

# 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

27 de novembro de 2025

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

# O Problema



## Encontrar uma $r$ -Arborescência Geradora de Custo Mínimo

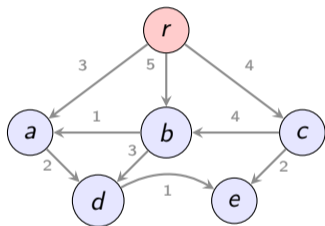
Dado um  $r$ -digrafo ponderado  $(D, w, r)$ :

- Encontrar uma  $r$ -arborescência geradora de custo mínimo de  $D$

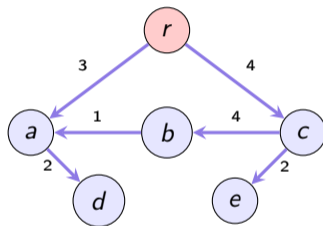
## Algoritmos estudados:

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

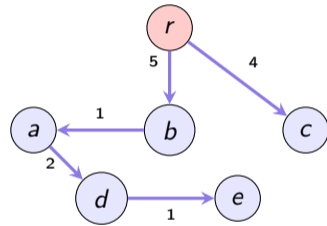
# Exemplo: $r$ -Arborescência Geradora Mínima



Digrafo Original

 $r$ -Arborescência Geradora

Custo: 16



Geradora Mínima

Custo: 13

# Algoritmo de Chu-Liu-Edmonds

# Chu-Liu-Edmonds

Algoritmo Recursivo: dado um  $r$ -digrafo ponderado  $(D, w, r)$

$\text{chu-liu-edmonds}((D, w, r))$ :

- 1 **Reduzir custos**: para cada vértice  $v \neq r$ , subtrair  $\lambda(v) = \min\{w(a) : a \in \delta^-(v)\}$
- 2 **Construir  $D_0$** : escolhendo um arco  $a_v$  de custo reduzido zero para cada  $v \neq r$
- 3 **Verificar**: se  $D_0$  é uma  $r$ -arborescência  $\Rightarrow$  **devolver  $D_0$**   
Caso contrário:
- 4 **Contração**: encontrar ciclo  $C$  em  $D_0$  e contrair
- 5 **Chamada recursiva**: Seja  $D' = D/C$  e  $w' = w_\lambda/C$ . Calcular  $T' = \text{chu-liu-edmonds}(D', w', r)$
- 6 **Devolver**: expandir( $T'$ )

# Exemplo: escolha gulosa

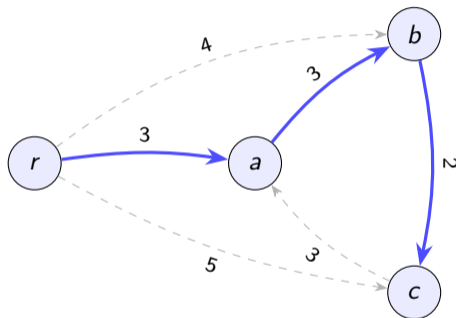
## Definição:

Para cada  $v \neq r$ , escolher um arco  $a_v$  de custo mínimo que entra em  $v$ :

$$T := \{a_v : v \in V \setminus \{r\}\}$$

## Propriedade:

Se  $T$  é uma  $r$ -arborescência, então  $T$  tem custo mínimo.



## Resultado

$T = \{(r, a), (a, b), (b, c)\}$  é uma  $r$ -arborescência de custo mínimo!

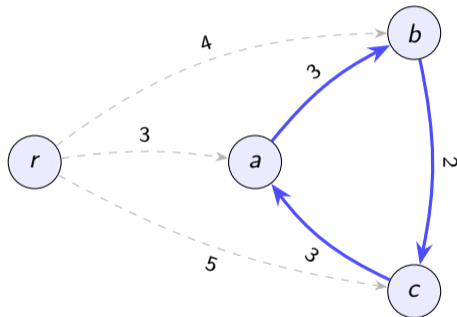
# E quando a escolha gulosa falha?

## Problema:

A escolha gulosa pode produzir um conjunto  $T$  que *não* é uma  $r$ -arborescência.

## Exemplo:

Os arcs de custo mínimo formam um ciclo  $(a, b, c, a)$  sem alcançar  $r$ .



Arcos azuis formam um **ciclo**!

