

ARTIGO ORIGINAL

Dispositivo para retransmissão de mensagens LoRaWAN

Device for relaying LoRaWAN messages

Samuel Zottis Dal Magro¹, Willingthon Pavan^{id},^{1,2}, Renato Weiller Dallagasperina³,
Felipe Vargas³, José Maurício da Cunha Fernandes^{id},⁴, Carlos Amaral Hölbig^{id},¹

¹Universidade de Passo Fundo, ²International Fertilizer Development Center, ³SensorOn, ⁴Embrapa Trigo

*142006@upf.br; wpavan@ifdc.org; renatoweiller@gmail.com; felipevar26@gmail.com; mauricio.fernandes@embrapa.br; holbig@upf.br

Recebido: 28/02/2022. Revisado: 13/06/2022. Aceito: 10/07/2022.

Resumo

Com o advento da Internet das Coisas (IoT), diversas tecnologias de comunicação surgiram para possibilitar a troca de informações entre dispositivos. A IoT está sendo usada no transporte, na indústria, na automação residencial, entre outras. Na agricultura, esse aporte também está presente devido a busca por melhor qualidade, maior produtividade e menor utilização de agroquímicos. Atualmente, segurança, instalação e confiabilidade estão se tornando mais importantes em comunicações sem fio, despontando, desta forma, as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Com grande potencial de aplicabilidade na agricultura, tecnologias LPWAN, como a LoRa e seu protocolo LoRaWAN estão sendo cada vez mais utilizadas. Alguns limites dessa tecnologia, como a não disponibilidade de saltos entre os dispositivos, desperta a necessidade de um dispositivo para suprir essa lacuna. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo e transparente para redes LoRaWAN capaz de retransmitir mensagens por meio de vários saltos, assim, aumentando o alcance da rede. Três estudos de caso foram realizados com os dispositivos repetidores desenvolvidos. No primeiro estudo foi analisado o comportamento do dispositivo repetidor em relação a retransmissão de mensagens *downlink* e *uplink*. Devido a colisões e perda de mensagens um novo estudo foi realizado, no qual dois repetidores executaram funções distintas na retransmissão de mensagem, assim, obtendo uma menor taxa de perda de pacotes. O último estudo consistiu em uma rede com múltiplos saltos. Como resultado obteve-se um equipamento capaz de retransmitir mensagens *uplink* e *downlink* de forma transparente por meio de vários saltos.

Palavras-Chave: Aumento de alcance; Coleta de dados; Internet das coisas; LoRa; Saltos; Transparente.

Abstract

With the advent of the Internet of Things (IoT), several communication technologies have emerged to exchange information between devices. IoT is being used in transportation, industry, and home automation. In agriculture, this contribution is also present due to the search for better quality, higher productivity, and less use of agrochemicals. Security, installation, and reliability are becoming more important in wireless communications, thus emerging the LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). With great potential for applicability in agriculture, LPWAN technologies, such as LoRa and its LoRaWAN protocol, are increasingly used. Some limits of this technology, such as the non-availability of hops between devices, awaken the need for a device to fill this lacuna. This paper presents the development of a low-cost and transparent device for LoRaWAN networks capable of relaying messages over multiple hops, thus increasing the range of the network. Three case studies were performed with the developed repeater devices. In the first study, the behavior of the repeater device with respect to retransmitting *downlink* and *uplink* messages was analyzed. Due to collisions and message loss, a new study was performed. Two repeaters performed different functions in a message relaying, thus leading to a more effective packet delivery rate. The last case study consisted of a network with multiple hops. After the case studies were performed, it was possible to relay messages transparently over multiple hops.

Keywords: Data collect; Internet of Things; Jumps; LoRa; Range increase; Transparent.

1 Introdução

Com o crescimento acelerado do mercado IoT houve um aumento no desenvolvimento de novas tecnologias em áreas da microeletrônica, na comunicação sem fio e micro-processadores [Dallagasperina \(2017\)](#). Em 2020, o número de conexões IoT globais excede o número de conexões tradicionais (smartphones, laptops e computadores) pela primeira vez [Analytics \(2020\)](#). No ano de 2021, até o mês de setembro (data da realização do estudo), 12,3 bilhões de dispositivos IoT estavam conectados. Até o final do ano de 2022 estima-se que serão 14,5 bilhões de dispositivos IoT ativos e espera-se que em 2025 esse número ultrapasse 27,1 bilhões, conforme descrito na [Fig. 1 \(Analytics, 2021\)](#).

Os avanços na agricultura de precisão com a utilização da Internet das Coisas (IoT) trouxe uma melhora na gestão da agricultura. A IoT possui diversas características, como escalabilidade e interoperabilidade, tornando-a uma parceira para a agricultura de precisão. Existem muitas tecnologias derivadas da IoT que trazem muitos benefícios, tanto na redução de riscos para a utilização da tecnologia, como no melhoramento de sistemas de inspeção/automação [\(Davcev et al., 2018\)](#).

Recentemente, a tecnologia LPWAN ganhou popularidade devido às suas características de comunicação de baixo consumo e de longo alcance. Dispositivos com essa tecnologia podem realizar comunicação em distâncias de até 20 km. Em zonas urbanas, essa distância é reduzida pela presença de obstáculos físicos. Em alguns casos, em condições específicas, o alcance pode superar o limite da tecnologia chegando a centenas de quilômetros. Além disso, devido ao seu baixo consumo, a vida útil dos dispositivos podem chegar a mais de 10 anos e os rádios de transmissão são de baixo custo de aquisição, em comparação com outras tecnologias de comunicação. Com essas características promissoras diversos estudos ([Mekki et al.,](#)

[2019](#), [Chaudhari and Zennaro, 2020](#), [Raza et al., 2017](#), [Song et al., 2017](#), [Nordlöf and Lagusson, 2017](#), [Gaddam and Rai, 2018](#)) estão sendo realizados com as tecnologias LPWAN, podendo ser utilizados *indoor* [\(Haxhibeqiri et al., 2017\)](#), em um ambiente industrial e *outdoor* [\(Davcev et al., 2018\)](#), em uma aplicação na agricultura. A LPWAN é adequada para aplicações IoT que necessitam enviar poucos dados a longas distâncias [\(Mekki et al., 2019\)](#).

