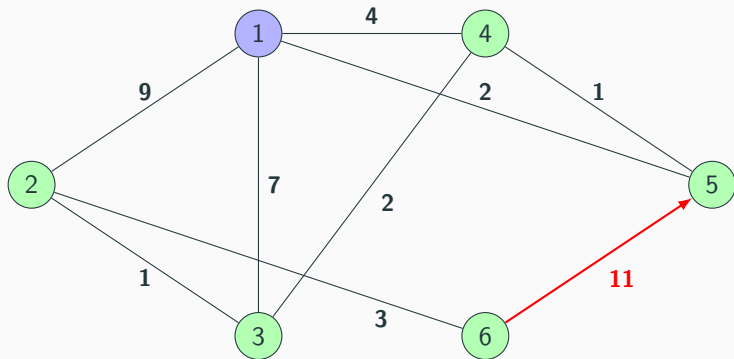
	1	2	3	4	5	6
	0	8	6	3	2	12

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	8	6	3	2	12

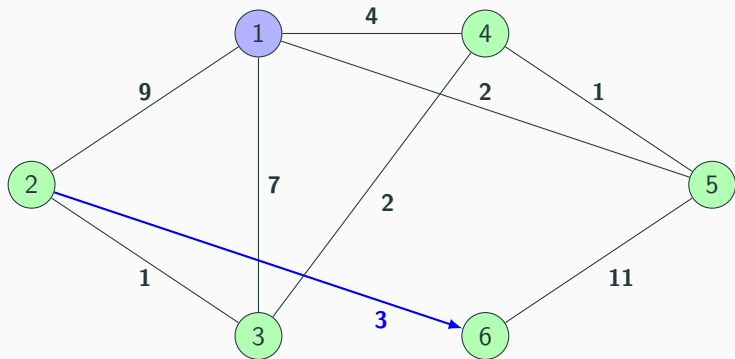
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Distâncias:

	1	2	3	4	5	6
	0	8	6	3	2	12

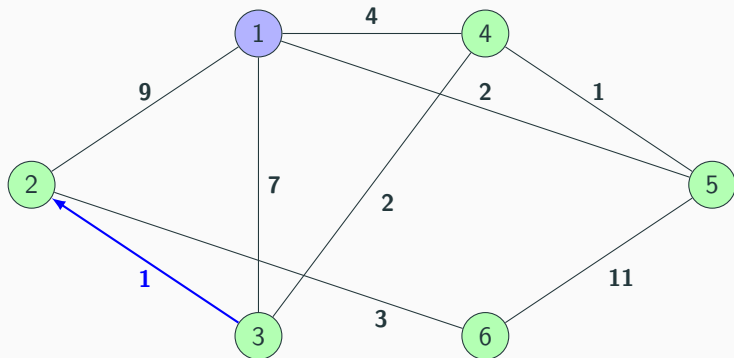
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Round #2

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	8	6	3	2	11

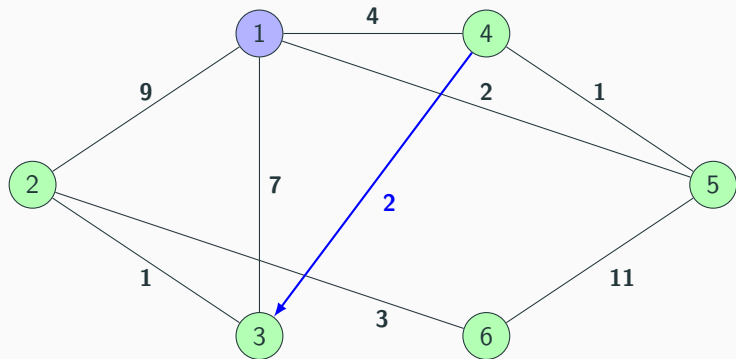
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Round #2

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	7	6	3	2	11

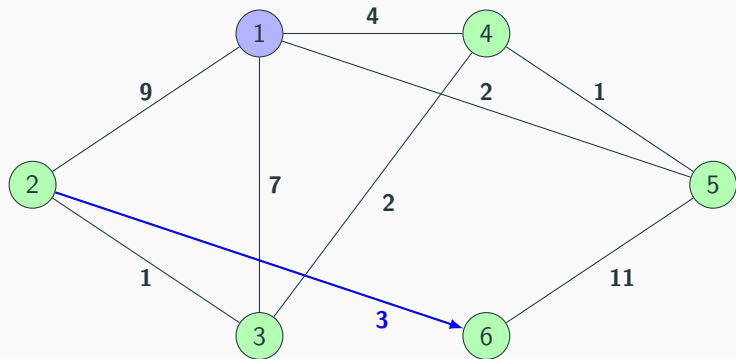
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Round #2

