

V Escola de Inverno da Maratona de Programação

Congresso da Sociedade Brasileira de Computação 2024

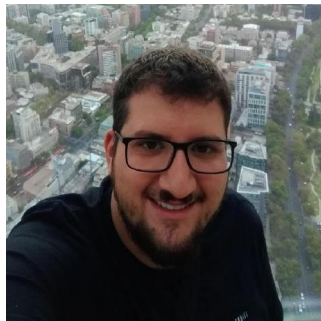
Alberto Tavares Duarte Neto
Daniel Saad Nogueira Nunes
Edson Alves da Costa Júnior

24 de julho de 2024

Alberto Neto

Daniel Saad

- ▶ Professor do Instituto Federal de Brasília, *campus* Taguatinga.
- ▶ Técnico das equipes do IFB.
- ▶ Participou do comitê de sistemas das Maratonas de Programação da SBC.
- ▶ Doutor em Informática pela Universidade de Brasília.
- ▶ Tema: compressão e estruturas de dados compactadas para textos altamente repetitivos.
- ▶ E-mail: daniel.nunes@ifb.edu.br



Edson Alves

- ▶ Professor da Faculdade UnB Gama.
- ▶ Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília.
- ▶ Tema: propagação de incertezas em eletromagnetismo.
- ▶ E-mail: edsonaves@unb.br



Definição (Passeio)

Um passeio de tamanho m é uma sequência de vértices v_1, \dots, v_m de modo que $(v_i, v_{i+1}) \in E$, $1 \leq i < n$.

Note que, de acordo com essa definição, podemos passar pelo mesmo vértice ou aresta mais de uma vez.

Alazão

Modelagem do problema

O problema quer saber, para um grafo $G = (V, E)$, se existe um passeio de tamanho múltiplo de k partindo do vértice de origem v_1 e chegando ao vértice destino v_n .

Alazão: solução

- ▶ Iremos resolver esse problema utilizando busca em profundidade com *memoization*.
- ▶ Armazenaremos em uma tabela $T[u][l] = 1$ se existe um caminho partindo da origem e chegando em u com tamanho de passeio $l \bmod k$. Caso contrário, $T[u][l] = 0$.
- ▶ Se existe uma aresta (u, v) e é possível chegar ao vértice u com um passeio de tamanho $l \bmod k$, então é possível chegar ao vértice v com um passeio de tamanho $l + 1 \bmod k$.
- ▶ Fácil de implementar com uma busca em profundidade (DFS).
- ▶ Obviamente existe um passeio de tamanho múltiplo de k do vértice origem v_1 ao vértice destino v_n se $T[n][0] = 1$.

Alazão: solução

```
function<void(int,int)> dfs = [&](int u, int x) {  
    vis[u][x] = 1;  
    int y = (x+1)%k;  
    for(int v=0;v<n;v++) {  
        if(not adj[u][v]) continue;  
        if(not vis[v][y]) dfs(v,y);  
    }  
};  
dfs(0,0);  
if(vis[n-1][0]) {  
    cout << "Sim" << endl;  
}  
else {  
    cout << "Nao" << endl;  
}
```


Análise de pior-caso

Como a busca em profundidade pode passar por cada nó v até k vezes, a complexidade da solução é $\Theta((|V| + |E|) \cdot k)$.

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Ideias?

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Ideias?

- Iterar as posições de 1 até N e decidir para toda posição qual será o valor nela. Quais são os problemas dessa abordagem?

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Ideias?

- ▶ Iterar as posições de 1 até N e decidir para toda posição qual será o valor nela. Quais são os problemas dessa abordagem? Não podemos usar o mesmo valor mais de uma vez, então teríamos que armazenar uma máscara de tamanho N como estado, o que nos daria pelo menos 2^N estados! Ou seja, TLE.

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Ideias?

- ▶ Iterar as posições de 1 até N e decidir para toda posição qual será o valor nela. Quais são os problemas dessa abordagem? Não podemos usar o mesmo valor mais de uma vez, então teríamos que armazenar uma máscara de tamanho N como estado, o que nos daria pelo menos 2^N estados! Ou seja, TLE.
- ▶ Uma boa intuição para problemas de DP é pensar se os seus estados parecem armazenar bem mais informação do que o necessário; sendo este o caso, pode ser possível remodelar a sua recursão com menos estados.

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Solução:

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Solução:

- ▶ Vamos iterar as posições de 1 até N . Como podemos modelar o problema de forma a não precisar distinguir os elementos?

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Solução:

- ▶ Mantemos uma variável com os valores que ainda não tiveram posição alocada. Ao passar da posição i para a posição $i + 1$, aumentamos o desbalanço pela mesma quantidade de elementos não alocados.

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Solução:

- ▶ Mantemos uma variável com os valores que ainda não tiveram posição alocada. Ao passar da posição i para a posição $i + 1$, aumentamos o desbalanço pela mesma quantidade de elementos não alocados.
- ▶ Essa ideia considera apenas mover elementos para posições mais a direita. Para mover para a esquerda, podemos armazenar uma outra variável de posições livres para a esquerda. Ao chegar na posição i , podemos decidir usar um elemento livre na posição i , ou armazenar essa posição e usar mais na frente.

Balanceando Competições

Problema

O desbalanço de uma permutação p é a soma das diferenças absolutas $\sum |p[i] - i|$. Dados inteiros N e T ($1 \leq n \leq 80$, $0 \leq T \leq 6400$), calcule quantas permutações de tamanho N possuem desbalanço menor ou igual a T .

Solução:

- ▶ Mantemos uma variável com os valores que ainda não tiveram posição alocada. Ao passar da posição i para a posição $i + 1$, aumentamos o desbalanço pela mesma quantidade de elementos não alocados.
- ▶ Essa ideia considera apenas mover elementos para posições mais a direita. Para mover para a esquerda, podemos armazenar uma outra variável de posições livres para a esquerda. Ao chegar na posição i , podemos decidir usar um elemento livre na posição i , ou armazenar essa posição e usar mais na frente.
- ▶ Note que a quantidade de elementos livres sempre é igual a quantidade de posições livres. Assim, nossos estados são: posição, elementos livres, desbalanço atual. Complexidade final: $O(N^2 T)$.

Balanceando Competições

```
11 dp(int i, int elm, int t) {
    int pos = elm; long long res = 0;
    if(elm < 0 or pos < 0 or T < 0) return 0;
    // i fica no i
    res = dp(i+1, elm, t - pos - elm);

    // coloco um elm no i, usa o elm i pra frente
    if(pos and elm)
        res = (res + elm*dp(i+1, elm+1-1, t - pos - (elm)) ) % MOD;

    // nao coloco um elm no i (pos++), usa o elm i pra frente
    res = (res + dp(i+1, elm+1, t - (pos+1) - (elm+1))) % MOD;

    // coloco um elm no i, usa o elm pra tras
    if(elm)
        res = (res + 1ll*elm*elm*dp(i+1, elm-1, t - (pos-1) - (elm-1))) % MOD;

    // nao coloco um elm no i (pos++), usa o elm i pra tras
    if(pos) res = (res + elm*dp(i+1, elm, t - pos - elm)) % MOD;

    return res;
}
```

Balanceando Competições

arstarst

```
11 dp(int i, int elm, int t) {  
    int pos = elm; long long res = 0;  
    if(elm < 0 or pos < 0 or T < 0) return 0;  
    // i fica no i  
    res = dp(i+1, elm, t - pos - elm);  
  
    // coloco um elm no i, usa o elm i pra frente  
    if(pos and elm)  
        res = (res + elm*dp(i+1, elm+1-1, t - pos - (elm)) ) % MOD;  
  
    // nao coloco um elm no i (pos++), usa o elm i pra frente  
    res = (res + dp(i+1, elm+1, t - (pos+1) - (elm+1))) % MOD;  
  
    // coloco um elm no i, usa o elm pra tras  
    if(elm)  
        res = (res + 1ll*elm*elm*dp(i+1, elm-1, t - (pos-1) - (elm-1))) % MOD;  
  
    // nao coloco um elm no i (pos++), usa o elm i pra tras  
    if(pos) res = (res + elm*dp(i+1, elm, t - pos - elm)) % MOD;  
  
    return res;  
}
```

Balanceando Competições

Análise de pior-caso

Existem N valores para a variável i , N valores para a variável elm e T valores para a variável t . Como a transição da DP é $O(1)$, a complexidade final é $O(N^2 T)$.

