

UNIVAG – SISTEMA DE INFORMAÇÃO

ANÁLISE DA REDE LORA MESH PARA RASTREAMENTO DE ANIMAIS EM ZONAS RURAIS

Rafael Ribeiro Vargas

Lázaro Filho

Resumo

O avanço tecnológico observado nos centros urbanos não se reflete com a mesma intensidade no meio rural, onde ainda há desafios significativos relacionados ao monitoramento e manejo de rebanhos. Com o intuito de analisar alternativas viáveis para essa realidade, realizou-se um estudo de campo em uma propriedade localizada a 60 km de Pirizal, MT. O objetivo deste trabalho é analisar a aplicabilidade da tecnologia LoRa (Long Range) Mesh para comunicação de dados em ambientes rurais, avaliando seu desempenho na transmissão de coordenadas GPS em longas distâncias para o rastreamento e monitoramento animal. A metodologia envolve a execução de testes práticos de comunicação e consumo energético. Os resultados indicaram uma precisão das coordenadas GPS de até 200m, um alcance de até 3.5km em campo aberto e a robustez da topologia Mesh, que garantiu a estabilidade e a extensão do enlace. Adicionalmente, o baixo consumo energético possibilitou uma autonomia estimada de 45 dias. Assim, os achados deste estudo demonstram a viabilidade técnica e econômica do sistema LoRa Mesh como uma solução eficiente e de baixo custo para sistemas de comunicação e rastreamento no meio rural.

Palavras-chaves: LoRa; Mesh; IoT Rural; rastreamento; bovinos.

Abstract

Technological advancements observed in urban centers are not reflected with the same intensity in rural areas, where significant challenges remain regarding livestock monitoring and management. To analyze viable alternatives for this reality, a field study was conducted on a rural property located 60 km from Pirizal, MT. The objective of this work is to assess the applicability of LoRa (Long Range) Mesh technology for data communication in rural environments,

evaluating its performance in transmitting GPS coordinates over long distances for animal tracking and monitoring. The methodology involves conducting practical tests of communication and energy consumption. The results indicated a GPS coordinate accuracy of up to 200 meters, a communication range of up to 3.5 km in open field, and the robustness of the Mesh topology, which ensured link stability and extended coverage. Additionally, the low energy consumption enabled an estimated autonomy of 45 days. Thus, the findings of this study demonstrate the technical and economic feasibility of the LoRa Mesh system as an efficient and low-cost solution for communication and tracking in rural settings.

Keywords: LoRa; Mesh; Rural IoT; Animal Tracking; Cattle.

1. Introdução

A pecuária é uma das principais atividades econômicas no meio rural, representando mais de 50% das terras agrícolas do país e abrigando cerca de 234,4 milhões de animais, segundo dados do IBGE (2022). No entanto, o setor enfrenta desafios relacionados ao monitoramento e manejo eficiente dos rebanhos, especialmente em áreas extensas e com pouca infraestrutura de comunicação. Com o avanço da Pecuária 4.0, tecnologias digitais são aplicadas para modernizar processos e oferecer maior controle e segurança na criação de animais.

Embora a necessidade de monitoramento de rebanhos seja crítica para otimizar o manejo e garantir a rastreabilidade, a implantação de soluções eficientes é impedida por desafios duplos: a lacuna de conectividade em grandes extensões rurais e as restrições energéticas de dispositivos móveis. Soluções tradicionais esbarram na dependência de infraestrutura de alto custo ou na baixa autonomia da bateria. Diante desse cenário de dificuldades técnicas e econômicas, o presente trabalho se propõe a responder a seguinte questão central:

Como viabilizar o rastreamento de rebanhos em grandes extensões rurais, garantindo longo alcance e autonomia energética prolongada, utilizando uma arquitetura de rede descentralizada e de baixo custo?

A escolha deste tema foi motivada pela observação das dificuldades enfrentadas por produtores rurais, que frequentemente carecem de ferramentas acessíveis e eficazes para monitorar seus animais, especialmente em propriedades situadas em regiões remotas. A proposta busca atender essa necessidade por meio do uso de tecnologias inovadoras, de longo alcance, energeticamente eficientes e com alto potencial de escalabilidade. Embora a validação inicial do sistema ocorra em fazendas menores, o objetivo final é que a solução seja aplicável também em grandes propriedades, ampliando seu impacto na eficiência e rastreabilidade da produção pecuária. A análise deste projeto se concentrará na criação, teste e validação de uma solução integrada de transmissão de informações que combine inovação tecnológica com aplicabilidade prática no setor agropecuário.

O objetivo geral deste trabalho é implementar e validar um sistema de rastreamento de longo alcance, baseado na arquitetura LoRa Mesh, adaptável a diferentes realidades rurais sem depender de internet. Tendo com objetivos específicos: realizar a fundamentação teórica e a análise da viabilidade técnica dessa solução, considerando aspectos como o desempenho da rede em campo aberto, autonomia dos dispositivos e a precisão do sistema na coleta e na transmissão das informações requeridas, como o número do dispositivo e sua localização, oferecendo apoio no controle do rebanho.

Esse tipo de solução se torna ainda mais relevante diante de um cenário nacional em que mais de 70% dos estabelecimentos rurais permanecem desconectados da internet. Segundo o Censo Agropecuário do IBGE (2017), cerca de 3,6 milhões de propriedades não possuem acesso à internet, e estimativas mais recentes da ConectarAgro (2022) indicam que esse número permanece praticamente inalterado. Essa central poderá conectar-se à internet por diferentes meios – como redes móveis ou soluções via satélite – conforme as condições locais, garantindo que os dados estejam acessíveis remotamente para os gestores da fazenda.