A tecnologia de comunicação de longa distância, LoRa, é utilizada na coleta de dados para agricultura, pois a aquisição de dados meteorológicos mais pontuais são condições primárias para muitos sistemas de auxílio à tomada de decisão. Porém, o protocolo de comunicação utilizado pelo LoRa, LoRaWAN, é limitado em relação a sua organização, pois seus dispositivos são organizados na topologia de rede estrela, no qual, um elemento da rede, Gateway, é centralizado. A função do Gateway é de receber informações de outros dispositivos (End-device) de forma direta. Inúmeras razões de falta de conectividade entre o Gateway e end-devices podem ser encontrados em áreas agrícolas, como: a topologia do terreno; acesso à Internet limitado ao escritório da fazenda; e isolamento dos end-devices devido a organização dos mesmo em relação ao gateway. Desta forma, alguns dispositivos podem ficar isolados (perder conexão com o gateway) em relação a outros dispositivos. Para se alcançar maiores distâncias de transmissão o aumento nos níveis de potência acarreta em um aumento no consumo de energia dos dispositivos finais reduzindo a vida útil da bateria.

A tecnologia LoRa é dividida em duas camadas distintas: camada física na qual é realizada a técnica de modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), de comunicação bidirecional e a camada do protocolo MAC, onde se encontra o protocolo LoRaWAN. Na camada física o sinal LoRa gerado pela modulação consiste em pulsos *chirp* de frequência e pode ser personalizado por meio de parâmetros como: 1) *Bandwidth*

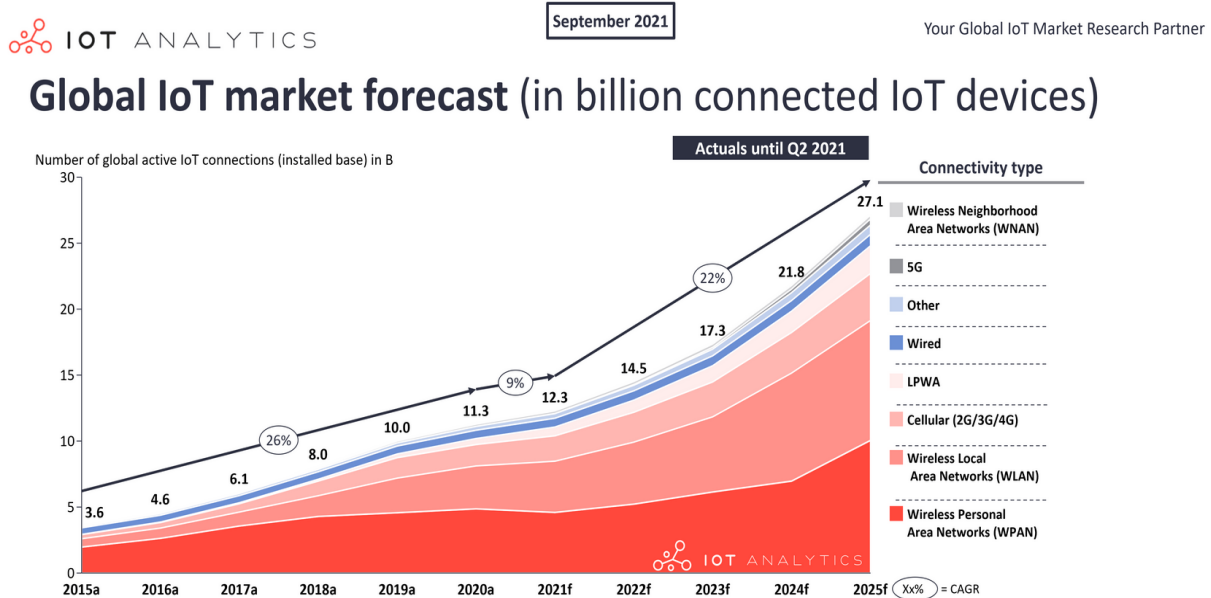


Figura 1: Número de dispositivos IoT globalmente conectados e a distribuição dos dispositivos baseado no tipo de conexão [\(Analytics, 2021\)](#).

(BW) é o parâmetro que indica o intervalo de tempo de variação dos chirps; II) *Spreading Factor* (SF), ou fator de espalhamento, codifica o pulso entre 7 e 12 bits. É um fator que impacta diretamente na comunicação: quanto mais alto o fator de espalhamento mais longo será o seu alcance, menos íngremes serão os chirps e mais baixa será a taxa de dados; III) *Code Rate* (CR) realiza controle essencialmente a quantidade que deve ser corrigida em relação ao erro de encaminhamento da mensagem (Mekki et al., 2019).

O protocolo LoRaWAN utiliza a camada física LoRa e possui diversos recursos importantes de uma rede sem fio, como criptografia, otimização de dados e qualidade de serviço (The Things Network, 2018). É um protocolo de padrão aberto que faz uso dos recursos do módulo LoRa (Peroni De Almeida and Bonaldi Teixeira, 2017). As redes LoRaWAN são geralmente representadas em uma topologia de rede estrela, onde os gateways se localizam centralizados, recebendo os dados dos end-devices. Essa arquitetura de rede oferece um melhor desempenho na comunicação a longa distância e um boa vida útil das baterias (Orange, 2016). Para tornar possível a comunicação em uma rede LoRaWAN são necessários três elementos fundamentais: I) end-devices são dispositivos presentes na rede LoRaWAN que visam o baixo consumo de energia e que podem funcionar como coletores de dados ou atuadores. Os end-devices se comunicam com os gateways, utilizando o protocolo LoRaWAN; II) gateway fazem a comunicação entre duas redes distintas, para que seja possível trocar informações entre as duas extremidades da rede (servidor e end-device). Na rede LoRaWAN os dispositivos finais se comunicam com os gateways, utilizando o protocolo LoRaWAN, sendo que estes se conectam com o servidor a partir de redes de alta largura de banda, como 3G ou WiFi. São chamados também de concentradores, pois recebem todas as informações dos dispositivos finais e transmitem para o servidor (Haxhibeqiri et al., 2018); III) servidor, recebem os dados dos gateways, onde contém aplicações que fazem tratamento desses dados. Os servidores podem ser privados ou públicos, na qual é possível visualizar os dados dos end-devices, fazendo o registro desses dispositivo.