Cidades Planejadas

Problema

Dada uma matriz N por N , representando o mapa da Nlogonia, diga se ela é simétrica com respeito à diagonal principal.

Cidades Planejadas

Problema

Dada uma matriz N por N , representando o mapa da Nlogonia, diga se ela é simétrica com respeito à diagonal principal.

Solução:

- ▶ Ideia principal: encontrar uma fórmula para achar os índices correspondentes ao elemento $A[i][j]$.

Cidades Planejadas

Problema

Dada uma matriz N por N , representando o mapa da Nlogonia, diga se ela é simétrica com respeito à diagonal principal.

Solução:

- ▶ Ideia principal: encontrar uma fórmula para achar os índices correspondentes ao elemento $A[i][j]$.
- ▶ A matriz é simétrica com respeito à diagonal principal se é igual a sua transposta; ou seja, se $A[i][j] == A[j][i]$ para todos $i, j = 1, \dots, N$.

Cidades Planejadas

Problema

Dada uma matriz N por N , representando o mapa da Nlogonia, diga se ela é simétrica com respeito à diagonal principal.

Solução:

- ▶ Ideia principal: encontrar uma fórmula para achar os índices correspondentes ao elemento $A[i][j]$.
- ▶ A matriz é simétrica com respeito à diagonal principal se é igual a sua transposta; ou seja, se $A[i][j] == A[j][i]$ para todos $i, j = 1, \dots, N$.
- ▶ Basta fazer dois laços de repetição aninhados e verificar se a igualdade acima não vale para algum par.

Cidades Planejadas

```
int main() {  
    int n;  
    cin >> n;  
  
    vector<vector<char>> mat(n, vector<char>(n, 0));  
    // leitura da matriz omitida  
  
    bool simetrica = 1;  
    for(int i = 0; i < n; i++) {  
        for(int j = 0; j < n; j++) {  
            if(mat[i][j] != mat[j][i]) {  
                simetrica = 0;  
            }  
        }  
    }  
  
    cout << (simetrica ? "Sim" : "Nao") << endl;  
  
    return 0;  
}
```

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Ideia:

- ▶ Podemos tentar modelar o problema com DP.

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Ideia:

- ▶ Podemos tentar modelar o problema com DP.
- ▶ Seja $f(u)$ o valor esperado de arestas percorridas até chegar no 1. Como fica a fórmula para $f(u)$?

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Ideia:

- ▶ Podemos tentar modelar o problema com DP.
- ▶ Seja $f(u)$ o valor esperado de arestas percorridas até chegar no 1. Como fica a fórmula para $f(u)$?
- ▶ se $u = 1$ então $f(u) = 0$. Caso contrário,

$$f(u) = 1 + \sum_{v \in \text{adj}[u]} \frac{1}{m} f(v), \text{ onde } m = \text{adj}[u].\text{size}()$$

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Ideia:

- ▶ Podemos tentar modelar o problema com DP.
- ▶ Seja $f(u)$ o valor esperado de arestas percorridas até chegar no 1. Como fica a fórmula para $f(u)$?
- ▶ se $u = 1$ então $f(u) = 0$. Caso contrário,

$$f(u) = 1 + \sum_{v \in \text{adj}[u]} \frac{1}{m} f(v), \text{ onde } m = \text{adj}[u].\text{size}()$$

- ▶ Ciclos na recursão impedem soluções imediatas com DP.

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Ideia:

- ▶ Podemos tentar modelar o problema com DP.

- ▶ Como fica a fórmula para $f(u)$?

- ▶

$$f(u) = 1 + \sum_{v \in \text{adj}[u]} \frac{1}{m} f(v), \text{ onde } m = \text{adj}[u].\text{size}()$$

- ▶ Ciclos na recursão impedem soluções imediatas com DP.

- ▶ Se considerarmos os valores $f(u)$ como variáveis desconhecidas, temos um sistema linear de equações. O sistema pode ser resolvido com Gauss, mas com complexidade $O(N^3)$, que daria TLE (Pergunta: o sistema sempre tem solução?).

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Solução:

- ▶ Como o sistema deste problema é mais específico, podemos explorá-lo para encontrar uma solução mais eficiente.

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Solução:

- ▶ Como o sistema deste problema é mais específico, podemos explorá-lo para encontrar uma solução mais eficiente.
- ▶ Escreva as fórmulas e tente resolver o seguinte caso de teste:

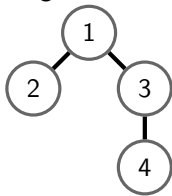
De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Solução:

- ▶ Como o sistema deste problema é mais específico, podemos explorá-lo para encontrar uma solução mais eficiente.
- ▶ Escreva as fórmulas e tente resolver o seguinte caso de teste:



De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Solução:

- ▶ Como o sistema deste problema é mais específico, podemos explorá-lo para encontrar uma solução mais eficiente.

De volta para casa

Problema

É dada uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Solução:

- ▶ Como o sistema deste problema é mais específico, podemos explorá-lo para encontrar uma solução mais eficiente.
- ▶ Ideia principal: enraíze a árvore no 1. Podemos escrever a fórmula de $f(u)$ como $f(u) = a + b \cdot f(p)$, onde p é o ancestral direto de u .

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Solução:

- ▶ Como o sistema deste problema é mais específico, podemos explorá-lo para encontrar uma solução mais eficiente.
- ▶ Ideia principal: enraíze a árvore no 1. Podemos escrever a fórmula de $f(u)$ como $f(u) = a + b \cdot f(p)$, onde p é o ancestral direto de u .
- ▶ De fato, provando indutivamente: o caso base são as folhas, em que isso é evidente. Para um vértice u , seja v um descendente direto. Por hipótese de indução, podemos escrever $f(v) = a + b \cdot f(u)$; aplicando esta substituição na fórmula de $f(u)$, segue a afirmação.

De volta para casa

Problema

É dado uma árvore de N vértices, com vértices indexados de 1 até N . Quando se está em um vértice $u \neq 1$, é percorrida uma aresta adjacente a u escolhida com mesma probabilidade. Se está no 1, o algoritmo para. Para cada vértice, calcule o valor esperado de arestas percorridas até que o algoritmo pare.