2. Referencial Teórico

2.1. Rastreamento Animal e Pecuária 4.0

O setor agropecuário moderno, impulsionado pelo conceito de Pecuária 4.0 (ou *Smart Farming*), tem investido significativamente na digitalização de processos para aumentar a produtividade, a sustentabilidade e a rastreabilidade dos rebanhos. Dentro deste contexto, o rastreamento animal em tempo real é uma aplicação de Internet das Coisas (IoT) Rural que oferece valor estratégico inestimável.

O monitoramento contínuo da localização de bovinos e outros animais vai além da simples identificação de sua posição geográfica. Ele fornece dados essenciais para:

- **Otimização do Manejo:** Permite identificar padrões de pastejo e uso de recursos, auxiliando na rotação inteligente de pastagens e na prevenção da degradação do solo.
- **Saúde e Bem-Estar:** Desvios incomuns no padrão de movimento ou a inatividade prolongada podem indicar estresse, doenças ou dificuldades no parto, permitindo a intervenção precoce do veterinário.
- **Controle e Segurança:** A demarcação de cercas virtuais (*geofencing*) alerta imediatamente o gestor sobre animais que se afastam dos limites da propriedade, mitigando perdas por furto ou por dispersão em áreas perigosas.

A implementação dessas soluções, no entanto, é dificultada pela escassez de infraestrutura de telecomunicações em grandes áreas rurais, um problema que soluções tradicionais (como Wi-Fi ou redes celulares) não conseguem resolver de forma eficaz ou econômica. Essa lacuna estabelece a necessidade de tecnologias de comunicação que sejam robustas, de longo alcance e autônomas, como a Rede LoRa Mesh, que será explorada nas seções seguintes. A relevância dessa abordagem é destacada por especialistas, que apontam que a tecnologia LoRa permite a criação de dispositivos de rastreamento de baixo peso e baixo custo que podem ser implantados com segurança em animais, permitindo o monitoramento de rebanhos por grandes distâncias em fazendas extensas (MOKOSmart, 2024).

2.2. Tecnologia LoRa (Long Range)

A tecnologia LoRa (*Long Range*) constitui um protocolo de comunicação sem fio de Long-Range Wide Area Network (LPWAN), notabilizando-se pelo seu longo alcance e baixo consumo de energia. Originalmente desenvolvida

pela empresa Semtech, ela opera em bandas de frequência sub-GHz, 433 MHz, 868 MHz ou 915 MHz, que são faixas não licenciadas.

O diferencial técnico do LoRa reside na sua técnica de modulação proprietária, o Chirp Spread Spectrum (CSS). Esta técnica é uma forma de espalhamento espectral (Spread Spectrum), na qual a informação é codificada utilizando sinais *chirp*, que são pulsos de rádio cuja frequência varia linearmente ao longo do tempo (aumentando, *up-chirp*, ou diminuindo, *down-chirp*). O CSS confere ao LoRa uma alta robustez contra interferências e o efeito *fading*, além de uma significativa sensibilidade de recepção (Yadav, 2023). Essa sensibilidade permite que a transmissão de dados alcance distâncias superiores a 10 km em áreas rurais ou campo aberto, mesmo operando com baixas taxas de dados (data rates).

Dada sua capacidade de comunicação de grande cobertura a baixo custo operacional e sem a dependência de infraestrutura celular dedicada, o LoRa é amplamente adotado em cenários de Internet das Coisas (IoT). Suas aplicações são vastas, abrangendo desde a agricultura inteligente e o monitoramento ambiental até o rastreamento de ativos. A operação em faixas sub-GHz proporciona uma excelente penetração de sinal em ambientes com vegetação e obstáculos naturais, tornando-o particularmente adequado para a aplicação de rastreamento de animais em áreas rurais (Ojo; Adami; Giordano, 2021).

2.2.1 Métricas de Desempenho

O desempenho e a confiabilidade de uma comunicação LoRa são avaliados por meio de métricas específicas, essenciais para o planejamento de cobertura.

- *RSSI (Received Signal Strength Indicator)*: Representa a potência total do sinal de rádio recebido no receptor. É medido em decibéis-miliwatts (dBm) e indica a força bruta do sinal. Em LoRa, valores mais próximos de 0 são mais fortes, sendo o mais fraco possível -120dBm.

- SNR (*Signal-to-Noise Ratio*): É a relação entre a potência do sinal útil e a potência do ruído no canal, expressa em decibéis (dB). Diferentemente do RSSI, o SNR indica a qualidade do sinal recebido. Esta métrica é especialmente crítica para a demodulação, pois o LoRa, devido ao uso do Chirp Spread Spectrum (CSS), é capaz de decodificar sinais mesmo quando estão abaixo do nível de ruído, resultando em valores de SNR negativos. Em alguns cenários, o LoRa pode operar com SNR de até -20 dB, dependendo do Spreading Factor utilizado.

Conforme o gráfico 1, é possível visualizar a representação do sinal emitido e suas características, como a linha azul, que representa o RSSI, a linha vermelha, o ruído e o intervalo entre elas, o SNR.

