

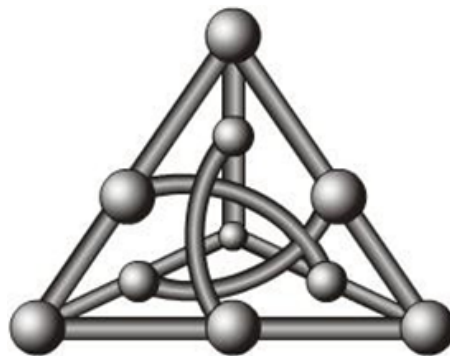
---

# **Avaliação da Tecnologia LoRa em Cenários de IoT na Suplementação de Bovinos de Corte**

---

**FACOM**

**Faculdade de Computação Universidade Federal de Mato  
Grosso do Sul**



Aluno: Jorcel Martins de Lima

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ribeiro dos Santos

Coorientador: Dr. Camilo Carromeu

Área de Concentração: Tecnologias Computacionais para

Agricultura e Pecuária

19 de Novembro de 2024

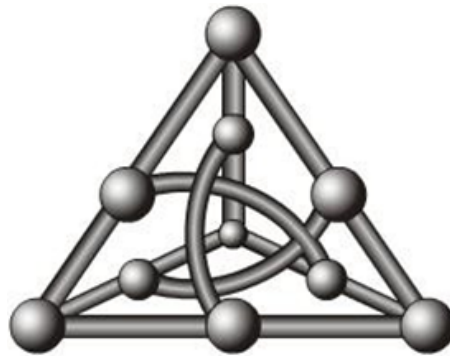
---

# **Avaliação da Tecnologia LoRa em Cenários de IoT na Suplementação de Bovinos de Corte**

---

**FACOM**

**Faculdade de Computação Universidade Federal de Mato  
Grosso do Sul**



Aluno: Jorcel Martins de Lima

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ribeiro dos Santos

Coorientador: Dr. Camilo Carromeu

Área de Concentração: Tecnologias Computacionais para  
Agricultura e Pecuária

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Mestrado Profissional em  
Computação Aplicada da Faculdade  
de Computação da Universidade  
Federal de Mato Grosso do Sul.

19 de Novembro de 2024

*Ao irmão, Raimundo (in memoriam).*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela sabedoria, força e saúde que recebi quando mais precisava, não me deixando desistir.

Agradeço aos meus pais, Damião Victor de Lima e Maria Martins de Lima, e a toda minha querida família e amigos pelo amor e apoio inabaláveis, que me guiaram por esta jornada.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Santos que aceitou o convite para caminhar comigo pela estrada do conhecimento. Obrigado por me mostrar que o conhecimento é um processo, que ouvir o outro é o caminho da verdadeira empatia. Agradeço por não desistir do desafio que era meu e se tornou nosso em tantos momentos. Obrigado por partilhar tanto a sua sabedoria, expertise.

Agradeço ao Dr. Camilo Carromeu, Dra. Hana Karina Salles Rubinsztein e Dr. Guilherme Augusto Defalque por terem aceitado participar da banca e pelas valiosas contribuições para o trabalho.

Agradeço Ao Me. Ricardo Espindola de Aguiar da Indext, pela contribuição inestimável em parte da documentação para realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos do LSCAD, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço de coração aos estimados professores da FACOM, pelos conhecimentos transmitidos.

Obrigado a todas as pessoas que contribuíram para o meu sucesso e para o meu crescimento como pessoa. Sou o resultado da confiança e da força de cada um de vocês.

## **Resumo**

*Com o aumento da demanda por recursos e alimentos e diante de problemas como as mudanças climáticas que impactam a produção, as tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e redes sem fio de baixa potência e longa distância surgiram como ferramentas tecnológicas que podem auxiliar no atendimento dessas demandas. Na pecuária de precisão, os dispositivos IoT possuem várias aplicações: rastreamento, estimativas de peso, bem-estar animal e alimentação. A atividade de suplementação (parte das atividades de alimentação do gado) consiste em fornecer suplementos alimentares além da forragem disponível para o rebanho. A suplementação é uma atividade crucial para atingir as metas de qualidade e produtividade. Existem alimentadores automáticos programáveis (Programmable Automatic Feeders - PAFs) que proporcionam uma suplementação mais assertiva e com pouca intervenção humana. Estas máquinas contam com recursos tecnológicos para distribuir os suplementos, adquirir, processar e enviar dados. Esta dissertação de mestrado apresenta o trabalho sobre simulação com experimentos de cenários de suplementação pecuária bovina para poder entender limitações da tecnologia e projetar sua expansão no futuro. A simulação foi realizada usando o software Network Simulator (NS-3) para avaliar o desempenho e escalabilidade da tecnologia LoRaWAN, que é usada nos PAFs.*

## **Abstract**

*With the increase in demand for resources and food and in the face of problems such as climate change that impact production, Internet of Things (IoT) technologies, and low-power, long-distance wireless networks (LPWANs) have emerged as technological tools that may assist in addressing these demands. IoT devices have multiple applications in precision livestock: tracking, weight estimation, animal welfare, and feeding. Supplementation activity (part of livestock feeding activities) consists of providing feed supplements in addition to the forage available to the herd. Supplementation is a crucial activity to achieve quality and productivity goals. There are programmable automatic feeders (PAFs) that provide more assertive supplementation and with little human intervention. These machines have technological resources to distribute supplements, acquire, process, and send data. This master thesis presents a research work on network simulation on cattle supplementation scenarios in order to understand limitations of the technology and project its expansion in the future. The simulation was carried out using Network Simulator (NS-3) software to evaluate the performance and scalability of LoRaWAN technology, which is used in PAFs.*

# Sumário

1. Introdução.....	9
2. Tecnologia LoRa e LoRaWAN.....	11
2.1 Classes LoRaWAN.....	12
2.1.1 Dispositivos Finais Bidirecionais (Classe A).....	12
2.1.2 Dispositivos Finais Bidirecionais com Slots Programados (Classe B).....	13
2.1.3 Dispositivos Finais Bidirecionais com Slots de Recepção Máximos (Classe C).....	13
2.2 Modulação LoRa.....	13
2.3 Colisões de Dados e Ortogonalidade do Fator de Dispersão.....	16
2.4 A Capacidade de uma Rede LoRaWAN.....	17
2.5 Considerações Finais do Capítulo.....	17
3. Suplementação de Rebanhos de Bovinos.....	18
3.1 Estratégias de Suplementação nas Fases de Criação de Bovinos.....	18
3.1.1 Suplementação na Fase de Cria.....	19
3.1.2 Suplementação na Fase de Recria.....	19
3.1.3 Suplementação na Fase de Terminação.....	20
3.1.4 Confinamento.....	20
3.2 Alimentador Automático para Suplementação de Rebanhos de Bovinos.....	21
3.4 Considerações Finais do Capítulo.....	23
4. Trabalhos Relacionados.....	25
4.1 Simulação e Avaliação da Rede LoRaWAN.....	25
4.2 Síntese dos Trabalhos Relacionados.....	30
5. Avaliação da Tecnologia LoRa em Cenários de Suplementação de Bovinos.....	34
5.1 Infraestrutura de Simulação.....	34
5.2. Cenários e Experimentos.....	35
5.3 Resultados da Simulação.....	38
5.4 Projeto dos Modelos de Predição.....	41
5.5 Considerações Finais do Capítulo.....	45
6. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	46
7. Referências Bibliográficas.....	47