No projeto de Dallagasperina (2017) e posteriormente no trabalho de Zottis Dal Magro et al. (2019), foi desenvolvido uma rede LoRa de mini-estações meteorológicas para coleta de dados para a agricultura, visando baixo custo e baixo consumo de energia. As mini-estações utilizam um microcontrolador Atmega328p, rádio LoRa e sensores para leitura de dados. Os desafios de comunicação citados, isolamento dos dispositivos e falta de comunicação com o Gateway, foram encontrados após alguns testes realizados.

Visando suprir essa lacuna, o objetivo deste trabalho é desenvolver um repetidor de mensagens LoRaWAN de forma transparente, não interferindo nas mensagens entre end-device e gateway. Além disso, o dispositivo deve realizar a retransmissão tanto das mensagens *uplink* como as de *downlink* transmitindo as mensagens com diversos saltos para aumentar o alcance da rede, e de baixo custo econômico.

2 Trabalhos Relacionados

No trabalho de Diop and Pham (2019) e de Dias and Grilo (2018) foram utilizados o mesmo princípio de um protocolo de *multi-hop*, chamado LoRaBlink. Esse protocolo tem seu funcionamento baseado no envio de *beacons* para determinar quem são os dispositivos que estão em seu alcance e qual é a sua distância para o gateway.

A diferença entre os trabalhos é que o projeto desenvolvido por Dias and Grilo (2018), seu protocolo visa uma rede com diversos saltos, utilizando um vetor de endereços. Cada dispositivo na rede LoRaWAN possui uma tabela de roteamento que contém os dispositivos de destino próximos a ele. Essa tabela de roteamento é atualizada através do envio de *beacons* e, assim, é possível verificar os nodos que estão no seu alcance. Os testes realizados com um dispositivo repetidor não levaram em conta o seu consumo de energia do dispositivo.

No projeto de Diop and Pham (2019) a comunicação entre os dispositivos acontece apenas em dois saltos, adicionando um dispositivo entre o gateway e o end-device. O dispositivo repetidor desenvolvido visa o baixo consumo de energia. Para que isso aconteça foi desenvolvido um algoritmo, para o dispositivo repetidor, que primeiramente faz uma varredura na rede LoRaWAN buscando dispositivos que estão ao seu alcance. Após essa varredura o dispositivo entra em modo de baixo consumo, acordando apenas nos horários definidos na etapa de varredura. Os testes de consumo mostraram que o dispositivo repetidor, que recebe os dados de outros dispositivos, é capaz de ficar mais de nove anos de operação com ciclos de três horas, acordando 3 vezes dentro dessas horas.

Já no trabalho de Maziero et al. (2020), foi desenvolvido um repetidor de baixo consumo e baixo custo, utilizando componentes de fácil acesso, pois com o seu uso é descartada aquisição de um gateway, sendo esse um componente de alto valor agregado. O dispositivo criado tem como o objetivo melhorar a taxa de entrega dos pacotes enviados pelos end-devices. O repetidor é totalmente transparente para a rede LoRaWAN, na qual os end-devices transmitem seus dados para o repetidor através do protocolo LoRaWAN e logo são retransmitidos para o gateway. O dispositivo repetidor suporta dispositivos da Classe A, operando somente em uma frequência. O repetidor fica sempre ligado, apenas mudando o estado do módulo LoRa quando for necessário enviar ou receber dados, assim, pode ser alimentado por fontes alternativas, como um painel fotovoltaico. Os testes comparativos realizados por Mazier, ocorreram na Universidade Federal de Santa Maria - UFSM que demonstram a melhora na entrega dos pacotes utilizando um dispositivo repetidor.

Um dispositivo de retransmissão de pacotes LoRaWAN também foi desenvolvido no trabalho de Sisinni et al. (2020). Foram utilizados dispositivos de maior processamento e de custo mais elevado para o desenvolvimento, pois o dispositivo pode receber dados simultâneos, de diversos end-devices. Os pacotes *uplink* recebidos pelo repetidor são reenviados até o gateway. Da mesma forma acontece o *downlink*, após o recebimento da mensagem ela reencaminhada até o dispositivo final. Este trabalho foi implementado em um laboratório industrial e os resultados apresentaram que este equipamento é transparente

em uma rede LoRaWAN e pode ser utilizado no ambiente de teste em que foi realizado.

Os trabalhos relacionados não abordaram dispositivos com mais de um salto entre o gateway e os end-devices sem a utilização de *beacons* para sincronismo. Devido a isso, este trabalho apresenta uma rede LoRaWAN com dois dispositivos intermediários entre o gateway e os end-devices.

