

Comunicações Off-Grid através do protocolo Meshtastic

Guido Rodrigues Barros¹, Carlos Alberto da Silva¹

¹Faculdade de Computação - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) guido.rodrigues@ufms.br, carlos.silva@ufms.br

Abstract

This article addresses the technical feasibility of the Meshtastic protocol as a possible alternative for communications in areas without traditional wireless network coverage, as well as its use as a form of decentralized communication. Technical factors identified during the research will be discussed, as well as reports from international communities that already use the technology as a form of communication.

Resumo

Este artigo aborda a viabilidade técnica do protocolo Meshtastic como possível alternativa para comunicações em áreas sem cobertura tradicional de redes sem fio, assim como sua utilização como forma de comunicação descentralizada. Será abordado fatores técnicos identificados durante o levantamento, assim como relatos de comunidades internacionais que já utilizam a tecnologia como forma de comunicação.

1 Introdução

Com o aumento da disponibilidade de dispositivos de comunicação modernos nas casas dos brasileiros, os *smartphones* já fazem parte do dia a dia, tanto para transações bancárias, informação e entretenimento, como para se comunicarem com parentes, amigos, conhecidos e desconhecidos. Com mais de 77.656 mil domicílios que possuem tais aparelhos de telefonia celular a sua disposição (IBGE PNAD Contínua, 2023).

Apesar do avanço na digitalização da população brasileira, mesmo com cerca de 99,74% dos moradores da área urbana com cobertura 3G/4G/5G, somente 58,11% dos moradores da área rural possuem acesso a cobertura; no Mato Grosso do Sul 99,69% dos moradores da área urbana possuem cobertura 3G/4G/5G e somente 33,94% dos moradores da área rural possuem acesso (ANATEL – Painéis de Dados – Infraestrutura, 2026).

Fatores como baixa densidade demográfica, a vastidão do próprio território nacional e dificuldades de acesso para a instalação da infraestrutura necessária contribuem para a demora na expansão do acesso à telefonia móvel. Frente a esse cenário, comunicações *off-grid*, ou seja, fora da rede tradicional de comunicações, fazem-se necessárias para auxiliar na conexão das comunidades que não possuem acesso a rede tradicional.

O protocolo Meshtastic é um projeto *open source* focado em oferecer uma solução simples para esse tipo de problema de conectividade, sem a necessidade de licenças estatais ou equipamentos de alta complexidade, utilizando dispositivos de radiofrequência restrita para a criação de redes de comunicação sem fio independentes da rede tradicional para a transmissão de mensagens de texto sob longas distâncias (Meshtastic, 2026).

Este artigo tem como objetivo uma introdução ao protocolo Meshtastic, seus aspectos técnicos mais significativos, bem como mostrar exemplos de comunidades que têm experiência

comprovada de sua utilização como forma de comunicação de texto entre seus membros. Com base nesses resultados, verificar a possibilidade da utilização da combinação dos dispositivos de radiofrequência restrita LoRa, utilizando Meshtastic, para comunicações em áreas que não possuem conexão tradicional de comunicação no território brasileiro.

2 Metodologia

2.1 Enquadramento Metodológico

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa descritiva, conduzida por meio de uma abordagem focada na análise da viabilidade técnica do protocolo Meshtastic como uma possível solução para comunicações em cenários desprovidos de cobertura de infraestruturas de telecomunicações tradicionais.

2.2 Procedimentos de Coleta de Dados e Fontes Documentais

A fundamentação e o levantamento dos requisitos do sistema basearam-se em pesquisa bibliográfica e documental de natureza técnica e em dados práticos levantados. As fontes primárias de dados foram divididas em três eixos complementares:

- Documentação Oficial e Repositórios: Análise direta das especificações de firmware, arquitetura de roteamento, mecanismos de segurança criptográfica, implementação da camada física LoRa e esquemas de serialidade em Protocol Buffers (Protobuf) disponibilizados pelo projeto de código aberto Meshtastic;
- Estudo de Múltiplos Casos Globais: Levantamento de dados operacionais, topologias de rede e relatos de implantação prática fornecidos por comunidades independentes de redes mesh estáveis, especificamente a Austin Mesh, Montreal Mesh, Mesh Hessen, Mountain Mesh e Freq51 Intermountain Mesh. Essas iniciativas serviram como referenciais empíricos secundários para avaliar o comportamento do protocolo em ambientes urbanos e rurais;
- Dados Estatísticos e Regulatórios: Coleta de indicadores demográficos e de conectividade junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e análise dos atos normativos vigentes emitidos pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

2.3 Critérios de Análise Técnica

Os dados coletados foram submetidos à análise de conteúdo técnica, categorizados sob os seguintes vetores de desempenho e engenharia:

- Viabilidade e resiliência da topologia *mesh* multi-salto (*multi-hop*) baseada em LoRa;
- Impacto das limitações intrínsecas de largura de banda (taxa de transmissão de dados) e latência;
- Algoritmo de inundação gerenciada (*Managed Flooding*) e concorrência no meio;
- Escalabilidade estrutural e vetores de colisão em redes de alta densidade;
- Conformidade e limites regulatórios do espectro de radiofrequência em solo nacional;
- Restrições e consumo energético dos componentes de *hardware* envolvidos.

