

## ROTEAMENTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO

2024015951 - André Luiz Melo dos Santos Franco

2021010209 - Enzo Oliveira Vizzotto

2021030800 - Matheus Rodrigues Pronunciate

2022012790 - Pedro Anicio Dornelas Moraes

### SMAC03 - GRAFOS

Prof. Rafael Frinhani



## Roteamento em Redes de Sensores Sem Fio

### 1 Introdução

As aplicações baseadas em monitoramento ambiental têm evoluído lado a lado ao avanço tecnológico, impulsionadas pela necessidade de coleta contínua de informações para prevenção de desastres, otimização de processos e preservação ambiental. Nesse contexto, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) surgem como tecnologias relevantes que permitem observação de fenômenos distribuídos geograficamente por meio de dispositivos compactos, autônomos e interconectados.

Esses sensores, geralmente alimentados por baterias e instalados em locais remotos, coletam dados físicos — como temperatura, umidade, vibração e luminosidade — e os transmitem através da própria rede até um ponto central de processamento. Um ponto de atenção do seu funcionamento é que o desempenho e a durabilidade da rede dependem diretamente da alocação dos sensores e das estratégias adotadas para definir os caminhos de tráfego dos dados.

Um dos principais desafios das RSSF é a limitação energética dos sensores. Como a substituição de baterias é inviável em muitos cenários, o consumo de energia torna-se um fator determinante para o tempo de vida útil da rede. O custo energético de transmissão tende a crescer com a distância entre os nós, o que torna o roteamento um dos elementos críticos para o desempenho global da RSSF. Estratégias inadequadas podem gerar sobrecarga em determinados sensores, reduzir a conectividade da rede e comprometer a disponibilidade dos dados coletados.

Diante disso, problemas de otimização, conectividade, detecção de nós críticos, caminhos mínimos e resiliência de rede — todos tradicionalmente abordados na Teoria dos Grafos — assumem papel central na análise e melhoria das RSSF. Modelar a rede como um grafo permite investigar diferentes algoritmos e métricas estruturais capazes de reduzir o consumo energético, balancear o tráfego e aumentar a robustez da rede frente a falhas.

#### 1.1 Cenário de Estudo

O cenário analisado neste projeto refere-se ao uso de uma Rede de Sensores Sem Fio empregada no monitoramento de uma área de floresta plantada. Nesse ambiente, diversos nós sensores - chamados de motes - são instalados em árvores ou pontos estratégicos, coletando continuamente informações ambientais como temperatura, umidade do solo e indicadores de risco de incêndio. Esses dados são fundamentais tanto para o planejamento das atividades florestais quanto para a preservação da fauna e da flora, especialmente em situações de emergência.

A RSSF utilizada pela empresa funciona como uma rede na qual cada mote comunica-se apenas com os vizinhos ao seu alcance, repassando pacotes em múltiplos saltos até uma estação rádio base (ERB) responsável por armazenar e analisar as informações coletadas. Essa operação exige que cada nó desempenhe simultaneamente o papel de fonte de dados e de roteador intermediário, o que torna o roteamento um componente crítico para o funcionamento correto do sistema.

As ressalvas acerca desse sistema são problemas relacionados à redução significativa da vida útil dos sensores. Em vários casos, motes localizados em regiões centrais da rede esgotam sua energia antes dos demais, causando a formação de áreas isoladas que deixam de enviar dados para a infraestrutura. Essa problema é normalmente causado devido ao tráfego excessivo entre determinados sensores, causado por falhas no algoritmo de roteamento atualmente adotado.

Diante desse contexto, o estudo concentra-se na modelagem da RSSF como um grafo e na avaliação de diferentes algoritmos de roteamento e métricas de importância de nós, a fim de propor soluções que aumentem a eficiência energética e a robustez da rede utilizada no monitoramento florestal.