3 Dispositivo de repetição de mensagens (*r-node*)

O dispositivo de repetição de mensagens LoRaWAN, *r-node*, tem como princípio a adição de saltos entre end-devices e o gateway. Esse funcionamento da rede se baseia no envio de mensagens dos end-devices em tempos pré-programados, para que não ocorram recebimentos simultâneos de informações no *r-node*. Isso se deve ao fato do dispositivo repetidor possuir somente um rádio de comunicação, assim, possibilitando a transmissão de uma mensagem por vez. O hardware do *r-node* é similar ao hardware utilizado nos end-devices, visando reduzir custos de desenvolvimento. Desta forma, a única semelhança entre os end-devices e repetidores são os componentes eletrônicos, pois a função do *r-node* é a retransmissão dos pacotes LoRaWAN recebidos. O desenvolvimento do dispositivo repetidor seguiu os seguintes conceitos:

- Baixo custo: como o hardware utilizado é similar aos end-devices as características de baixo consumo de energia e baixo custo estão presentes nos repetidores, Fig. 2. O objetivo de utilizar o mesmo hardware se baseia na finalidade de que apenas seja inserido o código específico para cada dispositivo para retransmitir as mensagens recebidas (*r-node*) ou para coletar dados (end-devices)
- Transparente: além de não interferir nas trocas de mensagens entre o gateway e os end-devices, expandindo tão somente o alcance da rede. O *r-node* deve funcionar naturalmente na rede, sem a necessidade de mudança de hardware ou de software do gateway e dos end-devices. Em relação aos end-devices, a única mudança deve ser no tempo de envio diferenciado entre os dispositivos. O dispositivo repetidor não deve ser detectado durante a troca de mensagens.



Figura 2: Dispositivo de Hardware utilizado (SensorOn).

Na Fig. 3, é apresentada a arquitetura LoRaWAN com dois dispositivos repetidores, inseridos de forma trans-

parente, para exemplificar o funcionamento de uma rede com vários *r-nodes* presentes. A linha vermelha representa uma conexão fraca ou inexistente entre os dispositivos. As linhas verdes significam a existência de uma conexão estável e de alta qualidade. As conexões entre os end-devices e o segundo repetidor (Repetidor 2), assim como os end-devices e o gateway, não acontecem devido a distância entre os dispositivos. Nesta arquitetura utilizou-se o gateway RG191, da marca Laird, e o LoRa Server do The Things Network (V3).

3.1 Funcionamento do Dispositivo

O dispositivo (*r-node*), nesta primeira fase do projeto utiliza fonte de energia ilimitada, desta forma, estando sempre ligado, na espera para realizar suas funções. Em trabalhos futuros, estamos projetando soluções de software visando baixo consumo de energia.

3.2 Simples *r-node*

Nesta versão do *r-node*, o dispositivo executa o recebimento e o envio tanto de mensagens *uplink* como de *downlink*. O *r-node* executa suas funções de forma sequencial, com isso, seu funcionamento segue a seguinte lógica:

- Etapa 1 (recebimento de *uplink*): o dispositivo está configurado em modo de recebimento para receber mensagens *uplink*. A frequência e os parâmetros de comunicação já foram configurados e ajustados conforme a configuração dos end-devices.
- Etapa 2 (envio de *uplink*): o repetidor recebe a mensagem, armazena em um vetor para ser retransmitida e muda seu estado para envio, configurando seus parâmetros e frequência para que o pacote seja enviado.
- Etapa 3 (recebimento de *downlink*): após o envio da Etapa 2, ocorre uma nova mudança de estado do dispositivo, entrando em modo de recebimento. Nesta etapa é configurado para o recebimento de *downlink*. O tempo de espera para receber um *downlink* é de 5000 milissegundos.
- Etapa 4: se após o tempo de espera de *downlink* nenhuma mensagem for recebida, o *r-node* entra em modo de recebimento de *uplink* novamente, assim, voltando para a Etapa 1.
- Etapa 5 (envio de *downlink*): se alguma mensagem de *downlink* for recebida, esta será armazenada em um vetor e o estado do dispositivo é alterado para envio de *downlink*. Finalizado o envio o dispositivo volta para a Etapa 1.

3.3 Duplo *r-node*

Nesta versão do dispositivo repetidor foi desenvolvido um algoritmo encarregado de trabalhar com cada tipo de mensagem separadamente, assim, um *r-node* ficou responsável pelo recebimento e envio de mensagens *uplink*, enquanto o outro pelas mensagens *downlink*. No *r-node* *uplink*, é configurada a frequência de recepção de *uplink*. Após o recebimento, a mensagem é enviada, e por fim, o dispositivo volta para o modo na qual aguarda *uplink*

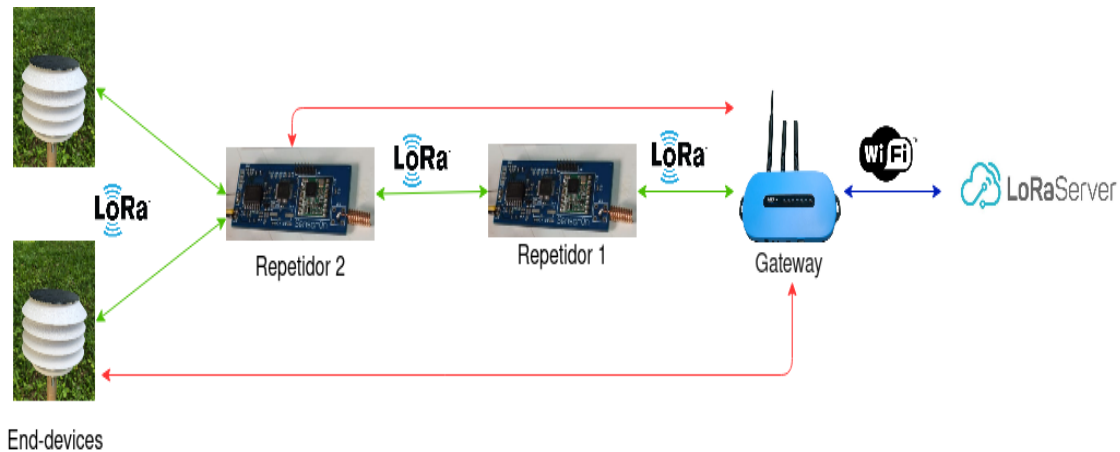


Figura 3: Arquitetura da rede LoRaWAN com múltiplos saltos. Linhas vermelhas representam conexão fraca ou inexistente e linhas verdes conexões estáveis e de alta qualidade.

novamente. O *r-node downlink*, executa o mesmo ciclo, somente alterando as configurações para receber e enviar *downlink*.

