



Os desafios da implementação de uma rede híbrida LoRa Mesh/LoRaWAN

The challenges of implementing a hybrid LoRa Mesh/LoRaWAN network

Juliana Simões¹, Roberto Krauss²

RESUMO

Nos últimos anos, as tecnologias de redes de baixo consumo energético e alta cobertura (LPWAN) têm se destacado em aplicações de IoT devido ao seu longo alcance e baixo consumo de energia. O protocolo LoRaWAN é popular, mas enfrenta problemas de sombreamento. Redes híbridas que combinam LoRaWAN com LoRa Mesh podem melhorar a cobertura em áreas sombreadas sem aumentar o consumo de energia. Este trabalho aborda os desafios na implementação de redes híbridas LoRa Mesh/LoRaWAN.

PALAVRAS-CHAVE: Internet das Coisas; LoRa; LoRaWAN

ABSTRACT

In recent years, Low Power Wide Area Networks (LPWAN) technologies have gained prominence in Internet of Things (IoT) applications due to its long range and low energy consumption. The LoRaWAN protocol is popular but face shadowing issues. Hybrid networks that combine LoRaWAN with LoRa Mesh can improve coverage in shaded areas without increasing power consumption. This work addresses the challenges in implementing LoRa Mesh/LoRaWAN hybrid networks.

KEYWORDS: Internet of Things; LoRa; LoRaWAN

INTRODUÇÃO

Com o crescimento das redes LPWAN, o protocolo LoRaWAN se destacou devido à sua eficiência e segurança em redes IoT (BUTUN; PEREIRA; GIDLUND, 2018). Redes LPWAN buscam alta cobertura e baixo consumo de energia. Em redes LoRaWAN, a topologia padrão é de estrela, onde dispositivos finais se conectam diretamente ao *gateway* através de um único enlace. No entanto, obstáculos podem prejudicar a cobertura. Por isso, redes LoRaWAN *multihop* foram propostas, permitindo que dispositivos finais se conectem entre si e encontrem rotas alternativas para se conectarem ao *gateway* (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2023; ALMEIDA et al., 2020; DIAS; GRILO, 2018).

Essas redes *multihop* enfrentam desafios, como aumento do consumo de energia, latência e interoperabilidade. Este trabalho explora esses desafios e avalia a viabilidade com base em estudos anteriores.

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil. E-mail: jsimoes@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9353447884576535.

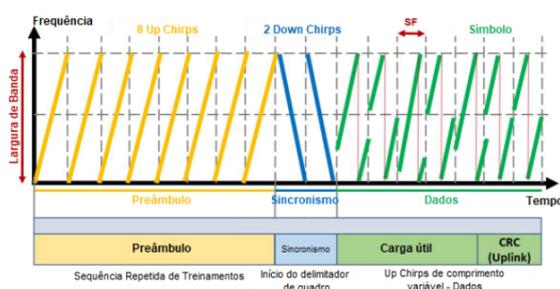
² Docente no Curso de Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico de Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil. E-mail: robertomartinez@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6469800712799886.



LORA

LoRa (Long Range) é uma tecnologia da Semtech que usa modulação de espalhamento espectral de *chirp* (CSS, do inglês *Chirp Spread Spectrum*). Em redes LoRa, cada símbolo é transformado em um sinal *chirp*, que varia em frequência ao longo do tempo (HAXHIBEQIRI et al., 2018). Na Figura 1, a sequência de *chirps* típica da modulação LoRa é apresentada. A mensagem inclui um preâmbulo, seguido de símbolos de sincronização e, finalmente, os dados úteis (*payload*).

Figura 1 – Sequência de *chirps* característica da modulação LoRa



Fonte: Adaptado de (CHALACAN, 2020).

No gráfico, é observado o parâmetro SF , que se trata do fator de espalhamento (do inglês, *spreading factor*), que controla a taxa de variação de cada *chirp* em uma banda de frequência específica. O SF pode variar de 7 a 12, com valores maiores resultando em maior tempo de transmissão no ar. As seis opções de SF são ortogonais entre si, permitindo que o *gateway* decodifique sinais com diferentes SF quando se sobrepõem (CHALACAN, 2020).