Solução:

- ▶ Como o sistema deste problema é mais específico, podemos explorá-lo para encontrar uma solução mais eficiente.
- ▶ Ideia principal: enraíze a árvore no 1. Podemos escrever a fórmula de $f(u)$ como $f(u) = a + b \cdot f(p)$, onde p é o ancestral direto de u .
- ▶ De fato, provando indutivamente: o caso base são as folhas, em que isso é evidente. Para um vértice u , seja v um descendente direto. Por hipótese de indução, podemos escrever $f(v) = a + b \cdot f(u)$; aplicando esta substituição na fórmula de $f(u)$, segue a afirmação.
- ▶ Façamos uma dfs e calculemos os coeficientes começando das folhas. Como $f(1) = 0$, uma segunda dfs propaga de cima para baixo os valores do ancestral direto e, substituindo-o, obtemos os valores desejados.

De volta para casa

```
void dfs(int u, int p) {
    int m = g[u].size();
    ll invm = inv(m);
    a[u] = 1;
    if(u != p) b[u] = inv(m);

    ll somab = 0;
    for(auto v : g[u]) {
        if(v == p) continue;
        dfs(v, u);

        a[u] = (a[u] + a[v]*invm) % MOD;
        somab = (somab + b[v]) % MOD;
    }
    a[u] = (a[u] * m) % MOD;
    b[u] = inv(m - somab + MOD);
    a[u] = (a[u] * b[u]) % MOD;

    if(u == 1) {a[1] = 0, b[1] = 0;}
```

De volta para casa

```
11 f[MAX];

void dfs2(int u, int p) {
    if(u == 1) res[u] = 0;
    else f[u] = (a[u] + b[u]*f[p]) % MOD;

    for(auto v : g[u]) {
        if(v == p) continue;
        dfs2(v, u);
    }
}
```

Modelagem do problema

Trata-se de descobrir um ciclo Hamiltoniano, isto é, um ciclo que começa em um vértice, passa por todos os outros, sem repeti-los, e retorna ao vértice original.

Observação

Em um ciclo Hamiltoniano, tanto faz o vértice de origem, já que é possível passar por todos os outros e retornar ao vértice original.

Estrutural: solução

Construção do grafo

Primeiramente, devemos construir um grafo não-direcionado.

Para cada par de strings (S_u, S_v) , cria-se uma aresta (u, v) sempre que a **distância de Hamming** entre as strings for menor ou igual a X .

Esse processo leva tempo $\Theta(V^2)$.

Estrutural: solução

```
int hamming_distance(const string &s1, const string &s2) {  
    assert(s1.size() == s2.size());  
    int d = 0;  
    for (size_t i = 0; i < s1.size(); i++) {  
        if (s1[i] != s2[i])  
            d++;  
    }  
    return d;  
}
```

Estrutural: solução

```
vector<vector<bool>> build_graph(vector<string> &vs, int make_edge_threshold) {  
    vector<vector<bool>> graph(n, vector<bool>(n, false));  
    for (int i = 0; i < n; i++) {  
        for (int j = i + 1; j < n; j++) {  
            if (hamming_distance(vs[i], vs[j]) <= make_edge_threshold) {  
                graph[i][j] = true;  
                graph[j][i] = true;  
            }  
        }  
    }  
    return graph;  
}
```

Estrutural: solução

Caso base

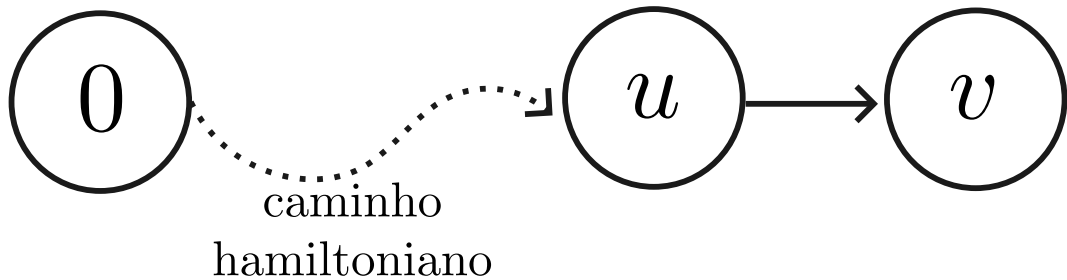
- ▶ O caso com $|V| = 1$ é fácil, basta imprimir o ciclo contendo o próprio vértice.
- ▶ Com $|V| > 1$, a solução pode ser obtida via **programação dinâmica**.

Estrutural: solução

Programação dinâmica

- ▶ Uma vez que o grafo $G = (V, E)$ foi construído, iremos resolver o problema por programação dinâmica.
- ▶ Suponha que para um subconjunto $S \subseteq V$, tenhamos um caminho hamiltoniano iniciando no vértice 0 e terminando no vértice u .
- ▶ Se existe uma aresta (u, v) e $v \notin S$, então existe um caminho hamiltoniano para o conjunto $S \cup \{v\}$ terminando em v .
- ▶ Além de armazenar se existe ou não o caminho hamiltoniano, guardaremos a informação do vértice predecessor, u , para recuperar o caminho hamiltoniano.

Estrutural: solução



Estrutural: solução

Programação dinâmica

$$T(v, S) = \begin{cases} -1, & v = 0 \text{ e } S = \{0\} \\ u, & u \in S \text{ e } T(S - \{v\}, u) \neq \perp \text{ e } u \neq v \text{ e } (u, v) \in E \\ \perp, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Observação

Existirá um ciclo hamiltoniano sempre que existir alguma entrada $T(v, V) \neq \perp$ e aresta $(v, 0) \in E$.

Estrutural: solução

```
vector<vector<int>> dp(vector<vector<bool>> &graph) {  
    vector<vector<int>> matrix(n, vector<int>(1 << n, -2));  
    matrix[0][1 << 0] = -1;  
    for (int mask = 0; mask < 1 << n; mask++) {  
        for (int j = 0; j < n; j++) {  
            if ((mask & (1 << j)) == 0)  
                continue;  
            for (int i = 0; i < n; i++) {  
                if (mask & 1 << i and i != j and  
                    matrix[i][mask ^ (1 << j)] != -2 and graph[i][j]) {  
                    matrix[j][mask] = i;  
                }  
            }  
        }  
    }  
    return matrix;  
}
```

Estrutural: solução

```
void solve() {  
    auto graph = build_graph(addresses, x);  
    auto matrix = dp(graph);  
    bool has_sol = false;  
    for (int i = 0; i < n; i++) {  
        if (matrix[i][(1 << n) - 1] != -2 and graph[i][0]) {  
            print_solution(matrix, addresses, i);  
            has_sol = true;  
            break;  
        }  
    }  
    if (!has_sol) {  
        cout << "impossivel\n";  
    }  
}
```

Estrutural: solução

```
void print_solution(const vector<vector<int>> &matrix,
                   const vector<string> &addresses, const int end_vertex)
{
    vector<string> path;
    int next_v = end_vertex;
    int mask = (1 << n) - 1;
    do {
        int cur_v = next_v;
        path.push_back(addresses[cur_v]);
        next_v = matrix[cur_v][mask];
        mask = mask ^ (1 << cur_v);
    } while (next_v != -1);
    reverse(path.begin(), path.end());
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        cout << path[i] << " -> ";
    }
    cout << addresses[0] << "\n";
}
```

Estrutural: análise

Análise de pior-caso

O tempo de pior caso da solução é de $\Theta(2^{|V|} \cdot |V|^2)$, visto que a tabela de programação dinâmica tem $\Theta(2^{|V|} \cdot |V|)$ estados e, para computar cada um, gasta-se tempo $\Theta(|V|)$ no pior caso.