O *r-node* foi desenvolvido dessa forma, não utilizando o mesmo microprocessador para controlar os dois módulos, pois o objetivo foi verificar se a entrega dos pacotes melhorou utilizando-se dois módulos. Os resultados comparativos são abordados no próximo capítulo.

3.4 Configuração da rede

O gateway Laird utilizado foi configurado para que as mensagens enviadas pelos end-devices não fossem recebidas, desta forma, garantindo a recepção das mensagens enviadas apenas pelo dispositivo repetidor. A configuração foi realizada no painel de configuração do gateway e desativado o canal da frequência em que os end-devices estavam transmitindo.

Essa configuração foi realizada para garantir a entrega das mensagens do repetidor, pois não foi possível encontrar um local adequado no qual os end-devices não conseguissem enviar seus dados para o gateway e somente fossem recebidos pelo repetidor. Como os dispositivos (*r-node*, end-devices e gateway) estavam localizados dentro de algumas residências em São Jorge, o alcance máximo de recepção do gateway foi de 560 m. Já o repetidor, por possuir uma antena de baixa qualidade, a sensibilidade de recebimento diminuiu. Esses fatores são explicados pelo ambiente urbano onde os dispositivos estavam inseridos, pois o sinal é enfraquecido pelo material em que ocorreu a propagação. Materiais como concreto e paredes de tijolos são obstáculos que enfraqueceram severamente o sinal (Asp et al., 2012).

A rede LoRaWAN com repetidor utilizou as frequências padrões do plano US915 e o fator de espalhamento 9. As configurações de envio dos end-devices é a mesma que a de recebimento do dispositivo repetidor, assim como a configuração de *downlink* entre gateway, repetidor, e repetidor e end-device. Para o repetidor utilizou-se uma frequência diferente de envio de *uplink* em relação aos end-devices, assim garantindo que todas as mensagens recebidas pelo

Network Server fossem enviadas exclusivamente pelo *r-node*.

Foi utilizado a frequência de espalhamento 9 pois foi a configuração que apresentou melhores resultados na entrega das mensagens. Alguns estudos foram realizados com o SF 10, mas nem todas as mensagens enviadas pelos end-devices o *r-node* era capaz de recebê-las. Nos estudos realizados com o SF menor que 9, o alcance observado não passou de algumas dezenas de metros.

3.5 Efetividade dos envios

Para realizar o cálculo de mensagens *uplink* perdidas, foi realizada a subtração das mensagens que foram recebidas pelo *Network Server* e as mensagens *downlink* enviadas automaticamente pelo mesmo. Para o cálculo das mensagens *downlink*, foi desenvolvido um contador interno nos end-devices e definido uma porta de comunicação, assim, quando os *downlinks* foram enviados na porta especificada e recebidos pelos end-devices o contador foi incrementado.

Para analisar a efetividade de transmissão do *r-node*, foi verificado a taxa de perda de pacotes, quanto menor esse valor mais efetivo é o envio das mensagens enviadas pelo dispositivo repetidor. A realização do cálculo da taxa de perda foi realizada pela Eq. (1). A variável LP é relacionada aos pacotes perdidos e variável PR são o total de mensagens enviadas.

$$\text{TaxaPerda} = \frac{LP \times 100}{PR} \quad (1)$$

4 Estudos com *r-node*

Os estudos de caso abordaram diferentes configurações do dispositivo repetidor inserido em uma rede LoRaWAN. O primeiro estudo realizado buscou comprovar se o *r-node* foi capaz de retransmitir mensagens LoRaWAN. No segundo, foi realizado o estudo com dois repetidores, mas