## **Lista de Quadros**

Quadro 1: Análise comparativa entre os artigos.....	32
---	----



## Lista de Figuras

Figura 1: Pilha de tecnologia LoRaWAN.....	12
Figura 2: Arquitetura da rede LoRaWAN.....	14
Figura 3: Comparação de fatores de espalhamento LoRa SF 7 a SF 12.....	15
Figura 4: Alimentador automático programável PAF.....	22
Figura 5: Comparação de tecnologias de telecomunicações.....	27
Figura 6: Infraestrutura de simulação.....	34
Figura 7: Local dos experimentos fazenda escola – UFMS.....	35
Figura 8: Cenários de simulação.....	36
Figura 9: Pacotes Recebidos versus Distância de um nó.....	38
Figura 10: Gráfico Pacotes Recebidos versus Intervalo de Envio de um nó.....	39
Figura 11: Pacotes Recebidos versus Distância de 10 nós.....	39
Figura 12: Pacotes Recebidos versus Intervalo de Envio de 10 nós.....	40
Figura 13: Pacotes Recebidos versus Distância de 100 nós.....	40
Figura 14: Pacotes Recebidos versus Intervalo de Envio de 100 nós.....	41

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Fatores de propagação LoRa.....	16
Tabela 2: Parâmetros camada física LoRa para simulações BER.....	26
Tabela 3: Cenário dos experimentos.....	37
Tabela 4: Associação entre variáveis e dos parâmetros utilizados nos modelos de predição.....	42
Tabela 5: Modelos de predição com 1 nó.....	42
Tabela 6: Modelos de Predição com 10 nós.....	43
Tabela 7: Modelos de Predição com 100 nós.....	43

## Glossário

**ALOHA** - *Advocates of Linux Open-source Hawaii Association*, é um protocolo de acesso múltiplo que permite que os dados sejam transmitidos através de um canal de rede pública. Opera dentro da subcamada de Controle de Acesso Médio (MAC) do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI).

**AS** - *Application Server*, processa mensagens de dados específicas do aplicativo recebidas de dispositivos finais. Os dados coletados podem ser interpretados aplicando técnicas como machine learning e inteligência artificial para resolver problemas de negócios.

**BACKHAUL** - Uma conexão de backhaul é um componente de rede que conecta uma rede local a uma rede central ou backbone. As conexões de *backhaul* podem ser feitas de cobre, fibra ou links sem fio.

**BER** - *Bit Error Rate*, é a medida de qualidade fundamental de um enlace digital de telecomunicações e pode ser expressa como a relação entre o número de *bits* recebidos com erro e o número total de *bits* transmitidos.

**CHIRP** - *Compressed High Intensity Radar Pulse*, são essencialmente ondas de pulsos variantes em frequência ao longo do tempo.

**CR** - *Code Rate*, verificação de código de paridade.

**CSS** - *Chirp Spread Spectrum*, técnica de espalhamento espectral que usa pulsos de CHIRP modulados linearmente em frequência de banda larga para codificar informações.

**ERB** - *Estação Rádio Base*, é a repetidora da informação de voz e dados de controle por meio de um sinal eletromagnético.

**GATEWAY** - O *gateway* recebe mensagens LoRa de dispositivos finais e simplesmente as encaminha para o servidor de rede LoRaWAN. Os gateways são conectados ao Network Server usando um *backhaul* como links de celular (3G/4G/5G), WiFi, Ethernet, fibra óptica ou rádio de 2,4 GHz.

**IoT** - *Internet of Things*, A Internet das Coisas descreve a rede de objetos físicos incorporados a sensores, software e outras tecnologias com o objetivo de conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet.

**ISM** - *Industrial, Scientific and Medical*, faixa ou canal de radiofrequências em aplicações com fins industriais, científicos e médicos, isenta de licença.

**LORA** - *Long Range*, é uma tecnologia de modulação de Rádio Frequência (RF) para redes de longa distância.

**LORAWAN** - *Long Range Wide Area Network*, LoRa Alliance a descreve a como um protocolo de rede de baixa potência e ampla área (LPWAN) projetado para conectar sem fio coisas operadas por bateria à internet em redes regionais, nacionais ou globais e atende aos principais requisitos da Internet das Coisas (IoT), como comunicação bidirecional,

**LPWAN** - *Low Power Wide Area Network*, são redes sem fio com foco em aplicações de baixo consumo de energia e que operam em uma área extensa.

**NS** - *Network Server*, recebe as mensagens transmitidas pelos *gateways* e remove mensagens com

pacotes duplicados (vários *gateways* podem receber a mesma mensagem e transmiti-las para a mesma rede servidor). Em seguida, o Network Server autentica a mensagem graças a uma chave AES de 128 *bits* chamada NwkSKey (chave de sessão de rede).

**PAFs - AFS - Programmable Automatic Feeders**, são máquinas que suplementam o gado de forma automática, em períodos previamente programados.

**PHY - Camada física LoRa**, modula sinais em sub-bandas de rádio da faixa de frequências não licenciadas ISM (Industrial, Scientific and Medical) na ordem dos MHz.

**RF - Radiofrequência**, é uma tecnologia que utiliza ondas eletromagnéticas para transmitir dados, voz e informações entre dispositivos.

**SF - Spreading Factor**, Baixos fatores de espalhamento fornecem alta taxa de dados e exigem menos tempo no ar, e grandes fatores fornecem baixas taxas de dados e exigem mais tempo no ar (TOA).

**SNR - Signal-to-Noise Ratio**, é a relação entre o sinal de potência recebido e o nível de potência do piso de ruído.

**TOA - Time on Air**, é o intervalo entre a transmissão e a recepção de um pacote.

**6LoWPAN - IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks**, é um protocolo que foi criado por um grupo de trabalho do Internet Engineering Task Force (IETF) responsável por desenvolver meios que permitam pacotes do tipo IPv6 serem transmitidos e recebidos dentro de uma rede baseada no protocolo 802.15.4, o que possibilita a existência de muito mais endereços IP, muito utilizado em dispositivos IoT.