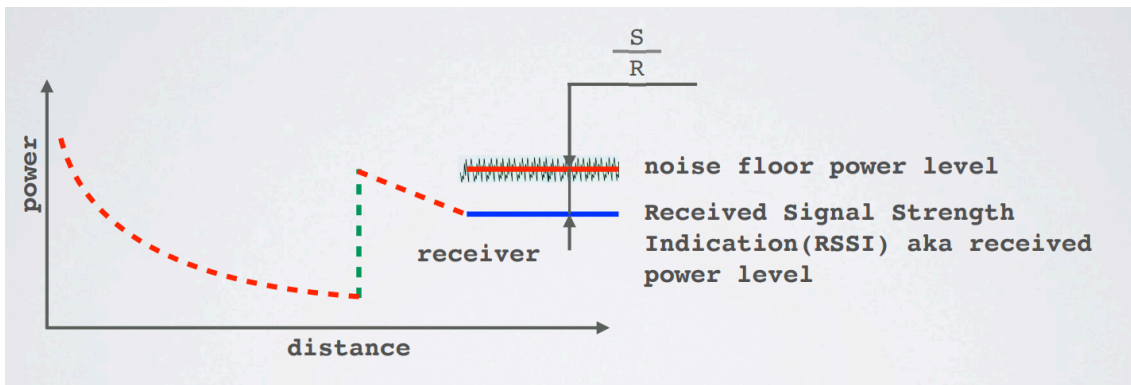


Figura 1. Representação do RSSI e SNR.

Fonte: https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part10.pdf

2.3. Redes Mesh e o conceito de LoRaMesh

Uma rede mesh é uma topologia de comunicação em que cada nó atua como transmissor e receptor, podendo retransmitir mensagens até o destino final. Isso cria um sistema autônomo, descentralizado e auto organizável.

De acordo com (WU; LIEBEHERR, 2023) e (ARRATIA et al., 2023), suas principais características incluem:

- Autorreparação e roteamento dinâmico: os nós são capazes de descobrir novas rotas automaticamente em caso de falhas nos caminhos existentes, garantindo a continuidade da comunicação.

- Escalabilidade aprimorada: novos nós podem ser facilmente integrados à rede, que cresce em capacidade à medida que dispositivos adicionais passam a atuar também como retransmissores.
- Cobertura estendida: com o uso de encaminhamento multi-hop, em que os nós retransmitem mensagens entre si, é possível cobrir áreas geográficas maiores sem a necessidade de que todos estejam ao alcance direto de um gateway central.
- Potencial de baixo custo: em redes mesh baseadas em LoRa, por exemplo, é possível reduzir ou eliminar a necessidade de múltiplos gateways caros, utilizando nós intermediários.

A integração da modulação LoRa com a topologia mesh — conhecida como LoRaMesh — combina longo alcance com robustez e redundância. Mesmo que um nó esteja fora do alcance direto, a mensagem pode ser encaminhada por outros nós intermediários, mantendo a comunicação ativa em áreas extensas e sem infraestrutura.

2.4. O projeto Meshtastic

O Meshtastic é um projeto de código aberto que implementa uma rede LoRa Mesh, permitindo comunicação entre dispositivos IoT em ambientes sem infraestrutura de rede convencional. Por meio da tecnologia LoRa, os dispositivos podem transmitir mensagens de texto, coordenadas de GPS e dados de telemetria diretamente entre os nós, sem depender de internet ou de servidores centrais. Essa arquitetura descentralizada torna a rede altamente resiliente a falhas e adequada para aplicações em campo e regiões remotas.

Cada dispositivo na rede Meshtastic possui um papel funcional definido, denominado Role, que determina seu comportamento na malha:

- Client: Atua como ponto de origem ou destino das mensagens, geralmente utilizado por usuários finais. O Client envia e recebe informações, mas não necessariamente retransmite dados de outros nós.

- Router: Responsável por retransmitir mensagens de outros nós na rede, estendendo o alcance da comunicação e garantindo conectividade entre dispositivos que estão fora do alcance direto uns dos outros.
- Tracker: Focado no envio periódico de informações de localização e telemetria, como coordenadas GPS. O Tracker pode atuar de forma autônoma, enviando dados para Routers ou Clients que estejam na malha.

Essa configuração de papéis permite que a rede seja flexível e escalável, já que cada nó pode assumir funções específicas para otimizar cobertura, confiabilidade e consumo energético. Além disso, o Meshtastic implementa criptografia ponto a ponto, garantindo segurança e integridade das mensagens transmitidas.

Entre suas principais funcionalidades destacam-se:

- Transmissão de mensagens ponto a ponto e em grupo, permitindo comunicação eficiente entre nós distribuídos.
- Rastreamento de localização GPS, com compartilhamento de coordenadas em tempo real.
- Coleta de telemetria e monitoramento de sensores, integrando dispositivos IoT à malha.
- Configuração remota e atualização de parâmetros, possibilitando ajustes sem acesso físico aos dispositivos.