# Passo 1: Redução de Custos

## Definição:

Para cada  $v \in V \setminus \{r\}$ :

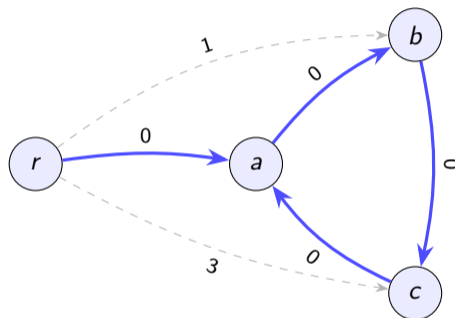
$$\lambda(v) := \min\{w(a) : a \in \delta^-(v)\}$$

Custo  $\lambda$ -reduzido:

$$w_\lambda(uv) := w(uv) - \lambda(v)$$

## Valores de $\lambda$ :

- $\lambda(a) = 3, \lambda(b) = 3, \lambda(c) = 2$



Arcos do ciclo têm custo zero!

Arcos com custo zero são candidatos para  $D_0$

# Implementação: Redução de Custos



## Função reduce\_weights:

```
def reduce_weights(D: nx.DiGraph, v: int
):
    in_edges = D.in_edges(v, data=True)
    yv = min((data["w"]
              for _, _, data in in_edges
              ))
    for u, _, _ in in_edges:
        D[u][v]["w"] -= yv
```

## Descrição:

- Calcula  $\lambda(v) = \min\{w(a) : a \in \delta^-(v)\}$
- Reduz o custo de cada arco que entra em  $v$
- Complexidade:  $O(k)$  onde  $k$  é o número de arcos entrando em  $v$

## Resultado

Após executar `reduce_weights(D, v)` para cada  $v \neq r$ , todos os vértices têm ao menos um arco de entrada com custo zero.

## Passo 2: Construção de $D_0$

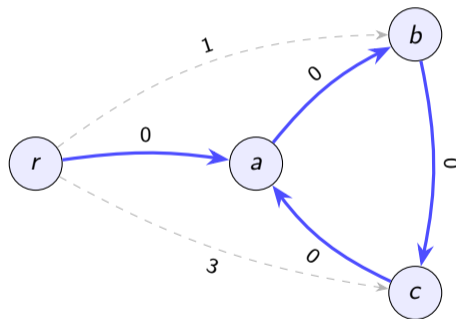


**Formação de  $D_0$ :** Para cada  $v \neq r$ , escolher um arco  $a_v \in \delta^-(v)$  com  $w_\lambda(a_v) = 0$  formar:

$$D_0 := (V, \{a_v : v \in V \setminus \{r\}\})$$

**Arcos escolhidos:**

- $(r, a)$
- $(a, b), (c, a)$



# Passo 2: Implementação da Construção de $D_0$ em Python



## Função `get_Dzero`:

```
def get_Dzero(D: nx.DiGraph, r: int):
    D_zero = nx.DiGraph()
    for v in D.nodes():
        if v != r:
            in_edges = D.in_edges(v,
                                   data=True)
            u = next((u for u, _, data
                       in in_edges
                       if data["w"] == 0))
            D_zero.add_edge(u, v)
    return D_zero
```

## Descrição:

- Para cada vértice  $v \neq r$ , seleciona um arco com custo zero
- Constrói subdigrafo gerador  $D_0$
- Garantido existir arco de custo zero após redução

## Observação

Se  $D_0$  for uma arborescência, então  $D_0$  é necessariamente uma  $r$ -arborescência ótima.

# Passo 3: Verificação de $D_0$

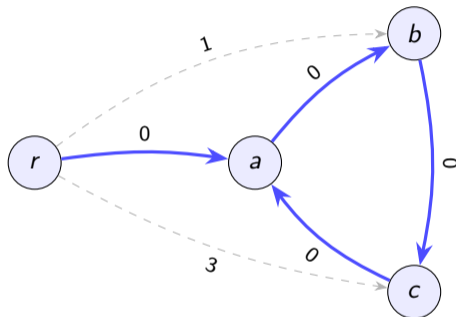
## Verificar:

Se  $D_0$  é uma  $r$ -arborescência  $\Rightarrow$  **devolver**  $D_0$

## Caso contrário:

$D_0$  contém algum ciclo  $C$ .

$\Rightarrow$  **prosseguir** para os passos 4 e 5.



$D_0$  não é uma  $r$ -arborescência!

Neste exemplo,  $D_0 = \{(r, a), (a, b), (c, a)\}$  não forma uma  $r$ -arborescência pois contém o ciclo  $(a, b, c, a)$ .

## Passo 3: Implementação da Verificação de $D_0$



### Verificação se é arborescência:

```
# Verificar se D_zero eh arborescencia
if nx.is_arborescence(D_zero):
    # Restaurar pesos originais
    for u, v in D_zero.edges:
        D_zero[u][v]["w"] = D[u][v]["w"]
    return D_zero
```

*Esse trecho faz parte do caso base da função recursiva principal.*

### Caso Base

Se  $D_0$  é uma arborescência, então ela é a  $r$ -arborescência de custo mínimo. Restauramos os pesos originais e devolvemos.