## 1. Introdução

Relatórios da Organização das Nações Unidas (ONU) projetam um aumento da população mundial dos 8,1 bilhões para 9,9 bilhões em 2054 (ONU, 2024). Esse aumento populacional aliado a fatores como aquecimento global geram uma demanda crescente sobre o suprimento de alimentos, água e terra cultivável no planeta (FAO, 2012). Diante desses desafios, os agricultores demandam de avanços tecnológicos para adaptar suas práticas a essa realidade, especialmente por meio do surgimento da agricultura inteligente (Haxhibeqiri et. al, 2017).

A agricultura inteligente possibilita que os agricultores possam monitorar a qualidade do solo, da superfície às raízes, comparar áreas, modular a fertilização, analisar padrões históricos e administrar melhor suas plantações em longo prazo. Na pecuária, pode-se melhorar as condições da forragem e do manejo dos animais. Por meio de sensores monitora-se temperatura corporal, estresse, doenças, localização e, conseqüentemente, pode-se aumentar a produtividade. Na bovinocultura já são utilizados dispositivos de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) em diversas aplicações, tais como: rastreabilidade e identificação, controle de peso, bem-estar animal e alimentação (Miles, 2020).

Especificamente sobre a questão da alimentação de bovinos, tem-se a atividade de suplementação que consiste em fornecer suplementos alimentares em adição à pastagem já disponível para o rebanho. Esse suplemento é preparado visando suprir ou complementar as demandas proteicas e/ou energéticas dos animais que, em determinados períodos do ano, podem não ser atendidos unicamente pela pastagem. O material suplementar, por ser uma composição de elementos (fibras, proteínas, minerais, entre outros), possui alto custo e, comumente, é distribuído para os animais de forma controlada e regulada. No contexto da pecuária de precisão, esse controle pode ser realizado por máquinas denominadas Arraçoadores ou Alimentadores Automáticos (Bungenstab, Santos, 2021). Tais máquinas podem, além de controlar a quantidade e horário do fornecimento do suplemento para o rebanho, ter recursos de comunicação visando informar, em tempo real, a situação do fornecimento do suplemento. A comunicação dos dados, nessa aplicação de suplementação bovina, precisa contemplar requisitos como infraestrutura sem fio, cobertura de longas distâncias, funcionamento diante de obstáculos naturais e limitação energética.

O advento de tecnologias de IoT (*Internet of Things*) tornou possível conectar sensores ou equipamentos diretamente à Internet, e também permitiu o desenvolvimento de Redes de

Longa Distância de Baixa Potência (LPWANs). Existem diversas LPWANs disponíveis no mercado, sendo a LoRaWAN (Miles et. al, 2020) uma das tecnologias de redes de longa distância sem fio mais conhecidas e disseminadas.

LoRaWAN adota em sua camada física (PHY) a tecnologia LoRa que é abreviação para longo alcance (*long range*). LoRa é baseada na modulação de espectro de espalhamento (CSS - CHIRP) usado principalmente em sistemas militares e de radar, a fim de permitir longo alcance e imunidade a ruídos. Essas características possibilitam que LoRaWAN seja uma tecnologia factível para aplicações de IoT, em particular onde não há cobertura de outras tecnologias de comunicação de dados, e especialmente na agricultura e pecuária, onde os espaços dedicados às plantações ou aos rebanhos de animais normalmente abrangem uma grande área, permitindo uma ampla distribuição dos sensores (Valente, 2020).

Diante do contexto e aplicação da suplementação para rebanhos de bovinos, este trabalho apresenta uma pesquisa envolvendo a definição de cenários e simulações para utilização da tecnologia de comunicação sem fio *Long Range* (LoRa) em máquinas alimentadoras automáticas. O objetivo é avaliar, por meio do simulador NS-3, as características dessa tecnologia de rede e projetar modelos de predição, para demonstrar como essa tecnologia pode atender às demandas de comunicação de dados na atividade de suplementação bovina, diante de diferentes cenários de utilização.

No desenvolvimento da simulação foram considerados diversos cenários distintos com variação da distância (500 a 15000 mts), tempo (30, 60 e 90s), número de nós (1, 10, 100) e número de *gateways* (1, 2). Além da variação de distância, tempo, número de nós e *gateways*, foram realizadas simulações com parâmetro no código LoRaWAN (parâmetro *Realistic=True*) que considera edificações como obstáculos.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta os conceitos envolvidos e características da tecnologia LoRa e LoRaWAN; o Capítulo 3 abrange os conceitos da suplementação bovina; o Capítulo 4 apresenta trabalhos de pesquisa relacionados com o enfoque desta dissertação; o Capítulo 5 aborda a avaliação da tecnologia LoRa em cenários de suplementação de bovinos e traz os resultados obtidos com a simulação; o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2. Tecnologia LoRa e LoRaWAN

Um dos desafios associados ao uso de tecnologias digitais e à transformação digital do setor agrícola e alimentar é que a cobertura da rede permanece limitada ou inexistente nas áreas rurais (Miles et al., 2020). LoRa (*Long range*) é uma tecnologia de modulação de radiofrequência (RF) para redes de longa distância (*Low power wide area networks* - LPWANs) de baixa potência. O nome LoRa refere-se aos longos *links* de dados que a tecnologia permite. Criado pela Semtech™ para padronizar LPWANs, o LoRa pode fornecer comunicações em longas distâncias: até 3 milhas (5 quilômetros) em áreas urbanas e 10 milhas (15 quilômetros) ou mais em áreas rurais (Lora developers, 2022).

Uma característica fundamental das soluções baseadas em LoRa são requisitos ultra baixos de energia, que possibilita a criação de dispositivos alimentados por baterias que podem durar até 10 anos e serem implantados em uma topologia em estrela.

Sobre estas baterias de longa duração, podemos citar por exemplo, bateria baseada em célula espiral de tamanho C, composição de dióxido de manganês e lítio (Li-MnO<sub>2</sub>) de 3 V e 5.6 Ah, com as dimensões (diâmetro 26,2 mm x 51,5 mm de altura) e também é indicada a bateria em célula de bobina de tamanho C de Cloreto de lítio-tionila (Li-SOCl<sub>2</sub>), de 3,6 V e 7.7 Ah (26.0 mm diâmetro x 49.1 mm de altura) ambas com alta densidade de energia que podem ser se for o caso de aumento de capacidade, acomodadas em manga retrátil. Para auxiliar nos parâmetros de projeto é possível fazer uso de ferramenta online para escolha da aplicação, ambiente e tecnologia a ser utilizada a bateria<sup>1</sup> (Semtech, 2022).

Baseada no protocolo aberto LoRaWAN, a rede atende as necessidades de aplicações que requerem comunicação de longo alcance ou possuam um grande número de dispositivos de baixo consumo de energia e coletam pequenas quantidades de dados (Lora developers, 2022).