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	7	5	3	2	11

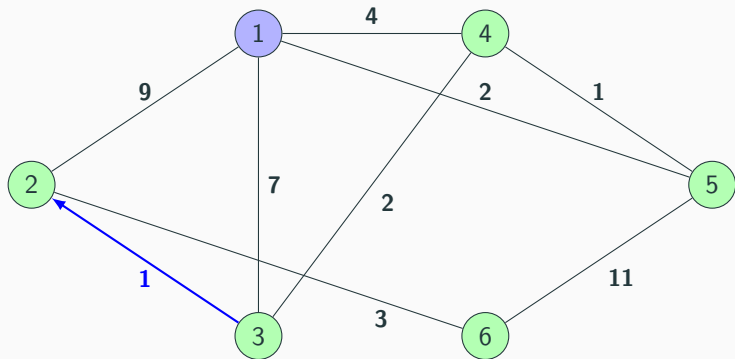
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Round #3

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	7	5	3	2	10

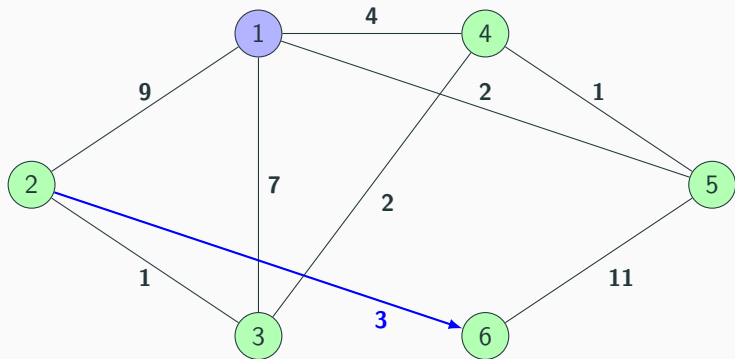
Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Round #3

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	6	5	3	2	10

Visualização do algoritmo de Bellman-Ford



Round #4

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	6	5	3	2	9

Implementação de Bellman-Ford em C++

```
1 #include <bits/stdc++.h>
2
3 using namespace std;
4 using edge = tuple<int, int, int>;
5
6 const int MAX { 100010 }, oo { 1000000010 };
7 int dist[MAX];
8
9 void bellman_ford(int s, int N, const vector<edge>& edges)
10 {
11     for (int i = 1; i <= N; ++i)
12         dist[i] = oo;
13
14     dist[s] = 0;
15
16     for (int i = 1; i <= N - 1; i++)
17         for (const auto& [u, v, w] : edges)
18             dist[v] = min(dist[v], dist[u] + w);
19 }
20
```

Implementação de Bellman-Ford em C++

```
21 int main()
22 {
23     vector<edge> edges { edge(1, 2, 9), edge(1, 3, 7), edge(1, 4, 4),
24                         edge(1, 5, 2), edge(2, 3, 1), edge(2, 6, 3), edge(3, 4, 2),
25                         edge(4, 5, 1), edge(5, 6, 11) };
26
27     for (int i = edges.size() - 1; i >= 0; --i)
28     {
29         const auto& [u, v, w] = edges[i];
30         edges.push_back(edge(v, u, w));
31     }
32
33     bellman_ford(1, 6, edges);
34
35     for (int u = 1; u <= 6; ++u)
36         cout << "Distância mínima de 1 a " << u << ": " << dist[u] << '\n';
37
38     return 0;
39 }
```


Identificação do caminho mínimo

- A implementação do algoritmo de Bellman-Ford apresentada computa a distância mínima entre qualquer vértice u conectado ao vértice s , mas não determina qual seria este caminho
- Para determinar o caminho, é preciso manter o vetor pred , onde $\text{pred}[u]$ é o nó que antecede u no caminho mínimo que vai de s a u
- Inicialmente, todos os elementos deste vetor devem ser iguais a um valor sentinela, exceto o vértice s , que terá $\text{pred}[s] = s$
- Se a aresta (u, v) atualizar a distância $\text{dist}[v]$, então o predecessor deve ser atualizado também: $\text{pred}[v] = u$
- Deste modo, o caminho pode ser recuperado, passando por todos os predecessores até se atingir o nó s
- Se o predecessor de u for o valor sentinela, não há caminho de s a u no grafo