O Meshtastic é recomendado para aplicações em monitoramento ambiental, rastreamento de ativos, operações de campo, expedições remotas e agricultura de precisão, onde a conectividade convencional é limitada ou inexistente. Sua arquitetura mesh combinada com a flexibilidade do protocolo LoRa proporciona uma solução robusta, escalável e econômica para comunicação entre dispositivos distribuídos. (MESHTASTIC DOCS, 2025)

3. Metodologia

3.1. Dispositivos

Foram utilizados três dispositivos com a instalação do firmware do Meshtastic e compatíveis com LoRa na frequência de 915 MHz, conforme descrito abaixo:

- LILYGO T-Beam V1.2 (2 unidades):
 - MCU: ESP32
 - Rádio LoRa: SX1262
 - Antena LoRa Integrada
 - Módulo GPS: u-blox NEO-6M
 - Alimentação: bateria 18650 (9800 mAh)
- Heltec WiFi LoRa V3 (1 unidade):
 - MCU: ESP32
 - Rádio LoRa: SX1262
 - Antena LoRa Integrada
 - Alimentação: power bank 9800 mAh

3.1.1. Módulo GPS SMA NEO-6M

O módulo NEO-6M, desenvolvido pela u-blox, é amplamente utilizado em aplicações de geolocalização devido ao seu baixo consumo energético, alta sensibilidade e interface simplificada para microcontroladores. No contexto deste projeto, o módulo está integrado ao dispositivo T-Beam, atuando como fonte primária de coordenadas geográficas para o nó Tracker.

O NEO-6M é capaz de rastrear até 22 satélites simultaneamente e possui sensibilidade típica de -161 dBm, permitindo operação mesmo em ambientes com limitações de sinal, como áreas urbanas densas (U-BLOX, 2011). E a precisão típica está entre 2,5 m e 5 m em campo aberto (UBLOX, 2020).

Do ponto de vista energético, o módulo opera tipicamente com consumo entre 25 mA e 30 mA durante a aquisição e o rastreamento dos sinais GPS, sendo um dos componentes que mais impactam o consumo total do nó quando o GPS está ativo (U-BLOX, 2011). Essa característica é relevante no caso de dispositivos alimentados por bateria, como o T-Beam, pois influencia diretamente a autonomia do Tracker.

Além disso, o módulo possui antena SMA externa, o que melhora significativamente a recepção de sinal em comparação a antenas cerâmicas internas, especialmente quando o dispositivo é utilizado em movimento ou em locais com obstruções parciais. A integração no T-Beam é feita por meio de interface UART, permitindo comunicação direta com o microcontrolador ESP32, conforme especificações do fabricante LilyGO (LILYGO, 2021).

3.2. Papéis dos Nós na Rede

Embora redes mesh não demandem necessariamente papéis fixos entre os dispositivos, na implementação específica do Meshtastic é recomendado atribuir perfis operacionais — como Tracker, Router e Client — de forma a otimizar desempenho, cobertura e consumo energético da malha. Para este estudo, foram configurados:

- Tracker: Envia automaticamente dados de localização via GPS em intervalos programados.
- Router: Mantém a integridade da malha retransmitindo mensagens de outros nós, ampliando o alcance da rede.
- Client (Gateway): Recebe as mensagens de toda a malha e atua como concentrador dos dados.

A escolha destes papéis reflete um ambiente real, no qual animais (Tracker) se deslocam em áreas amplas e dependem de nós intermediários (Router) para alcançar o ponto de coleta (Gateway).

3.3. Arquitetura de Comunicação

A rede adotada segue uma topologia Mesh LoRa, operando com as seguintes características:

- Frequência: 915 MHz
- Preset Meshtastic: Long Range / Moderate
- Spreading Factor: SF11
- Bandwidth: 125 kHz
- Coding Rate: 4/8
- Potência de transmissão (TX): 30 dBm
- Modo de economia de energia ativado (deep sleep no Tracker)

A comunicação ocorre na seguinte forma:

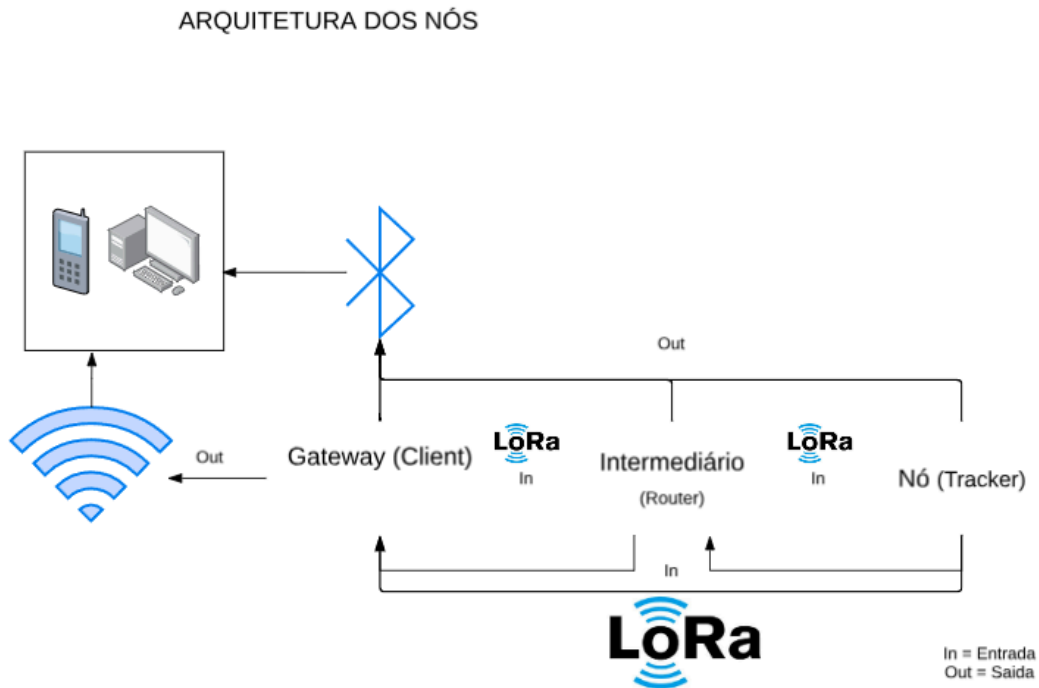


Figura 2. Fluxograma da Arquitetura da Comunicação dos Nós

Fonte: Autor

Observa-se no fluxograma a seguir que as informações podem ser obtidas através do Gateway pelo Wi-fi/Bluetooth, ou pelo Bluetooth de cada dispositivo.