## Passo 4: Contração de Ciclos

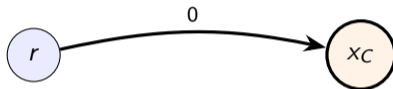
### Operação:

Contrair ciclo  $C$  em supervértice  $x_C$ . **Novo**

**problema:**  $(D', w', r)$  onde:

- $D' := D/C \mapsto x_C$
- $w' := w_\lambda/C \mapsto x_C$

O arco de  $D'$  que entra em  $x_C$  deve corresponder ao arco de  $D$  que entra em algum vértice de  $C$



Digrafo contraído  $D'$  - *podem ter arcos saindo de  $x_C$  em  $D'$ .*

### Propriedade

Uma solução ótima em  $D'$  pode ser expandida para uma solução ótima em  $D$ .

## Passo 4: Implementação da Contração (1/3)



### Detecção de ciclo:

```
def find_cycle(D_zero: nx.DiGraph):  
    nodes_in_cycle = set()  
    for u, v, _ in nx.find_cycle(  
        D_zero, orientation="original"):  
        nodes_in_cycle.update([u, v])  
    return D_zero.subgraph(nodes_in_cycle).to_directed()
```

### Descrição

- Usa `nx.find_cycle` para encontrar arcos do ciclo
- Coleta todos os vértices envolvidos
- Retorna subdigrafo induzido pelos vértices do ciclo

## Passo 4: Implementação da Contração (2/3)



### Arcos essenciais que entram no ciclo:

```
def contract_cycle(D: nx.DiGraph, C: nx.DiGraph,
                  label: int):
    cycle_nodes: set[int] = set(C.nodes())
    # Arcos essenciais entrando no ciclo
    in_to_cycle: dict[int, tuple[int, float]] = {}
    for u in D.nodes:
        if u not in cycle_nodes:
            min_weight_edge_to_cycle = min(
                ((v, data["w"])
                 for _, v, data in D.out_edges(u, data=True)
                 if v in cycle_nodes),
                key=lambda x: x[1], default=None)
            if min_weight_edge_to_cycle:
                in_to_cycle[u] = min_weight_edge_to_cycle
    for u, (v, w) in in_to_cycle.items():
        D.add_edge(u, label, w=w)
```

Para cada vértice externo, encontra o arco de menor custo que entra no ciclo.

## Passo 4: Implementação da Contração (3/3)



### Arcos essenciais que saem do ciclo:

```
# Arcos essenciais saindo do ciclo
out_from_cycle: dict[int, tuple[int, float]] = {}
for v in D.nodes:
    if v not in cycle_nodes:
        min_weight_edge_from_cycle = min(
            ((u, data["w"])
             for u, _, data in D.in_edges(v, data=True)
             if u in cycle_nodes),
            key=lambda x: x[1], default=None)
        if min_weight_edge_from_cycle:
            out_from_cycle[v] = min_weight_edge_from_cycle
for v, (u, w) in out_from_cycle.items():
    D.add_edge(label, v, w=w)
D.remove_nodes_from(cycle_nodes)
return in_to_cycle, out_from_cycle
```

Encontra o arco de menor custo que sai do ciclo para cada vértice externo. Os dicionários retornados serão usados na expansão.

## Passo 5: Chamada Recursiva

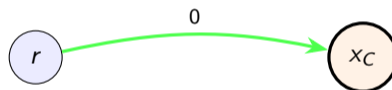


**Novo problema:**  $(D', w', r)$

**Chamada recursiva:**

$$T' := \text{chu-liu-edmonds}(D', w', r)$$

**Resultado:**  $T'$  é uma  $r$ -arborescência de custo mínimo em  $(D', w')$



$r$ -arborescência ótima em  $D'$

# Passo 5: Implementação da Chamada Recursiva



## Estrutura recursiva:

```
def chuliu_edmonds(D: nx.DiGraph, r: int, label: int):
    D_copy = cast(nx.DiGraph, D.copy())
    # Reducao de custos
    for v in D_copy.nodes:
        if v != r:
            reduce_weights(D_copy, v)
    D_zero = get_Dzero(D_copy, r)
    if nx.is_arborescence(D_zero):
        # Restaurar pesos e devolver
        for u, v in D_zero.edges:
            D_zero[u][v]["w"] = D[u][v]["w"]
        return D_zero
    # Contrair ciclo e recursao
    C = find_cycle(D_zero)
    in_to_cycle, out_from_cycle =
        contract_cycle(D_copy, C, label)
    F_prime = chuliu_edmonds(D_copy, r, label + 1)
    # ... expansao ...
```