Implementação da identificação do caminho mínimo em C++

```
1 #include <bits/stdc++.h>
2
3 using namespace std;
4 using edge = tuple<int, int, int>;
5
6 const int MAX { 100010 }, oo { 1000000010 };
7 int dist[MAX], pred[MAX];
8
9 void bellman_ford(int s, int N, const vector<edge>& edges)
10 {
11     for (int i = 1; i <= N; ++i) {
12         dist[i] = oo;
13         pred[i] = -1;
14     }
15
16     dist[s] = 0; pred[s] = s;
17 }
```

Implementação da identificação do caminho mínimo em C++

```
18     for (int i = 1; i <= N - 1; i++)
19         for (const auto& [u, v, w] : edges)
20             if (dist[v] > dist[u] + w) {
21                 dist[v] = dist[u] + w;
22                 pred[v] = u;
23             }
24 }
25
26 int main()
27 {
28     vector<edge> edges { edge(1, 2, 9), edge(1, 3, 7), edge(1, 4, 4),
29                         edge(1, 5, 2), edge(2, 3, 1), edge(2, 6, 3), edge(3, 4, 2),
30                         edge(4, 5, 1), edge(5, 6, 11) };
31
32     for (int i = edges.size() - 1; i >= 0; --i)
33     {
34         const auto& [u, v, w] = edges[i];
35         edges.push_back(edge(v, u, w));
36     }
37
38     bellman_ford(1, 6, edges);
```

Implementação da identificação do caminho mínimo em C++

```
40     for (int u = 1; u <= 6; ++u)
41     {
42         cout << "dist(1," << u << ") = " << dist[u] << endl;
43
44         vector<int> path;
45         auto p = u;
46
47         while (p != 1) {
48             path.push_back(p);
49             p = pred[p];
50         }
51
52         path.push_back(1);
53         reverse(path.begin(), path.end());
54
55         for (size_t i = 0; i < path.size(); ++i)
56             cout << path[i] << (i + 1 == path.size() ? "\n" : " -> ");
57     }
58
59     return 0;
60 }
```

Ciclos negativos

- Um grafo G tem um ciclo negativo quando a soma dos pesos das arestas de um ciclo resultam em um valor menor do que zero
- A presença de um ciclo negativo faz com que, a cada iteração, o algoritmo de Bellman-Ford atualize ao menos uma distância
- Desta forma, o próprio algoritmo pode ser usado para detectar tais ciclos
- Basta iterar o algoritmo mais uma vez após o seu término: caso o algoritmo faça alguma atualização nas distâncias, há um ciclo negativo no grafo
- Tal estratégia identificará tais ciclos no componente conectado do grafo, independentemente do nó inicial escolhido

Implementação da identificação de ciclos negativos

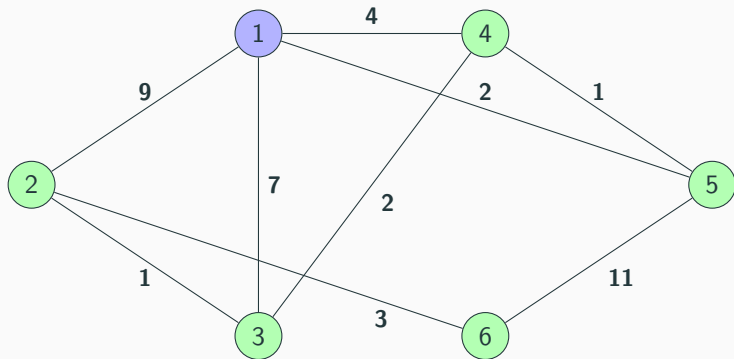
```
9 bool has_negative_cycle(int s, int N, const vector<edge>& edges)
10 {
11     for (int i = 1; i <= N; ++i)
12         dist[i] = oo;
13
14     dist[s] = 0;
15
16     for (int i = 1; i <= N - 1; i++)
17         for (const auto& [u, v, w] : edges)
18             dist[v] = min(dist[v], dist[u] + w);
19
20     for (const auto& [u, v, w] : edges)
21         if (dist[v] > dist[u] + w)
22             return true;
23
24     return false;
25 }
```