A camada física da tecnologia LoRa modula os sinais na sub-banda de rádio isenta de licença ISM (Industrial, Científica e Médica). Para o Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), uma das faixas para ISM é regulado entre 433 – 435 MHz; 902 – 907,5 MHz, 915 - 928 MHz (AU 915 - 928 MHz) (Anatel, 2015) (J. Catalano et. al, 2022). A camada física LoRa é uma técnica de modulação de espalhamento espectral proprietária da Semtech, que usa correção antecipada de erros (*Forward Error Correction* – FEC). Possui uma variante do espalhamento espectral por CHIRP (*Compressed High Intensity*

---

<sup>1</sup> <https://saft4u.saft.com/en/iot/simulator>

*Radar Pulse*), que modula pulsos de CHIRPs em frequência, a fim de codificar a informação (N. Sornin et. al, 2015).

## 2.1 Classes LoRaWAN

Uma rede LoRa distingue entre uma LoRaWAN básica (denominada Classe A) e outras opcionais (Classe B, Classe C), conforme mostrado na Figura 1 (N. Sornin et. al, 2015).

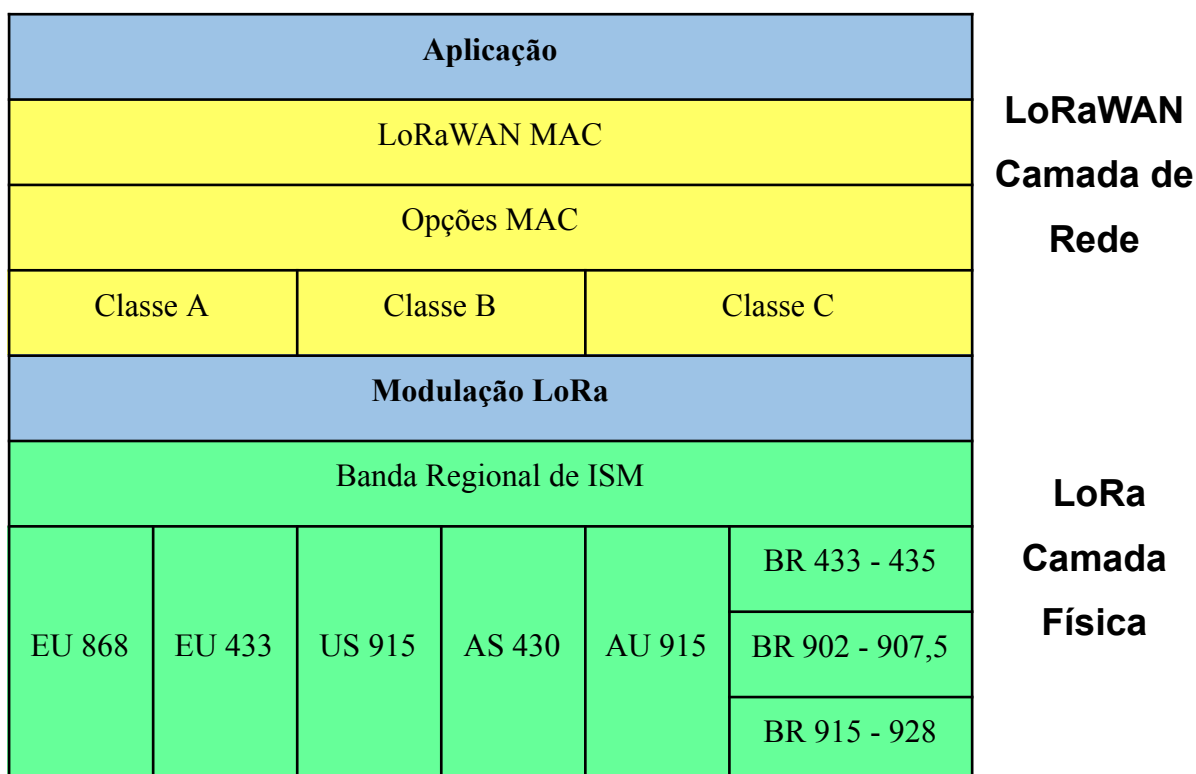


Figura 1: Pilha de tecnologia LoRaWAN, adaptada de (LoRa developers, 2019).

### 2.1.1 Dispositivos Finais Bidirecionais (Classe A)

Os dispositivos finais da Classe A permitem comunicações bidirecionais em que a transmissão de *uplink* de cada dispositivo final é seguida por duas janelas curtas de recebimento de *downlink*. O slot de transmissão agendado pelo dispositivo final é baseado em suas próprias necessidades de comunicação com uma pequena variação baseada em uma base de tempo aleatório (tipo de protocolo ALOHA). Essa operação de Classe A é adequada para aplicativos que requerem apenas comunicação de *downlink* do servidor logo após o dispositivo final ter enviado uma transmissão de *uplink*. As comunicações de *downlink* do



servidor em qualquer outro momento terão que esperar até o próximo *uplink* agendado.

### 2.1.2 Dispositivos Finais Bidirecionais com *Slots* Programados (Classe B)

Os dispositivos finais no modo Classe B fornecem janelas de recebimento programadas regularmente, além daquelas que abrem sempre que um *uplink* no estilo Classe A é enviado para o servidor. Para que o dispositivo final abra sua janela de recebimento no horário agendado, ele recebe um *beacon* sincronizado com o horário do *gateway*. Isso permite que o servidor saiba quando o dispositivo final está escutando para poder iniciar comunicação de *downlink* com o dispositivo.

### 2.1.3 Dispositivos Finais Bidirecionais com *Slots* de Recepção Máximos (Classe C)

Os dispositivos finais da Classe C têm janelas de recepção quase continuamente abertas, fechadas apenas durante a transmissão. O dispositivo final da classe C usará mais energia para operar do que a classe A ou a classe B, mas oferece menor latência para a comunicação entre o servidor e o dispositivo final (N. Sornin et. al, 2015).

## 2.2 Modulação LoRa

A modulação utiliza técnica proprietária de modulação de espectro espalhado, derivada da tecnologia existente *Chirp Spread Spectrum* (CSS). LoRa oferece uma compensação entre sensibilidade e taxa de dados, presente nos dispositivos e servidor denominada *Adaptive Data Rate* (ADR) que opera em um canal de largura de banda fixa de 125 KHz ou 500 KHz (para canais de *uplink*) e 500 KHz (para canais de *downlink*). Além disso, LoRa usa fatores de espalhamento ortogonais (SF). Isso permite que a rede preserve a vida útil da bateria dos nós finais conectados, fazendo otimizações adaptativas dos níveis de energia e taxas de dados de um nó final individual (Lora developers, 2022).

Originalmente, a tecnologia adota uma topologia de rede tipo estrela e se divide em três entidades: dispositivos finais (nós), *gateways* e servidor (NS - Rede e AS - Aplicações). Os dispositivos finais (nós) são sensores de baixa potência que se comunicam com *gateways* usando modulação de rede LoRa. Uma visão geral da arquitetura de rede com *gateways* e servidores é apresentada na Figura 2.