3 Fundamentação Teórica

3.1 LoRa

A LoRa, acrônimo de *Long Range*, é uma tecnologia de camada física baseada na modulação por espectro de propagação – *Chirp Spread Spectrum* (CSS) – utilizando variações lineares de frequência ao longo do tempo. Desenvolvida pela *Semtech Corporation*, dispositivos de radiofrequência de radiação restrita que utilizam essa tecnologia (dispositivos LoRa) possuem vantagens significativas em comparação a outras tecnologias da área, resolvendo o compromisso tradicional de *design* entre alcance, resistência à interferências e consumo de energia (Semtech Corporation, 2020)

3.1.1 Princípios básicos do CSS

O *chirp* é um sinal cuja frequência aumenta (*up-chirp*) ou diminui (*down-chirp*) linearmente em uma largura de banda (*bandwidth*) configurada definida durante um período de tempo (Meshtastic, 2026). No Meshtastic, a informação é codificada através de deslocamentos cíclicos no tempo de início desses chirps, conforme exemplo na Figura . Esta abordagem confere à rede uma robustez extrema contra o efeito Doppler, visto que o receptor LoRa sincroniza o tempo através do preâmbulo de cada pacote e contra interferências de multipercurso, pois o receptor foca na taxa de variação da frequência e não na frequência absoluta (Meshtastic, 2026).

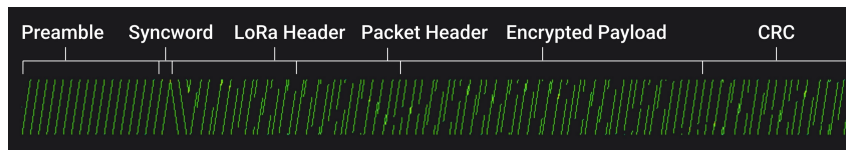


Figura 1: Exemplo de um pacote Meshtastic como *Chirps* na camada LoRa. Meshtastic, 2026

3.1.2 Variáveis envolvidas

O desempenho da camada física LoRa pode ser definido por três variáveis principais:

- *Spreading Factor* (SF): Determina a quantidade de *chirps* utilizados por símbolo. Um valor de SF mais alto (por exemplo: SF12) aumenta a densidade de energia por bit, permitindo que o sinal seja decodificado mesmo abaixo do nível da razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* SNR negativo) porém o tempo de transmissão (*Time on Air*) aumenta exponencialmente, reduzindo a taxa de dados. A Figura 2 apresenta os valores padrão de SF para LoRa.

<i>SpreadingFactor</i> (RegModulationCfg)	<i>Spreading Factor</i> (Chips / symbol)	<i>LoRa Demodulator</i> SNR
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

Figura 2: Alcance de valores de SF na camada LoRa. Semtech Corporation, 2020

- *Bandwidth* (BW): Define a largura de banda utilizada pelo canal. Valores maiores aumentam a taxa de transmissão, mas reduzem a sensibilidade do receptor. A Figura 3 mostra opções de configurações de BW em LoRa.

Bandwidth (kHz)	Spreading Factor	Coding rate	Nominal Rb (bps)
7.8	12	4/5	18
10.4	12	4/5	24
15.6	12	4/5	37
20.8	12	4/5	49
31.2	12	4/5	73
41.7	12	4/5	98
62.5	12	4/5	146
125	12	4/5	293
250	12	4/5	586
500	12	4/5	1172

Figura 3: Compromisso entre *Bandwidth* e Taxa de transmissão. Semtech Corporation, 2020

- *Coding Rate* (CR): Refere-se à detecção e correção de erros (*Forward Error Correction* – FEC) comuns durante o início de uma transmissão. O LoRa utiliza taxas de 4/5 a 4/8 para proteção contra rajadas de interferência, adicionando bits de paridade à carga útil. O *overhead* de dados por transmissão é apresentado na Figura 4.

CodingRate (RegTxCfg1)	Cyclic Coding Rate	Overhead Ratio
1	4/5	1.25
2	4/6	1.5
3	4/7	1.75
4	4/8	2

Figura 4: Faixa de *Overhead* empregado pelo modem LoRa. Semtech Corporation, 2020

3.2 ProtoBuf

O ProtoBuf (*Protocol Buffer*) é um mecanismo independente de plataforma desenvolvido pela Google LLC como uma forma de serialização de dados estruturados que gera estruturas significativamente mais compactas do que os tradicionais XML e JSON e é suportada pelas principais linguagens orientadas a objetos (como C++, Java e Python) (Meshtastic, 2026).