SPFA

Shortest Path Fast Algorithm

- O SPFA (*Shortest Path Fast Algorithm*) é uma variante do algoritmo de Bellman-Ford, que reduz o tempo de execução através de uma escolha diferente das arestas a serem processadas
- É criada uma fila de nós a serem processados, e inicialmente o nó s é inserido na fila
- A fila é processada um nó por vez, e caso uma aresta (u, v) reduza a distância até v , o nó v é inserido na fila
- Embora tenha melhor tempo de execução do que o algoritmo de Bellman-Ford, a complexidade no pior caso ainda é de $O(VE)$.

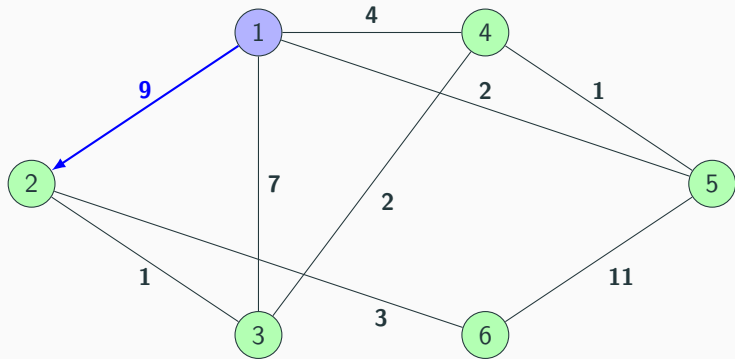
Visualização do algoritmo SPFA



Fila: 1

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	∞	∞	∞	∞	∞

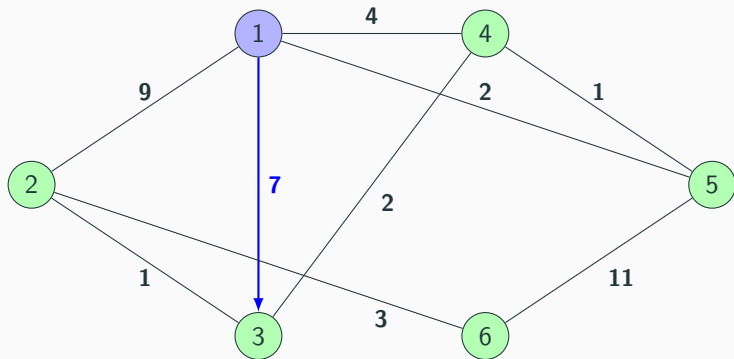
Visualização do algoritmo SPFA



Fila: 2

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	9	∞	∞	∞	∞

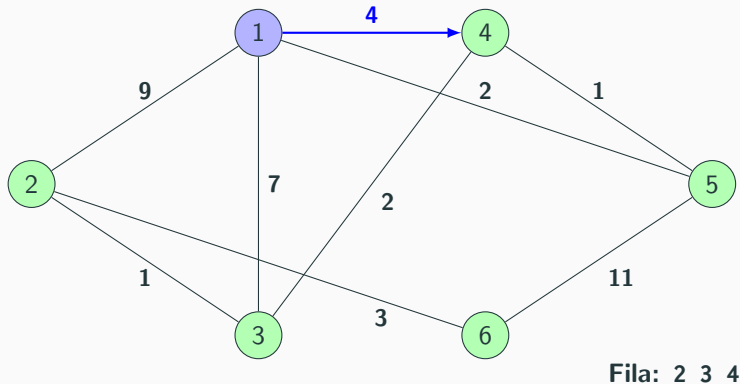
Visualização do algoritmo SPFA



Fila: 2 3

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	9	7	∞	∞	∞

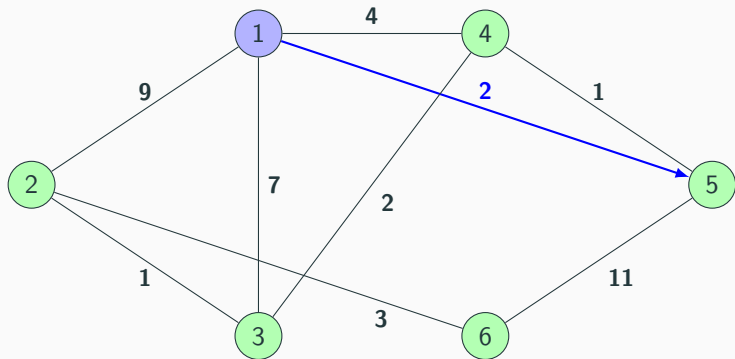
Visualização do algoritmo SPFA



Distâncias:

1	2	3	4	5	6
0	9	7	4	∞	∞

Visualização do algoritmo SPFA

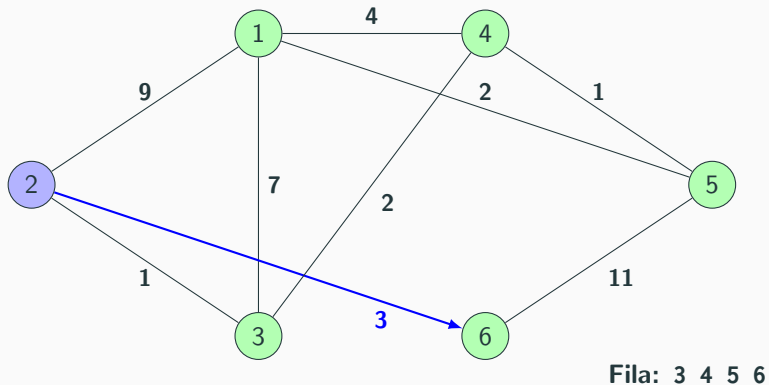


Fila: 2 3 4 5

Distâncias:

1	2	3	4	5	6
0	9	7	4	2	∞

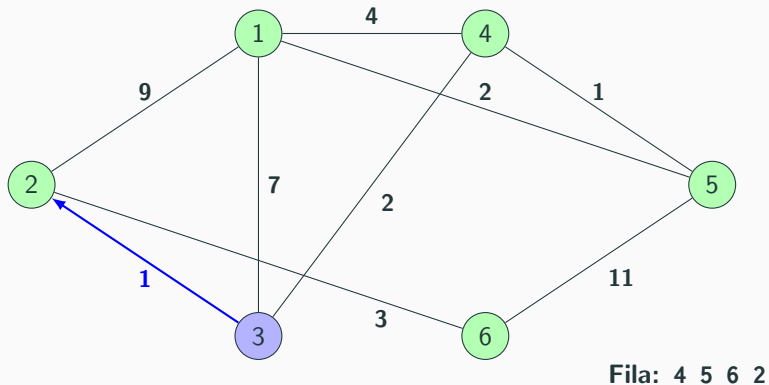
Visualização do algoritmo SPFA



Distâncias:

1	2	3	4	5	6
0	9	7	4	2	12

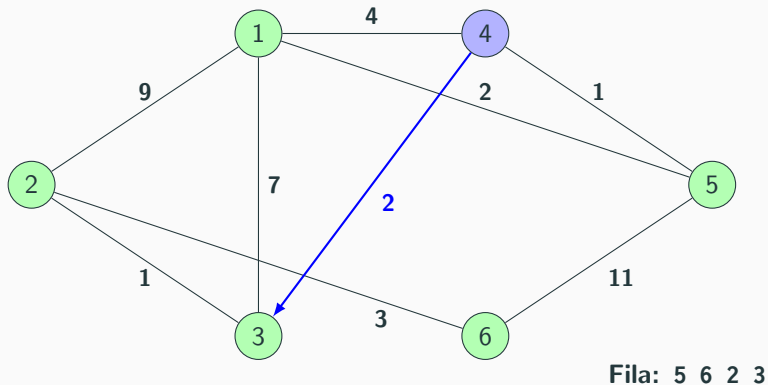
Visualização do algoritmo SPFA



Distâncias:

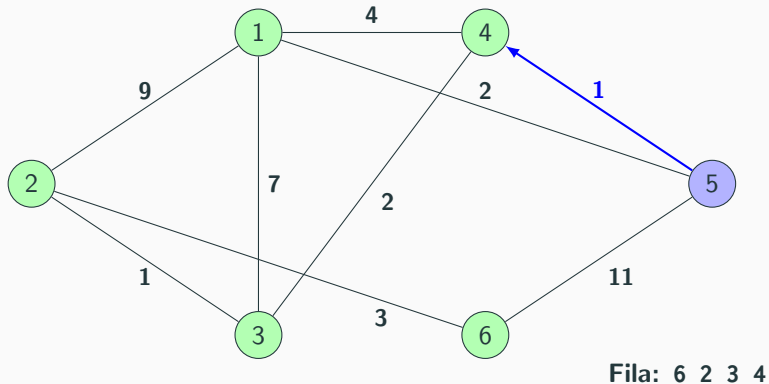
1	2	3	4	5	6
0	8	7	4	2	12

Visualização do algoritmo SPFA



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	8	6	4	2	12

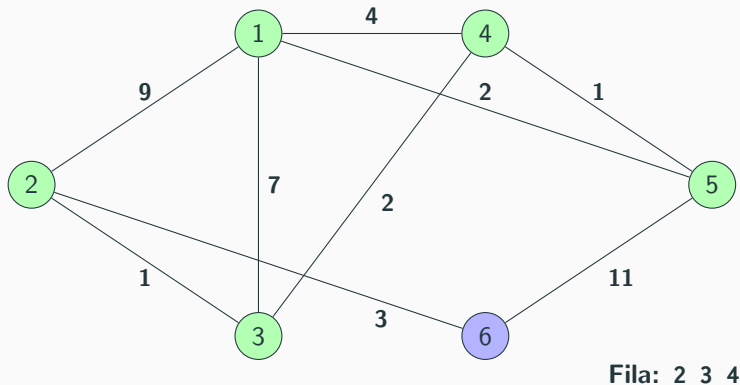
Visualização do algoritmo SPFA



Distâncias:

1	2	3	4	5	6
0	8	6	3	2	12

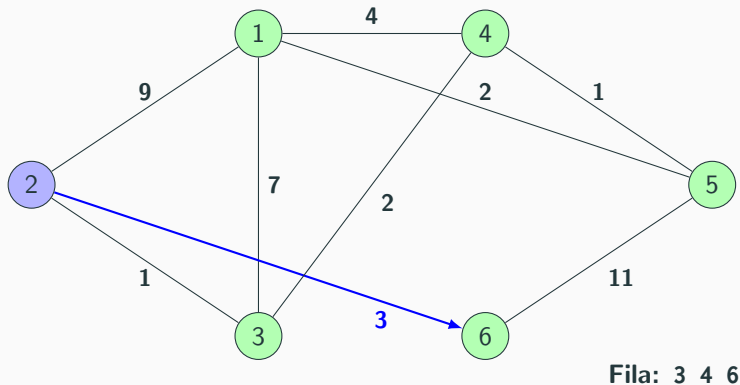
Visualização do algoritmo SPFA



Distâncias:

1	2	3	4	5	6
0	8	6	3	2	12

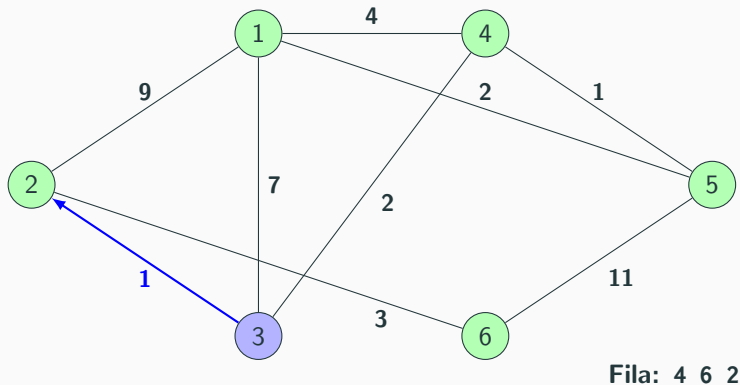
Visualização do algoritmo SPFA



Distâncias:

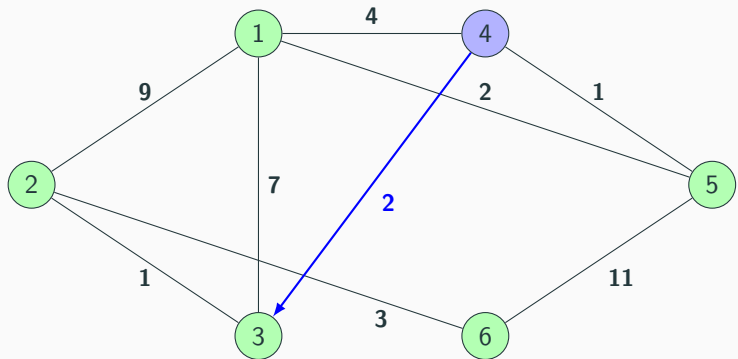
1	2	3	4	5	6
0	8	6	3	2	11

Visualização do algoritmo SPFA



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	7	6	3	2	11

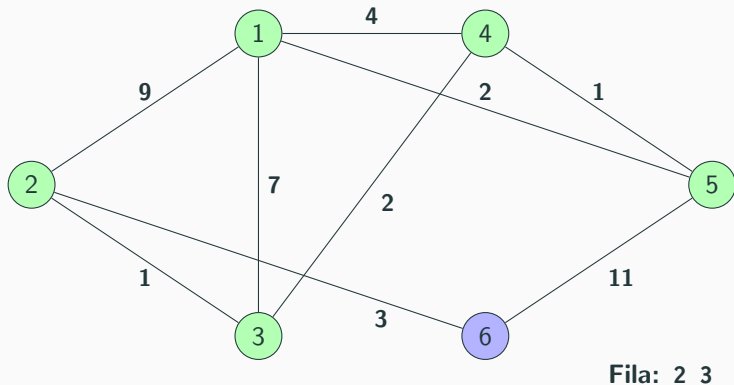
Visualização do algoritmo SPFA



Fila: 6 2 3

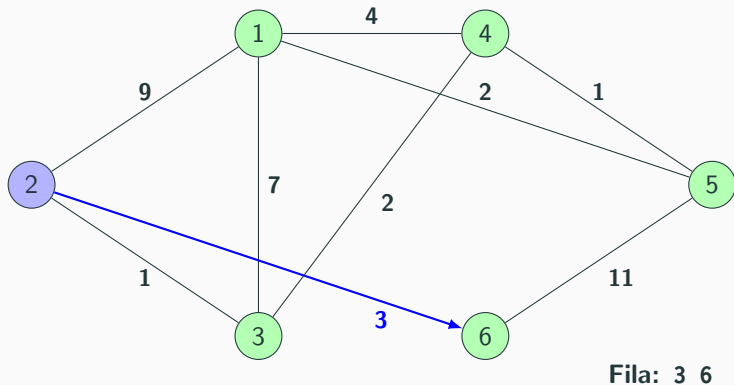
	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	7	5	3	2	11

Visualização do algoritmo SPFA



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	7	5	3	2	11

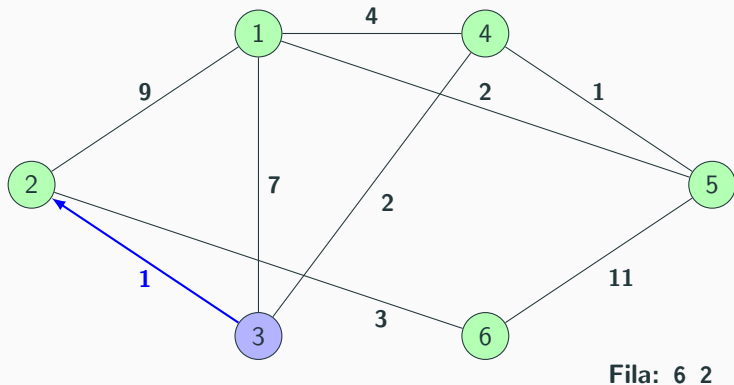
Visualização do algoritmo SPFA



Distâncias:

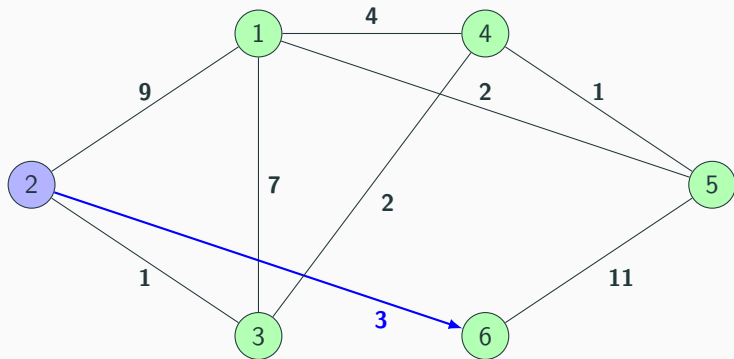
1	2	3	4	5	6
0	7	5	3	2	10

Visualização do algoritmo SPFA



	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	6	5	3	2	10

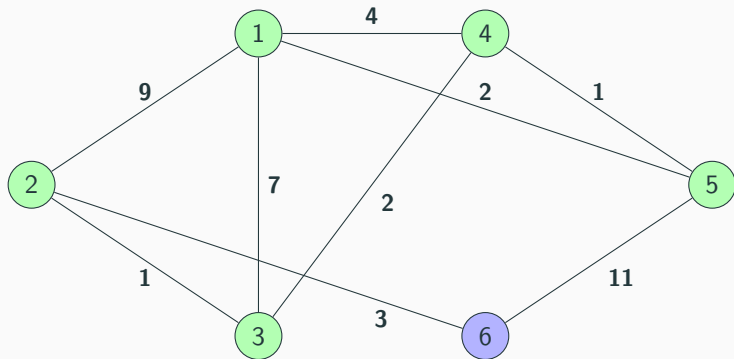
Visualização do algoritmo SPFA



Fila: 6

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	6	5	3	2	9

Visualização do algoritmo SPFA



Fila:

	1	2	3	4	5	6
Distâncias:	0	6	5	3	2	9

Implementação do SPFA em C++

```
1 #include <bits/stdc++.h>
2
3 using namespace std;
4 using ii = pair<int, int>;
5 using edge = tuple<int, int, int>;
6
7 const int MAX { 100010 }, oo { 1000000010 };
8 vector<ii> adj[MAX];
9 int dist[MAX];
10
11 void spfa(int s, int N) {
12     bitset<MAX> in_queue;
13
14     for (int i = 1; i <= N; ++i)
15         dist[i] = oo;
16
17     dist[s] = 0;
18
19     queue<int> q;
20     q.push(s);
21     in_queue[s] = true;
```

Implementação do SPFA em C++

```
23  while (not q.empty())
24  {
25      auto u = q.front();
26      q.pop();
27      in_queue[u] = false;
28
29      for (const auto& [v, w] : adj[u])
30      {
31          if (dist[v] > dist[u] + w)
32          {
33              dist[v] = dist[u] + w;
34
35              if (not in_queue[v])
36              {
37                  q.push(v);
38                  in_queue[v] = true;
39              }
40          }
41      }
42  }
43 }
```

Implementação do SPFA em C++

```
45 int main()
46 {
47     vector<edge> edges { edge(1, 2, 9), edge(1, 3, 7), edge(1, 4, 4),
48         edge(1, 5, 2), edge(2, 3, 1), edge(2, 6, 3), edge(3, 4, 2),
49         edge(4, 5, 1), edge(5, 6, 11) };
50
51     for (const auto& [u, v, w] : edges)
52     {
53         adj[u].push_back(ii(v, w));
54         adj[v].push_back(ii(u, w));
55     }
56
57     spfa(1, 6);
58
59     for (int u = 1; u <= 6; ++u)
60         cout << "Distância mínima de 1 a " << u << ": " << dist[u] << '\n';
61
62     return 0;
63 }
```

SPFA e ciclos negativos

- A presença de ciclos negativos pode levar o SPFA a um laço infinito, pois a fila nunca ficaria vazia neste caso
- Para evitar tal situação, é preciso manter um registro do número de vezes que um nó entrou na fila
- Se um mesmo nó tiver entrado V vezes na fila, o grafo tem um ciclo negativo
- Com este cuidado adicional, a implementação do SPFA é mais longa do que a do algoritmo de Bellman-Ford, mas produz um tempo de execução menor
- Para grafos sem a presença de arestas negativas, contudo, há um algoritmo mais eficiente para o mesmo problema: o algoritmo de Dijkstra

1. **HALIM**, Felix; **HALIM**, Steve. *Competitive Programming 3*, 2010.
2. **LAAKSONEN**, Antti. *Competitive Programmer's Handbook*, 2018.
3. **SKIENA**, Steven S.; **REVILLA**, Miguel A. *Programming Challenges*, 2003.