

ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ROTEAMENTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO APLICADOS AO CENÁRIO DE MONITORAMENTO FLORESTAL

2023013658 - Fernanda Raponi Silva

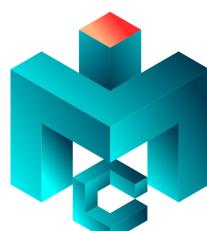
2024006578 - Henrique Oliveira Batista

2024003496 - Lucas Barbosa Pena

2024003754 - Rodrigo Paiva Onofri

SMAC03 - GRAFOS

Prof. Rafael Frinhani



**INSTITUTO DE
MATEMÁTICA E
COMPUTAÇÃO**

UNIFEI - Itajubá



Análise de Algoritmos de Roteamento em Redes de Sensores Sem Fio aplicados ao cenário de monitoramento florestal

1 Introdução

1.1 Cenário de Estudo (Contextualização, Conceitos)

O trabalho aborda o cenário de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) aplicadas ao monitoramento ambiental e detecção de incêndios em florestas plantadas. Neste contexto, nós sensores (motes) são distribuídos geograficamente para coletar dados críticos, como umidade do solo e temperatura, transmitindo-os sem uma infraestrutura fixa de comunicação entre os nós.

A transmissão ocorre salto a salto, onde cada sensor envia seus dados para o vizinho mais próximo até alcançar a estação base, que comunica as informações à central de monitoramento. A principal problemática deste cenário reside na eficiência energética: o consumo de bateria dos motes é diretamente proporcional à distância de transmissão. O esgotamento prematuro da energia de certos nós pode causar a desconexão de partes da rede, gerando "ilhas" de sensores isolados e comprometendo a integridade do sistema de monitoramento.

1.2 Objetivos do Projeto (Detalhamento do Problema)

O objetivo principal deste projeto é aplicar conceitos de Teoria dos Grafos para modelar a RSSF e propor estratégias que maximizem a vida útil da rede. Especificamente, o trabalho visa analisar e comparar diferentes algoritmos de roteamento, buscando identificar aquele que ofereça o melhor desempenho em termos de consumo de energia e longevidade dos nós.

Além da otimização energética, o projeto tem como objetivo secundário avaliar a robustez da rede. Será analisada a fragilidade do sistema diante de falhas, identificando nós críticos cuja inoperância poderia causar a desconexão completa de grandes segmentos da floresta monitorada.

2 Referencial Teórico

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) constituem um dos pilares das tecnologias modernas de monitoramento distribuído, sendo formadas por dispositivos autônomos capazes de coletar, processar e transmitir dados do ambiente sem a necessidade de uma infraestrutura fixa. Esses dispositivos, denominados nós sensores ou motes, possuem características comuns como baixo custo, limitação de energia, alcance reduzido de comunicação e capacidade computacional restrita, o que exige o emprego de protocolos eficientes e topologias otimizadas

[Akyildiz et al. \(2002\)](#). Seu funcionamento é baseado na cooperação entre os nós, que organizam a comunicação em arquitetura multihop, repassando informações até a estação base responsável por agregá-las e enviá-las ao sistema central. Um aspecto importante das RSSFs é a sua forte dependência em um bom sistema de eficiência energética para funcionar. Como os motes são posicionados em regiões remotas ou de difícil acesso e são alimentados por baterias não recarregáveis, o consumo de energia acaba por se tornar o principal limitador do tempo de vida da rede.

Os estudos de [Kaur et al. \(2023\)](#) demonstram que a substituição de baterias é inviável em larga escala, e que o consumo eficiente de energia numa RSSF é um fator principal para garantir que a operação de monitoramento continue pela maior quantidade de tempo possível, evitando possíveis comprometimentos na conectividade global. A comunicação entre sensores da rede é o maior consumidor de energia, principalmente quando operações como transmissões de longo alcance ou envio de múltiplos pacotes são necessárias. Nesse cenário, estratégias de roteamento e clusterização buscam reduzir a distância média de transmissões e equilibrar o uso médio da bateria dos nós, com o fim de promover a longevidade da RSSF. A organização topológica de uma RSSF pode ser modelada utilizando estratégias da Teoria dos Grafos, onde cada mote representa um vértice e as possíveis conexões entre eles são representadas como arestas.