3.3 Regulação sobre LoRa no Brasil

A operação de dispositivos baseados na tecnologia LoRa é normatizada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) por meio da Resolução nº 680/2017 e, fundamentalmente, pelo Ato nº 14448/2017, estabelecendo os requisitos técnicos para a avaliação da conformidade de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita (ANATEL, 2017). O protocolo Meshtastic utiliza hardwares que operam na faixa de radiofrequência compreendida entre 902 MHz e 928 MHz (Banda ISM – *Industrial, Scientific and Medical*), utilizando o plano de frequências regionalizado US915.

4 Protocolo Meshtastic

4.1 Protocolo de roteamento na rede Mesh

Meshtastic utiliza o mecanismo de inundação gerenciada (*Managed Flooding*) para garantir que o pacote do nó remetente chegue ao nó destinatário da forma mais curta possível.

4.1.1 Camada 0: Início da transmissão

Ao iniciar uma transmissão, o protocolo envia um preâmbulo LoRa para sincronização dos dispositivos, seguido da palavra de sincronização (*Sync Word* - denotada por 0x2B) e do cabeçalho físico (*LoRa Physical Header*) contendo informações como tamanho do pacote, taxa de correção de erros e verificação CRC (*Cyclic Redundancy Check*).

4.1.2 Camada 1: Construção da Mensagem

O pacote do Meshtastic é implementado na camada não confiável do LoRa. Na Tabela 1 é apresentada a estrutura de um pacote que será enviado via LoRa.

Tabela 1: Estrutura Interna de um pacote Meshtastic. Meshtastic, 2026

Offset	Tamanho	Tipo	Utilização
0x00	4 bytes	Inteiro	Cabeçalho: NodeID do Destinatário.
0x04	4 bytes	Inteiro	Cabeçalho: NodeID do Remetente.
0x08	4 bytes	Inteiro	Cabeçalho: NodeID do nó que está repassando o pacote.
0x0C	1 byte	Bits	Cabeçalho: <i>Flags</i> que o pacote possui quando enviado
0x0D	1 byte	Bits	Cabeçalho: <i>Channel Hash</i> – identifica o canal destino e a chave de criptografia utilizada.
0x0E	1 byte	Bytes	Cabeçalho: <i>Next-hop</i> da rede quando estabelecida a cadeia de comunicação.
0x0F	1 byte	Bytes	Cabeçalho: Último byte do NodeID que retransmitiu o pacote antes de ser recebido.
0x10	Máx. 237 bytes	Bytes	O pacote em si (excluindo o <i>overhead</i> do <i>protobuf</i>).

NodeID

O valor de cada NodeID é um conjunto de 4 bytes que representa o bit menos significativo do MAC *Address* das CPUs dos *chipsets* que recebem suporte ao protocolo, devido ao fato de que esses bytes são garantidos como únicos pelo padrão IEEE.

Flag

Na Tabela 2 são apresentados os valores de *Flag* utilizados na transmissão de cada pacote.

Tabela 2: *Flags* utilizadas em um pacote. Meshtastic, 2026

Índice	Quantidade de Bits	Utilização
0	3	<i>HopLimit</i> , decresce a cada salto na rede
3	1	<i>WantAck</i> : Deseja confirmação de recebimento
4	1	<i>ViaMQTT</i> (pacote recebido via MQTT)
5	3	<i>HopStart</i> número original de salto (<i>HopLimit</i>)

Pacote

Valores de cabeçalho não são criptografados por padrão para garantir que se saiba apenas os dados necessários para envio, não o conteúdo enviado. O pacote enviado consiste em um conjunto de dados criptografados:

- *Portnum*: 1 byte que identifica o tipo de porta da aplicação;
- *Want Response*: 1 bit que indica que o remetente deseja uma resposta à mensagem;
- *Reply ID*: 4 bytes que identifica qual mensagem está sendo respondida;

- *Emoji Flag*: 1 bit que denota se a mensagem é um emoji;
- *Application Payload*: Aproximadamente 200 bytes que denota a mensagem;
- *Bitfield*: 1 byte definido pelo *firmware* do Meshtastic. Se Bit 0, então a mensagem pode ser enviada via MQTT; se Bit 1, então a mensagem aguarda uma resposta do destinatário; ambos os bits selecionados significam que ambas as *flags* foram selecionadas;

4.1.3 Colisão de pacotes

Para enviar o problema de colisão de pacotes durante uma tentativa de envio na rede Meshtastic, foi implementada a CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Antes de cada transmissão o nó necessita realizar o CAD (*Channel Activity Detection*), caso o canal esteja ocupado o nó deverá esperar por um número aleatório de tempo para garantir que múltiplos nós não tentem transmitir a um canal ao mesmo tempo. Este número aleatório de espera é recuperado utilizando uma CW (*Contention Window*) que é estabelecida conforme a utilização do canal – maior utilização significa maiores números de espera (Meshtastic, 2026).

