

# Estudo de Conectividade e Estrutura em Redes Elétricas com Teoria dos Grafos

Alex de Oliveira Alves, Gabriel Barbosa Fernandes, João Pedro Silva de Oliveira, Leonardo Siqueira Fernandes | Orientador: Rafael de Magalhães Dias Frinhani

Universidade Federal de Itajubá | Bacharelado em Sistemas de Informação | 2025



# Contexto e Motivação

## O Desafio Real

Uma concessionária de energia enfrenta **interrupções localizadas** e instabilidades no fornecimento que não decorrem da geração, mas sim de fragilidades na **configuração estrutural** da rede de distribuição.

## Nossa Abordagem

Aplicamos **teoria dos grafos** para analisar a topologia da rede elétrica, identificando pontos críticos, gargalos e vulnerabilidades estruturais que comprometem a continuidade do serviço.





# Contexto e Motivação

## Objetivo

Oferecer uma visão abrangente da estrutura da rede, contribuir para decisões de engenharia e apontar intervenções para melhorar eficiência e estabilidade

## Soluções

Criação de estratégias de melhoria da topologia, aumento de robustez e caminhos alternativos e mitigação de riscos associados à desconexão de vértices/arestas relevantes.



# Fundamentos: Teoria dos Grafos



## O que é um Grafo?

Estrutura matemática  $G=(V,E)$  composta por vértices (V) e arestas (E) que representa entidades e suas conexões em sistemas interconectados.



## Aplicação em Redes Elétricas

Vértices representam usinas, subestações, transformadores e consumidores. Arestas são as conexões físicas entre esses elementos.



## Por que é Essencial?

Permite analisar conectividade, centralidade e robustez, identificando vulnerabilidades antes que causem falhas operacionais reais.

# Conceitos-Chave Aplicados

01

---

## Conectividade

Avalia se existem caminhos entre todos os vértices. Identifica componentes isoladas e pontos de articulação cuja remoção fragmenta a rede.

Pontos de articulação e arestas-ponte são elementos únicos cuja falha desconecta partes da rede, representando vulnerabilidades graves.

02

---

## Centralidades

Métricas que revelam vértices estratégicos: grau (conexões diretas), intermediação (controle de fluxo) e proximidade (eficiência de alcance).

03

---

## Árvore Geradora Mínima

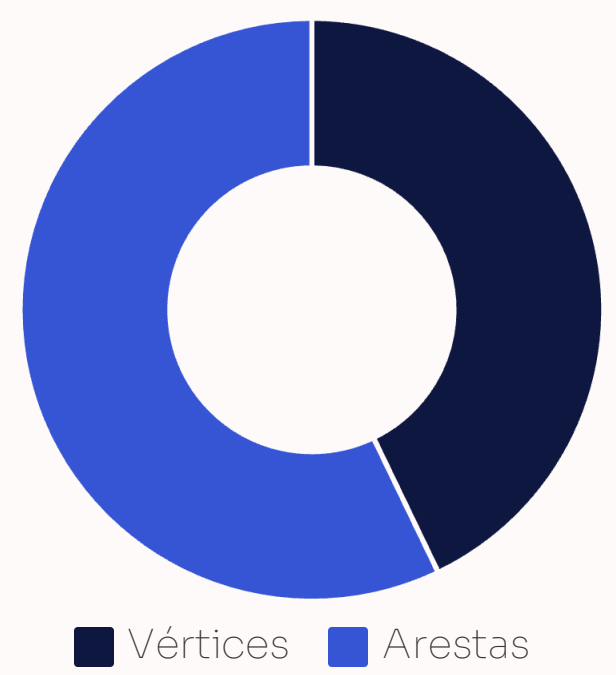
Subgrafo que conecta todos os vértices com o mínimo de arestas, revelando ligações essenciais versus redundância estrutural.



# Análise do Dataset: Estrutura da Rede

## Características Gerais

A rede elétrica analisada apresenta dimensões significativas e uma estrutura totalmente conexa, permitindo análises profundas sobre sua topologia.



## Métricas Iniciais



Rede totalmente conexa com 1 componente conectado, mas estrutura revela potenciais fragilidades.



# Diagnóstico: Vulnerabilidades Críticas

## Arestas-Ponte Excessivas

24% das arestas (1.611) são pontes cuja remoção fragmenta a rede — indicando ausência severa de redundância.

## Vértices de Alta Criticidade

25% dos vértices são pontos de articulação essenciais para manter conectividade entre regiões distintas.

## Concentração de Fluxo

Centralidades revelam vértices sobrecarregados: falhas nesses pontos comprometem caminhos mínimos e distribuição energética.

## Regiões Periféricas Isoladas

Áreas dependem de conexões únicas, tornando-se altamente vulneráveis a interrupções localizadas do fornecimento.





# Solução: Algoritmos de Melhoria Estrutural



## Bypass para Vértices Críticos

Cria conexões diretas entre vizinhos de vértices altamente críticos, reduzindo dependência e estabelecendo rotas alternativas.



## Redundância para Arestas-Ponte

Adiciona ligações entre vizinhos de extremos de pontes, impedindo que falha de aresta única interrompa fluxo regional.



