

Algoritmos para r -Arborescências Geradoras Mínimas em Digrafos: Uma Aplicação Web Interativa

Lorena Sampaio, Samira Haddad
Orientador: Prof. Dr. Mário Leston Rey

Universidade Federal do ABC
Centro de Matemática, Computação e Cognição

25 de novembro de 2025

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Algoritmo de Chu-Liu-Edmonds
- 3 Algoritmo de András Frank
- 4 Resultados Experimentais
- 5 Aplicação Web
- 6 Conclusões

O Problema

Arborescência de Custo Mínimo

Dado um digrafo $D = (V, A)$ com pesos $w : A \rightarrow \mathbb{R}$ e raiz $r \in V$:

- Encontrar uma r -arborescência geradora T
- Que minimize $w(T) = \sum_{a \in A(T)} w(a)$

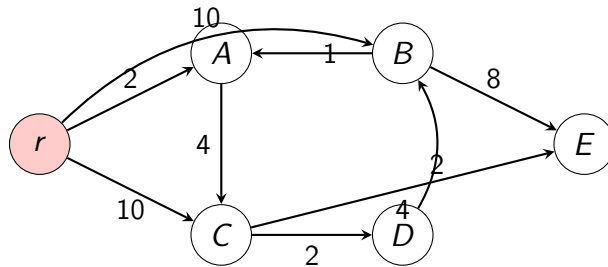
Aplicações:

- Redes de comunicação
- Logística
- Otimização de recursos

Algoritmos estudados:

- 1 Chu-Liu-Edmonds (1965-67)
- 2 András Frank (1981-2014)

Digrafo de Exemplo



Objetivo

Encontrar a r -arborescência geradora de custo mínimo

Chu-Liu-Edmonds: Ideia Principal

Estratégia Recursiva

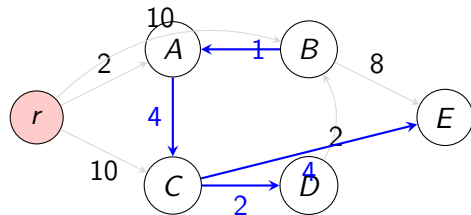
- 1 Para cada vértice $v \neq r$: escolher arco de entrada de **custo mínimo**
- 2 Se não há ciclos \Rightarrow solução ótima encontrada!
- 3 Se há ciclos \Rightarrow **contrair** e resolver recursivamente

Escolha Gulosa + Contração de Ciclos

Passo 1: Escolha Gulosa

Para cada vértice, selecionar arco de entrada mínimo:

- A: arco (B, A) peso 1 ✓
- B: arco (r, B) peso 10
- C: arco (A, C) peso 4 ✓
- D: arco (C, D) peso 2 ✓
- E: arco (C, E) peso 4 ✓



Problema

Ciclo detectado: $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow A$

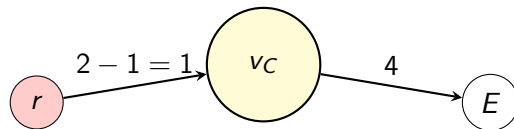
Passo 2: Contração do Ciclo

Ciclo encontrado: $\{A, B, C, D\}$

Contraímos em um super-vértice v_C

Ajustamos pesos dos arcos que **entram** no ciclo:

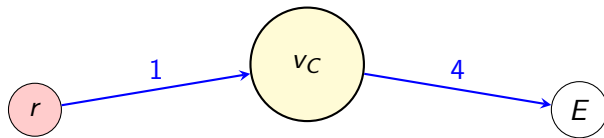
$$w'(u, v_C) = w(u, v) - w(\min_in(v))$$



Recursão

Resolver o problema no digrafo contraído

Passo 3: Solução no Digrafo Contraído



Escolha gulosa:

- (r, v_C) peso 1
- (v_C, E) peso 4

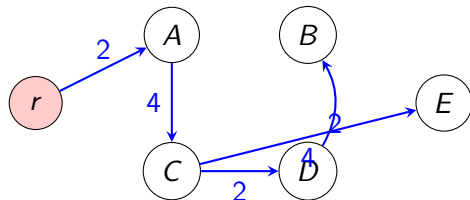
Sem ciclos! \Rightarrow Solução encontrada no digrafo contraído

Passo 4: Expandindo a Solução

No digrafo contraído: (r, v_C) foi escolhido

Expandindo v_C :

- Remover arco (B, A) do ciclo
- Manter: (A, C) , (C, D) , (D, B)
- Adicionar: (r, A) peso 2



Solução Ótima

Custo total: $2 + 4 + 2 + 2 + 4 = 14$

András Frank: Visão Geral

Abordagem em Duas Fases

Fase I: Construir cobertura de subconjuntos minimais via redução de custos

Fase II: Extrair arborescência da cobertura

Diferencial:

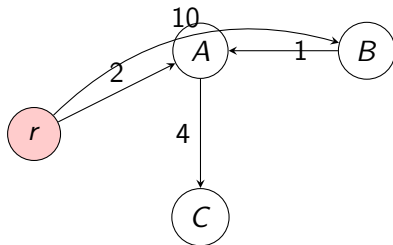
- Trabalha com múltiplos vértices simultaneamente
- Usa componentes fortemente conexas
- Redução sistemática de custos

Complexidade:

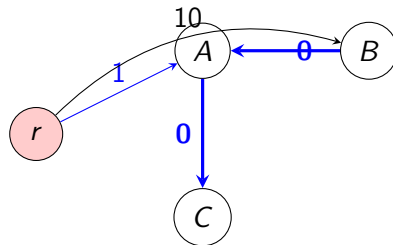
- Fase I: $O(nm)$
- Fase II v1 (lista): $O(n^2)$
- Fase II v2 (heap): $O(n \log n)$

Fase I: Redução de Custos

Para cada vértice $v \neq r$: subtrair o mínimo de entrada



Original



Após Redução

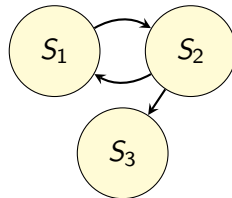
Arcos com custo **zero** formam o digrafo D_0

Fase I: Componentes Fortemente Conexas

Identificar componentes fortemente conexas (CFCs) em D_0

Cada CFC forma um **subconjunto minimal**

Construir sequência laminar de subconjuntos



Condição de Otimalidade

Sequência λ satisfaz: $|\delta^-(X)| = 1$ para cada X em λ

Fase II: Construção da Arborescência

Objetivo: Extrair arborescência de D_0 respeitando λ

- ➊ Iniciar com conjunto $R = \{r\}$
- ➋ Para cada v fora de R :
 - Selecionar arco (u, v) com $u \in R$ e custo reduzido zero
 - Adicionar v a R
- ➌ Repetir até incluir todos os vértices

Resultado

Arborescência ótima com mesma solução: custo 14

Comparação de Desempenho

Experimentos: 2000 digrafos aleatórios, $|V| \in [101, 4996]$

Algoritmo	Tempo Mediano	Tempo Médio
Chu-Liu-Edmonds	0,25 s	0,58 s
Frank Fase I	8,93 s	12,40 s
Frank Fase II (lista)	0,98 s	1,34 s
Frank Fase II (heap)	0,016 s	0,020 s

Speedup Fase II

Heap vs Lista: aceleração de **58,12 vezes** (mediana)

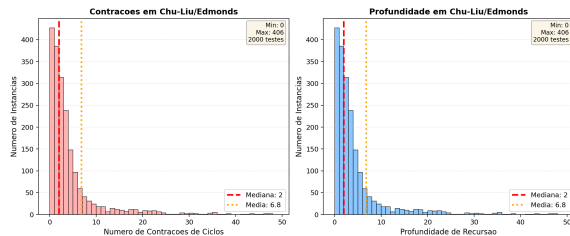
Características Estruturais

Contrações (Chu-Liu):