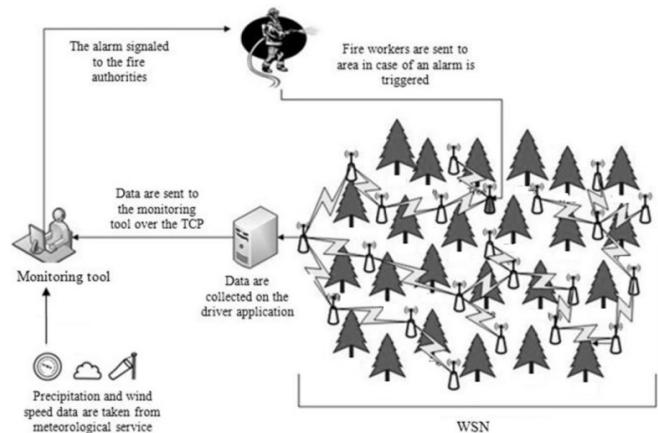


Figura 1: Exemplificação do problema

#### 1.2 Objetivos do projeto

O objetivo central deste projeto é investigar, modelar e avaliar estratégias de roteamento capazes de aumentar significativamente a vida útil de uma Rede de Sensores Sem Fio utilizada no monitoramento de florestas plantadas. Para isso, busca-se desenvolver soluções que reduzam o consumo energético de cada sensor e, principalmente, distribuam esse consumo de forma equilibrada ao longo de toda a rede. Diante desse cenário, este projeto tem como objetivos específicos:

- Modelar a RSSF como um grafo

- Estudar algoritmos e heurísticas de roteamento
- Avaliar a longevidade global da rede
- Identificar nós críticos e analisar a fragilidade da topologia

## 2 Referencial teórico

A eficiência energética sempre foi um dos pilares fundamentais no desenvolvimento de redes sem fio multissalto, especialmente aquelas compostas por nós com recursos limitados de bateria. Os primeiros avanços significativos surgiram com protocolos que buscavam reduzir o custo de comunicação entre nós, priorizando a rota com menor gasto energético possível. Entre esses trabalhos iniciais, destaca-se o estudo de Rodoplu e Meng, que introduziu um modelo de minimização de energia para redes móveis e estabeleceu princípios que influenciaram vários protocolos subsequentes [Rodoplu & Meng \(2002\)](#).

Com o crescimento das redes de sensores, surgiu abordagens focadas na organização hierárquica, como o LEACH, um dos protocolos mais citados, que divide a rede em clusters para reduzir o número de transmissões diretas e balancear o consumo energético entre os nós [Heinzelman et al. \(2000b\)](#). Essa técnica de rotação periódica dos líderes (cluster-heads) provou aumentar significativamente a vida útil da rede ao evitar o esgotamento prematuro de nós específicos.

Avançando nessa mesma direção, o protocolo PEGASIS propôs substituir a estrutura de clusters por uma cadeia de comunicação linear, onde cada nó transmite apenas para um vizinho próximo, reduzindo o número total de transmissões e equilibrando melhor o consumo entre os dispositivos [Lindsey & Raghavendra \(2002\)](#). A principal contribuição do PEGASIS está justamente em garantir que o desgaste energético ocorra de forma mais homogênea em toda a rede, o que se alinha diretamente ao objetivo deste projeto.

Em paralelo a este surge o Heed [Younis & Fahmy \(2004\)](#), uma melhoria do LEACH que aprimora a seleção de líderes ao considerar não apenas a energia residual dos nós, mas também métricas de custo de comunicação. O HEED apresenta melhor estabilidade dos clusters e uma distribuição de carga mais homogênea, aspectos importantes para prolongar a vida útil da rede.

Outras abordagens complementares exploram o comportamento de redes parcialmente conectadas, como o Epidemic Routing, que distribui mensagens de forma oportunista entre nós móveis para aumentar a probabilidade de entrega, mesmo sem conectividade constante. Embora não seja focado estritamente em eficiência energética, esse modelo contribui para o entendimento de dinâmicas distribuídas e da tolerância a falhas em redes multissalto.