4.1.4 Camada 2: Garantir o recebimento do próximo nó

O protocolo implementa um mecanismo de confirmação implícita de recebimento. Ao invés de retransmitir ACKs por todos os nós da rede, o remetente considera o pacote confirmado ao detectar sua retransmissão por um nó vizinho. Caso não haja confirmação após múltiplas tentativas, a mensagem é considerada não entregue.

4.1.5 Camada 3: envio entre múltiplos nós na rede

Managed Flooding refere-se a que, mesmo sabendo que todos os dispositivos retransmitem o pacote na rede até um limite, cada nó deve aguardar um certo tempo para ver se algum outro nó na rede já retransmitiu, reduzindo a complexidade de realizar o roteamento das mensagens (Meshtastic, 2026).

Ao receber o pacote, ele verifica se o HopLimit é maior que 0; decrementa o valor e realiza a transmissão do pacote. Para garantir que sempre o nó mais distante realize a retransmissão primeiro, o valor de CW definido na Camada 1 também é gerado conforme o SNR do pacote. Valores de CW menores significam que o SNR da rede é baixo; logo, os nós mais distantes enviarão o pacote antes dos nós mais próximos, que não retransmitiram. Exceções para esse tipo de comportamento são ROUTER e REPEATER, que sempre retransmitirão pacotes recebidos, independentemente das regras já definidas de prioridade (Meshtastic, 2026). Na Figura 5 encontra-se um exemplo desse comportamento de envio.

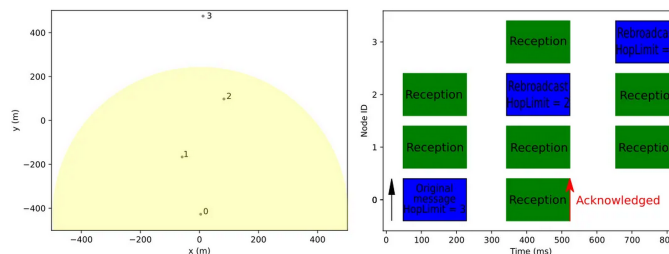


Figura 5: Exemplo de comunicação entre o nó 0 e o nó 3: para alcançar o nó 3, o nó 2 realizará a retransmissão antes do nó 1. Meshtastic, 2026

Para mensagens diretas a partir da versão 2.6, cada nó da rede é guardado como um caminho provável no campo de Next-hop. Ao atingir o destino do pacote, uma resposta

é enviada pelo destinatário. Caso o nó que retransmite ao remetente seja um dos nós que transmitiram o pacote até o destinatário, é escolhido como um caminho válido para futuras comunicações entre esses dois nós, garantindo um único caminho para novas mensagens. Tal comportamento está exemplificado na Figura 6. Caso um dos nós no caminho base esteja indisponível, *managed flooding* é realizado para a descoberta de um novo caminho na próxima comunicação entre os dois nós.

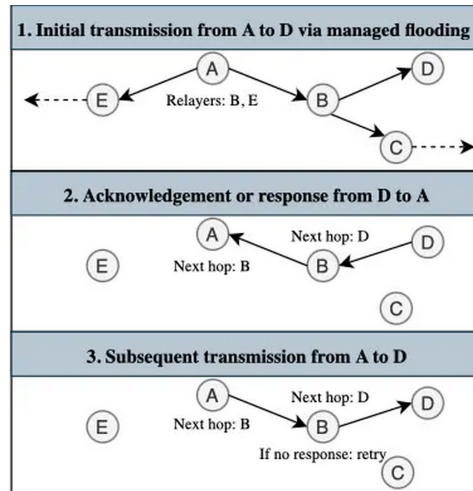


Figura 6: Exemplo de estabelecimento de uma comunicação direta entre o nó A e o nó D, Meshtastic, 2026

4.1.6 Intervalos de Envio de Mensagens da Rede

O tráfego padrão é realizado de forma regular em intervalos de tempo padronizados:

- Telemetria do nó: Enviados a cada 30 minutos;
- Geoposicionamento do nó: Caso autorizado o envio, será realizado a cada 15 minutos;
- Identificação do nome do nó na rede: Intervalo de envio é a cada 3 horas.

Para garantir que, em redes com vários nós ativos, não sejam paralisadas pelo volume de dados padrão sendo enviados simultaneamente, o *firmware* aumentará o intervalo de tempo para o envio. A partir da versão 2.4.0, foi implementado um sistema de redução de tempo para redes com mais de 40 nós ativos nas últimas 2 horas:

$$\text{ScaledInterval} = \text{Interval} * (1.0 + ((\text{NumberOfOnlineNodes} - 40) * 0.075))$$

Um exemplo: 62 nós ativos equivalem a intervalos de 79,5 minutos (Meshtastic, 2026).