Fila da Padaria

Modelagem do problema

Dada uma sequência de elementos v_1, \dots, v_n , o problema quer saber, para cada v_i , a quantidade de elementos $v_j, j < i$, isto é, à esquerda de v_i , que são maiores que v_i .

Fila da padaria: solução

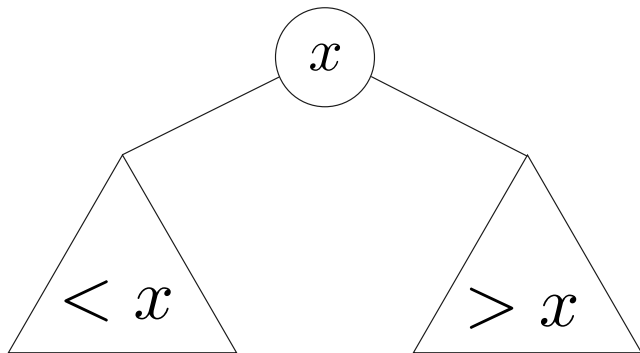
- ▶ Uma possível solução é utilizar uma árvore binária de pesquisa auto balanceável, como: Treaps, árvores-AVL, árvores-rubro-negras.
- ▶ Cada nó deve armazenar o tamanho da subárvore, a chave e o número de elementos igual a chave.
- ▶ Para cada elemento da entrada, inserimos o elemento da árvore e fazemos a busca por quantos elemento são maiores que ele.

Fila da padaria: solução

BST

Lembrando da estrutura de uma BST:

- ▶ A subárvore da esquerda possui elementos menores que x .
- ▶ a subárvore da direita possui elementos maiores que x .



Fila da padaria: solução

Seja y um número qualquer. Queremos saber quantos elementos maiores que eles na BST temos:

- ▶ Se $y < x$, então sabemos que a resposta corresponde ao tamanho da subárvore da direita mais ou número de ocorrências de x mais a solução recursiva sobre a subárvore da esquerda.
- ▶ Caso contrário, a resposta corresponde à solução do problema aplicado à subárvore da direita.

Fila da padaria: solução

Corpo principal

```
int main() {
    avl_tree_t *tree = nullptr;
    avl_tree_initialize(&tree);
    int n,p;
    ios::sync_with_stdio(false);
    cin >> n >> p;
    for(int i=0;i<n;i++){
        int x;
        cin >> x;
        x = x/p;
        avl_tree_insert(tree,x);
        cout << avl_tree_get_greater(tree,x) << (i < n-1 ? ' ' : '\n');
    }

    avl_tree_delete(&tree);
    return 0;
}
```

Fila da padaria: solução

Busca

```
int avl_tree_get_greater(avl_tree_t* t, int data){  
    return avl_tree_get_greater_helper(t->root,data);  
}
```

Fila da padaria: solução

Busca

```
int avl_tree_get_greater_helper(avl_node_t* v,int data){
    if(v==nullptr)
        return 0;
    if(data < v->data){
        return v->count + avl_tree_sz(v->right) +
            avl_tree_get_greater_helper(v->left,data);
    }
    return avl_tree_get_greater_helper(v->right,data);
}
```

Fila da padaria: análise

Análise de pior-caso

Cada busca possui tempo de pior caso $O(\lg n)$, em que n é o tamanho da entrada. Como são inseridos n elementos, o tempo de pior caso da solução é $\Theta(n \lg n)$.

Gama, sempre Gama!

Modelagem do problema

Dada a capacidade M da mochila e N itens com peso d_i e valor e_i , escolher zero ou mais itens com índices i_1, i_2, \dots, i_k de modo que

$$\sum_{j=1}^k d_{i_j} \leq M$$

e que a soma

$$S = \sum_{j=1}^k e_{i_j}$$

seja a maior possível.

Gama, sempre Gama!

Solução

- ▶ Conforme apresentado na modelagem, este problema corresponde ao da mochila binária.
- ▶ Seja $dp(i, t)$ a maior soma de fatores engajamento possível escolhendo zero ou mais elementos a partir do i -ésimo clipe, cuja soma das durações é menor ou igual a t segundos.
- ▶ O caso base é dado por $dp(N, t) = 0$, ou seja, sem nenhuma opção de escolha (sufixo vazio), a soma máxima é zero.
- ▶ Para $i > 0$ há duas transições possíveis. A primeira delas é

$$dp(i, t) = dp(i + 1, t),$$

que significa que o i -ésimo clipe não foi selecionado.

Gama, sempre Gama!

Solução

- ▶ Caso $t_i \leq t$, há uma segunda transição possível, dada por

$$dp(i, t) = dp(i + 1, t - t_i) + e_i,$$

correspondente à escolha do i -ésimo clipe.

- ▶ Para cada clipe, deve ser escolhida, dentre as transições possíveis, a que maximiza o valor de $dp(i, t)$.
- ▶ A resposta do problema é dada por $dp(0, 60 \times M)$, pois M é dado em minutos e as durações d_i são dadas em segundos.

Gama, sempre Gama!: solução

```
long long dp(int i, int t, int N, const vector<ii>& xs)
{
    if (i == N)
        return 0;

    if (st[i][t] != -1)
        return st[i][t];

    auto res = dp(i + 1, t, N, xs);
    auto [d, e] = xs[i];

    if (t >= d)
        res = max(res, dp(i + 1, t - d, N, xs) + e);

    return (st[i][t] = res);
}
```

Gama, sempre Gama!

Análise de pior-caso

Como há $\Theta(NM)$ estados e as transições são feitas em $\Theta(1)$, esta solução tem complexidade $\Theta(NM)$.

Definição (Distância entre reta e ponto)

A distância entre a reta $r = ax + by + c$ e o ponto $P = (x, y)$ é dada por

$$\text{dist}(r, P) = \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Hortaliças

Modelagem do problema

Dados N pontos interiores ao paralelogramo $ABCD$, determine o segmento de reta r , paralelo aos segmentos AB e CD e posicionado entre ambos, que minimiza a função

$$d(r, N) = \sum_{i=1}^N \text{dist}(r, P_i)$$

Hortaliças

Solução

- ▶ Seja $M = D_y - A_y$. Uma solução que avalia todas as $M - 1$ retas possíveis tem complexidade $O(MN)$ e leva ao veredito TLE.
- ▶ Para reduzir a complexidade da solução, observe que, como todas as retas são paralelas, os coeficientes a e b serão idênticos em todas as possíveis retas.
- ▶ Assim, a função a ser minimizada pode ser simplificada para

$$d(r, N) = \sum_{i=1}^N |ax_i + by_i + c_r|,$$

dispensando o cálculo da raiz quadrada, o uso de frações e de aritmética de ponto flutuante.