Através dessa modelagem, é possível realizar análises formais sobre propriedades como a conectividade de uma rede, custos de comunicação, e rotas energicamente eficientes, possibilitando avaliar a robustez e eficácia dos sistemas distribuídos com alta precisão, o que exerce papel essencial no monitoramento de fenômenos ambientais. Em aplicações como essa, que são sensíveis ao tempo e a confiabilidade, o desempenho da RSSF depende fortemente do equilíbrio entre eficiência de energia, cobertura espacial e tempo de resposta. A má organização de uma rede pode sofrer atrasos na entrega de dados ou até a perda da conectividade em regiões críticas, afetando diretamente na operação do sistema.

A escabilidade e a tolerância a falhas são desafios centrais em redes de grande porte [Yick et al. \(2008\)](#), especialmente em cenários onde há aumento na densidade dos nós ou quando surgem interferências na comunicação. Desse modo, a topologia da rede se mostra um aspecto não apenas estrutural mas também determinante para a confiabilidade do sistema de monitoramento ambiental. Nesse contexto, a literatura recente vem explorando estratégias que combinam otimização topológica, técnicas de clusterização e métodos de decisão ponderada para prolongar a vida útil das redes. Os algoritmos de

Prim e Kruskal são abordagens clássicas da Teoria dos Grafos para construção de árvores geradoras mínimas (Minimum Spanning Trees, MST) e são amplamente utilizados para organizar a topologia com menor custo global de arestas, sendo considerados pilares da teoria de otimização em grafos.

O protocolo LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), projetado para RSSFs, organiza os motes em clusters e utiliza cluster-heads (CHs) rotativas com o intuito de reduzir o consumo de energia e prolongar a vida útil da rede [Heinzelman et al. \(2000\)](#), e foi o primeiro protocolo a introduzir o conceito de clusterização adaptativa na pesquisa de otimização energética em redes de sensores. O LEACH opera de forma distribuída, sendo dividido em duas fases principais: a organização (setup) e a transmissão (steady-state). Na fase de setup, cada nó tem uma probabilidade de se tornar uma CH em um ciclo, se tornando responsável por agregar dados dos nós vizinhos e transmiti-los diretamente à estação rádio base (ERB), reduzindo drasticamente o número de transmissões de longa distância. A escolha aleatória e periódica das CHs evita que os nós esgotem sua energia rapidamente, aumentando a vida útil operacional da rede e diminuindo o risco de desconexão de regiões críticas.

3 Solução Proposta

A fim de investigar a influência da construção de árvores geradoras mínimas (MST) no desempenho energético de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), este estudo implementa e analisa duas estratégias clássicas, os algoritmos de Prim e de Kruskal. Cada algoritmo é avaliado em duas variações: (i) execução direta sobre a rede, sem a presença de *cluster heads* (CH), e (ii) execução adaptada, incorporando CHs rotacionáveis segundo as políticas de seleção estudadas em protocolos como LEACH [Heinzelman et al. \(2002\)](#); [Liu & Ravishankar \(2011\)](#). Essas duas configurações permitem observar como a estrutura da árvore, a ordem das arestas e o comportamento dos CHs impactam o consumo energético da rede.

Para tornar essa comparação objetiva, utiliza-se um conjunto fixo de métricas: número de rodadas até a morte do primeiro nó, energia total remanescente no instante dessa morte, média de energia gasta por rodada, evolução da mortalidade dos nós e robustez estrutural medida pela sensibilidade a falhas. Tais métricas são amplamente utilizadas em estudos de longevidade de RSSF [Correia \(2017\)](#); [WILSON & YEBRA \(2024\)](#) e fornecem uma visão consistente do desempenho das estratégias de roteamento e agregação.

3.1 Data Set

O conjunto de dados utilizado consiste em um *dataset* sintético formado por sensores distribuídos aleatoriamente em uma área quadrada. Cada sensor possui coordenadas (x, y) e energia inicial idêntica, enquanto a Estação Base (EB) é modelada como um nó especial responsável por receber todas as transmissões agregadas. Como etapa preliminar, aplica-se o algoritmo Union-Find [BATTA et al. \(2022\)](#) para determinar os componentes conexos com base em um alcance máximo fixo entre sensores. Tal procedimento permite identificar regiões conectadas e assegurar que as simulações sejam conduzidas sobre topologias comunicantes e compatíveis com as restrições físicas da rede.