Além desses, o protocolo GAF (Geographical Adaptive Fidelity) introduziu uma perspectiva geográfica na economia de energia, ativando apenas o número mínimo necessário de nós para manter a fidelidade da rede, enquanto os demais permanecem em modo de baixa energia [Xu et al. \(2001\)](#). Essa ideia de “equivalência funcional” entre nós em determinada região também reforça o conceito de desgaste homogêneo da rede, central para o presente trabalho.

Assim, a literatura demonstra que diferentes estratégias – clusterização, cadeias lineares, roteamento oportunista e ativação geográfica seletiva – contribuem para estender a longevidade da rede. Este projeto se baseia nesses princípios para propor um modelo onde a vida útil seja maximizada não apenas em termos de duração total, mas também em termos de uniformidade do desgaste, permitindo que a manutenção seja planejada de forma sincronizada e eficiente.

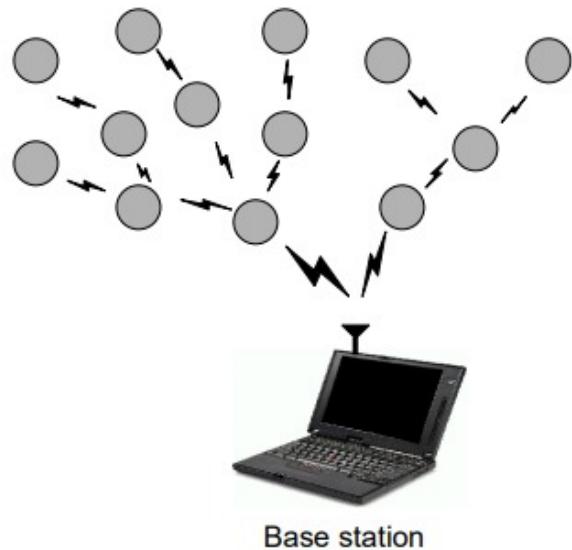


Figura 2: Funcionamento do LEACH. ([Heinzelman, 2000](#))

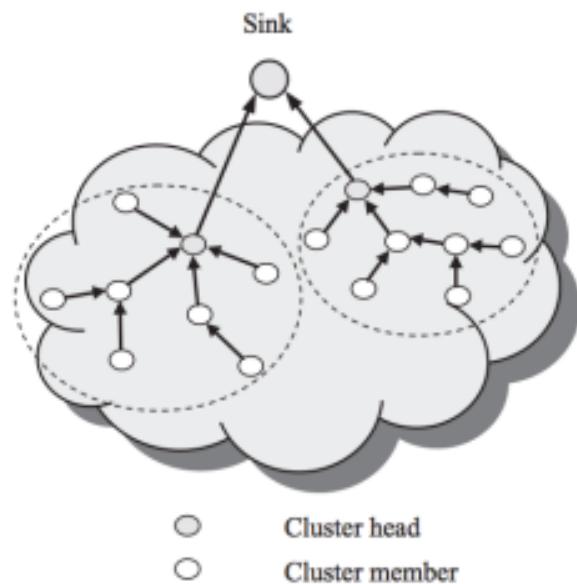


Figura 3: Funcionamento de uma rede de múltiplo saltos (PEGASIS e HEED). ([Ferreira, 2012](#))

### 2.1 O sensor

O sensor referência para os testes é o [Silvanet Wildfire Sensor](#), projetado especialmente para detecção de incêndios florestais

e que se abastece pela energia solar. Sua principal característica é a detecção Ultra-precoce de incêndios que permite uma rápida identificação e tomada de decisão. Ele possui ainda comunicação LoraWAN, que proporciona longo alcance de conexão para transferência de informações.

É um dispositivo fabricado em plástico resistente às condições climáticas e raios UV que fica instalado em árvores e consegue se comunicar em um raio de até 100m, com potência de transmissão de 14dBm.