- Mediana: 2 contrações
- Média: 6,82
- Máximo: 406
- 93,8% com < 20

Muito abaixo do limite teórico $O(n)$

Consumo de memória: mediana 11,5 MB (Fase I)



Motivação Didática

Desafio

Algoritmos de grafos são **abstratos** e **difíceis de visualizar**

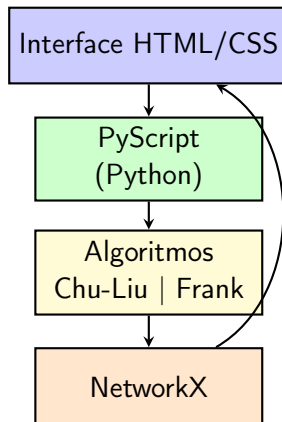
Solução Proposta:

- Visualização interativa
- Execução passo a passo
- Feedback imediato
- Acessível via navegador

Tecnologias:

- PyScript (Python no browser)
- JavaScript
- HTML5/CSS3
- NetworkX

Arquitetura da Aplicação



Interface: Página Principal

**ArboGraph**

 Home

 Chu-Liu-Edmonds

 András Frank (V1)

 András Frank (V2)

 Desenhe um digrafo

 Nossa dissertação

**Dúvidas ?**

Quer aprender mais sobre esses algoritmos, leia nossa tese :)

[Link](#)

Algoritmos para o problema da arborescência geradora mínima: uma aplicação didática interativa

Resumo

Este trabalho investiga e implementa algoritmos de busca de uma r -arborescência geradora mínima em digrafos. A partir da formulação clássica e da literatura de Chu-Liu-Edmonds e também da formulação de András Frank, desenvolvemos uma aplicação web que permite: (i) desenhar ou importar um digrafo ponderado, (ii) escolher o nó raiz r , (iii) executar o algoritmo passo a passo com visualização das contrações, seleção de arcos de custo mínimo e reconstrução da arborescência, e (iv) exportar resultados e logs. A solução combina PyScript e NetworkX para a lógica algorítmica, Cytoscape para edição e visualização interativa, e Tailwind/Flowbite na interface. Como contribuição, o sistema oferece um ambiente didático que torna transparentes as decisões do algoritmo e facilita a análise e comparação de soluções em diferentes instâncias, apoiando ensino, experimentação e validação.

Integrantes do Projeto







Interface: Desenho de Grafos

The screenshot shows the ArboGraph web application interface. On the left is a sidebar with a navigation menu containing: Home, Chu-Liu/Edmonds, Andras Frank (V1), Andras Frank (V2), Desenhe um grafo (highlighted), and Nossa tese. Below the menu is a 'Dúvidas ?' (Doubts?) section with a lightbulb icon and a 'Link' button. The main area is titled 'Desenhe seu grafo' (Draw your graph) and contains instructions: '1. Desenhe um grafo, carregue um exemplo ou importe um grafo já existente.' Below this is a section labeled 'Grafo Original' showing a directed graph with 9 nodes (0-8) and weighted edges. The graph structure is as follows: Node 0 points to Node 2 (weight 6) and Node 1 (weight 3). Node 2 points to Node 1 (weight 1) and Node 4 (weight 10). Node 1 points to Node 4 (weight 10) and Node 3 (weight 2). Node 4 points to Node 3 (weight 1) and Node 6 (weight 1). Node 3 points to Node 4 (weight 1). Node 6 points to Node 8 (weight 2) and Node 5 (weight 1). Node 8 points to Node 7 (weight 4) and Node 5 (weight 5). Node 5 points to Node 6 (weight 1). There are also self-loops on nodes 2 and 8. To the right of the graph are download and delete icons.