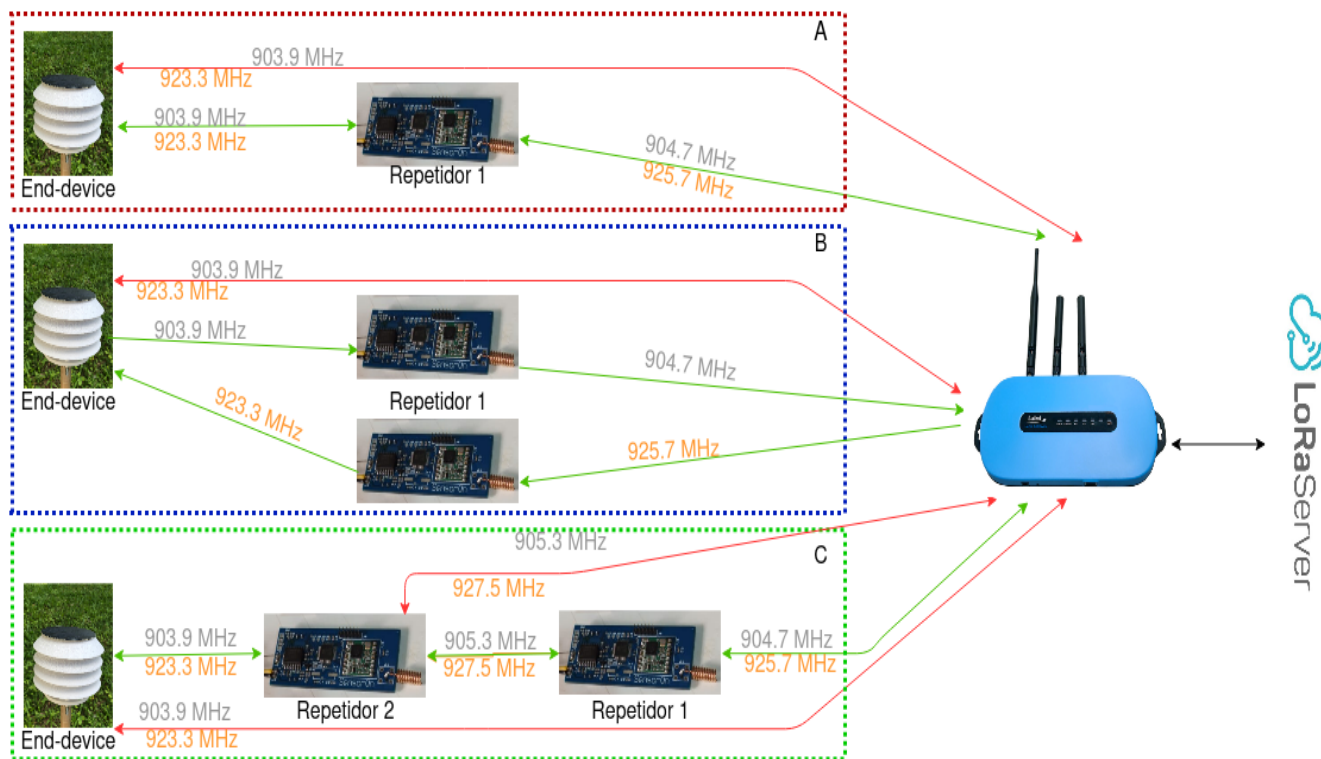


Figura 4: Arquiteturas dos estudos com diferentes frequências para simular ausência de alcance e uso dos repetidores. As frequências alaranjadas são correspondentes às frequências de *downlink* e as escritas em cinza de *uplink*. Linhas vermelhas representam conexão inexistente e linhas verdes, conexões estáveis e de alta qualidade.

um responsável somente para mensagens *uplink* e o outro para mensagens *downlink*. No terceiro estudo, dois dispositivos repetidores foram colocados entre os end-devices e o gateway para verificar a possibilidade de múltiplos saltos utilizando os *r-nodes*.

Os estudos foram realizados com os dispositivos localizados no interior de algumas casas no município de São Jorge, a comunicação entre os elementos da rede (gateway, end-devices e repetidor) precisou estar em distâncias menores para que fosse possível enviar os pacotes. Isso foi comprovado pelo fato de que mensagens *downlink* não eram retransmitidas pelo *r-node* com o RSSI menor que -115 . Esse fator indica a força/intensidade do sinal recebido, quanto menor, pior é a qualidade do sinal.

Na Fig. 4, são apresentadas as três configurações de rede que foram utilizadas para a realização dos estudos. O retângulo (A) é a configuração de rede utilizada no estudo em que o *r-node* opera com o envio e recebimento de mensagens *uplink* e *downlink*. O retângulo (B) foi utilizado no estudo com dois *r-nodes* com funções distintas, um operando apenas com mensagens *uplink* e o outro apenas com mensagens *downlink*. Por fim, o último estudo, retângulo (C), foi a inserção de dois *r-nodes* conectados sequencialmente. As comunicações entre os elementos da rede são representadas por setas, na qual, as setas em vermelho indicam falta de comunicação e as verdes conexões, estáveis e de alta qualidade entre os dispositivos.

4.1 *r-node* operando com *downlink* e *uplink*

Neste estudo, foi inserido um dispositivo repetidor entre os end-devices e o gateway (Fig. 4) retângulo vermelho (A). Para a realização desse estudo foram feitas duas abordagens, na qual a primeira utilizou-se três end-devices e na segunda dois end-devices. Os dados foram enviados em intervalos de tempos diferentes para que não houvesse colisão de pacotes, pois o *r-node* é capaz de enviar apenas uma mensagem por vez. Para testar a efetividade do repetidor, o canal de comunicação (frequência de comunicação) entre end-device e gateway foi suspensa, assim, simulando um ambiente sem comunicação.

A disposição dos dispositivos para este estudo realizou-se da seguinte forma (Fig. 5). Os end-devices ficaram a 240 m do repetidor e o repetidor ficou a 240 m do gateway, mas o end-devices e o gateway não possuíam comunicação.

O estudo realizado com três EDs totalizou 580 mensagens enviadas e 27 perdas, com uma porcentagem de perda de 4,65% para mensagens *uplink*. Para *downlink* 18 mensagens foram enviadas e 1 perda, com porcentagem de 3,7%. O estudo realizado com dois EDs enviou 587 mensagens com 4,25% das mensagens perdidas, em um total de 25 das mensagens não entregues. Em relação às mensagens *downlink*, neste estudo, apresentou maior taxa de perda de pacotes, o *r-node* conseguiu enviar 4 de 10 pacotes recebidos. Essa maior taxa de perda deve ter ocorrido devido às condições climáticas, chuva, nos dias em que foram realizados os estudos. O efeito da chuva é um

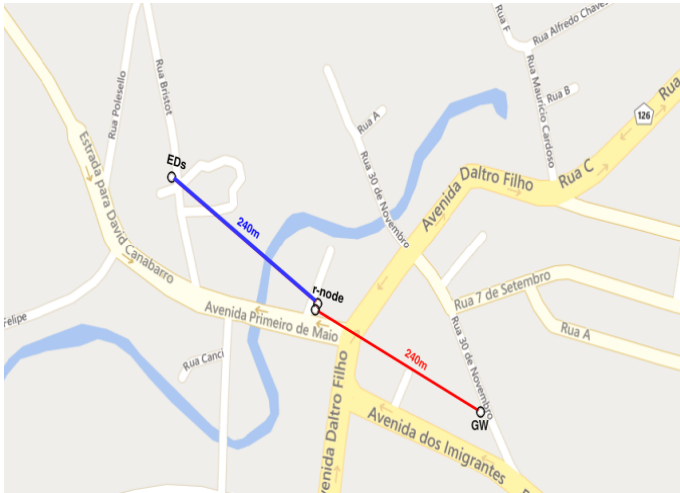


Figura 5: Disposição dos dispositivos para a realização do primeiro estudo.

fator que afeta a atenuação de sinais propagados (Elijah et al., 2021).