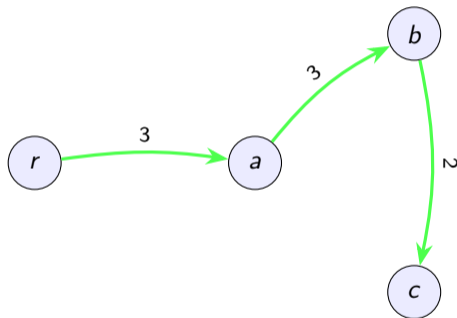
# Passo 6: Reexpansão da Solução

**Dado:**  $T'$  ótima em  $(D', w')$

**Construir:**  $T$  ótima em  $(D, w)$

**Procedimento:**

- 1 Seja  $uv$  o arco de  $D$  correspondente ao arco  $ux_C$  de  $T'$
- 2 Incluir  $uv$  em  $T$
- 3 Incluir todos os arcos de  $C$  exceto aquele que entra em  $v$



$r$ -arborescência final no digrafo original

**Resultado:**  $T$  é uma  $r$ -arborescência de custo mínimo

# Passo 6: Implementação da Reexpansão (1/2)



## Encontrar e adicionar arco correspondente:

```
# F_prime: solucao em D' (com supervertice)
# Encontrar arco que entra em label
in_edge = next(iter(
    F_prime.in_edges(label, data=True)))
u, _, _ = cast(tuple, in_edge)

# Arco correspondente em D original
v, _ = in_to_cycle[u]
F_prime.add_edge(u, v)

# Adicionar arcos do ciclo (exceto o que entra em v)
for u_c, v_c in C.edges:
    if v != v_c:
        F_prime.add_edge(u_c, v_c)
```

**Observação:** Identifica qual arco do ciclo não será incluído na solução final.

## Passo 6: Implementação da Reexpansão (2/2)



### Transferir arcos externos e restaurar pesos:

```
# Arcos que saem do supervertice
for _, z, _ in list(
    F_prime.out_edges(label, data=True)):
    u_cycle, _ = out_from_cycle[z]
    F_prime.add_edge(u_cycle, z)

# Remover supervertice
F_prime.remove_node(label)

# Restaurar pesos originais
for u, v in F_prime.edges:
    F_prime[u][v]["w"] = D[u][v]["w"]

return F_prime
```

**Correção:** A expansão garante que  $T$  é uma  $r$ -arborescência ótima no digrafo original.

# Complexidade do Algoritmo



## Análise de Complexidade:

- Cada chamada recursiva reduz o número de vértices em pelo menos 1
- No pior caso, pode haver até  $O(n)$  chamadas recursivas
- Cada chamada envolve operações de redução de custos, construção de  $D_0$ , detecção de ciclos e contração, cada uma com complexidade  $O(m)$

## Complexidade Total:

$$O(n \cdot m)$$

onde  $n$  é o número de vértices e  $m$  é o número de arcos no digrafo original.

# Intermissão



## Algoritmo de András Frank

# Algoritmo de András Frank



## Abordagem em Duas Fases

**Fase I (Fulkerson):** Construir cobertura de  $r$ -conjuntos via redução de custos

**Fase II (Frank):** Extrair  $r$ -arborescência geradora da cobertura

**Objetivo da Fase I:** Construir uma sequência  $\sigma = ((f_i, R_i, \lambda_i))_{i \in [k]}$  tal que:

- $F := \{f_i : i \in [k]\}$  é uma **cobertura de  $r$ -conjuntos**
- A sequência  $(R_i, \lambda_i)_{i \in [k]}$  é  **$w$ -disjunta**

**Objetivo da Fase II:** Extrair  $r$ -arborescência geradora mínima usando  $F$  e a propriedade  $w$ -disjunta.

# Fase I: Conceitos Fundamentais



## Definições:

### $r$ -conjunto minimal

Um  $r$ -conjunto  $R$  é **minimal não coberto por  $F$**  se:

- $F$  não entra em  $R$  (i.e.,  $F \cap \delta^-(R) = \emptyset$ )
- Para todo  $\emptyset \subset R' \subset R$ , existe arco de  $F$  que entra em  $R'$

### Sequência $w$ -disjunta

Uma sequência  $((R_i, \lambda_i))_{i \in [k]}$  é  **$w$ -disjunta** se:

$$\sum_{i \in [k]} \lambda_i [a \in \delta^-(R_i)] \leq w(a) \quad \text{para cada } a \in A(D)$$

A soma dos  $\lambda_i$  sobre os conjuntos que  $a$  entra não excede o peso de  $a$ .