Hortaliças

Solução

- ▶ Agora, considere um segmento de reta r fixo, com coeficiente c_r .
- ▶ Para $c_s = c_r + 1$, há dois cenários possíveis que relacionam $d(s, N)$ com $d(r, N)$:
 1. se $c_r \geq -(ax_i + by_i)$, então $|ax_i + by_i + c_s| = |ax_i + by_i + c_r| + 1$;
 2. se $c_r < -(ax_i + by_i)$, então $|ax_i + by_i + c_s| = |ax_i + by_i + c_r| - 1$;
- ▶ Seja $\delta_r(P_i)$ a função delta de Kronecker tal que $\delta_r(P_i) = 1$ se $c_r \geq -(ax_i + by_i)$, ou zero, caso contrário.
- ▶ Seja $\mu_r(P_i)$ uma função tal que $\mu_r(P_i) = 1$ se $c_r < -(ax_i + by_i)$, e zero, caso contrário.

Hortaliças

Solução

- ▶ Logo,

$$\delta(r, N) = \sum_{i=1}^N \delta_r(P_i) - \mu_r(P_i)$$

computa a variação de $d(s, N)$ em relação a $d(r, N)$.

- ▶ Como $\delta(r, N)$ é monótona não-decrescente em relação ao coeficiente c_r , a função $d(r, N)$ é unimodal.
- ▶ Portanto, a reta que minimiza $d(r, N)$ pode ser determinada por meio de uma busca ternária nos coeficientes c das retas candidatas a solução.

Hortaliças

```
struct Line {  
    ll a, b, c;  
  
    Line(const Point& P, const Point& Q)  
        : a(P.y - Q.y), b (Q.x - P.x), c(P.x * Q.y - Q.x * P.y)  
    {  
    }  
  
    ll distance(const Point& p) const           // Distância de p à reta  
    {  
        return llabs(a*p.x + b*p.y + c);  
    }  
};
```

Hortaliças

```
11 distances(const Line& r, const vector<Point>& ps)
{
    11 sum = 0;

    for (auto& p : ps)
        sum += r.distance(p);

    return sum;
}
```

Hortaliças

```
auto solve(const Point& A, const Point& B, const Point&, const Point& D,
{
    ll a = 1, b = D.y - A.y - 1, ans = a;
    auto best = oo;

    while (a <= b)
    {
        auto m1 = a + (b - a)/3;
        auto m2 = b - (b - a)/3;

        auto r = Line(Point { A.x, A.y + m1 }, Point { B.x, B.y + m1 });
        auto s = Line(Point { A.x, A.y + m2 }, Point { B.x, B.y + m2 });

        auto dist1 = distances(r, ps);
        auto dist2 = distances(s, ps);
    }
}
```

Hortalças

```
    if (dist1 > dist2) {  
        a = m1 + 1;  
  
        if (dist2 < best) {  
            best = dist2; ans = m2;  
        }  
    } else {  
        b = m2 - 1;  
  
        if (dist1 < best) {  
            best = dist1; ans = m1;  
        }  
    }  
}  
  
return make_pair(Point { A.x, A.y + ans }, Point { B.x, B.y + ans });  
}
```

Análise de pior-caso

Como são feitas $\Theta(\log M)$ buscas e em cada uma delas são avaliados N pontos, esta solução tem complexidade $\Theta(N \log M)$.

Indo ao Mercado

Modelagem do problema

Seja d_i a quantidade de itens a serem adquiridos no dia, sendo que no dia i são vendidos a_i itens ao custo unitário de c_i . Um item que não foi adquirido no dia i pode ser adquirido no dia j pelo custo

$$C_j = c_i + \sum_{k=i}^{j-1} l_k$$

O problema consiste em adquirir $D = \sum_i d_i$ itens tal que a soma dos custos de aquisição de cada item seja minimizada.

Indo ao Mercado

Solução

- ▶ A solução do problema consiste em, a cada dia i , adquirir d_i pelo menor custo possível
- ▶ Se os custos dos itens que estão na geladeira forem computados usando a fórmula da modelagem do problema, a solução terá veredito TLE
- ▶ Então é preciso computar estes custos de forma eficiente
- ▶ Isto pode ser feito usando modelando a geladeira como um *Venice Set*
- ▶ Esta estrutura suporta 3 operações: adicionar um item ao conjunto (`add()`), somar v em todos os elementos (`update_all()`) e extrair o menor elemento do conjunto (`extract_min()`)

Indo ao Mercado: Venice Set

```
using ii = pair<int, int>;

struct VeniceSet
{
    multiset<ii> ms;
    ll acc = 0;

    void add(ll x, ll qtd) { ms.insert(ii(x - acc, qtd)); }

    void update_all(ll v) { acc += v; }

    ii extract_min()
    {
        auto [v, qtd] = *ms.begin();
        ms.erase(ms.begin());

        return { v + acc, qtd };
    }
};
```


Indo ao Mercado

Solução

- ▶ Seja M o número de elementos no *Venice Set*
- ▶ As operações de adição e extração do mínimo tem complexidade $O(\log M)$
- ▶ A operação de atualização tem complexidade $O(1)$
- ▶ Usando esta estrutura para modelar a geladeira, basta avaliar os itens na ordem da entrada
 1. Coloque o i -ésimo item na geladeira
 2. Extraia da geladeira os d_i itens de menor custo e some estes custos à resposta
 3. Atualize o acumulador da geladeira com o valor l_i

Indo ao Mercado: solução

```
auto solve(int N, const vector<ll>& ds, const vector<ll>& as,
           const vector<ll>& cs, const vector<ll>& ls)
{
    ll ans = 0;
    VeniceSet s;

    for (int i = 0; i < N; ++i)
    {
        auto a = as[i];
        auto c = cs[i];
        auto d = ds[i];
        auto l = ls[i];

        s.add(c, a);
    }
}
```

Indo ao Mercado: solução

```
while (d > 0) {  
    auto [cost, qtd] = s.extract_min();  
    auto k = min(d, qtd);  
  
    ans += k * cost;  
    d -= k;  
    qtd -= k;  
  
    if (qtd > 0)  
        s.add(cost, qtd);  
}  
  
s.update_all(1);  
  
return ans;  
}
```

Indo ao Mercado

Análise de pior-caso

Como há $\Theta(N)$ item a serem processado, e cada item é processado em $\Theta(\log N)$, esta solução tem complexidade $\Theta(N \log N)$.

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Proposição. Sejam x e m inteiros positivos e denotemos $\bar{x} = x \% m$. O conjunto dos múltiplos de \bar{x} , $X = \{\bar{x}, \overline{2x}, \overline{3x} \dots\}$, tem exatamente m/g elementos, onde $g = \gcd(x, m)$. Além disso, $X = \{ \overline{d \cdot g} : d \in \mathbb{Z} \}$.

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Proposição. Sejam x e m inteiros positivos e denotemos $\bar{x} = x \% m$. O conjunto dos múltiplos de \bar{x} , $X = \{\bar{x}, \overline{2x}, \overline{3x} \dots\}$, tem exatamente m/g elementos, onde $g = \gcd(x, m)$. Além disso, $X = \{\overline{d \cdot g} : d \in \mathbb{Z}\}$.

Prova:

- Como existem finitas classes mod m , o conjunto é finito. Existe um menor d positivo tal que $dx = 0 \pmod{m}$. Verifique que $d = m/g$.

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Proposição. Sejam x e m inteiros positivos e denotemos $\bar{x} = x \% m$. O conjunto dos múltiplos de \bar{x} , $X = \{\bar{x}, \overline{2x}, \overline{3x} \dots\}$, tem exatamente m/g elementos, onde $g = \gcd(x, m)$. Além disso, $X = \{\overline{d \cdot g} : d \in \mathbb{Z}\}$.