Figura 4: Silvanet Wildfire Sensor

Tabela 1: Especificações Técnicas

Variável	Especificação
Tamanho	19 x 12 x 2 cm
Peso	700 g
Faixa de Operação de Temperatura	-45°C a +85°C
Proteção UV	UV8 (mínimo para plásticos expostos ao sol)
Resistência à Água e Poeira	IP67
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carga do painel solar.</li> <li>- Substituição de baterias (mínimo a cada 5 anos).</li> </ul>
Garantia	10 anos
Modo de Operação	Plástico reciclável ou reaproveitado, contendo painel solar monocristalino.
Dados	Coleta de dados sobre T (°C), UR, UV, consumo energético, posição geográfica, entre outros.

## 2.2 Conceitos e métodos com grafos

Na área de grafos, podem ser usados diferentes meios para atingir diferentes objetivos finais. Para este caso, o estudo é aplicado sobre o gasto da rede e sua vida útil, sem priorizar a velocidade de informação desde o primeiro mote até a ERB. Dessa forma, algoritmos de árvore geradora mínima ligados a busca em largura se mostram úteis para estudos e simulações.

Como a velocidade de informação não é o foco do estudo, algoritmos de caminhos mínimo não são empregados. Em contrapartida, a busca em largura é usada com intuito de avançar em direção à central mas distribuindo o gasto energético entre a rede

## 3 Solução proposta

A solução proposta neste projeto consiste em analisar e comparar diferentes estratégias de roteamento aplicadas a Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), com foco específico na maximização da vida útil global da rede e na redução do desgaste energético desigual entre os nós sensores. A partir da compreensão de que o esgotamento rápido de nós críticos provoca desconexões e compromete o monitoramento, este trabalho busca construir uma abordagem fundamentada na teoria dos grafos que permita compreender, simular e avaliar comportamentos de roteamento mais eficientes.

Dante disso, o estudo conta com testes para casos onde a árvore geradora mínima é definida no início do processo, sem sofrer alterações e casos onde é feito um roteamento de sinal de tempos em tempos.

### 3.1 Modelagem

Para modelar o problema, foram usados quatro datasets que consistem em coordenadas distribuídas em uma área de 1000x1000 metros, contendo motes de modelos Silvanet Wildfire. Cada dataset descreve uma rede com diferentes quanti-

dades de motes (50, 100, 200, ou 400), onde cada mote é identificado por suas coordenadas no plano e é considerado um vértice em um grafo. Além disso, a rede inclui as coordenadas da Estação Rádio Base.

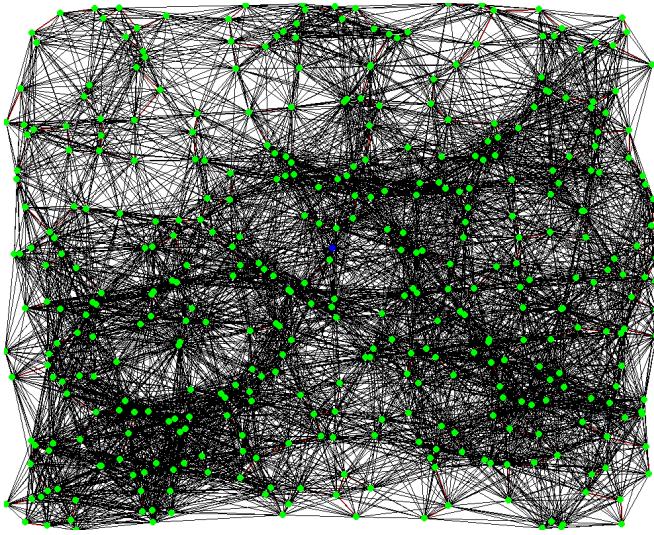


Figura 5: Modelagem do grafo com 400 sensores.

### 3.2 Método de solução

O propósito principal é da pesquisa, é avaliar e comparar diversas estratégias para o gerenciamento da rede e sua eficiência energética, através de simulações na rede.