3.1.1 Modelagem da Rede

A RSSF é inicialmente modelada como um grafo geométrico simples $G = (V, E)$, em que cada vértice representa um sensor físico e cada aresta corresponde a uma possível comunicação direta. A conectividade estrutural é definida pela distância euclidiana:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

sendo criada uma aresta sempre que $d_{ij} \leq R_{\max}$. Esse limite segue práticas usuais de implantação em ambientes florestais, conforme relatado em aplicações reais de RSSF [WILSON & YEBRA \(2024\)](#).

Entretanto, no contexto da simulação, a rede se comporta como um grafo ponderado dinâmico, cujos pesos das arestas variam a cada rodada. Isso porque a distância não é o único fator determinante para o roteamento intra-cluster, mas sim o estado energético dos nós. A cada rodada, é gerado um grafo ponderado cujos pesos refletem simultaneamente a distância e o estado energético dos sensores. O peso básico é definido como:

$$w_{ij}(t) = \alpha d_{ij} + \beta \left(\frac{1}{E_i(t) + E_j(t)} \right), \quad \alpha + \beta = 1,$$

o que penaliza a seleção de nós energeticamente fragilizados e favorece caminhos que prolonguem a longevidade da rede. Quando CHs são utilizados, seus enlaces recebem prioridade por meio do fator de ajuste:

$$\tilde{w}_{ij}(t) = \begin{cases} \gamma w_{ij}(t), & \text{se } i \text{ ou } j \text{ for CH,} \\ w_{ij}(t), & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Essa adaptação segue a lógica de priorização temporária empregada em protocolos de clusterização baseados em energia [Heinzelman et al. \(2002\)](#); [Liu & Ravishankar \(2011\)](#), permitindo observar a influência da centralização por CHs no comportamento das MSTs.

3.1.2 Energia Inicial dos Sensores

A energia inicial atribuída a cada sensor foi definida como $E_i(0) = 50 \text{ J}$, valor obtido por reescalonamento a partir das capacidades energéticas típicas discutidas na literatura de RSSF. Estudos sobre modelagem energética de redes de sensoriamento, como o apresentado por [Correia \(2017\)](#), consideram configurações usuais de baterias de aproximadamente 4000 mAh operando em torno de 3.6 V, o que permite estimar a energia física disponível em um sensor real por meio da relação:

$$E_{\text{real}} = Q \cdot V \cdot 3600 = 4.0 \text{ Ah} \times 3.6 \text{ V} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \approx 51\,840 \text{ J.}$$

Essa quantidade, da ordem de dezenas de quilojoules, representa a capacidade energética típica de dispositivos empregados em cenários reais de monitoramento ambiental. Entretanto, utilizar diretamente essa escala em simulações resultaria em tempos de execução muito longos e em dinâmicas de depleção energética pouco práticas para estudos comparativos, como também salientado em avaliações experimentais de RSSF [Correia \(2017\)](#).

Por essa razão, adotou-se um procedimento de normalização amplamente utilizado em simulações da área, no qual a energia inicial é reduzida para uma escala manejável, neste caso, 50 J, preservando-se as proporções relativas entre transmissão, recepção e processamento. Assim, o valor de 50 J mantém a consistência com os modelos energéticos descritos na literatura, viabilizando as análises de desempenho dos algoritmos de roteamento e a comparação entre as diferentes variantes com e sem *cluster heads*. Definidos os parâmetros energéticos e estruturais, a próxima etapa consiste na aplicação dos algoritmos de Prim e Kruskal à topologia resultante, conforme descrito na subseção seguinte.

3.2 Método de Solução

Para explorar o desempenho dos algoritmos, quatro cenários são testados: Prim sem CH, Prim com CH, Kruskal sem CH e Kruskal com CH. Em todos eles, a simulação ocorre em rodadas discretas, sendo que em cada rodada, executam-se as seguintes etapas: 1. seleção ou rotação dos CHs, quando aplicável; 2. atualização dos pesos das arestas considerando distância e energia; 3. construção da MST pelo algoritmo escolhido; 4. débito energético resultante das transmissões; 5. registro das métricas.

A Estação Base permanece fixa e atua como destino de coleta, replicando modelos clássicos de monitoramento ambiental [Correia \(2017\)](#). Essa padronização assegura que diferenças nos resultados derivem unicamente das estratégias de MST e do uso ou não de CHs.