Funcionalidades:

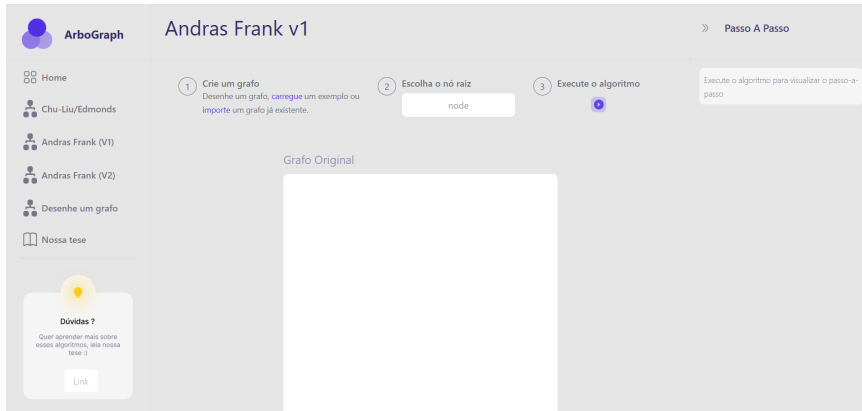
- Adicionar vértices e arestas
- Definir pesos

Interface: Chu-Liu-Edmonds

The screenshot shows the ArboGraph web application interface. On the left is a sidebar with navigation links: Home, Chu-Liu/Edmonds, Andras Frank (V1), Andras Frank (V2), Desenhe um grafo, and Nossa tese. The main area is titled 'Chu-Liu / Edmonds' and contains three numbered steps: 1. 'Crie um grafo' (Create a graph) with sub-options 'Desenhe um grafo, carregue um exemplo ou importe um grafo já existente.'; 2. 'Escolha o nó raiz' (Choose the root node) with a text input field containing '0'; and 3. 'Execute o algoritmo' (Execute the algorithm) with a play button. Below these steps is a 'Grafo Original' (Original Graph) visualization showing a directed graph with 9 nodes (0-8) and weighted edges. On the right, there is a 'Passo A Passo' (Step by Step) section with a button to 'Execute o algoritmo para visualizar o passo-a-passo'.

- Visualização passo a passo
- Destacamento de ciclos detectados
- Log detalhado das operações

Interface: András Frank



- Exibição das duas fases
- Visualização de CFCs
- Comparação entre versões (lista vs heap)

Princípios de Design

Teoria dos Registros de Representação (Duval)

Transitar entre diferentes representações:

- **Visual:** diagramas do grafo
- **Simbólico:** código Python
- **Textual:** log das operações

Feedback Imediato

Validação em tempo real das operações do usuário

Contribuições do Trabalho

1 Implementação completa de dois algoritmos clássicos

- Chu-Liu-Edmonds: recursivo com contração
- András Frank: duas fases com otimização heap

2 Análise experimental detalhada

- 2000 instâncias aleatórias
- Comparação de desempenho e características estruturais

3 Aplicação web interativa

- Ferramenta didática para visualização
- Execução passo a passo dos algoritmos
- Design centrado no usuário

Principais Resultados

- **Corretude validada:** custos idênticos em todas as instâncias
- **Chu-Liu-Edmonds** mais rápido para construção direta
 - Mediana: 0,25 s vs 8,93 s (Fase I Frank)
- **Otimização heap** fundamental na Fase II
 - Speedup: $58\times$ (mediana), $61\times$ (média)
- **Comportamento prático** muito melhor que limites teóricos
 - Contrações: mediana 2 (limite $O(n)$)
 - Memória modesta: 11,5 MB

Trabalhos Futuros

Extensões Possíveis

- Implementar outras variantes (Tarjan, Gabow)
- Análise em grafos com estruturas especiais
- Paralelização dos algoritmos
- Extensão para grafos dinâmicos

Melhorias na Aplicação

- Modo de edição visual de grafos
- Geração automática de casos de teste
- Exercícios interativos com correção automática
- Integração com plataformas de ensino (Moodle, Jupyter)

Obrigado!

Perguntas?

<https://github.com/lorenypsum/graph-visualizer>