# Fase I: Algoritmo de Fulkerson



## Processo iterativo

Dado: um  $r$ -digrafo ponderado  $(D, w, r)$

### 1 Inicializar:

- $c := w$  (custos correntes)
- $\sigma := \epsilon$  (sequência vazia)
- $F := \emptyset$  (conjunto de arcos selecionados)

### 2 Enquanto existir fonte $R_k$ em $\mathcal{C}(D_0)$ com $r \notin R_k$ :

- Calcular  $\lambda_k := \min\{c(a) : a \in \delta^-(R_k)\}$
- Selecionar  $f_k \in \delta^-(R_k)$  com  $c(f_k) = \lambda_k$
- $\sigma := \sigma \cdot (f_k, R_k, \lambda_k)$
- $F := F \cup \{f_k\}$
- $c := c - \lambda_k 1_{\delta^-(R_k)}$  (reduzir custos)
- $D_0 := (V, F)$  (atualizar digrafo auxiliar)

### 3 Devolver: $\sigma$

# Fase I: Encontrando $r$ -conjuntos Minimais



**Como encontrar um  $r$ -conjunto minimal não coberto?**

Seja  $D_0 := (V, F)$  onde  $F = \{f_i : i \in [k]\}$ .

- ❶ Calcular a condensação  $\mathcal{C}(D_0)$
- ❷ Identificar componentes fortemente conexas (CFCs)
- ❸ Encontrar uma fonte  $S$  em  $\mathcal{C}(D_0)$  tal que  $r \notin S$

## Proposição

Toda fonte  $S$  de  $\mathcal{C}(D_0)$  com  $r \notin S$  é um  $r$ -conjunto minimal não coberto por  $F$ .

**Complexidade:** identificação de CFCs em  $O(|A|)$  usando Kosaraju.

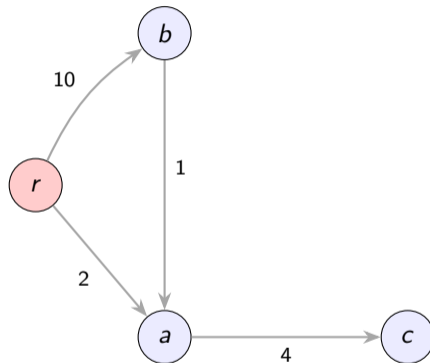
# Exemplo: Digrafo Inicial

**Digrafo ponderado  $(D, w, r)$ :**

- Vértices:  $\{r, a, b, c\}$
- Raiz:  $r$

**Pesos dos arcos:**

- $(r, a) : 2, (r, b) : 10$
- $(b, a) : 1, (a, c) : 4$



## Problema

Aplicar o algoritmo de András Frank para encontrar a  $r$ -arborescência geradora de custo mínimo.

# Fase I - Iteração 1: Encontrar $r$ -conjunto Minimal

## Estado inicial:

- $F = \emptyset$  (nenhum arco selecionado)
- $D_0 = (V, \emptyset)$
- $\mathcal{C}(D_0)$  tem 4 fontes

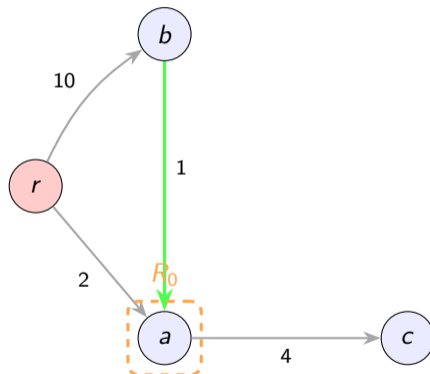
## Fontes que são $r$ -conjuntos:

- $\{a\}, \{b\}, \{c\}$

## Escolha: $R_0 = \{a\}$ (minimal)

## Arcos que entram em $\{a\}$ :

- $(r, a) : 2$
- $(b, a) : 1 \leftarrow$  **mínimo**



$$\lambda_0 = 1, f_0 = (b, a)$$

## Fase I - Iteração 1: Redução de Custos

## Atualização:

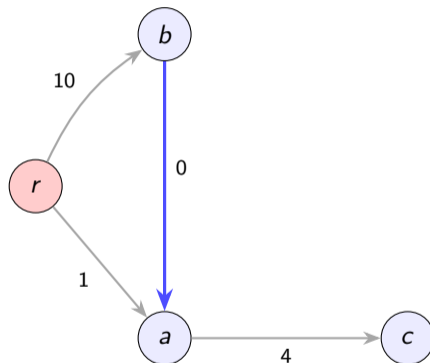
- $\sigma = [(f_0, R_0, \lambda_0)]$
- $F = \{(b, a)\}$
- $D_0 = (V, \{(b, a)\})$