A modulação LoRa possui outros dois parâmetros configuráveis: a taxa de codificação (CR, do inglês *code rate*), que define a relação entre os bits de dados úteis e os bits transmitidos, podendo ser de 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8, e a largura de banda dos sinais transmitidos, com opções de 125, 250 ou 500 (SHANMUGA SUNDARAM; DU; ZHAO, 2020).

PROTOCOLO LORAWAN

O protocolo LoRaWAN é um dos protocolos LPWAN mais difundidos, foi desenvolvido pela *LoRa Alliance* e funciona na camada de enlace (LORA ALLIANCE, 2015). Uma rede LoRaWAN típica é constituída por dispositivos finais, que possuem sensores ou atuadores, por *gateways*, que recebem os pacotes de dados gerados pelos dispositivos finais e os encaminham para o servidor de rede, e por um servidor de rede que coleta e analisa as informações enviadas pelos dispositivos finais (BANKOV; KHOROV; LYAKHOV, 2016).

Os dispositivos finais são divididos em três classes de implementação, 'A', 'B' e 'C'. A classe 'A' é suportada por todos os dispositivos LoRaWAN; nela os dispositivos podem receber *downlinks* por um curto período após a transmissão de um *uplink*, o que faz com que essa classe apresente o menor consumo energético e a maior latência dentre as três. A classe 'B' possui, além dos períodos disponíveis na classe 'A', outros períodos em que os dispositivos podem receber mensagens, possibilitando o controle da latência ao passo que a eficiência energética diminui. Por fim, na classe



‘C’ os dispositivos estão disponíveis para recebimento de *downlinks* durante todo o tempo; seu uso é indicado para aplicações onde há o fornecimento constante de energia (LORA ALLIANCE, 2015).

LORA MESH

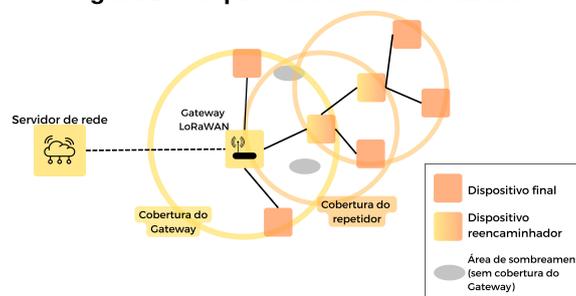
Uma rede LoRa Mesh usa a estratégia *multihop*, em que informações são transmitidas de um dispositivo para outro por meio de saltos intermediários, melhorando escalabilidade e confiabilidade (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020). O trabalho de (LEE; KE, 2018) apresenta uma rede LoRa Mesh para monitoramento em larga escala onde apenas um *gateway* se comunica diretamente com o servidor, enquanto os dispositivos finais se comunicam entre si. Quando um nó se junta à rede, ele é adicionado a uma estrutura de dados vazia. O envio periódico de *beacons* pelo *gateway* para, e ele começa a receber dados dos dispositivos finais. Os dados também notificam dispositivos não conectados para se juntar à rede. Quando um dispositivo não conectado detecta esses dados, decide ingressar na rede e escolhe conectar-se a um dispositivo com base na qualidade do sinal e na distância do *gateway*, caso seja optado por outro nó (LEE; KE, 2018).

REDES HÍBRIDAS LORA MESH/LORAWAN

Como visto, as redes Mesh apresentam uma solução para o problema de cobertura enfrentado pelas redes LoRaWAN. Entretanto, seu desenvolvimento pode ser desafiador pela falta de um protocolo difundido (ALMEIDA et al., 2020). Um caminho viável é a utilização do já bem estabelecido protocolo LoRaWAN em conjunto com uma rede LoRa Mesh.

Almeida et al. (2020) propõe um modelo híbrido que amplia a cobertura de rede, como ilustrado na figura 2. Os círculos amarelos representam a cobertura do *gateway* LoRaWAN, os cinzas são áreas sombreadas na rede LoRaWAN, e os laranjas indicam a cobertura dos dispositivos finais reencaminhadores. É possível perceber uma extensão das rede através da topologia Mesh, assim como a cobertura de áreas previamente sombreadas.