4.2 Segurança e Criptografia

Como o protocolo Meshtastic foi concebido como uma alternativa off-grid que se aproveita das tecnologias *wireless* mais tradicionais, como os rádios de longa distância do tipo rádio amador, sua segurança acaba sendo mais limitada. O padrão de criptografia simétrica AES256-CTR (*Counter mode*) foi escolhido como o meio criptográfico padrão implementado no Meshtastic.

4.2.1 Comunicação entre canais

Para cada canal na rede há uma PSK (*Pre-Shared Key*) definida como padrão de segurança. Os canais, no momento de sua criação, possuem como PSK a chave “AQ==” (Meshtastic, 2026). Caso seja necessária a mudança da chave padrão para que não seja criptografada ou que utilize outro tipo de criptografia suportada pelo protocolo, como AES128 ou o formato padrão AES256, isso deve ser realizado por todos que forem utilizar tal canal.

4.2.2 Comunicações diretas

A partir do *firmware* 2.5.0, as comunicações diretas passaram a contar com um novo modelo de segurança, utilizando o conceito de PKC (*Public Key Cryptography*), onde cada nó possui um único par de chaves: uma chave pública e uma chave privada.

4.2.3 Mensagens administrativas

A partir do novo *firmware*, utiliza-se adicionalmente um sistema baseado em *key exchange* com o esquema de chaves *Elliptic-curve Diffie–Hellman*, e na utilização de Section ID para cada nó, onde para cada seção de mensagens administrativas, é gerado um valor adicional, no pacote criptografado, valido somente por um curto espaço de tempo e descartado após o final da comunicação ou até que uma nova mensagem administrativa seja iniciada.

4.2.4 Limitações e desvantagens

Os mecanismos criptográficos adotados priorizam baixo consumo energético e simplicidade operacional. Entretanto, o protocolo não implementa *Perfect Forward Secrecy*, tornando possível o comprometimento retrospectivo das comunicações caso uma chave seja exposta ou que um nó seja fisicamente apossado. Além disso, canais convencionais não realizam autenticação completa dos nós, permitindo possíveis ataques de inferência ou falsificação de identidade. Tais limitações afetam principalmente comunicações em canais públicos, sendo parcialmente mitigadas nas comunicações diretas e administrativas introduzidas nas versões recentes do *firmware* (Meshtastic, 2026).

4.3 MQTT

A integração via MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) permite interligar redes *mesh* independentes utilizando infraestrutura convencional de Internet, transformando determinados nós em *gateways* híbridos, interligando redes *mesh* que não poderiam se comunicar entre si devido a limitações de alcance. Na Figura 7 é apresentado um exemplo entre duas redes interligadas via MQTT. Entretanto, limitações de propagação, redução de precisão geográfica e restrições de tipos de mensagens são aplicadas para evitar sobrecarga na rede pública do projeto. Outros servidores MQTT podem ser configurados e a configuração padrão de propagação pode ser ajustada pelo administrador da rede

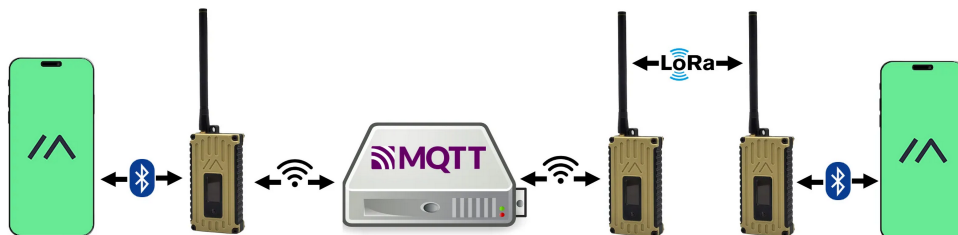


Figura 7: Exemplo de integração entre nós e um servidor MQTT em duas redes mesh. Meshtastic, 2026

5 Discussão e Aplicabilidade do Meshtastic

5.1 Histórico das Redes Implementadas

Os avanços na área de LoRa tem tido maior tração desde a popularização do *open-source* protocolo Meshtastic, visto a não necessidade de licenciamento para operar dispositivos LoRa, baixo custo dos equipamentos envolvidos e a necessidade reduzida de conhecimentos técnicos em radiodifusão. Na figura 8 é possível ver um exemplo da utilização global do protocolo.



Figura 8: Dispositivos Meshtastic ao redor do mundo (somente são visíveis os conectados ao servidor MQTT). Meshmap.net, Maio, 2026

A utilização do protocolo como meio de comunicação interna localizada em expedições em áreas isoladas é uma aplicação que também vem crescendo. Embora isso não substitua as comunicações tradicionais, fundamentais em casos de emergências médicas, a utilização para troca de mensagens e coordenadas entre membros de forma simples e econômica, tanto em relação a custo de obtenção como em custo de operação, é um fator muito popular nesse tipo de comunidade (Mesh Underground, 2025).