3.4. Procedimento Experimental

Os testes foram conduzidos em ambiente aberto, com distâncias previamente medidas. O procedimento foi dividido em cinco etapas principais.

3.4.1 Etapa 1 – Configuração Inicial

1. Configurar os dispositivos.
2. Validar o funcionamento em ambiente controlado antes dos testes em campo.

Durante a fase de configuração, foi configurado o período de uma hora dentre os envios de coordenadas GPS do nó Tracker, com uma precisão de até 200m. No intervalo de uma coordenada a outra, ele entra em modo Deep Sleep.

A fase de validação em ambiente controlado foi realizada através de teste de comunicação direta, de um nó para o outro, sem a necessidade do *hop*.

3.4.2. Etapa 2 – Teste da Rede Mesh Completa

O objetivo dessa etapa é avaliar a entrega de mensagens usando os *Hops* (Saltos).

- Com o Router ativo, o Tracker enviou pacotes diretamente para o Client, porém em cenários com obstáculos, onde o Tracker não teria uma boa visibilidade, do contrário do Router, forçando a malha a passar por ele para chegar no Client.
- Distancias testadas: 1km, ± 2.5 km e ± 3.5 km.
- Para cada distância, foram coletadas as informações da qualidade da rota entre os nós, com critério avaliativo no SNR.

3.4.3. Etapa 3 – Teste de Localização

O objetivo dessa etapa é avaliar a precisão e a confiabilidade do envio periódico de coordenadas GPS conforme a configuração. A precisão das coordenadas é avaliada conforme um critério de desvio máximo de 200m, parâmetro que foi previamente configurado, validando que a margem de erro está dentro do limite aceitável para o manejo pecuário e não desloca o animal para áreas inaceitáveis (como outro pasto, fazenda ou estrada).

3.4.4. Etapa 4 – Análise do Consumo Energético

3.5. Metodologia de Medição do Consumo Energético (Tracker)

Para avaliar o consumo energético do Tracker, foi adotada uma metodologia baseada em testes acelerados e medições experimentais, permitindo estimar a autonomia do dispositivo em cenários de operação real. O procedimento consistiu nas seguintes etapas:

3.5.1. Preparação do Dispositivo

O Tracker foi completamente carregado e configurado para operar com ciclos definidos de atividade e sono. Cada ciclo foi composto por um período ativo, em que o dispositivo realiza transmissão de dados via LoRa e coleta de GPS, seguido por um período em modo de baixo consumo (sleep).

3.5.2. Teste Acelerado

Para reduzir o tempo necessário para a coleta de dados, foi adotado um teste acelerado com ciclos curtos:

- Período de atividade: 30 s (GPS + transmissão LoRa)
- Período de sono curto: 60 s

Durante esse teste, foi monitorada a variação do nível de carga da bateria, permitindo determinar a energia consumida por ciclo.

3.5.3. Cálculo do Consumo Médio por Ciclo

A partir das medições experimentais e da documentação, foram serão estimadas:

- Corrente de sleep: 5 mA (MESHTASTIC DOCS, 2025)
- Consumo Total de bateria (Equação 1):

$$\text{ConsumoTotalBateria} = \text{CargaInicial} \times \text{PorcentagemUsada} \quad (1)$$

- Quantidade de ciclos durante o período (Equação 2):

$$\text{QtdCiclo} = \frac{\text{DuraçãoDoTeste}}{\text{DuraçãoCiclo}} \quad (2)$$

- Consumo médio de sleep por ciclo (Equação 3):

$$\text{ConsumoMCicloSleep} = \text{CorrenteSleep} \times \text{DuraçãoEmHoras} \quad (3)$$

- Consumo médio por ciclo de 90 s (sleep + ativo) (Equação 4):

$$\text{ConsumoTotalMCiclo} = \frac{\text{ConsumoTotalBateria}}{\text{Ciclos}} \quad (4)$$

- Consumo médio de GPS Ativo (Equação 5):

$$\text{ConsumoMAtivo} = \text{ConsumoMTotal} - \text{ConsumoMSleep} \quad (5)$$

Esses valores foram utilizados para calcular a corrente média do dispositivo e permitir a estimar o consumo para o cenário final de operação, considerando ciclos de 1 hora (Equação 6).

$$\text{ConsumoCicloMédio (mAh)} = \text{ConsumoMAtivo (mAh)} + \text{ConsumoMSleep (mAh)} \quad (6)$$

3.5.4. Estimativa da Autonomia Tracker

Com base na corrente média estimada e na capacidade nominal da bateria (9.800 mAh), a autonomia do Tracker foi calculada (Equação 7):

$$\text{Autonomia (h)} = \frac{\text{Capacidade da Bateria (mAh)}}{\text{ConsumoTMCiclo(mAh)}} \quad (7)$$

Essa estimativa representa o cenário em que o Tracker realiza apenas um envio de dados por hora, permanecendo em modo de sono profundo entre os envios, sem a necessidade de observá-lo durante dias fornecendo uma visão aproximada da operação prática.