## Redução de custos:

- $c(r, a) = 2 - 1 = 1$
- $c(b, a) = 1 - 1 = 0 \checkmark$

## Custos reduzidos:

- $(r, a) : 1, (r, b) : 10$
- $(b, a) : 0, (a, c) : 4$



Arcos azuis têm custo zero

Fase I - Iteração 2: Próximo  $r$ -conjunto

**Estado:**  $F = \{(b, a)\}$

$\mathcal{C}(D_0)$  agora tem:

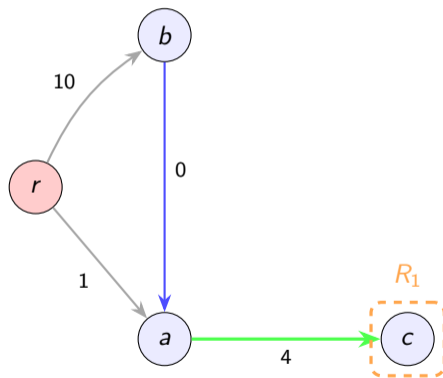
- CFC:  $\{b, a\}$  ( $b \rightarrow a$ )
- Fontes:  $\{r\}$ ,  $\{c\}$

**Escolha:**  $R_1 = \{c\}$

Arcos que entram em  $\{c\}$ :

- $(a, c) : 4 \leftarrow$  único

$\lambda_1 = 4$ ,  $f_1 = (a, c)$



## Fase I - Iteração 2: Redução e Estado Final

## Atualização:

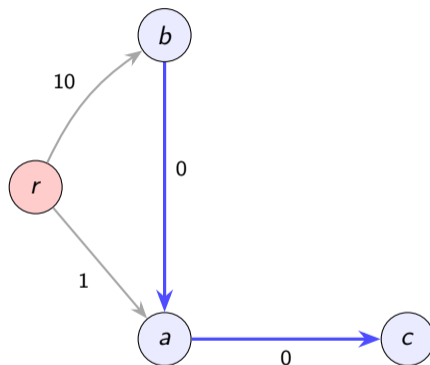
- $F = \{(b, a), (a, c)\}$
- $D_0 = (V, F)$

## Redução:

- $c(a, c) = 4 - 4 = 0 \checkmark$

$\mathcal{C}(D_0)$  agora:

- CFC:  $\{r\}, \{b, a, c\}$
- Apenas 1 fonte (contém  $r$ )



**Fim da Fase II!**

Cobertura de  $r$ -conjuntos construída!

Sequência devolvida

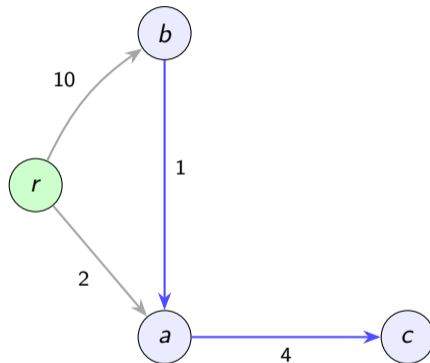
# Fase II: Extração da Arborescência

## Entrada da Fase II:

- $F = [f_0, f_1] = [(b, a), (a, c)]$

## Algoritmo guloso:

- 1  $U = \{r\}, J = \emptyset$
- 2 Iterar sobre  $F$  em ordem:
  - $(b, a)$ :  $b \notin U \times$  pular
  - $(a, c)$ :  $a \notin U \times$  pular
- 3 Precisamos incluir arcos de  $D$  não em  $F$ !



Verde = vértices em  $U$

## Observação

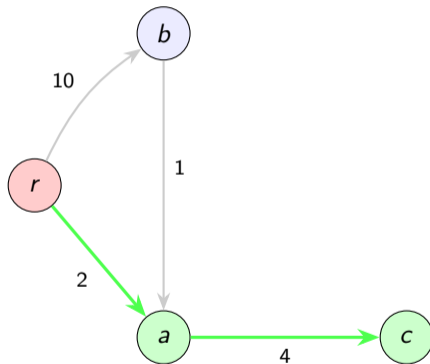
# Fase II: Construção Passo a Passo

## Iteração 1:

- $U = \{r\}$
- Procurar arco saindo de  $U$
- $(r, a)$ :  $r \in U$ ,  $a \notin U$  ✓
- $U := U \cup \{a\}$
- $J := \{(r, a)\}$