5.2 Observações sobre o uso pelas comunidades Meshtastic

Muitas das comunidades organizadas que utilizam o protocolo como comunicação *off-grid* surgiram como formas adicionais de complementar comunidades já existentes de radioamadores, assim como aproveitando as facilidades já mencionadas em trabalhar com LoRa, como os dispositivos utilizados pela Mountain Mesh (região de Atlanta e proximidades da cadeia dos Apalaches) e pela comunidade Freq51; muitas também surgiram como formas de intercomunicação entre moradores de regiões populacionais, como o estado de Hesse na Alemanha, Montreal no Canadá e Austin no Texas.

5.2.1 Densidade das redes mesh

A principal consideração é o problema relativo a densidade das redes utilizando o *preset* padrão para o protocolo (*LongFast*: 250kHz, SF 12), observado em redes com mais de 60 nós conectados, redes com alta densidade de nós em um espaço geográfico ou com grande tráfego de mensagens, causando demora na entrega das mensagens e aumento da colisão de pacotes, visto que a configuração padrão esta pensada para comunicações em longas distâncias (Meshtastic, 2026). Muitas redes, como a Mountain Mesh, Freq51, resolveram esse

tipo de problema de conexão reduzindo a pré-configuração do modem para *MediumFast* (250 kHz, SF 9), já a rede Mesh Hessen reduziu a configuração para *ShortSlow* (250 KHz, SF 8), reduzindo o tempo de transmissão, latência e diminuindo os riscos de colisão dos pacotes. Esse tipo de mudança requer a colaboração de todos os usuários da rede para garantir que nós participantes não sejam desconectados da rede após a reconfiguração do padrão do modem.

Mudança de protocolo como solução à densidade Comunidades como Austin Mesh e Mesh Montréal adotaram protocolos alternativos, como o MeshCore, visando maior escalabilidade em ambientes urbanos densos para redes com nós fixos. Contudo, observam-se limitações relacionadas à segurança criptográfica devido ao método criptográfico padrão AES em modo ECB, com ampla literatura especializada sobre a facilidade que possui em permitir o vazamento de padrões estruturais presentes no texto (*ECB penguin*), a transparência do desenvolvimento e a exposição de informações topológicas da rede, fatores que mantêm o Meshtastic como uma alternativa tecnicamente mais madura para aplicações descentralizadas seguras.

5.3 Instalação, localização e conservação dos equipamentos

Embora, em um primeiro momento, nós de uma rede mesh de carácter doméstico utilizem equipamentos LoRa compactos de uso interno, redes mais organizadas tendem a se diferenciar pela utilização de dispositivos instalados em ambientes externos. Na Tabela 3 é apresentado exemplos de alcances conforme verificado pelas comunidades.

Tabela 3: Alcances verificados para nós em diferentes cenários de localização

Cenário	Tipo de antena	Alcance típico observado
Urbano denso	Interna	300 m – 2 km
Urbano/suburbano	Interna	1 – 5 km
Rural aberto	Interna	3 – 10 km
Urbano/suburbano	Externa	5 – 15 km
Rural aberto	Externa	10 – 30 km (condições favoráveis)
Ponto elevado/repetidor	Externa de alto ganho	20 – 50 km (condições excepcionais)

A necessidade de posicionamento estratégico dos dispositivos externos em locais elevados e com maior linha de visada (*Line-of-Sight* – LoS) é uma estratégia importante. Em ambientes urbanos densos, onde edificações, estruturas metálicas e limitações de linha de visada podem degradar significativamente a propagação dos sinais LoRa, sendo fundamental para a expansão da cobertura e estabilidade topológica das redes mesh. Na Figura 9 é apresentado um exemplo importante de utilização do relevo como forma de ampliação de LoS com um Nebra Miner reconicionado para executar Meshtastic no hardware Raspberry PI CM3.

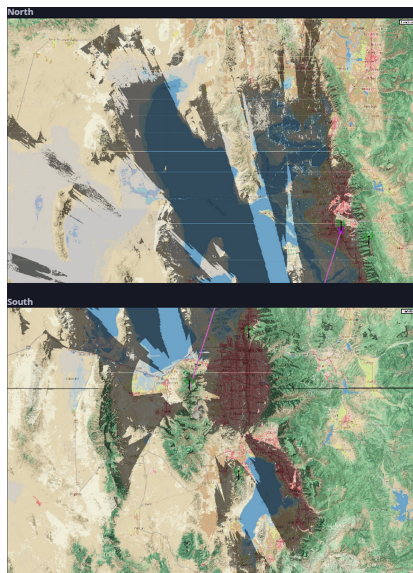


Figura 9: *Line-Of-Sight* do nó instalado no Pico Nelson - Utah, alcance de ~ 80 Km. Freq51 - The Intermountain Mesh, 2026

O abastecimento de eletricidade para o funcionamento do nó, principalmente para nós em áreas externas ou isoladas, com nós alimentados por painéis solares e baterias de lítio, garantindo a operação contínua. Comunidades como Austin Mesh e Mountain Mesh frequentemente recomendam arquiteturas baseadas no *chipset* nRF52 para repetidores solares permanentes, devido ao seu consumo energético significativamente inferior em modo de espera (*sleep mode*), enquanto dispositivos baseados em ESP32 permanecem amplamente utilizados em nós móveis e aplicações pessoais.