4. Resultados e Discussão

4.1. Resultados da Comunicação em Rede Mesh

A rede mesh foi composta por três dispositivos, configurados nos papéis de Client, Router e Tracker. Durante os testes, o Tracker transmitiu dados periodicamente, que podiam ser encaminhados diretamente ao Client ou através do Router. Os resultados demonstraram que, mesmo em curtas distâncias, o Router atua como um elemento garantidor da entrega dos pacotes, elevando a confiabilidade na comunicação. Em distâncias maiores ou na presença de obstáculos, o roteamento em múltiplos saltos (via Router) possibilitou uma significativa do alcance efetivo, melhorando o desempenho e minimizando perdas de pacotes.

4.1.1. Distância

O teste de distância avaliou o alcance efetivo entre os dispositivos da rede mesh, considerando um salto (hop) do Tracker passando pelo Router até o Client. Os resultados indicaram que o enlace foi mantido de forma estável por uma distância aproximada de 3,5 km, demonstrando a capacidade do sistema de suportar transmissões de longa distância mesmo em ligações que apresentavam grandes obstáculos, como florestas e mata.

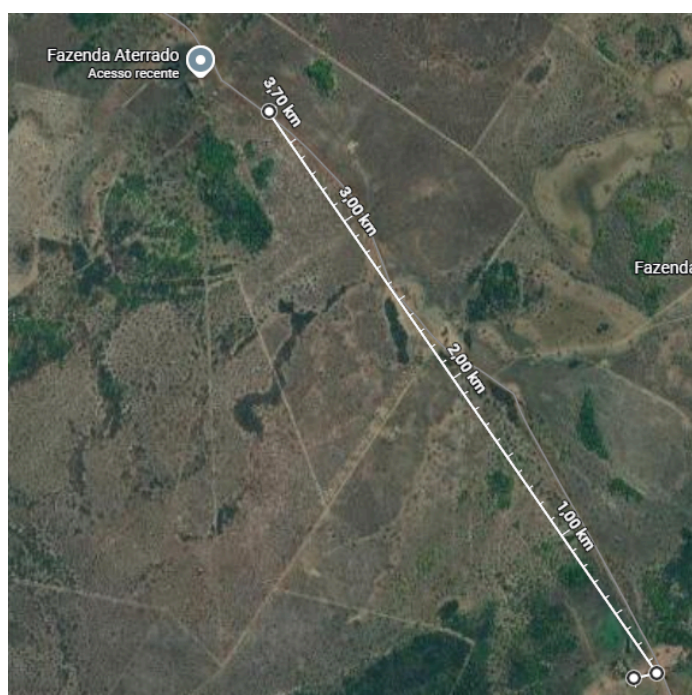


Figura 3. Distância máxima de comunicação obtida entre o nó Router e o Client, utilizando um salto intermediário (hop) com o Tracker.

Como pode ser visto na Figura 3, durante o percurso do sinal, o terreno apresentava diversos obstáculos e dificuldades.



Figura 4. Representação de alguns dos obstáculos presentes.

4.1.2. Avaliação das Rotas

A análise das rotas foi realizada considerando três diferentes distâncias entre os dispositivos, com o objetivo de avaliar a qualidade do enlace em diferentes cenários e o impacto do roteamento via Router na entrega de pacotes. Para essa análise, utilizou-se o SNR (Signal-to-Noise Ratio) como principal indicador de qualidade do sinal, considerando que valores positivos tendem a representar comunicação estável, enquanto valores negativos indicam maior probabilidade de perda de pacotes.

Maior distância entre os nós – 1km:

- IDA:
 - Client → Router = SNR: 7.5dB
 - Router → Tracker = SNR: 7.0dB
- VOLTA:
 - Tracker → Router = SNR: 7.25dB
 - Router → Client = SNR: 9.5dB

Nessa distância, todos os saltos apresentam SNR positivo, indicando uma comunicação consistente e estável tanto na ida quanto na volta. Observa-se uma boa simetria entre os enlaces, com desempenho elevado em

todos os segmentos. Esse cenário representa a condição ideal da rede mesh, com comunicação confiável mesmo sem degradação significativa.

Maior distância entre os nós – 2.5km:

- IDA:
 - Client → Router = SNR: 6.5dB
 - Router → Tracker = SNR: 2.5dB
- VOLTA:
 - Tracker → Router = SNR: -2.75dB
 - Router → Client = SNR: 8.75dB

A rota de ida apresenta SNR positivo em ambos os saltos, indicando boa qualidade de comunicação. Na volta, observa-se desempenho assimétrico: o salto inicial (Tracker → Router) apresenta SNR negativo, sugerindo diminuição da qualidade de transmissão do Tracker, enquanto o salto Router → Client mantém excelente desempenho. Ainda assim, a rota completa é funcional, evidenciando que o Router estabiliza o enlace mesmo quando um dos saltos apresenta degradação.