3.2.1 Construção da MST pelo Algoritmo de Prim

O algoritmo de Prim constrói a MST expandindo-a a partir de um vértice raiz, que corresponde ao CH selecionado (ou à EB na variante sem clusters). Uma fila de prioridade mantém as arestas de menor peso disponíveis para conexão e em cada iteração, a aresta de menor custo que liga um nó já visitado a um nó ainda não incluído é adicionada à árvore.

Quando CHs não são utilizados, a expansão se baseia exclusivamente nos pesos $w_{ij}(t)$ e quando CHs estão ativos, usa-se $\tilde{w}_{ij}(t)$, influenciando diretamente a ordem de inserção das arestas e, consequentemente, a topologia da MST. Esse comportamento é consistente com resultados observados em aplicações de Prim em contextos de clusterização [Wang et al. \(2014\)](#).

Algorithm 1: Pseudocódigo – Prim

Data: Lista de nós, conjunto de CHs, parâmetros α , β e γ
Result: Árvore geradora mínima

- 1 Selecionar raiz (EB ou CH);
- 2 Gerar pesos das arestas;
- 3 Inicializar heap com arestas incidentes à raiz;
- 4 **while** existem nós não incluídos **do**
- 5 Extrair menor aresta válida do heap;
- 6 Incluir aresta na MST;
- 7 Debitar energia dos nós;
- 8 Inserir arestas incidentes ao novo nó;
- 9 **end**

3.2.2 Construção da MST pelo Algoritmo de Kruskal

Kruskal, diferentemente de Prim, não depende de um vértice inicial: todas as arestas são ordenadas por peso crescente e adicionadas à MST sempre que não formarem ciclos, verificados por meio da estrutura Union-Find. Essa estratégia tende a capturar globalmente as melhores arestas e pode gerar MSTs mais eficientes em redes densas [BATTA et al. \(2022\)](#).

Na versão com CH, os pesos ajustados $\tilde{w}_{ij}(t)$ alteram a ordem global das arestas, favorecendo caminhos que atravessam CHs e modificando a forma da árvore resultante. Assim como em Prim, essa diferença é um dos principais focos de comparação na análise experimental.

Algorithm 2: Pseudocódigo – Kruskal

Data: Lista de nós, conjunto de CHs, parâmetros α , β e γ
Result: Árvore geradora mínima

- 1 Gerar todas as arestas com pesos atualizados;
- 2 Ordenar arestas por peso crescente;
- 3 Inicializar Union-Find;
- 4 **foreach** aresta em ordem **do**
- 5 **if** não forma ciclo **then**
- 6 Adicionar aresta à MST;
- 7 Debitar energia dos nós;
- 8 **end**
- 9 **end**

3.2.3 Avaliação de Conectividade e Robustez

A robustez estrutural de uma RSSF é um fator determinante para sua longevidade, uma vez que a exaustão energética ou a remoção acidental de nós pode comprometer a conectividade global da rede, impedindo a transmissão de dados até a Estação Base (EB). Estudos recentes em redes de sensoriamento a longo prazo destacam que falhas topológicas são uma das principais causas de interrupção de serviço em aplicações ambientais e de IoT [WILSON & YEBRA \(2024\)](#). Assim, além da análise energética resultante das MSTs construídas por Prim e Kruskal, torna-se essencial avaliar de que forma a topologia subjacente responde à perda de nós críticos. Esse tipo de avaliação permite investigar se as diferentes estratégias de roteamento com ou sem *cluster heads* (CHs), que favorecem padrões que concentram carga em determinados nós, potencializam vulnerabilidades topológicas que impactam diretamente a resiliência da rede.

Para capturar diferentes dimensões de criticidade, este trabalho emprega dois métodos complementares, sendo a simulação de remoção de nós com reconstrução de componentes via Union-Find e a detecção de pontos de articulação pelo algoritmo de Tarjan [Tarjan \(1972\)](#). A remoção de nós permite medir a *criticidade funcional* identificando vértices, cuja falha isola regiões inteiras da rede ao quebrar o caminho até a EB. Tal abordagem é particularmente relevante em RSSFs energéticas, nas quais CHs e nós próximos à EB tendem a assumir papel de encaminhamento recorrente, podendo se tornar gargalos funcionais [Correia \(2017\)](#). Já o algoritmo de Tarjan identifica *criticidade estrutural*, revelando vértices cujo papel é central à topologia, independentemente do fluxo efetivo de

dados. Esse tipo de análise é fundamental para detectar falta de redundância geográfica e estrutural, fenômeno recorrente em redes de sensores estáticas implantadas em campo, conforme evidenciado por [WILSON & YEBRA \(2024\)](#).