Com o objetivo de enfrentar os desafios relacionados ao consumo de energia em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), será realizada uma análise comparativa de algoritmos baseados na teoria dos grafos. A intenção é compreender como esses algoritmos funcionam e identificar qual implementação apresenta o desempenho mais eficiente em relação ao gasto energético. Durante as simulações, será levado em conta que cada sensor na rede começa com uma quantidade inicial de energia, a qual será consumida gradativamente ao longo dos testes.

Para os testes será considerado a energia gasta pelo envio das mensagens, conforme a primeira equação. Também será considerado o gasto energético ao receber uma mensagem, calculado através da segunda equação (Heinzelman et al., 2000a)

$$E_{rx}(k, d) = E_{elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2$$

onde:

- $E_{tx}(k, d)$  é a energia total necessária para transmitir  $k$  bits a uma distância  $d$ ,
- $E_{elec}$  é a energia consumida pela eletrônica de transmissão (em joules por bit),
- $E_{amp}$  é a energia consumida pelo amplificador (em joules por bit por metro quadrado),
- $k$  é o número de bits da mensagem recebida.
- $d$  é a distância entre os nós (em metros).

$$E_{rx}(k) = E_{elec} \times k$$

onde:

- $E_{rx}(k)$  é a energia total necessária para receber  $k$  bits,
- $E_{elec}$  é a energia consumida pela eletrônica de recepção (50 nJ/bit),
- $k$  é o número de bits da mensagem recebida.

Tabela 2: Constantes para as fórmulas

Parâmetro	Item da Fórmula	Valores
Energia consumida pela eletrônica de transmissão	$E_{elec}$	50 nJ/bit
Energia consumida pelo amplificador	$E_{amp}$	100 pJ/bit/m <sup>2</sup>
Bits por mensagem	$k$	4000 bits
Distância entre os nós	$d$	Distância euclidiana

### 3.3 Testes

Para a realização dos testes, foi utilizado um grafo em que os vértices representam os motes e as arestas indicam as distâncias entre eles. O peso de cada aresta corresponde ao gasto energético calculado com base nas fórmulas mencionadas anteriormente, necessário para transmitir informações entre dois vértices. Para a árvore geradora mínima, é utilizado a distância adicionado ao gasto energético total no momento. O vértice azul representa a estação rádio base, para a qual os dados devem ser direcionados. Os algoritmos foram aplicados utilizando as coordenadas fornecidas nos datasets. Além disso, os testes foram realizados para cenários onde todos os motes mandam mensagens ao mesmo tempo.

Os vértices do grafo, que representam os sensores da RSSF, são coloridos com base no nível de bateria restante para facilitar a visualização do estado energético. A regra de cores é definida da seguinte forma:

- **Verde:** Bateria  $\geq 80\%$ ;
- **Amarelo:**  $50\% \leq$  Bateria  $< 80\%$ ;
- **Laranja:**  $20\% \leq$  Bateria  $< 50\%$ ;
- **Vermelho:**  $0\% <$  Bateria  $< 20\%$ ;
- **Cinza:** Bateria = 0%.

Com essas configurações visuais, é de fácil entendimento os nós utilizados pelo algoritmo e principalmente a identificação de nós críticos.

Para ambos os testes realizados a seguir, foi plotado o grafo de árvore geradora mínima com base nos dados do dataset de rede de 400 motes.