Os *gateways* transmitem quadros de dispositivos LoRaWAN brutos para um servidor

de rede, por meio de uma interface de *backhaul* (*links* de comunicação entre a rede principal e a rede de dispositivos de borda de taxa mais alta), normalmente Ethernet ou 3G, 4G ou atualmente 5G. Os servidores de rede se encarregam de unificar os pacotes enviados pelos nós, e também são responsáveis pela geração dos pacotes que devem ser reenviados. Portanto, o *gateway* é somente um retransmissor dos pacotes bidirecionais (Adelantado; Vilajosana; Martinez, 2017).

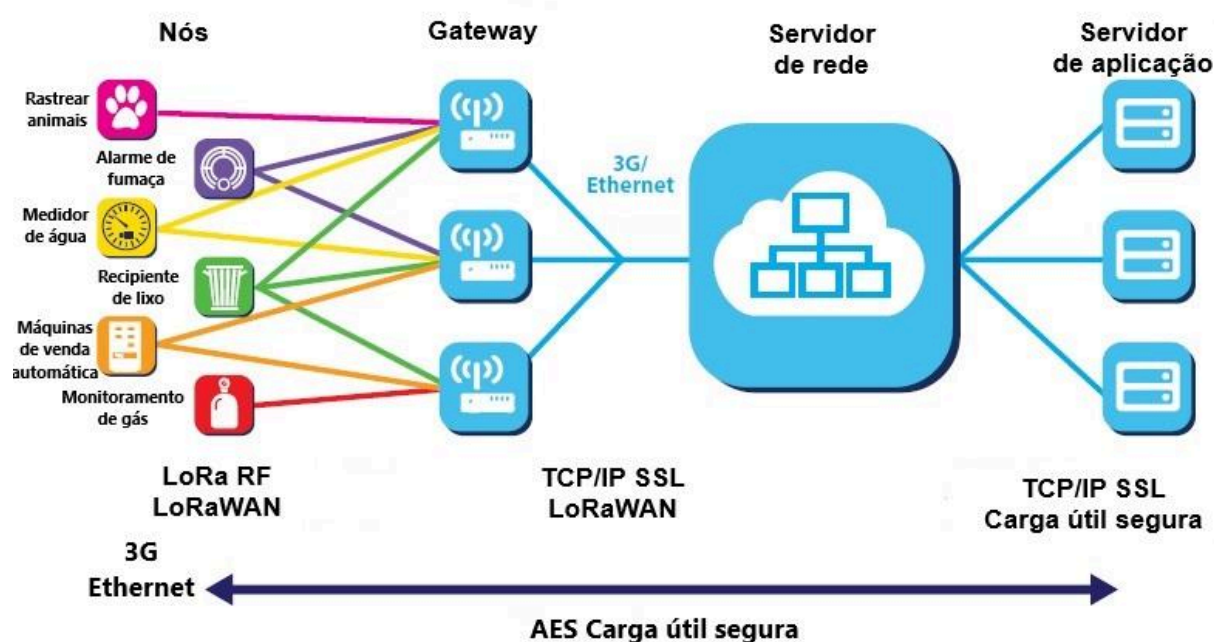


Figura 2: Arquitetura da rede LoRaWAN, adaptada de (LoRa developers, 2019).

Por exemplo, um dispositivo final localizado próximo a um *gateway* deve transmitir dados com um fator de espalhamento baixo, pois é necessário pouca taxa de dados no *link*. No entanto, um dispositivo final localizado a vários quilômetros de um *gateway* precisará transmitir com um fator de espalhamento muito maior e este fator de espalhamento mais alto proporciona maior ganho de processamento.

Em vez de cabeamento, o ar é usado como um meio para transportar ondas de rádio LoRa de um transmissor de RF em um dispositivo IoT para um receptor de RF em um *Gateway* e vice-versa. Em um sistema tradicional ou *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), a fase da portadora do sinal do transmissor muda de acordo com uma sequência de código.

Ao multiplicar o sinal de dados com um padrão de bit predefinido a uma taxa muito mais alta, também conhecido como código de espalhamento (ou sequência de CHIRP), um

o sinal é criado com componentes de frequência mais altos do que o sinal de dados original. Isso significa que a largura de banda do sinal é espalhada além da largura de banda do sinal original. Na terminologia de RF, os *bits* da sequência de código são chamados de CHIRPS (para distinguir o espalhamento usado no transmissor de RF), resultando em uma réplica do sinal de dados original (Lora Developers, 2019).

### Principais Propriedades de Modulação LoRa

Conforme mencionado, o ganho de processamento LoRa é introduzido no canal de RF multiplicando o sinal de dados com um código de espalhamento ou sequência de CHIRP. Ao aumentar a taxa de CHIRP, aumenta-se os componentes de frequência do espectro total do sinal. Em outras palavras, a energia do sinal total agora está espalhada por uma faixa mais ampla de frequências, permitindo ao receptor discernir um sinal com uma relação sinal-ruído (SNR) mais baixa (LoRa developers, 2019).

Em termos de LoRa, a quantidade de código de espalhamento aplicada ao sinal de dados original é chamada de fator de espalhamento (SF). A modulação LoRa tem um total de seis fatores de espalhamento (SF7 a SF12) como demonstrado na Figura 3. Quanto maior o fator de espalhamento usado, mais longe o sinal poderá viajar e ainda ser recebido sem erros pelo receptor de RF, mas a taxa de transmissão de dados será menor.