Prova:

- ▶ Como existem finitas classes mod m , o conjunto é finito. Existe um menor d positivo tal que $dx = 0 \pmod{m}$. Verifique que $d = m/g$.
- ▶ Temos que $\overline{(d+1)x} = \bar{x}, \dots, \overline{(d+k)x} = \overline{kx}$. Isso implica que $X = \{\bar{x}, \dots, \overline{dx}\}$.

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Proposição. Sejam x e m inteiros positivos e denotemos $\bar{x} = x \% m$. O conjunto dos múltiplos de \bar{x} , $X = \{\bar{x}, \overline{2x}, \overline{3x} \dots\}$, tem exatamente m/g elementos, onde $g = \gcd(x, m)$. Além disso, $X = \{\overline{d \cdot g} : d \in \mathbb{Z}\}$.

Prova:

- ▶ Como existem finitas classes mod m , o conjunto é finito. Existe um menor d positivo tal que $dx = 0 \pmod{m}$. Verifique que $d = m/g$.
- ▶ Temos que $\overline{(d+1)x} = \bar{x}, \dots, \overline{(d+k)x} = \overline{kx}$. Isso implica que $X = \{\bar{x}, \dots, \overline{dx}\}$.
- ▶ Não existem $0 \leq d_1 < d_2 \leq d$ tais que $d_1x = d_2x$. De fato, se existissem, $(d_2 - d_1)x = 0$ contradiria a minimalidade de d .

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Proposição. Sejam x e m inteiros positivos e denotemos $\bar{x} = x \% m$. O conjunto dos múltiplos de \bar{x} , $X = \{\bar{x}, 2\bar{x}, 3\bar{x} \dots\}$, tem exatamente m/g elementos, onde $g = \gcd(x, m)$. Além disso, $X = \{\overline{d \cdot g} : d \in \mathbb{Z}\}$.

Prova:

- ▶ Como existem finitas classes mod m , o conjunto é finito. Existe um menor d positivo tal que $dx = 0 \pmod{m}$. Verifique que $d = m/g$.
- ▶ Temos que $\overline{(d+1)x} = \bar{x}$, \dots , $\overline{(d+k)x} = \overline{kx}$. Isso implica que $X = \{\bar{x}, \dots, \overline{dx}\}$.
- ▶ Não existem $0 \leq d_1 < d_2 \leq d$ tais que $d_1x = d_2x$. De fato, se existissem, $(d_2 - d_1)x = 0$ contradiria a minimalidade de d .
- ▶ Por um lado, $x = (x/g)g$. Por outro lado, existem inteiros a, b tais que $ax + bm = g$ (prove!), que implica em $\bar{g} = \overline{ax}$ por definição de congruência modular. Isso prova a última afirmação da proposição.

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Solução:

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Solução:

- ▶ Ideia principal: fazer uma bfs a partir de X .

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Solução:

- Ideia principal: fazer uma bfs a partir de X . O grafo é muito grande! Encontre um exemplo que dê TLE em um código que monte explicitamente o grafo.

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Solução:

- ▶ Ideia principal: fazer uma bfs a partir de X .
- ▶ Sejam $x_1 = a[u_1]$ e $x_2 = a[u_2]$. Os vértices u_1 e u_2 alcançam exatamente os mesmos vértices se, e somente se, $\gcd(x_1, N) = \gcd(x_2, N)$ e $u_1 = u_2 \pmod{N}$ (Pela proposição).

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Solução:

- ▶ Ideia principal: fazer uma bfs a partir de X .
- ▶ Sejam $x_1 = a[u_1]$ e $x_2 = a[u_2]$. Os vértices u_1 e u_2 alcançam exatamente os mesmos vértices se, e somente se, $\gcd(x_1, N) = \gcd(x_2, N)$ e $u_1 = u_2 \pmod{N}$ (Pela proposição).
- ▶ Ideia: não processar na bfs mais de um vértice com o mesmo gcd com N e resto por N . Por quanto reduzimos as arestas processadas?

Jogo da Moeda

Problema

São dados N vértices indexados de 0 até $N - 1$, um vértice inicial X , e uma lista de N inteiros a_1, \dots, a_N . Para todo u e inteiro d existe uma aresta de u para $(u + d \cdot a[u]) \% N$. Calcule a menor distância de X para todos os outros vértices.

Solução:

- ▶ Ideia principal: fazer uma bfs a partir de X .
- ▶ Sejam $x_1 = a[u_1]$ e $x_2 = a[u_2]$. Os vértices u_1 e u_2 alcançam exatamente os mesmos vértices se, e somente se, $\gcd(x_1, N) = \gcd(x_2, N)$ e $u_1 = u_2 \pmod{N}$ (Pela proposição).
- ▶ Ideia: não processar na bfs mais de um vértice com o mesmo gcd com N e resto por N . Por quanto reduzimos as arestas processadas?
- ▶ Pior caso: seja d um divisor de N . Este divisor contribui com N/d arestas. Existem d restos possíveis módulo d , então os vértices com $\gcd = d$ vão contribuir com no máximo N arestas no total. Se D é a quantidade de divisores de N , a complexidade final é $O(ND)$.

Jogo da Moeda

```
vector<int> vis(n), res(n, -1);
set<int> foi[n+1];
queue<pair<int,int>> q;
q.push({x-1, 0});

while(q.size()) {
    auto [u, d] = q.front(); q.pop();
    if(vis[u]) continue;
    vis[u] = 1;
    res[u] = d;

    int m = gcd(a[u], n);
    if(foi[m].count(u%m)) continue;
    foi[m].insert(u%m);

    int prox = (u+a[u]) % n;
    while(prox != u) {
        q.push({prox, d+1});
        prox = (prox + a[u]) % n;
    }
}
```

Definição (Troca (*swap*))

Dado uma sequência de elementos a_1, a_2, \dots, a_N , uma troca (*swap*) é uma operação que troca os valores de dois elementos adjacentes. Em outras palavras, se $i = 1, 2, \dots, N - 1$, uma troca envolvendo os elementos a_i e a_{i+1} transforma a sequência a_k original na sequência

$$b_k = a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, a_i, a_{i+2}, \dots, a_N$$

Kart Indoor

Modelagem do problema

Dada uma sequência de N elementos, determine o número mínimo de trocas necessárias para ordenar seus elementos.

Kart Indoor

Solução

- ▶ Observe que as numerações dos karts seguem a ordem de largada, isto é, $1, 2, \dots, N$.
- ▶ A partir da ordem de chegada dos karts, basta determinar a quantidade de trocas que serão efetuadas para recuperar a ordem de largada (ordem crescente)
- ▶ Como $N \leq 5 \times 10^3$, é possível contar o número de trocas adicionando um contador na implementação do *bubble sort*, obtendo uma solução $O(N^2)$
- ▶ É possível resolver este problema com complexidade $O(N \log N)$ adicionando um contador no *mergesort*

Kart Indoor – *Bubble sort*

```
auto solve(int N, vector<int>& karts)
{
    auto swaps = 0;

    for (int i = 0; i < n - 1; i++) {
        for (int j = n - 1; j > i; j--) {
            if (karts[j - 1] > karts[j]) {
                swap(karts[j], karts[j - 1]);
                ans++;
            }
        }
    }

    return ans;
}
```

Kart Indoor – Mergesort

```
11 inversions(int a, int b, vector<int>& xs) {  
    if (b - a == 1)  
        return 0;  
  
    auto m = b + (a - b)/2;  
    auto sum = inversions(a, m, xs) + inversions(m, b, xs);  
    auto x = a, y = m, idx = 0;  
    vector<int> temp(b - a);  
  
    while (x < m and y < b) {  
        if (xs[x] <= xs[y])  
            temp[idx++] = xs[x++];  
        else {  
            temp[idx++] = xs[y++];  
            sum += (m - x);  
        }  
    }  
}
```

Kart Indoor – Mergesort

```
while (x < m)
    temp[idx++] = xs[x++];

while (y < b)
    temp[idx++] = xs[y++];

for (int i = a; i < b; ++i)
    xs[i] = temp[i - a];

return sum;
}
```

Análise de pior-caso

A solução baseada no *bubble sort* tem complexidade $O(\Theta N^2)$; a solução baseada no *mergesort* tem complexidade $O(\Theta N \log N)$.