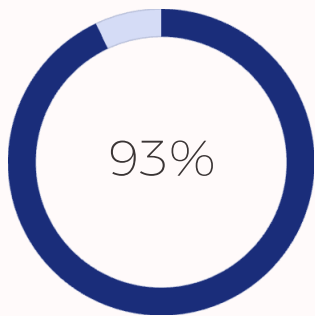
## Augmentação Gulosa

Analisa caminhos mínimos e adiciona arestas estratégicas entre pares periféricos para distribuir carga e reduzir congestionamento.



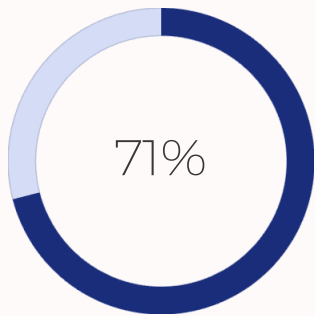
# Resultados: Transformação Estrutural

## Impacto das Intervenções



Redução de Bridges

De 1.611 para apenas 111 arestas-ponte



Menos Vértices Críticos

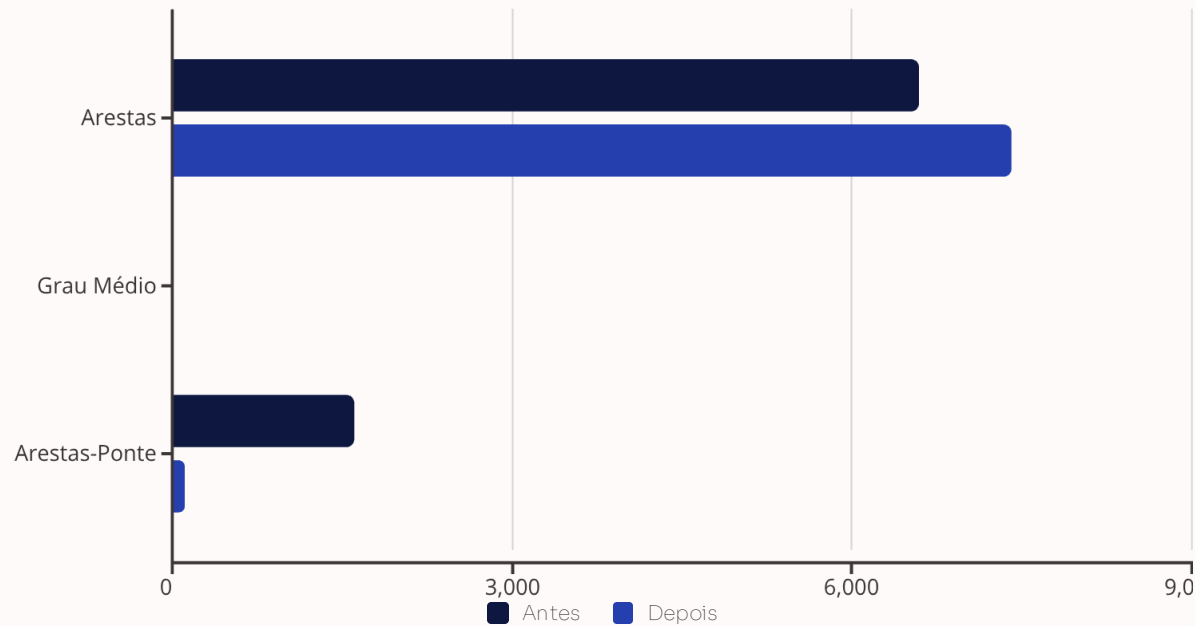
Pontos de articulação drasticamente reduzidos



Novas Conexões

Arestas adicionadas estrategicamente

## Melhorias Quantificadas



A rede resultante é **significativamente mais robusta**, com redundância aumentada e distribuição equilibrada de fluxos.



# Análise de Centralidades Pós-Intervenção

## Intermediação

Vértice 1308 lidera com 0.11196, mas valores menores que antes indicam **descentralização do fluxo**.

## Proximidade

Vértice 4164 com 0.12478 — mais eficiente em alcançar outros nós, refletindo **melhor distribuição topológica**.

## Autovetor

Cluster denso nos vértices 4381, 4345, 4336 revela região bem conectada e **estruturalmente influente**.

As métricas confirmam que, mesmo com vértices ainda relevantes, a dependência estrutural foi **significativamente reduzida**.

# Conclusões e Impacto

## Resultados Alcançados

- Robustez Estrutural**  
Rede mais resiliente com redundância local aumentada e menor dependência de elementos únicos.
- Distribuição Equilibrada**  
Carga estrutural mais homogênea reduz risco de sobrecargas e interrupções inesperadas.
- Aplicabilidade Prática**  
Melhorias baseadas em métricas científicas sem necessidade de grandes reestruturações físicas.



## Próximos Passos

- Analisar cenários de falhas múltiplas simultâneas
- Avaliar impacto econômico das intervenções propostas
- Otimizar relação custo-benefício dos algoritmos
- Validar em outras redes elétricas reais