A combinação desses métodos fornece uma visão abrangente da robustez da rede, pois integra tanto vulnerabilidades estruturais quanto funcionais. Enquanto a análise funcional via Union-Find captura o impacto real que a falha de um nó provoca na conectividade operacional, a análise estrutural via Tarjan revela fragilidades intrínsecas da topologia geométrica. Essa complementaridade é essencial para o contexto deste trabalho, pois as variantes Prim e Kruskal, com e sem CHs, podem produzir padrões de tráfego e uso energético distintos, alterando o conjunto de nós que se tornam críticos ao longo do tempo. Em resumo, a avaliação de robustez aplicada aqui permite compreender não apenas a eficiência energética das diferentes estratégias, mas também sua capacidade de manter a rede conectada e funcional em condições adversas, oferecendo uma análise coerente com recomendações presentes em levantamentos sobre RSSF e redes sensoriais [WILSON & YEBRA \(2024\)](#).

4 Resultados

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos nas simulações realizadas sobre quatro redes de 50, 100, 200 e 400 sensores, permitindo avaliar o comportamento dos algoritmos de Prim e Kruskal, cada um em suas versões com e sem uso de *cluster heads* (CHs). A análise segue o conjunto de métricas definido na seção anterior: número total de rodadas até a morte do primeiro nó, quantidade de sensores ativos ao final da simulação e energia total remanescente no sistema.

4.1 Comparação Geral entre Algoritmos

A análise dos resultados revela um padrão consistente em todas as topologias: o algoritmo de Kruskal apresenta maior longevidade operacional, isto é, executa um número maior de rodadas antes da morte do primeiro nó. Esse comportamento decorre de sua natureza global, pois a ordenação completa das arestas permite ao algoritmo selecionar caminhos menos custosos distribuídos ao longo de toda a rede, evitando sobrecarga concentrada em regiões de maior fluxo, conforme discutido na seção anterior.

Por outro lado, Prim, por construir a árvore a partir de um vértice raiz CH ou Estação Base, apresenta maior tendência à concentração de tráfego nas vizinhanças iniciais da expansão. Essa característica é bem documentada em estudos que analisam algoritmos de MST aplicados a redes clusterizadas [Wang et al. \(2014\)](#), e foi observada de forma clara nas simulações, sobretudo nas redes menores. Desse modo, a Tabela 1 consolida numericamente essas tendências e apresenta, lado a lado, todas as configurações avaliadas.

Tabela 1: Resumo dos resultados obtidos para cada instância e configuração de algoritmo.

Rede - algoritmo	Rodadas	Nós Ativos	Energia
50 – Kruskal (CH)	198	29	1050.36
50 – Kruskal	215	28	1096.15
50 – Prim (CH)	76	47	2312.58
50 – Prim	82	47	2317.28
100 – Kruskal (CH)	196	45	1310.86
100 – Kruskal	347	45	1343.31
100 – Prim (CH)	122	97	4830.94
100 – Prim	122	97	4830.94
200 – Kruskal (CH)	693	45	706.67
200 – Kruskal	745	43	827.27
200 – Prim (CH)	148	157	4359.58
200 – Prim	158	155	4421.16
400 – Kruskal (CH)	598	46	366.02
400 – Kruskal	548	49	619.54
400 – Prim (CH)	120	157	1514.40
400 – Prim	138	146	1830.51

4.2 Impacto dos Cluster Heads

A ativação de CHs produziu efeitos distintos nos dois algoritmos, de forma que para Kruskal, redes pequenas de 50 e 100 nós, apresentaram redução no número de rodadas quando CHs foram empregados, evidenciando que a priorização induzida pelo fator γ pode reforçar padrões de tráfego centralizado em topologias pouco densas. Entretanto, nas redes de 200 e 400 nós, mais densas e com maior redundância espacial, o uso de CHs aumentou o desempenho, sugerindo que, nesse cenário, a priorização funciona como guia para direcionar o tráfego a regiões energeticamente mais favoráveis.