Maior distância entre os nós – 3.5km:

- IDA:
 - Client → Router = SNR: -7.5dB
 - Router → Tracker = SNR: -4.0dB
- VOLTA:
 - Tracker → Router = SNR: -11.0dB
 - Router → Client = SNR: -11.75dB

Nessa distância, todos os saltos apresentam SNR negativo, demonstrando que a comunicação direta se torna instável e com maior risco de perdas. Ainda assim, a presença do Router permite que os pacotes percorram a rota completa, mesmo que com menor qualidade, reforçando o papel do nó intermediário como elemento essencial para garantir conectividade em longas distâncias.

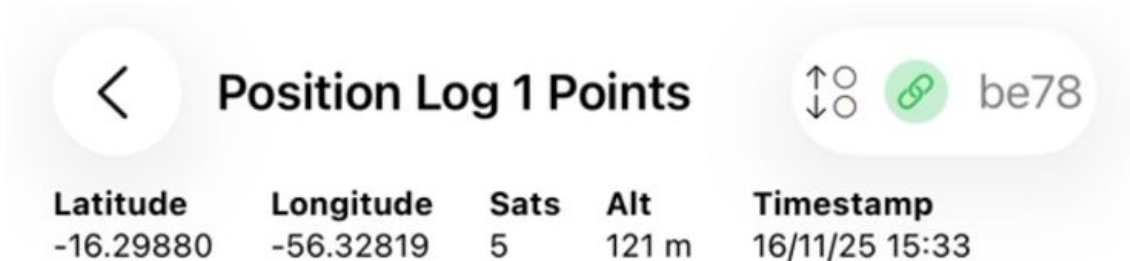
4.2. Resultados da Precisão de Localização

4.2.1 Envio Periódico e Estabilidade

O dispositivo enviou coordenadas de forma estável a cada intervalo configurado, sem perda significativa de mensagens. Os valores recebidos apresentaram coerência espacial com a área delimitada, não sendo observados deslocamentos incompatíveis com o movimento esperado.

4.2.2 Precisão Geográfica

Como se pode ver no registro log do dispositivo (Figura 4), as coordenadas enviadas foram: Latitude = -16.29880 e Longitude = -56.32819.



Latitude	Longitude	Sats	Alt	Timestamp
-16.29880	-56.32819	5	121 m	16/11/25 15:33

Figura 5. Registro de log das coordenadas durante os testes.

Comparando essas coordenadas no Google Maps, com a localização real aproximada do bezerro, obtemos o resultado de aproximadamente 150m de diferença (Figura 5). Esse nível de precisão está dentro do limite configurável do dispositivo e é plenamente aceitável para o manejo pecuário, pois permite identificar com segurança a localização do animal na propriedade.



Figura 6. Distância da coordenada em obtida no log com a aproximação de onde o animal estava.

4.3. Resultados de Consumo Energético

O consumo energético foi avaliado por meio de um teste acelerado, no qual o Tracker operou com ciclos curtos (60 s de *sleep* + 30 s ativo). Esse procedimento permitiu medir energia real por ciclo em um curto período, o que

foi então extrapolado para estimar a autonomia no cenário de operação final (1 ciclo por hora), reduzindo o tempo total de experimentação.

4.3.1 Medição Experimental

O dispositivo iniciou o teste com 100% de carga às 19:00 do dia 20/11/2025 e após 24 horas de atividade, atingiu 60% de carga total. A partir desse intervalo, foi possível estimar a corrente média consumida por ciclo e derivar a energia ativa aproximada.

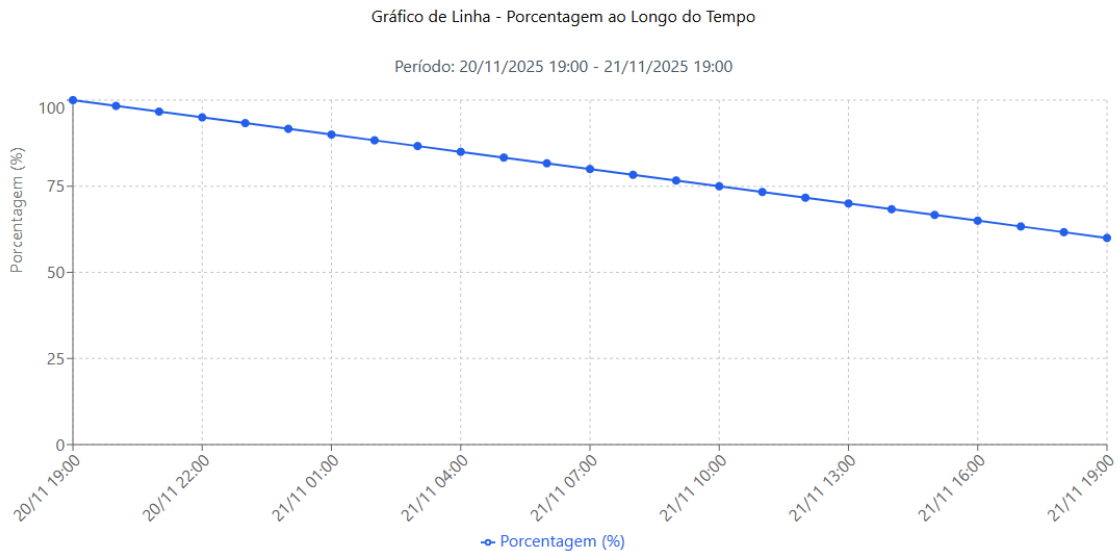


Gráfico 1. Porcentagem da bateria durante o período de teste.