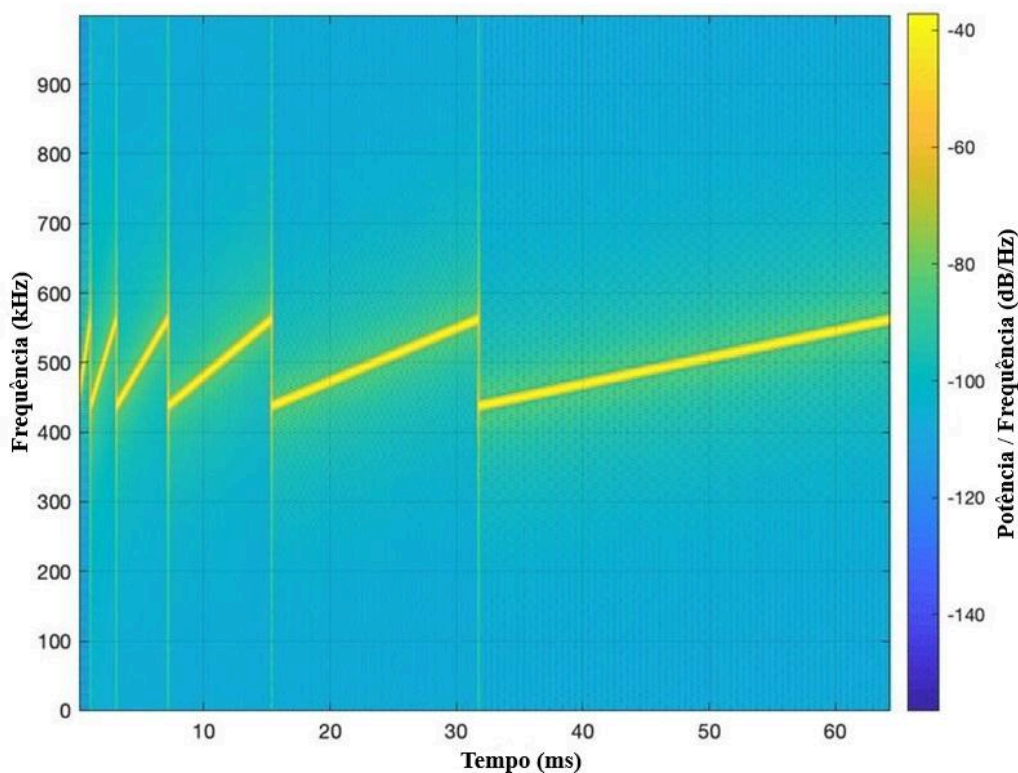


Figura 3: Comparação de fatores de espalhamento LoRa SF 7 a SF 12 (MROUE, 2018).

A Tabela 1 mostra os quatro diferentes fatores de espalhamento [SF7...SF10] que podem ser usados para mensagens *uplink* (UL) em um canal de 125 KHz. As mensagens de *downlink* transmitidas em canais de 500 KHz podem usar todos os seis fatores de propagação disponíveis (SF7...SF12). O quadro mostra a taxa de *bits* equivalente, bem como o alcance estimado (isso depende do terreno). Ele também mostra o tempo de permanência, ou tempo no ar (TOA)<sup>2</sup>, valores para uma carga útil de 11 *bytes*.

Tabela 1: Fatores de propagação LoRa, adaptada de (LoRa developers, 2019).

Fator de espalhamento (Para Upload em 125 KHz)	Taxa de Bits	Alcance (Depende do terreno)	Tempo no Ar (Para uma carga útil de 11 <i>bytes</i> )
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

É importante ressaltar que os fatores de espalhamento da modulação LoRa são inerentemente ortogonais. Isso significa que os sinais modulados com diferentes fatores de propagação e transmitidos no mesmo canal de frequência ao mesmo tempo não interferem entre si. Em vez disso, os sinais em diferentes fatores de espalhamento simplesmente parecem ruídos entre si. Os sinais LoRa são robustos e muito resistentes a mecanismos de interferência dentro e fora da banda. Além disso, os deslocamentos *Doppler* causam um pequeno deslocamento de frequência no eixo do tempo do sinal de banda base. Essa tolerância de deslocamento de frequência atenua a necessidade de fontes de relógio de referência de tolerância rígida e, portanto, torna o LoRa ideal para comunicações de dados de dispositivos móveis (LoRa developers, 2019).

### 2.3 Colisões de Dados e Ortogonalidade do Fator de Dispersão

Com o LoRa, os pacotes que usam diferentes fatores de espalhamento são ortogonais,

<sup>2</sup> Calculadora de tempo no ar pode ser acessado no endereço <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/au915>

o que significa que são invisíveis entre si: eles simplesmente aparecem como ruído um para o outro. Portanto, dois pacotes que chegarem ao mesmo tempo no mesmo canal de recepção em diferentes faixas de espalhamento não irão colidir e ambos serão demodulados pelo CHIRP do modem do *gateway*. No entanto, dois pacotes com o mesmo fator de propagação chegando ao mesmo tempo no mesmo canal podem resultar em uma colisão, se um dos dois pacotes for mais forte em seis dB, ele sobreviverá (LoRa developers, 2019).

## 2.4 A Capacidade de uma Rede LoRaWAN

A capacidade de uma rede LoRaWAN está relacionada em função do número de *gateways*. Para maximizar a capacidade da rede, é essencial usar um mecanismo de taxa de dados adaptável (ADR). O principal objetivo do ADR é economizar a energia da bateria dos nós finais do LoRaWAN. Ao ter os nós finais mais próximos de um *gateway* transmitindo usando o fator de espalhamento mais baixo, seu tempo no ar é minimizado, prolongando assim a vida útil da bateria (LoRa developers, 2019).

## 2.5 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos sobre a tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN. A tecnologia LoRa é uma solução promissora para superar os desafios de conectividade em áreas rurais, onde as redes convencionais muitas vezes não estão presentes. Essa tecnologia é particularmente relevante para o setor agrícola, pois permite a criação de redes privadas que suportam soluções de IoT que podem melhorar a eficiência e a produtividade nas fazendas. Com diferentes classes de dispositivos LoRaWAN (A, B e C), a tecnologia oferece opções variadas de comunicação, adaptando-se às necessidades específicas de cada aplicação em termos de energia, latência e frequência de comunicação. No próximo capítulo, serão abordados o tema da suplementação e as estratégias utilizadas, detalhando as diferentes fases da criação de bovinos. Além disso, será apresentado o funcionamento dos alimentadores automáticos PAFS.

### **3. Suplementação de Rebanhos de Bovinos**

Este capítulo introduz o tópico sobre suplementação de bovinos aplicado no contexto deste trabalho. As próximas seções abordam: estratégias de suplementação, suplementação na fase de cria, recria e engorda e sobre o alimentador automático para suplementação de rebanhos de bovinos (PAF). Todos estes fundamentos auxiliam no entendimento das técnicas de manejo envolvidas na atividade de suplementação de bovinos.

#### **3.1 Estratégias de Suplementação nas Fases de Criação de Bovinos**

O Brasil detém o maior rebanho bovino comercial do mundo, ocupando posição de destaque na produção de carne, com um rebanho de cerca de 202,78 milhões de bovinos, sendo que aproximadamente 42,31 milhões são abatidos anualmente. A maioria desses animais são criados em áreas ocupadas por gramíneas tropicais (ABIEC, 2022).

Nas últimas décadas ocorreram significativos avanços nas tecnologias voltadas para a criação de bovinos de corte. Isso inclui a introdução de gramíneas mais adaptadas, aprimoramento do manejo das pastagens, implementação de suplementação estratégica, adoção de touros com melhor potencial genético para ganho, avanços em biotécnicas de reprodução e aprimoramento do manejo sanitário. É importante ressaltar que a fase de recria e engorda tem testemunhado a maior adesão a essas tecnologias (ABIEC, 2022).