4.2 Estudo com *r-nodes* operando separadamente com um tipo de mensagem: *downlink* ou *uplink*

Após a análise de comportamento realizada no primeiro estudo verificou-se que ocorreram colisões de pacotes devido ao funcionamento do repetidor, pois o *r-node* é capaz de trabalhar com uma mensagem de cada vez. Em virtude disso, foram colocados dois dispositivos repetidores no mesmo local (Fig. 6), mas com funcionalidades diferentes, Seção 3.3. A rede foi organizada exatamente como a do primeiro estudo para que fosse possível realizar a comparação de pacotes perdidos (Fig. 5).

Para este estudo, realizou-se a configuração de repetidores (Fig. 4, retângulo (B)) um responsável por mensagens *uplink* e outro por mensagens *downlink*. A distância entre os dispositivos permaneceu a mesma e a quantidade de pacotes enviados ficou próximo do realizado no primeiro estudo com dois EDs.

O estudo, portanto, contou com o envio de 592 mensagens. A perda total de pacotes foi de 21, com uma porcentagem de 3,54%. Foram enviados 12 *downlinks*, com um pacote perdido.

4.3 Estudo com dois *r-nodes* sequencialmente

Este estudo consistiu na utilização de dois repetidores, fazendo as funções de *uplink* e *downlink*, ligados sequencialmente. Foi testado apenas a funcionalidade dessa organização de rede, pois em alguns casos somente um repetidor não terá o alcance necessário para que as mensagens possam chegar até o gateway.

Na Fig. 7, os EDs estão localizados a 240 m do *r-node* 2. O *r-node* 2 está a 230 m do *r-node* 1 que por fim, está a 7 m do gateway. Os dispositivos foram organizados dessa forma para tentar manter o padrão nas distâncias de co-

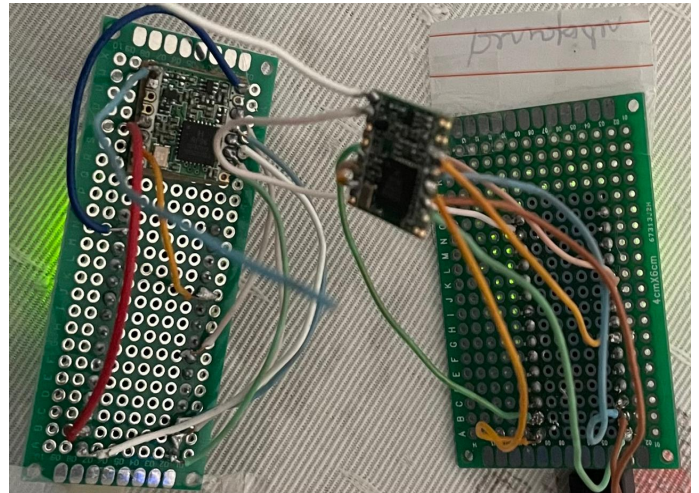


Figura 6: Dispositivos de retransmissão de mensagens *uplink* e *downlink*.

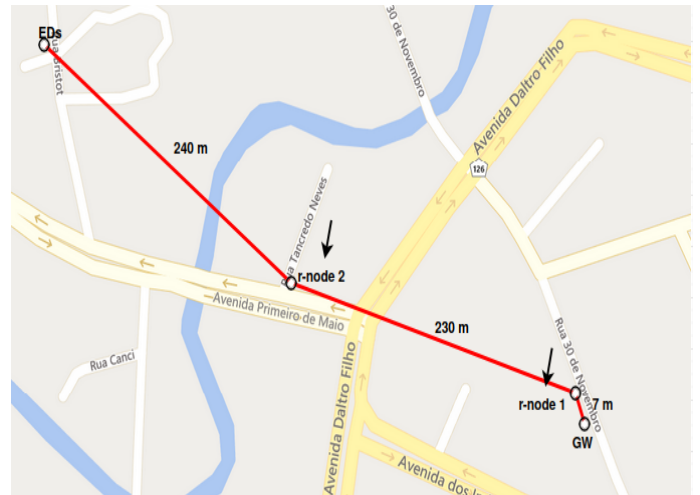


Figura 7: Rede com dois dispositivos repetidores conectados sequencialmente.

municação em relação aos outros estudos.

Para o envio das mensagens *uplink*, devido ao problema de comunicação, os dispositivos foram configurados como relatado na Seção 3.4. O diferencial para realizar esse estudo foi a configuração das frequências do gateway, para que o *Network Server* fosse capaz de receber somente mensagens do *r-node* 1, assim, foram desativadas as frequências dos EDs e a frequência do *r-node* 2.

Na Fig. 4, as conexões em vermelho representam a falta de conectividade entre os elementos da rede. Enquanto as verdes são os dispositivos que possuem conectividade. As conexões em cinza representam as frequências das mensagens *uplink* e as laranjas são as frequências de *downlink*. Para a rede com dois repetidores, foi necessário a desativação das frequências no gateway, tanto a dos EDs como a do Repetidor 2, para garantir o recebimento das mensagens enviadas pelo Repetidor 1 ao LoRa Server. Em ambas as mensagens, *uplink* e *downlink*, obteve-se sucesso na

entrega.

5 Conclusão e trabalhos futuros

As redes de coletas de dados e transmissão estão cada vez mais presentes na coleta dos mais variados dados em diferentes contextos de utilização. Na agricultura, o uso da Internet das Coisas permite a obtenção de melhores rendimentos, aumentando a eficiência produtiva, assim, ajudando no problema gerado pela expansão populacional. LoRaWAN, apesar da baixa taxa de transmissão de dados, é considerada a rede mais adequada para LPWANs em aplicações IoT na agricultura. Porém, problemas de comunicação em áreas remotas e difícil acesso são encontradas em algumas propriedades agrícolas. Problemas como relevo acentuado e isolamento de dispositivos coletores de dados impedem a utilização dessa tecnologia.