## Iteração 2:

- $(b, a)$ :  $a \in U$  ✗
- $(a, c)$ :  $a \in U$ ,  $c \notin U$  ✓
- $U := \{r, a, c\}$
- $J := \{(r, a), (a, c)\}$



$J =$  arborescência geradora

# Fase I: Implementação - Estrutura Principal



## Função phase1:

```
def phase1(D: nx.DiGraph, r: int):
    D_copy = D.copy()
    sigma = []
    D_zero = nx.DiGraph()
    D_zero.add_nodes_from(D_copy.nodes())

    while True:
        C = nx.condensation(D_zero)
        sources = [x for x in C.nodes()
                   if C.in_degree(x) == 0]
        if len(sources) == 1:
            break

        for s in sources:
            X = C.nodes[s]["members"]
            if r in X:
                continue
            # ... (continua no proximo slide)
```

**Observação:** Loop principal até todos  $r$ -conjuntos estarem cobertos

# Fase I: Implementação - Seleção de Arcos



## Continuação da função phase1:

```
# ... (continuacao do loop)
arcs = [(u, v, data)
        for u, v, data in D_copy.edges(data=True)
        if u not in X and v in X]

min_weight = min(data["w"] for _, _, data in arcs)
a = update_weights(D_copy, arcs, min_weight)

D_zero.add_edge(a[0], a[1])
sigma.append((a, X, min_weight))

return sigma
```

**Complexidade:**  $O(|V||A|)$  - limitado por  $2|V| - 1$  iterações

# Fase I: Implementação - Atualização de Pesos

## Função `update_weights`:

```
def update_weights(D: nx.DiGraph,  
                  arcs: list[tuple[int, int, dict]],  
                  min_weight: float):  
    for u, v, _ in arcs:  
        D[u][v]["w"] -= min_weight  
        if D[u][v]["w"] == 0:  
            a = (u, v)  
    return a
```

## Descrição

- Reduz peso de todos arcos que entram no  $r$ -conjunto
- Devolve arco com peso zero (custo reduzido mínimo)
- Atualiza o digrafo in-place

# Fase II: Construção da Arborescência



**Entrada:** Sequência  $(f_i)_{i \in [k]}$  da Fase I

**Objetivo:** Extrair  $J \subseteq \{f_i : i \in [k]\}$  que é uma  $r$ -arborescência geradora

**Algoritmo guloso:**

- 1 Iniciar com  $U := \{r\}$  e  $J := \emptyset$
- 2 Para  $t = 1$  até  $|V| - 1$ :
  - Para cada  $f_i = (u_i, v_i)$  na sequência:
  - Se  $u_i \in U$  e  $v_i \notin U$ :
    - $U := U \cup \{v_i\}$
    - $J := J \cup \{f_i\}$
    - Passar para próxima iteração

**Invariante**

Em cada iteração,  $\varrho_J(R_i) \leq 1$  para todo  $i \in [k]$

# Fase II: Implementação - Versão Lista



## Versão 1: Iteração sobre lista

```
def phase2(D: nx.DiGraph, r: int,
          F: list[tuple[int, int]]):
    Arb = nx.DiGraph()
    Arb.add_node(r)
    n = len(D.nodes())

    for _ in range(n - 1):
        for u, v in F:
            if u in Arb.nodes() and v not in Arb.nodes():
                edge_data = D.get_edge_data(u, v)
                Arb.add_edge(u, v, **edge_data)
                break

    return Arb
```

**Complexidade:**  $O(|V||F|) = O(|V|^2)$  pois  $|F| \leq 2|V| - 1$

# Fase II: Implementação - Versão Heap



## Versão 2: Usando fila de prioridade (estilo Dijkstra)

```
def phase2_v2(D, r, F):
    Arb = nx.DiGraph()
    for i, (u, v) in enumerate(F):
        Arb.add_edge(u, v, w=i) # prioridade = indice

    V = {r}
    q = []
    for u, v, data in Arb.out_edges(r, data=True):
        heapq.heappush(q, (data["w"], u, v))

    J = nx.DiGraph()
    while q:
        _, u, v = heapq.heappop(q)
        if v in V: continue
        J.add_edge(u, v, w=D[u][v]["w"])
        V.add(v)
        for x, y, data in Arb.out_edges(v, data=True):
            heapq.heappush(q, (data["w"], x, y))
    return J
```

**Complexidade:**  $O(|V| \log |V|)$  usando heap binário

# Algoritmo Completo de Frank



## Composição das duas fases:

```
def andras_frank(D: nx.DiGraph, r: int):
    # Fase I: construir cobertura
    sigma = phase1(D, r)
    F = [f for f, _, _ in sigma]

    # Fase II: extrair arborescencia
    J = phase2_v2(D, r, F)

    return J
```

