

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 representam 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

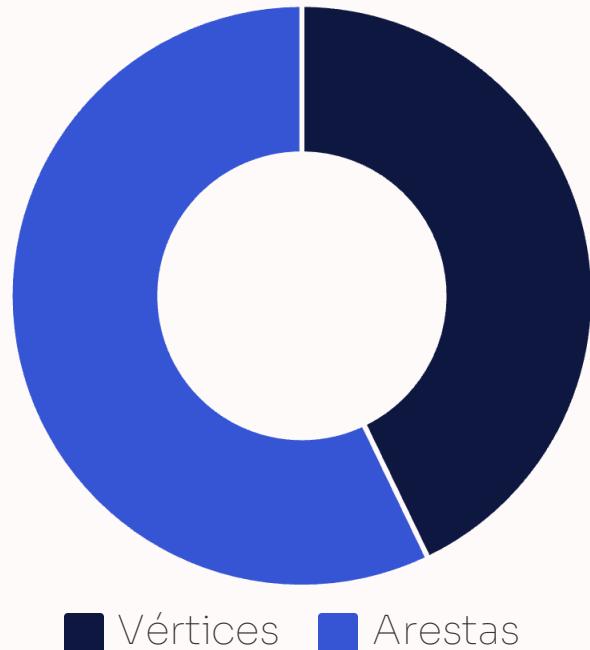
Subgrafo que conecta todos os vértices com o mínimo de arestas, revelando ligações essenciais versus redundância estrutural.



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

4.941

Vértices

Nós da rede representando
elementos

6.594

Arestas

Conexões físicas entre
elementos

2.66

Grau Médio

Conexões médias por vértice

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.

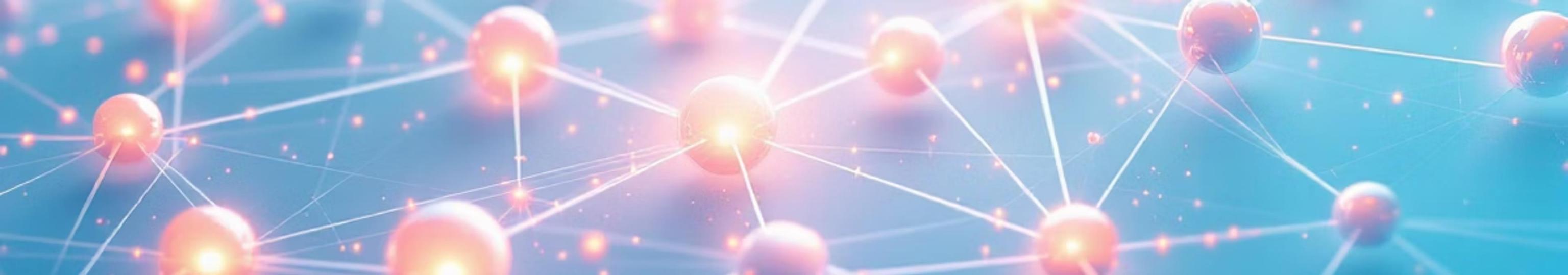
Concentração de Fluxo

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

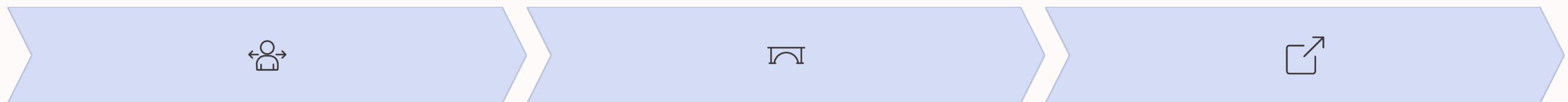
Regiões Periféricas Isoladas

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 Arestras-Ponte

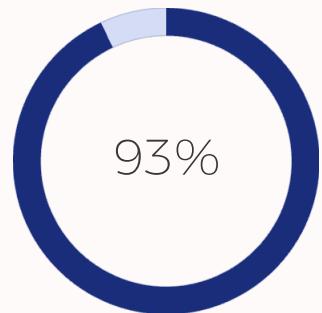
Adiciona ligações entre vizinhos de extremos de pontes, impedindo que falha de aresta única interrompa fluxo regional.

Augmentação Gulosa

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

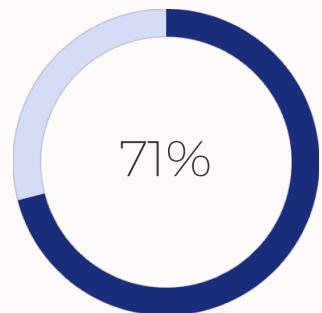
Resultados: Transformação Estrutural

Impacto das Intervenções



Redução de Bridges

De 1.611 para apenas 111 arestas-ponte



Menos Vértices Críticos

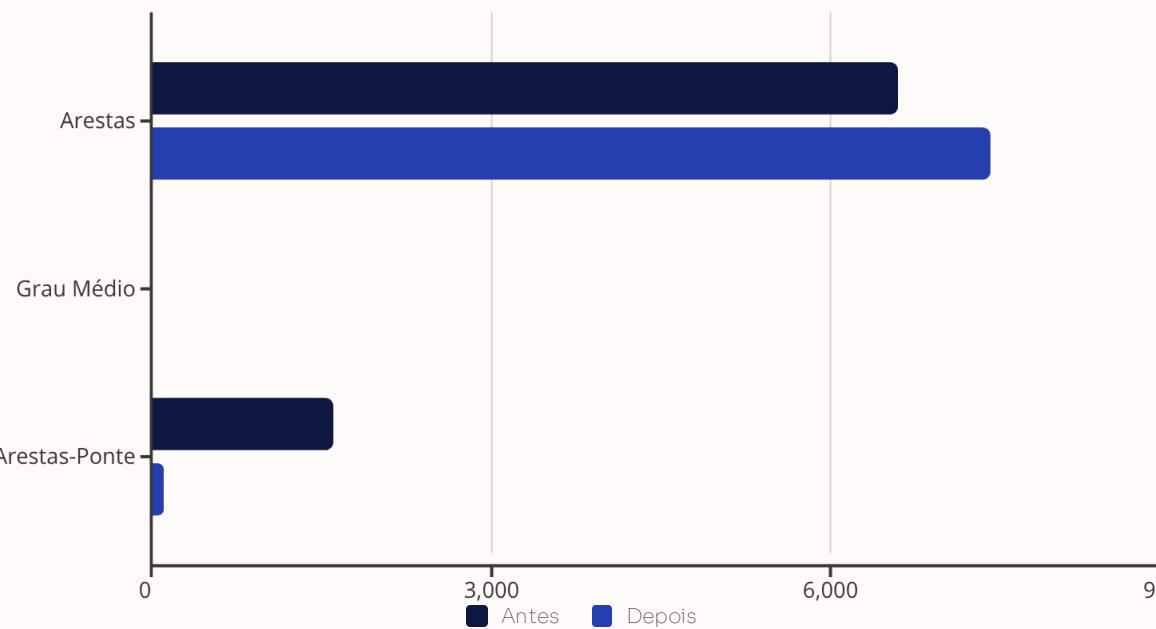
Pontos de articulação drasticamente reduzidos



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