Para ambas simulações, cada iteração envia informações dos sensores até a central, baseado em um algoritmo de busca em largura. Foi determinado que para o teste de árvore geradora mínima fixa, o algoritmo se comportaria de forma a não

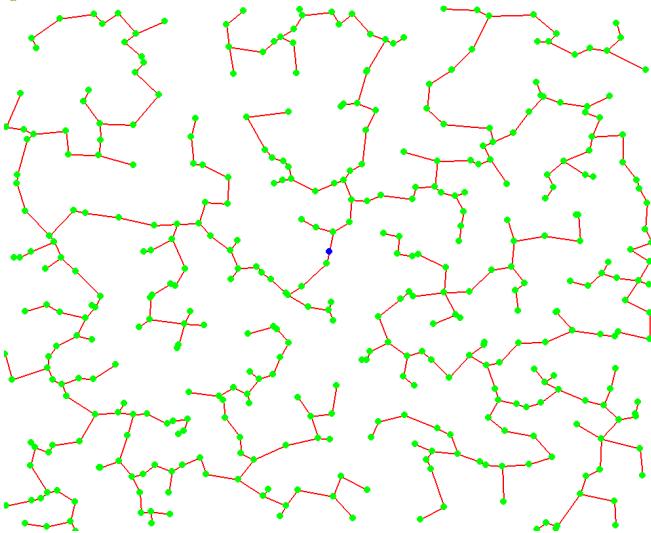


Figura 6: Grafo inicial de árvore geradora mínima.

adaptar a árvore geradora ao executar iterações. O objetivo era analisar o consumo energético de cada vértice até que os dados alcansassem a estação rádio base. O algoritmo roda até que a bateria do primeiro mote se esgote.

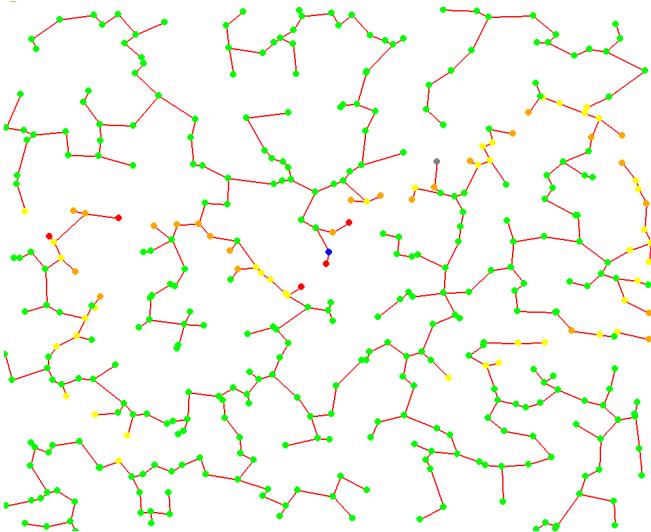


Figura 7: Grafo final de árvore fixa.

Para a árvore variável, a estratégia utilizada é semelhante a anterior no que diz respeito ao envio de informações à central, porém, a cada 10 iterações é feito um novo roteamento para calcular uma nova área geradora mínima com base nas baterias atuais.

## 4 Resultados

A análise do sistema foi feita usando dois métodos diferentes em que ambos utilizam o algoritmo de Árvore Geradora Mínima de Kruskal.

É possível observar, tanto a partir das imagens geradas pela simulação, quanto pelo número de iterações observadas até o primeiro sensor ter sua bateria zerada, que a simulação feita no caso em que uma nova árvore geradora mínima é calculada após 10 iterações demonstra resultados muito mais po-

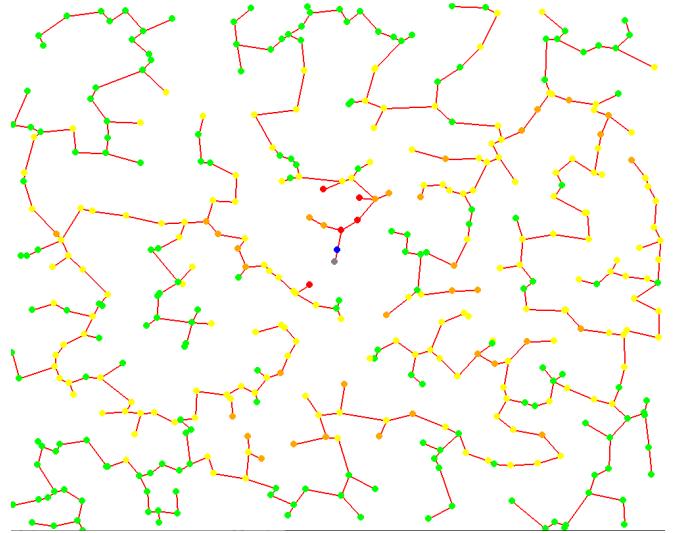


Figura 8: Grafo final de árvore variável.

sitivos.