## Complexidade Total

- Fase I:  $O(|V||A|)$
- Fase II (heap):  $O(|V| \log |V|)$
- **Total:**  $O(|V|(|A| + \log |V|))$

# Intermissão



## Chu-Liu-Edmonds vs András Frank

# 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)	<b>0,016 s</b>	<b>0,020 s</b>

## Speedup Fase II

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

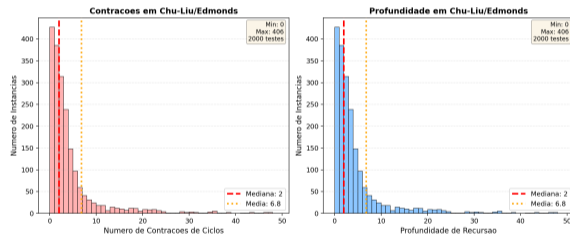
# Características Estruturais

## 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)



# Desafios na Ensino de Algoritmos de Grafos



## Abstração Excessiva

- Dificuldade em visualizar estruturas
- Compreensão limitada dos passos do algoritmo

## Solução Proposta

Ferramenta interativa para visualização e execução passo a passo

# Objetivos da Ferramenta Didática



- Facilitar a compreensão dos algoritmos Chu-Liu-Edmonds e András Frank
- Permitir aos usuários interagir com grafos e observar o funcionamento dos algoritmos
- Fornecer feedback imediato sobre as operações realizadas
- Ser acessível via navegador web, sem necessidade de instalação

# Motivação Didática



## Desafio

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

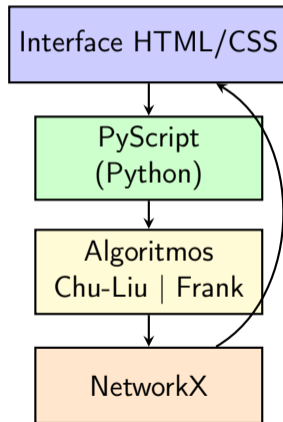
## Solução Proposta:

- 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 :)

## 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



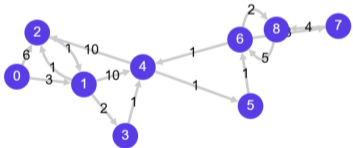
# Interface: Desenho de Grafos


**ArboGraph**

Desenhe seu grafo

1. Desenhe um grafo, [carregue](#) um exemplo ou [importe](#) um grafo já existente.

Grafo Original



Home

Chu-Liu/Edmonds

Andras Frank (V1)

Andras Frank (V2)

Desenhe um grafo

Nossa tese


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

[Link](#)

## Funcionalidades:

- Adicionar vértices e arestas

# Interface: Chu-Liu-Edmonds


**ArboGraph**

Home

Chu-Liu/Edmonds

Andras Frank (V1)

Andras Frank (V2)

Desenhe um grafo

Nossa tese


**Chu-Liu / Edmonds**

1 Crie um grafo  
Desenhe um grafo, [carregue](#) um exemplo ou [importe](#) um grafo já existente.

2 Escolha o nó raiz

3 Execute o algoritmo

Grafo Original



» Passo A Passo

Execute o algoritmo para visualizar o passo-a-passo

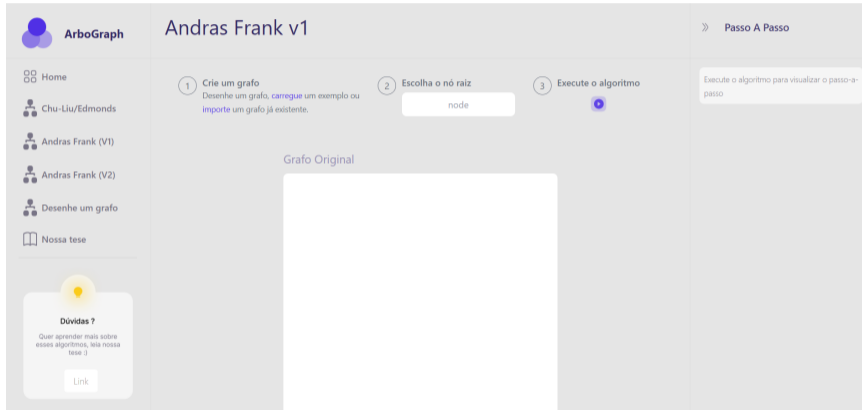
**Dúvidas ?**

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

[Link](#)

- Visualização passo a passo
- Destacamento de ciclos detectados

# Interface: András Frank



- Exibição das duas fases
- Visualização de CFCs

# 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>