Considerando:

- Tempo ativo: ≈ 30 s (GPS + LoRa TX)
- Tempo em *sleep*: 60 s
- Corrente de *sleep* estimada: 5 mA
- Consumo de sleep: 5 mAh
- Duração do período de teste: 24 horas = 86.400s
- Consumo total do período = 40% de 9.800 mAh = 3.920 mAh

1)

- Quantidade de ciclos realizados:

$$\frac{\text{DuraçãoTeste}}{\text{DuraçãoCiclo}} = \frac{86400}{90} = 960 \text{ Ciclos} \quad (2)$$

Foram obtidos:

- Consumo por ciclo:

$$\frac{\text{ConsumoTotalPeriodo}}{\text{Ciclos}} = \frac{3.920}{960} \approx 4,083 \text{ mAh} \quad (4)$$

- Consumo durante Sleep por hora: 5 mAh
- Consumo médio estimado:

$$\text{ConsumoMedioEstimada} = \text{ConsumoCiclo} + \text{ConsumoSono} \approx 9,083 \text{ mAh} \quad (6)$$

Foi considerado o valor total de consumo por ciclo, sem descontar o consumo do período de 60s de sono do dispositivo, a fim de gerar uma pequena margem de consumo a mais.

4.3.2 Estimativa da Autonomia

Usando uma bateria 18650 de 9.800 mAh:

$$\text{Autonomia} = \frac{9.800}{9,083} \approx 1.079 \text{ h} \approx 45 \text{ dias} \quad (7)$$

5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar a aplicabilidade da tecnologia LoRa Mesh como uma solução de comunicação e rastreamento de baixo consumo e longo alcance, viável para o manejo pecuário em zonas rurais com infraestrutura limitada. Os resultados obtidos em ambiente de campo provaram a viabilidade técnica da solução, respondendo afirmativamente ao problema de pesquisa e cumprindo integralmente os objetivos específicos traçados.

A análise de desempenho da rede foi particularmente conclusiva. O sistema demonstrou ser capaz de estabelecer um enlace estável em campo aberto com alcance de até 3.5km, um feito notável para uma solução de baixo custo. O desempenho do roteamento em topologia Mesh se mostrou crucial, atuando como um elemento estabilizador capaz de manter a comunicação mesmo em pontos de degradação do sinal, provando ser uma arquitetura ideal para cobrir grandes extensões de terra.

Em relação aos requisitos de precisão e autonomia, o sistema apresentou uma precisão geográfica de até 200m, valor plenamente aceitável para o manejo animal, e um consumo energético otimizado que permitiu uma autonomia estimada de 45 dias. Tais resultados validam a solução como um sistema robusto e eficiente, que oferece aos produtores rurais uma ferramenta de baixo custo para o monitoramento contínuo de rebanhos, superando a barreira da conectividade tradicional. A principal contribuição deste estudo reside na demonstração prática de que a combinação da tecnologia LoRa com a arquitetura Mesh é uma alternativa madura para acelerar a inserção da Pecuária 4.0 em propriedades rurais desconectadas.

6. Referências

YADAV, H. Advancements in LoRaWAN technology: scalability and energy efficiency for IoT applications. *International Numeric Journal of Machine Learning and Robots*, 2023. Disponível em: <https://injmrc.com/index.php/fewfewf/article/view/26>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

MOKOSMART. *Por que escolher LoRaWAN para rastreamento de gado por GPS*. 2024. Disponível em: <https://www.mokosmart.com/pt/why-choose-lorawan-for-gps-livestock-tracking>. Acesso em: 25 Nov. 2025.

OJO, M. O.; ADAMI, D.; GIORDANO, S. Experimental evaluation of a LoRa wildlife monitoring network in a forest vegetation area. *Future Internet*, v. 13, n. 5, p. 1-18, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-5903/13/5/115>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

GERMANO, Stefane Bressani. Protótipo de solução IoT para uma estação meteorológica aplicando tecnologia LoRa no ambiente agro. 2022. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2022. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1616/1/tcc_Stefane%20Bressani%20Germano.pdf. Acesso em: 20 Nov. 2025.

ARRATIA, A. et al. A review of wireless mesh networks (WMNs) in the Internet of Things (IoT) context. *Applied Sciences*, v. 13, n. 3, p. 1-25, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1976>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

OLIVEIRA, D. T. B. de; OLIVEIRA, R. H. C. A. de; ALBUQUERQUE, L. L. P. A. de. LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343396596_LoRaWAN_Mesh_Networks_A_Review_and_Classification_of_Multihop_Communication. Acesso em: 20 Nov. 2025.

U-BLOX. *NEO-6 GPS Modules: Data Sheet*. Version 5.00. 2011. Disponível em: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf. Acesso em: 20 Nov. 2025.

LILYGO. *T-Beam Series — Technical Specifications*. 2021. Disponível em: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGO-T-Beam>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Datasheet*. 2020. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 20 Nov. 2025.

LILYGO. *LilyGO T-Beam Specifications*. 2019. Disponível em: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGO-T-Beam>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

MESHTASTIC DOCS. *Meshtastic docs*. 2025. Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

SEMTECH. *SX1261/SX1262 Datasheet*. 2024. Disponível em: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/RQ000008nKCH/hp2iKwMDKWI34g1D3LBf_zC7TGBRlo2ff5LMnS8r19s. Acesso em: 20 Nov. 2025.