Figura 2 – Arquitetura do modelo híbrido



Fonte: Autoria própria (2023)

Existem, basicamente, duas formas de implementar uma rede híbrida: uma utilizando técnicas de reencaminhamento, em que os dispositivos repetidores apenas retransmitem os pacotes recebidos para o próximo nó da rede sem registrar o caminho das rotas, e outra utilizando técnicas de roteamento, onde é possível otimizar as rotas e identificar o dispositivo que originou o pacote de dados



(RODRIGUES COTRIM, 2021).

DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO

CONSUMO DE ENERGIA

No estudo de (BOUGUERA et al., 2018), foi avaliada a autonomia de dispositivos com sensor, processador e comunicação LoRa/LoRaWAN operando na classe 'A' com configurações específicas para reduzir o consumo. O consumo total de energia é representado pela soma do consumo de energia do dispositivo no modo *stand-by* e pelo consumo de energia no modo ativo. Os resultados indicam uma autonomia média de 4,5 anos com baterias de 950 e intervalos de 30 entre medições.

Por sua vez, (CASALS et al., 2017) conduziu medições práticas do consumo de corrente em dispositivos LoRa na classe 'A', considerando vários estados de operação. Os resultados variam de 2,17 e 2,9 anos com uma bateria de 2400 e $T_{notif} = 3600$. Este estudo considera mais parâmetros, resultando em estimativas menos otimistas em comparação com (BOUGUERA et al., 2018).

Em redes LoRaWAN classe 'A', como nos estudos de (CASALS et al., 2017) e (BOUGUERA et al., 2018), o dispositivo final abre janelas de recepção após cada transmissão, enquanto em redes *multihop*, os nós intermediários mantêm janelas abertas para recepção durante todo o tempo em que não estão transmitindo, o que leva à um aumento significativo no consumo de redes *multihop*.

(RODRIGUES COTRIM, 2021) desenvolve um modelo analítico para o consumo de energia em redes *multihop*, considerando o consumo adicional dos dispositivos intermediários. Isso é representado pela equação (1).

$$E_{reen} = \sum_{i=0}^{Pckt} (E_{Tx}(i)) + E_{Rx} + Pckt \cdot E_P, \quad (1)$$

em que $Pckt$ é o número de pacotes reencaminhados, E_{Tx} é a energia de transmissão, E_{Rx} é a energia de recepção e E_P é a energia de processamento. Os modelos anteriores não levam em conta a limitação de energia dos dispositivos intermediários, de modo que um estudo futuro deve investigar o consumo de energia dos dispositivos intermediários em detalhes e otimizar algoritmos para maior eficiência energética.

INTEROPERABILIDADE

A integração da rede Mesh com a infraestrutura LoRaWAN requer interoperabilidade eficiente entre *gateways*, dispositivos finais e intermediários, suportando estratégias *multihop* e o protocolo LoRaWAN de forma simultânea. Duas abordagens principais podem ser usadas para essa integração: na primeira abordagem, um coordenador da rede Mesh, que também é um nó LoRaWAN, atua como ponto de coleta, agregando dados da rede Mesh em uma única mensagem para envio ao *gateway*. na segunda abordagem, o coordenador age como intermediário, encaminhando dados da rede Mesh para a rede LoRaWAN e permitindo o roteamento personalizado e a identificação no *gateway* da origem de cada pacote de dados (ALMEIDA et al., 2020).



(DIAS; GRILO, 2018) propôs uma extensão *multihop* compatível com *gateways* LoRaWAN padrão usando o protocolo de roteamento DSDV (Vetor de Distância Sequenciada de Destino). Os dispositivos finais enviam pacotes com informações do LoRaWAN e tabelas de roteamento. Quando conectados diretamente ao *gateway*, a sobrecarga de roteamento é removida, permitindo a interpretação correta dos pacotes. Nessa abordagem, para identificar a origem dos dados sem incluir a tabela de roteamento, alguns bits na carga útil podem ser reservados para alocar um identificador a cada dispositivo final.