Na pecuária brasileira existem diversas práticas nutricionais que dependem das condições de clima e solo do local onde ocorre a atividade. A produção de bovinos de corte no Brasil é dominada por pastagens, com retorno animal reduzido devido a restrições de forragem. Portanto, o uso de suplementos é uma alternativa que pode trazer ganhos em tecnologia animal, trazendo maior rentabilidade ao sistema produtivo (SENAR, 2018). O principal objetivo da suplementação é corrigir a deficiência de nutrientes na forragem ofertada, promovendo ganho de peso nos animais.

Apesar dos avanços, a bovinocultura ainda enfrenta desafios que precisam ser superados para aprimorar a sustentabilidade dos sistemas de produção. Os principais obstáculos estão associados à fase de cria, como a necessidade de aprimorar o ganho de peso na recria, reduzir a idade da primeira cobertura e melhorar a taxa de fertilidade das vacas de cria (ABIEC, 2022). Estimativas não oficiais indicam que a taxa de prenhez do rebanho gira em torno de 65%, com a idade da primeira cobertura ultrapassando os 3 anos. Para melhorar

essas estimativas, faz-se necessário um planejamento forrageiro e estratégias de suplementação com concentrados ou volumosos para promover fermentação ruminal, obter balanço energético positivo, aumentar ganho de peso e, conseqüentemente, reduzir idade à primeira cobertura, melhorar condição corporal das vacas e sua taxa de prenhez (ABIEC, 2022).

### **3.1.1 Suplementação na Fase de Cria**

A fase de criação é o primeiro passo na produção de carne. No Brasil, a criação é extensiva na maioria dos casos e se caracteriza pela baixa produtividade. Outra forma de aumentar o peso ao desmame e reduzir a idade de abate é o uso de suplementos adicionais para bezerros lactentes, como o chamado *creep-feeding*, (SENAR, 2018).

O *creep-feeding* envolve o fornecimento de concentrado suplementar aos bezerros em cochos privados inacessíveis às vacas. Essa dieta deve conter proteína de alto valor energético e biológico: 75% a 80% de nitrogênio digestível total (NDT) e 16% a 21% de proteína bruta (PB). Portanto, recomenda-se fornecer 0,5% a 1,0% de concentrado de peso vivo por cabeça por dia (SENAR, 2018). Este método aumenta o ganho médio diário (GMD) de peso do bezerro, produzindo animais desmamados mais pesados e familiarizando o animal com a suplementação alimentar intermitente mais tarde na vida (Malau-Aduli e Holman, 2014).

### **3.1.2 Suplementação na Fase de Recria**

A suplementação durante a fase de recria é importante porque durante esta fase os animais experimentam períodos de seca e chuvas. Pereira et al. (2007) concluíram que, mesmo havendo disponibilidade de forragem no período da seca, é necessário a utilização de suplementos, uma vez que o teor de proteína bruta da matéria seca comumente é inferior a 7%.

Com a suplementação, ganhos de 300 a 350 gramas por dia normalmente podem ser alcançados, no peso dos animais, durante a estação seca. Para atender às necessidades do animal, podem ser utilizados suplementos proteicos de baixo suplementação (SENAR, 2018). Por outro lado, durante período de chuvas, observa-se maior quantidade de forragens com alto valor nutricional, baixo teor de fibra indigestível e alto teor de proteína (10% a 12% de proteína bruta), de modo que as metas de desempenho podem ser alcançadas apenas com suplementação mineral, junto a boas práticas relacionadas ao manejo do pasto.

Considerando que o peso à desmama é de 180 kg e o peso inicial do confinamento é de 360 kg, é necessário um ganho de 180 kg durante o processo de recria. Se um animal ganha cerca de 300 g/dia durante a estação seca (180 dias = 54 kg), então o mesmo animal deve ganhar 126 kg (700 g/dia) durante a estação chuvosa (180 dias). Essa suplementação pode ser feita com sais minerais e pastagem adubada, ou com suplementos energéticos de baixo consumo (1 a 2 g/kg de peso vivo) para ganho de peso e entrada precoce desses animais na fase de terminação (SENAR, 2018).

### **3.1.3 Suplementação na Fase de Terminação**

O objetivo da atividade de suplementação na fase de terminação da produção de gado de corte é maximizar o ganho de peso, incentivar a conversão alimentar eficaz e produzir carne premium (Poppi et al., 2018). A fase de terminação ou engorda do gado de corte brasileiro ainda é realizada principalmente a pasto. Portanto, para poder abater animais precoces, com bom acabamento e qualidade da carne, é necessário suplementar o máximo possível ao longo da vida do animal. Antes de adotar uma estratégia de suplementação, a quantidade e a qualidade da forragem disponível devem ser avaliadas. Tipicamente, esses animais receberão um suplemento de 6 a 10 g/kg de peso vivo para alcançar altos ganhos de peso corporal de até 1 kg por dia (SENAR, 2018). Nessa fase é comum o fornecimento de suplemento para aumentar o consumo total de energia, mesmo com reposição parcial no consumo de pasto. O tipo de suplemento aplicado possui teor médio de PB de 20% e alta densidade energética (NDT de 80% em média) (Thiago e Silva, 2001).

### **3.1.4 Confinamento**

A prática da utilização de rebanhos bovinos em confinamento ocorre, geralmente, durante a fase de engorda. Apresenta inúmeras vantagens, dentre as quais podem ser destacadas a redução da idade de abate dos animais, a produção de carne de melhor qualidade, o retorno do capital investido em curto prazo de tempo, o descanso das áreas de pastagem durante a seca, a elevada produção de esterco, o melhor rendimento de carcaça, entre outras (Luchiari Filho, 2000).

Há alguns anos, a prática de confinamento de bovinos de corte, no Brasil, tinha como principal premissa a possibilidade de aproveitar o diferencial de preços da arroba do boi gordo, entre a safra e a entressafra. Isto possibilitava o recebimento de um valor da arroba pelo menos 30% mais alto que o praticado na safra, além de permitir que o produtor produza



animais mais novos, com melhor acabamento de carcaça e com custo relativamente baixo da arroba produzida. Diante dessa condição, o confinamento assume uma posição estratégica nos sistemas de produção, permitindo a manutenção de elevadas taxas de lotação anual e, conseqüentemente, o aumento da produtividade (Santos et al., 2022).

Atualmente, a terminação de bovinos em confinamento deixou de ser apenas uma estratégia para contornar o problema de baixa disponibilidade de forragem. É cada vez mais comum que pecuaristas usem o confinamento para conseguir atingir as metas, e atender as demandas de mercado por animais mais jovens e com melhor acabamento. Outro fato importante é sobre a época de confinamento, que aos poucos vem sendo usado durante todo o ano (Santos et al., 2022).