Luka, Miku e Chocolate

Modelagem do problema

Dado um grafo direcionado $G = (V, E)$, o problema quer responder Q consultas do tipo: existe caminho de u para v ?

Observação

Uma restrição importante que o problema possui é que cada nó possui, **no máximo**, uma aresta saindo dele.

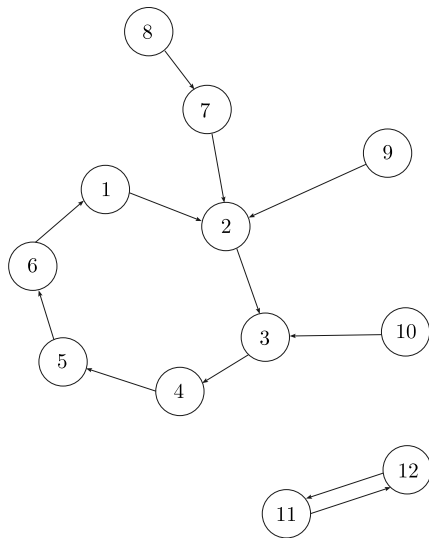
Esta restrição guiará o projeto de um algoritmo eficiente.

Luka, Miku e Chocolate: solução

- ▶ Primeiramente, iremos transformar o grafo direcionado G em um DAG (grafo acíclico direcionado) $G' = (V', E')$ de suas componentes fortemente conexas.
- ▶ Esse processo pode ser realizado em tempo $\Theta(|V| + |E|)$ usando o conhecido algoritmo de Tarjan.

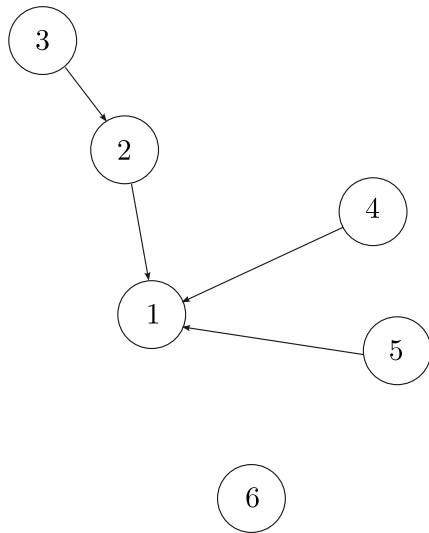
Luka, Miku e Chocolate: solução

Identificação da SCCs



Luka, Miku e Chocolate: solução

Identificação da SCCs

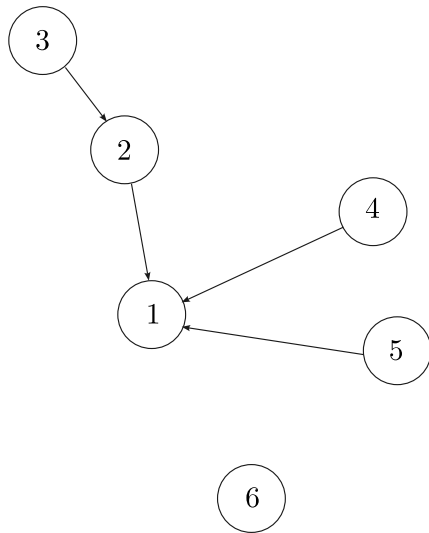


Luka, Miku e Chocolate: solução

- ▶ Agora a restrição do problema se faz fundamental para que consigamos resolvê-lo eficientemente.
- ▶ Temos vários caminhos que podem se encontrar, **mas nunca haverá uma bifurcação** após o encontro.
- ▶ Se invertermos as arestas de G' , obteremos uma floresta G'^R

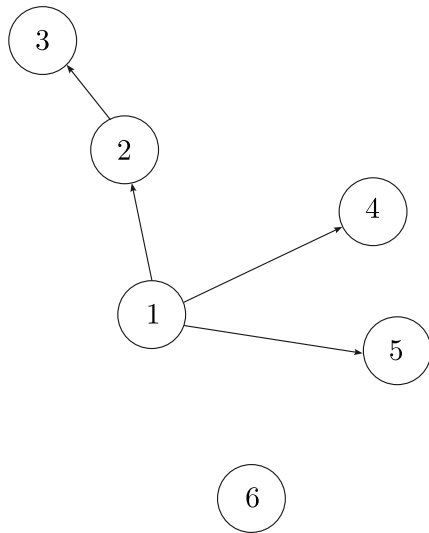
Luka, Miku e Chocolate: solução

Transformação do DAG em floresta



Luka, Miku e Chocolate: solução

Transformação do DAG em floresta

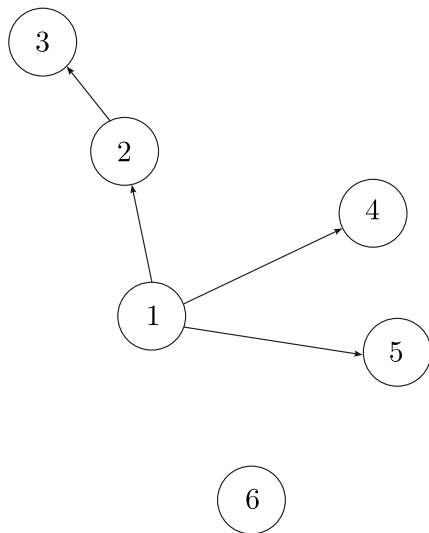


Luka, Miku e Chocolate: solução

- ▶ Para conectar todas as florestas, criaremos um novo nó em G'^R que possui uma aresta para a raiz de cada árvore.
- ▶ Isso facilitará na hora de responder cada consulta.
- ▶ Agora temos uma árvore na qual cada subárvore conectada a esse nó criado corresponde a uma árvore da floresta original.