LATÊNCIA

O aumento da cobertura das redes implica em maior latência, decorrente do prolongamento do tempo de transmissão dos pacotes. A latência tem uma relação direta com a Taxa de Entrega de Pacotes (PDR, em inglês, *Packet Delivery Ratio*) em redes de comunicação, pois uma latência elevada pode resultar na perda de pacotes devido a atrasos na recepção ou no processamento. A PDR é definida como a razão entre os pacotes recebidos e os pacotes enviados pelo transmissor (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2023). Em cenários *multihop*, a PDR está diretamente relacionada ao número de saltos intermediários pelos quais um pacote passa antes de chegar ao *gateway*.

No trabalho de (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2023), foram analisados os PDRs resultantes de redes com diferentes números de saltos intermediários. Observou-se que, à medida que o número de saltos aumenta, o PDR diminui. No pior cenário, com 100 dispositivos finais enviando 6 pacotes por meio de 8 saltos, o PDR foi inferior a 10%. Esses resultados evidenciam o desempenho superior das redes LoRaWAN simples. No entanto, para redes com menos dispositivos finais, os PDRs em redes *multihop* se aproximam dos obtidos em redes *singlehop* (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2023).

CONCLUSÃO

A implementação de redes híbridas LoRa Mesh/LoRaWAN aborda problemas de cobertura e escalabilidade nas redes IoT. No entanto, enfrenta desafios como gerenciamento de energia, interoperabilidade e latência. À medida que as redes IoT crescem, é importante continuar inovando e superando esses desafios. Os autores revisados propuseram modelos com resultados promissores, incentivando a busca por melhorias e aplicações expandidas.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Departamento Acadêmico de Eletrônica do Campus de Campo Mourão pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.



REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Nelson C. et al. Proposal of a Hybrid LoRa Mesh / LoRaWAN Network. In: 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT. [S.l.: s.n.], 2020. P. 702–707.
- BANKOV, Dmitry; KHOROV, Evgeny; LYAKHOV, Andrey. On the Limits of LoRaWAN Channel Access. In: 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). [S.l.: s.n.], 2016. P. 10–14.
- BOUGUERA, Taoufik et al. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. **Sensors**, v. 18, n. 7, 2018. ISSN 1424-8220.
- BUTUN, Ismail; PEREIRA, Nuno; GIDLUND, Mikael. Analysis of LoRaWAN v1. 1 security. In: PROCEEDINGS of the 4th ACM MobiHoc Workshop on Experiences with the Design and Implementation of Smart Objects. [S.l.: s.n.], 2018. P. 1–6.
- CASALS, Lluís et al. Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. **Sensors**, v. 17, n. 10, 2017. ISSN 1424-8220.
- CHALACAN, Victor Hugo Lopez. **Performance Evaluation of Long Range (LoRa) Wireless RF Technology for the Internet of Things (IoT) Using Dragino LoRa at 915 MHz**. 2020. Monografia (Tese de mestrado) – University of North Florida.
- COTRIM, Jeferson Rodrigues; KLEINSCHMIDT, João Henrique. An analytical model for multihop LoRaWAN networks. **Internet of Things**, v. 22, p. 100807, 2023. ISSN 2542-6605.
- COTRIM, Jeferson Rodrigues; KLEINSCHMIDT, João Henrique. LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication. **Sensors**, v. 20, 2020.
- DIAS, José; GRILO, António. LoRaWAN multi-hop uplink extension. **Procedia Computer Science**, v. 130, p. 424–431, 2018. ISSN 1877-0509.
- HAXHIBEQIRI, Jetmir et al. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. **Sensors**, v. 18, n. 11, 2018. ISSN 1424-8220.
- LEE, Huang-Chen; KE, Kai-Hsiang. Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018.
- LORA ALLIANCE. **What is LoRaWAN®, A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™**. [S.l.]: LoRa Alliance, 2015.
- RODRIGUES COTRIM, Jeferson. **LoRaWAN Multihop Networks: Classification, Modeling, and Practical Implementation**. Ago. 2021. Tese (Doutorado).
- SHANMUGA SUNDARAM, Jothi Prasanna; DU, Wan; ZHAO, Zhiwei. A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 22, n. 1, p. 371–388, 2020.