Para mitigar fatores climáticos e ambientais é necessário a manutenção preventiva e inspeção periódica dos equipamentos instalados, garantindo maior disponibilidade operacional das redes *mesh*. O emprego de caixas seladas para aplicações externas, amparadas por mecanismos de proteção contra umidade, radiação ultravioleta e dissipação térmica passiva, ampliam a durabilidade operacional desses equipamentos em ambientes externos.

5.4 Aplicabilidade no cenário brasileiro

Em regiões onde o acesso a comunicações tradicionais sem fio é inexistente, as outras alternativas de comunicação existentes, como a rádio amadora e sistemas de comunicação via satélite, esbaram em barreiras que podem ser ainda mais trabalhosas em comparação com a alternativa LoRa:

- Além da necessidade obrigatória de licenciamento para o uso de equipamentos de rádio amador, o custo para obter um aparelho capaz de funcionar nas frequências autorizadas é superior aos equipamentos LoRa disponíveis no mercado;
- Para as comunicações *off-grid* e utilização como comunicação interna em expedições, a utilização de sistemas de comunicação via satélite é economicamente inviável.

Na Tabela 4 é mostrado um comparativo baseado no cenário atual de comunicações *wireless* e suas contrapartidas.

Tabela 4: Comparativo econômico e de infraestrutura das tecnologias de comunicação analisadas no período de maio de 2026

Tecnologia	Investimento Inicial	Custo Recorrente	Dependência de Infraestrutura Externa	Cobertura Típica
LoRa + Meshtastic)	Baixo a Médio (R\$ 150 - R\$ 1.500)	Baixo (manutenção e substituição de baterias)	Muito baixa (rede mesh descentralizada baseada em nós LoRa)	Local a regional (conforme já abordado)
Rádio VHF/UHF	Baixo a Alto (R\$ 150 - R\$ 5.000+)	Baixo (manutenção, substituição de baterias, licenciamento)	Baixa (comunicação ponto a ponto; infraestrutura adicional limitada a repetidoras opcionais)	Local a regional (1-50 km, dependendo da topografia e da instalação)
Internet via Satélite (ex.: <i>Starlink</i>)	Médio a Muito alto (R\$ 1.500 - R\$ 15.000+)	Alto a Muito alto (R\$ 230 - R\$ 3.000+/mês)	Muito alta (constelação LEO, <i>gateways</i> terrestres e <i>backbone</i> IP)	Global (fixa ou móvel, conforme plano contratado)
Rede Celular (4G/5G)	Baixo a médio (R\$ 800 - R\$ 6.000 para <i>smartphones</i> , modems e roteadores compatíveis com redes 4G/5G)	Médio (R\$ 50 - R\$ 300/mês)	Muito alta (ERBs, núcleo de rede móvel e <i>backhaul</i>)	Dependente da cobertura da operadora

6 Conclusão

Os resultados obtidos mostram o potencial da utilização de dispositivos LoRa juntamente com o protocolo Meshtastic para sua utilização como comunicação *off-grid*, assim como sua utilização em áreas rurais, em atividades *outdoor* e como forma de comunicação paralela em áreas urbanas. Sua utilização e disseminação nas comunidades citadas demonstram resultados importantes de operações reais, onde a habilidade de comunicação independente é muito apreciada por seus membros.

Os aspectos de segurança empregados no protocolo demonstram ser mais práticos, garantindo maior robustez em comparação a alternativas adotadas na plataforma LoRa. Devido ao caráter limitado das redes LoRa, isso impede que o protocolo receba de forma completa várias suítes de segurança que já existem nas redes tradicionais de comunicações.

Embora, no cenário brasileiro, a construção de redes Meshtastic possa ser uma alternativa viável economicamente e tenha uma utilização simplificada, não se deve considerá-la como um substituto total das comunicações tradicionais, e sim como uma forma de interconexão por meio de mensagens de texto entre membros de uma região, usando dispositivos de radiofrequência LoRa de baixo custo, alta escalabilidade e dispensa de licenciamento segundo a legislação atual, tendo em conta as limitações presentes.