No caso de Prim, os CHs não trouxeram benefícios significativos em nenhuma das instâncias avaliadas e como a expansão da árvore é naturalmente orientada pelo vértice raiz, o efeito da priorização introduzida pelo fator γ é limitado, e em alguns casos reforça a tendência de sobrecarregar determinados caminhos. Esse comportamento reforça que o efeito dos CHs é sensível à estrutura do algoritmo, sendo mais influente na ordenação global de Kruskal do que na expansão local de Prim.

4.3 Diferenças entre as Redes

As diferenças entre as quatro redes revelam que a densidade topológica exerce papel determinante no desempenho. As redes com 50 e 100 nós apresentaram maior sensibilidade à falha de nós, fenômeno consistente com os testes de robustez estrutural realizados via Union-Find e pontos de articulação, conforme apresentado na seção anterior. Já as redes com 200 e 400 nós demonstraram capacidade superior de redistribuição da carga, sustentando mais rodadas e apresentando menos nós críticos.

A rede de 400 nós, em particular, destacou-se pela convergência completa entre os métodos de detecção de fragilidade, sendo nenhum nó crítico e indicando uma topologia altamente redundante. Essa robustez contribuiu para melhor desempenho tanto de Prim quanto de Kruskal, embora a diferença entre os algoritmos tenha permanecido significativa.

4.4 Discussão dos Resultados

A análise consolidada dos resultados permite identificar tendências claras no comportamento das estratégias avaliadas. O algoritmo de Kruskal apresentou, de maneira consistente, o maior número de rodadas em praticamente todas as configurações e tamanhos de rede, especialmente nas topologias com 100 e 200 nós, o que reforça sua natureza global e sua capacidade de selecionar caminhos energeticamente mais eficientes ao longo de toda a estrutura da RSSF. Em contraste, o desempenho de Prim mostrou-se mais sensível à posição da raiz, característica intrínseca ao algoritmo que, independentemente da presença ou não de *cluster heads*, tende a concentrar tráfego em regiões específicas, reduzindo sua longevidade.

A utilização de CHs produziu impactos distintos conforme a densidade da topologia. Redes mais esparsas não se beneficiaram dessa estratégia, mas em redes mais densas, a priorização induzida pelo fator de ajuste demonstrou ganhos consideráveis, sobretudo no caso de Kruskal. Esses efeitos sugerem que a presença de CHs é benéfica apenas quando há redundância suficiente para sustentar a redistribuição de carga, condição observada sobretudo nas redes médias e grandes.

Por fim, os testes de robustez corroboram que redes pequenas são estruturalmente mais vulneráveis e que as árvores geradas por Prim exibem menor resiliência frente à falha de nós quando comparadas às de Kruskal, tendência compatível com os resultados energéticos observados. De forma geral, os experimentos confirmam a hipótese delineada na Solução Proposta: a estratégia de construção da MST, combinada aos ajustes de peso e ao uso de CHs, desempenha papel decisivo na durabilidade e na capacidade de manter a conectividade da RSSF. Assim, a escolha entre Prim e Kruskal depende diretamente das prioridades da aplicação, sejam elas maximizar longevidade, preservar conectividade ou equilibrar carga energética.

5 Conclusões

Em conclusão, a partir desse estudo, observamos a dificuldade de monitorarmos as áreas florestais devido aos obstáculos impostos pelo custo elevado e baixa confiabilidade no monitoramento dessas regiões. Nesse ínterim, chegamos em acordo que uma boa solução é o uso de redes de sensores sem fios Correia (2017). Por conseguinte, observamos também que as RSSFs apresentam óbices quanto a sua longevidade, sendo que, muitas vezes o sensor descarrega e inviabiliza a transmissão de dados WILSON & YEBRA (2024); além da impossibilidade de trocar a bateria dos dispositivos utilizados nessa rede devido a sua localização remota, sendo assim, criou-se a necessidade do uso de meios tecnológicos para aumentar ao máximo a longevidade da rede e minimizar o descarregamento prematuro dos dispositivos.

Portanto, após realizarmos o teste de quatro algoritmos, Kruskal, Kruskal com Cluster Head BATTA et al. (2022), Prim e Prim com Cluster Head Wang et al. (2014), que visam criar árvores geradoras mínimas e assim viabilizar a transmissão dos dados entre os motes até a base fixa podemos extrair dados tangíveis para diferentes casos. Sendo assim, através de testes realizados em simulações computacionais, chegamos a conclusão que, para cenários em que os motes estão distribuídos de forma mais esparsa e pobres em conexões devido

ao limite da distância, o Kruskal sem o uso de Cluster Head desempenhou melhor, proporcionando que a rede se mantivesse funcional por mais rodadas. Para redes maiores e ricas em conexões o algoritmo de Kruskal com Cluster Head se mostrou mais efetivo em tornar a rede sustentável e sobreviver por mais rodadas.