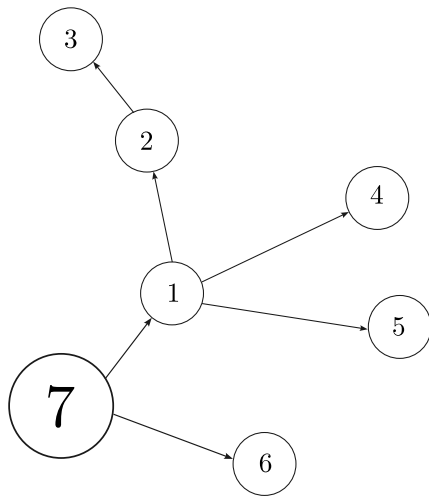
Luka, Miku e Chocolate: solução

Conexão das florestas



Luka, Miku e Chocolate: solução

Conexão das florestas



Luka, Miku e Chocolate: solução

- ▶ Agora, para saber se existe um caminho de u a v em G , basta respondermos se existe um caminho da componente em que v se encontra, digamos, v' , até a componente em que u se encontra, digamos u' , na árvore G'^R .
- ▶ Existe um caminho de v' até u' se v' é o ancestral comum mais baixo (LCA) de v' .
- ▶ A raiz que conecta as florestas tem o propósito de definir o LCA para qualquer par de nós.
- ▶ Utilizando árvores de segmentos, conseguimos responder a consulta de LCA em tempo logarítmico.

Luka, Miku e Chocolate: solução

Corpo principal

```
void solve() {  
    queue<int> root_nodes;  
    stack<int> scc_nodes;  
    num.assign(n, -1);  
    low.assign(n, n + 1);  
    scc_num = 0;  
    scc.assign(n, -1);  
    visited.assign(n, WHITE);
```

Luka, Miku e Chocolate: solução

Corpo principal

```
for (int u = 0; u < n; u++) {
    if (visited[u] == WHITE) {
        tarjan(u, scc_nodes);
    }
}
build_scc_tree();
LCA lca(scc_tree, scc_num);
for (const auto &[u, v] : queries) {
    if (lca.lca(scc[u], scc[v]) == scc[v]) {
        cout << "Sim\n";
    } else {
        cout << "Nao\n";
    }
}
}
```

Luka, Miku e Chocolate: solução

Construção do DAG de SCCs

```
void tarjan(int u, stack<int> &scc_nodes) {  
    visited[u] = GRAY;  
    scc_nodes.push(u);  
    num[u] = dfs_num;  
    low[u] = dfs_num++;  
    for (auto v : adj[u]) {  
        if (visited[v] == WHITE) {  
            tarjan(v, scc_nodes);  
            low[u] = min(low[u], low[v]);  
        } else if (visited[v] == GRAY) {  
            low[u] = min(low[u], num[v]);  
        }  
    }  
}
```

Luka, Miku e Chocolate: solução

Construção do DAG de SCCs

```
if (low[u] == num[u]) {  
    int w = -1;  
    do {  
        w = scc_nodes.top();  
        scc_nodes.pop();  
        scc[w] = scc_num;  
        visited[w] = BLACK;  
    } while (w != u);  
    scc_num++;  
}  
}
```

Luka, Miku e Chocolate: solução

Construção da árvore de SCCs

```
void build_scc_tree() {  
    vector<vector<int>> scc_tree_inverted(scc_num);  
    vector<int> in_degree(scc_num, 0);  
    for (int u = 0; u < n; u++) {  
        for (auto v : adj[u]) {  
            if (scc[u] != scc[v]) {  
                scc_tree_inverted[scc[u]].push_back(scc[v]);  
            }  
        }  
    }  
}
```


Luka, Miku e Chocolate: solução

Construção da árvore de SCCs

```
scc_tree.resize(scc_num + 1);  
for (int u = 0; u < scc_num; u++) {  
    for (auto v : scc_tree_inverted[u]) {  
        scc_tree[v].push_back(u);  
        in_degree[u]++;  
    }  
}
```

Luka, Miku e Chocolate: solução

Construção da árvore de SCCs

```
// artificial node
for (int i = 0; i < scc_num; i++) {
    if (in_degree[i] == 0)
        scc_tree[scc_num].push_back(i);
}
```

Luka, Miku e Chocolate: análise

Análise de pior-caso

A complexidade da solução é $\Theta((|V| + |E|) + (Q \cdot t_{LCA}))$, sendo Q o número de consultas.

Se as consultas de LCA forem implementadas através de árvores de segmentos, então $t_{LCA} \in \Theta(\lg |V'|)$.

Luka, Miku e Chocolate: solução otimizada

Resolvendo em tempo ótimo

- ▶ É possível resolver o problema em tempo $\Theta(|V| + |E| + Q)$.
- ▶ Como saber se um nó é descendente de outro em uma árvore?
- ▶ Basta comparar os tempos de entrada e saída em uma DFS!
- ▶ Se um nó u começa a ser processado antes do nó v e termina de ser processado após o nó v é porque u é ancestral de v na árvore.
- ▶ Essa comparação leva tempo $\Theta(1)$.

Luka, Miku e Chocolate: solução otimizada

Resolvendo em tempo ótimo

```
void dfs(int u) {  
    first[u] = dfs_num++;  
    for (auto v : scc_tree[u]) {  
        if (first[v] == 0) {  
            dfs(v);  
        }  
    }  
    last[u] = dfs_num++;  
}
```

Luka, Miku e Chocolate: solução otimizada

Resolvendo em tempo ótimo

```
first.assign(scc_num+1, 0);
last.assign(scc_num+1, 0);
dfs_num = 1;
dfs(scc_num);
for (const auto &[u, v] : queries) {
    if (first[scc[v]] <= first[scc[u]] and last[scc[v]] >= last[scc[u]]) {
        cout << "Sim\n";
    } else {
        cout << "Nao\n";
    }
}
```

Autoria dos problemas

- A) Alazão – Eric Grochowicz – UDESC
- B) Balanceando Competições – Gustavo Machado Leal – UFG
- C) Cidade Planejada – Vinicius Ruela Pereira Borges – UnB
- D) Dobradinha da Ceilândia – Eduardo Freire dos Santos– UnB
- E) Estrutural – Daniel Saad Nogueira Nunes – IFB
- F) Fila da Padaria – Caleb Martim de Oliveira – UnB
- G) Gama, sempre Gama! – Edson Alves da Costa Júnior – UnB/FGA
- H) Hortaliças – Edson Alves da Costa Júnior – UnB/FGA
- I) Indo ao mercado – Gustavo Machado Leal – UFG
- J) Jogo da moeda – Eduardo Schwarz Moreira – UDESC
- K) Kart Indoor – Vinicius Ruela Pereira Borges– UnB
- L) Luka, Miku e chocolate – Caleb Martim de Oliveira – UnB

Revisores

- ▶ Alberto Tavares Duarte Neto – UnB
- ▶ Caleb Martim de Oliveira – UnB
- ▶ Daniel Saad Nogueira Nunes – IFB
- ▶ Edson Alves da Costa Júnior – UnB/FGA
- ▶ Gustavo Machado Leal – UFG

Sistemas

- ▶ Bruno César Ribas – UnB/FGA
- ▶ Daniel Saad Nogueira Nunes – IFB

Staff

- ▶ Ana Joyce Guedes
- ▶ Eduardo Ferreira Marques Cavalcante
- ▶ Maria Eduarda Carvalho

Organização CSBC

- ▶ Guilherme Novaes Ramos
- ▶ Lucy Mari Tabuti
- ▶ Vinicius Ruela Pereira Borges

- ▶ Emílio Wuerges.

`https://moj.naquadah.com.br/cgi-bin/tag.sh/v_maratona_de_inverno_2024`

Recursos

[https://danielsaad.com/maratona/blog/2024/07/23/
v-escola-de-inverno-da-maratona-de-programacao-resultados.html](https://danielsaad.com/maratona/blog/2024/07/23/v-escola-de-inverno-da-maratona-de-programacao-resultados.html)