Referências

- [1] SEMTECH CORPORATION, SX1276/77/78/79 Datasheet. Revision 7. Califórnia: Semtech, 2020. Disponível em: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276>. Acesso em: maio 2026.
- [2] AUSTIN MESH. Devices for the Mesh. Austin Mesh, 2025. Disponível em: <https://www.austinmesh.org/devices/>. Acesso em: maio 2026.
- [3] AUSTIN MESH. Meshtastic vs. MeshCore on Austin Mesh. Austin Mesh, 2025. Disponível em: <https://www.austinmesh.org/learn/meshcore-vs-meshtastic/>. Acesso em: maio 2026.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). Painéis de Dados sobre infraestrutura, 2026. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/infraestrutura>. Acesso em: maio 2026.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017. Aprova o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita. Brasília, 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acesso em: maio 2026.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). Ato nº 14448, de 4 de dezembro de 2017. Requisitos técnicos para avaliação da conformidade de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. Brasília, 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448>. Acesso em: maio 2026.
- [7] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: acesso à internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://painel.ibge.gov.br/pnadc/>. Acesso em: maio 2026.
- [8] FREQ51. Our Equipment. Freq51, 2025. Disponível em: <https://freq51.net/equipment>. Acesso em: maio 2026.
- [9] FREQ51. Nebra Miner Guide. Freq51, 2025. Disponível em: <https://freq51.net/equipment/nebra-miner>. Acesso em: maio 2026.
- [10] FREQ51. Infrastructure. Freq51, 2025. Disponível em: <https://freq51.net/infrastructure>. Acesso em: maio 2026.
- [11] MESHMAP.NET. A nearly live map of Meshtastic nodes seen by the official Meshtastic MQTT server, 2026. Disponível em: <https://meshmap.net/>. Acesso em: Maio 2026.
- [12] MESH MONTRÉAL. Réseau Libre Montréal – Frequently Asked Questions. Montréal, 2025. Disponível em: <https://lora.reseaulibre.ca/guides/faq/>. Acesso em: maio 2026.
- [13] MESH MONTRÉAL. Réseau Libre Montréal – Hardware options. Montréal, 2025. Disponível em: <https://lora.reseaulibre.ca/references/hardware/>. Acesso em: maio 2026.

- [14] MESH Hessen.Homepage.Mesh Hessen, 2025.Disponível em: <https://meshhessen.de/>.Acesso em: maio 2026.
- [15] MESH UNDERGROUND.Meshtastic node maps: a visual guide to off-grid networks.2025.Disponível em: <https://meshunderground.com/posts/meshtastic-node-maps-a-visual-guide-to-off-grid-networks/>.Acesso em: maio 2026.
- [16] MESH UNDERGROUND.Meshtastic Off-Road Communication - Your Off-Grid Guide .2025.Disponível em: <https://meshunderground.com/posts/1743600313080-meshtastic-off-road-communication--your-off-grid-guide/>.Acesso em: maio 2026.
- [17] MESHTASTIC.Is LongFast Holding Your Mesh Back? Better LoRa Presets for Bigger Meshtastic Networks.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/blog/why-your-mesh-should-switch-from-longfast/#understanding-lora-presets>.Acesso em: maio 2026.
- [18] MESHTASTIC.Overview.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/overview/>.Acesso em: maio 2026.
- [19] MESHTASTIC.Radio Settings.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/overview/radio-settings/>.Acesso em: maio 2026.
- [20] MESHTASTIC.Mesh Broadcast Algorithm.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/overview/mesh-algo/>.Acesso em: maio 2026.
- [21] MESHTASTIC.Meshtastic Encryption.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/overview/encryption/>.Acesso em: maio 2026.
- [22] MESHTASTIC.Known Limitations and Future Plans of Meshtastic's Encryption.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/about/overview/encryption/limitations/>.Acesso em: maio 2026.
- [23] MESHTASTIC.LoRa Configuration.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/configuration/radio/lora/>.Acesso em: maio 2026.
- [24] MESHTASTIC.MQTT Module Configuration.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/configuration/module/mqtt/>.Acesso em: maio 2026.
- [25] MESHTASTIC.MQTT — Integrations Overview.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/software/integrations/mqtt/>.Acesso em: maio 2026.
- [26] MESHTASTIC.Protobufs.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/development/reference/protobufs/>.Acesso em: maio 2026.
- [27] MESHTASTIC.Updated Security Implementation.Meshtastic Project, 2026.Disponível em: <https://meshtastic.org/docs/development/reference/encryption-technical/>.Acesso em: maio 2026.
- [28] MOUNTAIN MESH.Migration to MediumFast. Mountain Mesh, 2025.Disponível em: <https://mtme.sh/mediumfast/>.Acesso em: maio 2026.

[29] MOUNTAIN MESH.Recommended Configuration Settings.Mountain Mesh, 2025.Disponível em: <https://mtnme.sh/config/>.Acesso em: maio 2026.