Sendo assim, utilizamos dois métodos de verificação de conectividade da rede, sendo eles, o Algoritmo de Union-Find Simsiri et al. (2016) e DFS (Algoritmo de Tarjan) Zhong et al. (2025) a fim de analisar a fragilidade quanto a desconexões devido a nós sensores considerados críticos. O uso das duas estratégias distintas, proporcionou um embasamento mais preciso nos resultados, através de que o Union-Find verifica se através de um vértice em específico é possível chegar à base de tratamento de dados já a DFS (Algoritmo de Tarjan) verifica a conectividade do grafo inteiro. Em consequente, conseguimos pontuar de uma forma mais assertiva quanto à quantidade de nós críticos e também quais são eles.

Por fim, com a utilização de RSSFs atreladas às estratégias de caminhamento em grafos (MST) conseguimos aprimorar a velocidade, durabilidade e integridade da comunicação de interpéries em regiões arborizadas. Demonstrando assim, o potencial que a tecnologia pode desempenhar para a preservação de florestas e plantações contra os estragos causados por focos de incêndio.

6 Papel dos Integrantes

Fernanda Raponi: Redação da solução proposta e resultados, realizou pesquisas para fundamentar a nossa solução nos campos de Cluster Head e algoritmos de grafos.

Henrique Batista: Redação da introdução, desenvolvimento da modelagem no modelo CRISP-NET, pesquisou algoritmos de grafos e técnicas de clustering.

Lucas Pena: Redação do referencial teórico, implementou o algoritmo de Kruskal, realizou o cálculo das distâncias e criação dos nós.

Rodrigo Onofri: Redação da conclusão, implementou o algoritmo de Kruskal com Cluster Head, Prim e Prim com Cluster Head todos com base fixa, pesquisou sobre algoritmos de grafos, RSSFs e custo energético na transmissão.

O link do nosso repositório está disponível neste endereço: https://github.com/Digao-Onofri/Trabalho_Grafos.

O link da nossa apresentação do estudo está disponível neste endereço: <https://youtu.be/x76XJ7n-nFc>.

Referências

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4), 393–422.
- BATTA, M. S., ALIOUAT, Z., MABED, H., MERAH, M., et al. (2022). A distributed energy-efficient unequal clustering based kruskal heuristic for iot networks. In *14th International Conference on Applications of Graph Theory in Wireless Ad hoc Networks and Sensor Networks (GRAPH-HOC)*, volume 12 (pp. 117–129).

- Correia, T. d. A. (2017). Rssf para detecção de incêndios florestais em tempo real. *Dissertação*.
- Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, (pp. 660–670).
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Em *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences* (pp. 10–pp).: IEEE.
- Kaur, P., Kaur, K., Singh, K., & Kim, S. (2023). Early forest fire detection using a protocol for energy-efficient clustering with weighted-based optimization in wireless sensor networks. *Applied Sciences*, 13(5), 3048.
- Liu, J.-L. & Ravishankar, C. V. (2011). Leach-ga: Genetic algorithm-based energy-efficient adaptive clustering protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Machine Learning and Computing*, (pp. 79–85).
- Simsiri, N., Tangwongsan, K., Tirthapura, S., & Wu, K.-L. (2016). Work-efficient parallel union-find with applications to incremental graph connectivity. Em *European Conference on Parallel Processing* (pp. 561–573).: Springer.
- Tarjan, R. E. (1972). Depth-first search and linear graph algorithms. *SIAM Journal on Computing*, 1(2), 146–160.
- Wang, G.-W., Zhang, C.-X., & Zhuang, J. (2014). Clustering with prim's sequential representation of minimum spanning tree. *Applied Mathematics and Computation*, 247, 521–534.
- WILSON, N. & YEBRA, M. (2024). A survey on iot ground sensing systems for early wildfire detection: Technologies, challenges, and opportunities. *IEEE Access*.
- Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12), 2292–2330.
- Zhong, Z., Lin, L., Jiang, Z., Yuan, X., Ngai, E., Lam, J., & Kwok, K.-W. (2025). Connectivity determination algorithm for complex directed networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*.