Enquanto a árvore fixa concentra a informação a ser passado nos mesmos sensores, a árvore variável é capaz de identificar arestas críticas e encontrar novos caminhos onde não há muita concentração de informações passada por eles, aumentando a vida útil da rede. Isso é comprovado pelo número de iterações feitas em cada situação: na árvore fixa, cada sensor envia 258 sinais até a central antes que a bateria de um acabe, e na árvore variável, 347 iterações ocorrem antes que o mesmo evento ocorra.

## 5 Conclusões

A problemática de rede de sensores sem fio possui diversos desafios e os resultados podem variar de acordo com o objetivo final da empresa que a implementa.

O roteamento em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) voltada para o monitoramento de incêndios florestais ainda apresenta desafios significativos, mas é importante notar como soluções baseadas em uma estrutura de dados versátil como grafos pode ser capaz de propor melhorias para aumentar a vida útil de uma rede. Os resultados apresentados mostram como utilizar um sistema de roteamento não fixo é capaz de aumentar significativamente a vida útil da rede. É importante notar que, na simulação, todos os sensores enviaram dados para a central a cada iteração, mas em uma situação real, a identificação só aconteceria quando ocorresse um aumento da temperatura provindo de um incêndio.

Um ponto crítico ainda observado é o fato de que, mesmo aumentando a vida útil da rede como um todo e distribuindo o gasto de bateria entre os diversos sensores, ainda é possível identificar que os primeiros sensores a terem sua bateria zerada ainda são os que se encontram próximos da central, pois a informação acaba sempre sendo passada por eles. Também é necessário chamar atenção para o fato de que a ação de realizar o roteamento periodicamente também seria responsável por gastos de energia. Um fator que poderia ser estudado futuramente seria a análise do gasto de energia para refazer o roteamento e, a partir disso, identificar quais momentos seriam ideais para realizar esse processo.

Por fim, esse estudo mostra como utilizar uma modelagem em grafos é capaz, não só de compreender e representar um problema, como também propor soluções baseadas nos conceitos dessa área de estudo, como as árvores geradoras mínimas e a busca em largura, que foram utilizadas na situação em questão.

- Link do github: <https://github.com/andreunderstars/Trabalho-Grafos-RSSF>
- Link do vídeo: <https://youtu.be/TclTvIghSyQ>
- Link dos slides: <https://www.canva.com/design/DAG51V2zvXY/FcmDNK1ERtMq6Z-Z-itE1w/edit>
- responsáveis: Desenvolvimento: André e Pedro Docu-mentação: Enzo e Matheus

## Referências

Ferreira, L. N. (2012). *Técnica de agrupamento de dados baseada em redes complexas para o posicionamento de cluster heads em rede de sensores sem fio*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.

Heinzelman, W., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000a). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Em *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 10 pp. vol.2-).

Heinzelman, W. B. (2000). *Application-specific protocol architectures for wireless networks*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000b). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Em *Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 10–pp).

Lindsey, S. & Raghavendra, C. S. (2002). Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems. Em *IEEE Aerospace Conference* (pp. 1125–1130).: IEEE.

Rodoplu, V. & Meng, T. H. (2002). Minimum energy mobile wireless networks. Em *IEEE International Conference on Communications*, volume 3 (pp. 1633–1639).: IEEE.

Xu, Y., Heidemann, J., & Estrin, D. (2001). Geographical adaptive fidelity in ad hoc routing. Em *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* (pp. 70–84).

Younis, O. & Fahmy, S. (2004). Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*.