Sendo assim, por meio desse trabalho, foi possível desenvolver um dispositivo, *r-node*, transparente para a rede LoRaWAN, capaz de retransmitir as mensagens e aumentar o alcance da rede. O repetidor desenvolvido conseguiu retransmitir tanto mensagens *uplink* como mensagens *downlink* nas duas janelas de tempo padrões para dispositivos end-devices LoRaWAN. Devido a característica do *r-node* de poder trabalhar com apenas uma mensagem de cada vez, foi possível observar que adicionando um end-device aumentou a perda de pacotes, *uplink*. Esse aumento foi gerado, devido a maior colisão de pacotes na hora do recebimento pelo repetidor.

Ao evidenciar esse problema gerado pela colisão, um novo algoritmo foi desenvolvido para que o *r-node* pudesse trabalhar apenas com um tipo de mensagem, *uplink* ou *downlink*. Assim, após a configuração dos dispositivos, cada qual responsável por um tipo de mensagens, foi possível concluir que houve uma redução da perda de pacotes *uplink* de 4,25% para 3,54%, no teste com dois end-devices.

O presente trabalho mostrou a possibilidade de inserir dois dispositivos repetidores (*r-node*) na rede LoRaWAN. O teste realizado levou em consideração apenas se foi ou não possível enviar dados com dois *r-nodes* presentes na rede. Tanto mensagens *uplink* como mensagens *downlink* foram possíveis ser retransmitidas, assim, podendo aumentar ainda mais o alcance da rede.

Como trabalho futuro, propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo visando a eficiência energética, assim, podendo funcionar com baterias e flexibilizando sua utilização. Esse dispositivo fará a utilização de um componente controlador de tempo para poder armazenar os horários em que as mensagens foram enviadas pelos end-devices e recebidas pelo *r-node*. Desse modo, torna-se viável a utilização do repetidor em áreas agrícolas.

Referências

- Analytics, I. (2020). State of the iot 2020: 12 billion iot connections, surpassing non-iot for the first time. Disponível em <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>.
- Analytics, I. (2021). State of iot 2021: Number of connected iot devices growing 9% to 12.3 billion globally, cellular iot now surpassing 2 billion. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.
- Asp, A., Sydorov, Y., Valkama, M. and Niemelä, J. (2012). Radio signal propagation and attenuation measurements for modern residential buildings, 2012 IEEE Globecom Workshops, IEEE, pp. 580–584. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2012.6477638>.
- Chaudhari, B. S. and Zennaro, M. (2020). *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04787-8>.
- Dallagasperina, R. W. (2017). *Uma plataforma de comunicação universal utilizando protocolo zigbee*, Master's thesis, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, Brasil. Disponível em <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/27>.
- Davcev, D., Mitreski, K., Trajkovic, S., Nikolovski, V. and Koteli, N. (2018). IoT agriculture system based on LoRaWAN, *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems – Proceedings, WFCS*. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2018.8402368>.
- Dias, J. and Grilo, A. (2018). LoRaWAN multi-hop uplink extension, *Procedia Computer Science*, Vol. 130, Elsevier BV., pp. 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.063>.
- Diop, M. and Pham, C. (2019). Increased flexibility in long-range IoT deployments with transparent and lightweight 2-hop LoRa approach, *IFIP Wireless Days*. <https://doi.org/10.1109/WD.2019.8734228>.
- Elijah, O., Rahim, S. K. A., Sittakul, V., Al-Samman, A. M., Cheffena, M., Din, J. B. and Tharek, A. R. (2021). Effect of weather condition on lora iot communication technology in a tropical region: Malaysia, *IEEE Access* 9: 72835–72843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3080317>.
- Gaddam, S. C. and Rai, M. K. (2018). A comparative study on various LPWAN and cellular communication technologies for IoT based smart applications, 2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research, ICETIETR 2018. <https://doi.org/10.1109/ICETIETR.2018.8529060>.
- Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I. and Hoebeke, J. (2018). A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. <https://doi.org/10.3390/s18113995>.
- Haxhibeqiri, J., Karaagac, A., Van den Abeele, F., Joseph, W., Moerman, I. and Hoebeke, J. (2017). Lora indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study, 2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA), IEEE, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247601>.
- Maziero, L., Barriquello, C., Marchesan, T. B., Carloto, F. G. and Vizzotto, W. D. (2020). Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia.

- Disponível em https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/553/2020/07/91663-field_submission_abstract_file2.pdf.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. and Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT Express*. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.
- Nordlöf, J. and Lagusson, P. (2017). A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard, *Technical report*, KTH Royal Institute of Technology, School of Industrial Engineering and Management. Disponível em <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1141920/fulltext01.pdf>.
- Orange (2016). LoRa Device Developer Guide: Orange Connected Objects & Partnerships, *Technical report*, Orange. Disponível em <https://developer.orange.com/od-uploads/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf>.
- Peroni De Almeida, J. V. and Bonaldi Teixeira, G. (2017). Rede LORA® e protocolo LORAWAN® aplicados na agricultura de precisão no brasil, *Technical report*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. Disponível em https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16191/1/PG_COELE_2017_2_01.pdf.
- Raza, U., Kulkarni, P. and Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview, *ieee communications surveys & tutorials* **19**(2): 855–873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>.
- Sisinni, E., Ferrari, P., Fernandes Carvalho, D., Rinaldi, S., Marco, P., Flammini, A. and Depari, A. (2020). LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **16**(8). <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2958620>.
- Song, Y., Lin, J., Tang, M. and Dong, S. (2017). An internet of energy things based on wireless lpwan, *Engineering* **3**(4): 460–466. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.011>.
- The Things Network (2018). LoRaWAN Overview. Disponível em <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>.
- Zottis Dal Magro, S., Pavan, W., Fernandes, J. M., Weiller Dallagasperina, R. and de Vargas, F. (2019). Sensoriamento remoto utilizando protocolo de comunicação lorawan. Universidade de Passo Fundo.