A mudança dos bovinos da área de pastagem para o confinamento, modifica alguns aspectos ambientais que são de grande importância na resposta orgânica do animal, como por exemplo: a superpopulação; o acesso à água que antes era consumida em córregos, açudes e grandes bebedouros, entretanto, no confinamento é consumida em bebedouros menores e principalmente ao acesso a alimentação que antes era no pasto e no confinamento passa a ser no cocho (Ítavo et. al, 2009). Para se obter resultados promissores e garantir o suprimento de concentrados e volumosos, de forma adequada, as instalações do confinamento devem possuir componentes que facilitem o manejo com os animais. Sobre a frequência de alimentação, dados experimentais evidenciam que essa frequência pode aumentar o desempenho animal através do aumento da eficiência de utilização dos nutrientes contidos na dieta. Em média, a recomendação seria fornecer a dieta diariamente pelo menos quatro vezes ao dia. Alimentos úmidos e alimentos conservados em forma de silagem úmida devem ser fornecidos várias vezes ao dia para evitar fermentações indesejáveis que possam interferir no consumo dos nutrientes e na saúde do animal (Ítavo et. al, 2009).

### **3.2 Alimentador Automático para Suplementação de Rebanhos de Bovinos**

Os Arraçoadores/Alimentadores Programáveis Automáticos (*Programmable Automatic Feeders* - PAFs) ou Sistemas de Alimentação Automática (*Automatic Feeding Systems* - AFS) são máquinas que possibilitam distribuir os suplementos alimentares para o rebanho de forma automática, com mínima intervenção humana e em períodos previamente programados. Esses equipamentos são baseados em tecnologias existentes para distribuição automatizada de alimentos individuais (concentrados, silagens, forragens) ou em novos conceitos completos (Bisaglia, 2010).

Além de automatizar a atividade de suplementação, essas máquinas possuem recursos tecnológicos que permitem armazenar resultados da suplementação (quantidade que foi distribuída), quais e quantos animais consumiram o suplemento, horários da suplementação, entre outras informações. Esse conjunto de dados pode ser transmitido via tecnologias sem fio para a sede da fazenda ou diretamente para ambientes de nuvem computacional, possibilitando assim o monitoramento da atividade. Tal monitoramento possibilitará ainda a tomada de decisão acurada e mais rápida sobre eventuais mudanças na atividade de suplementação visando maximizar produtividade e qualidade e minimização de desperdícios.

Existem vários tipos de PAFS, alguns exemplos de máquinas arraçoadoras automáticas para suplementação de bovinos são apresentadas na Figura 4.

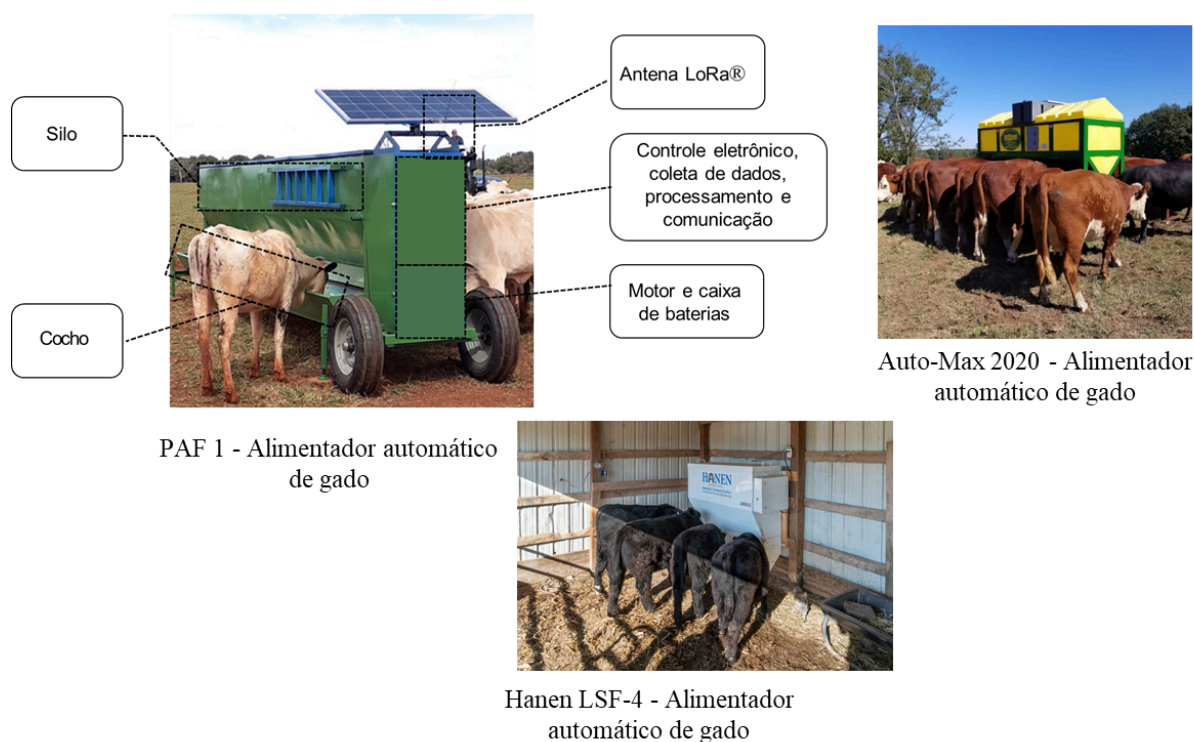


Figura 4: Alimentador Automático Programável - PAF (Fonte: Autor).

A máquina PAF 1 possui um vagão reboque, de fácil mobilidade, construído utilizando chapas de metal. Esse reboque contém um armazenador de suplemento (silo). O fornecimento automático é feito por dois eixos rotores movidos por motor elétrico de 12V para distribuição do suplemento do silo para os cochos acoplados. O motor elétrico é alimentado por bateria estacionária, selada, com recarga advinda de painel solar fotovoltaico (Bungenstab, D. J.; Santos, R. R., 2020). Os rotores ao longo de toda a extensão do equipamento permitem a distribuição precisa e uniforme do suplemento, permitindo acesso simultâneo a todos os

animais do lote, desde que respeitadas as recomendações técnicas de suplementação. O acionamento do equipamento é automatizado e feito em horários predeterminados, sendo totalmente programável pelo usuário (controle eletrônico). Essa programação pode ser realizada, inclusive, remotamente, por uma estação-base que utiliza tecnologia LoRa para comunicação com os equipamentos alimentadores automáticos.

O sistema permite calibração precisa para diferentes tipos de suplemento ou ração e gera relatórios de fornecimento de suplemento assim como de eventuais falhas no acionamento. O equipamento conta com dispositivo para detecção de chuva, adiando o fornecimento quando necessário e também dispositivo para informar níveis baixos de suplemento no reservatório, alertando para a necessidade de reabastecimento.

Para demonstrar o funcionamento do Alimentador Automático Programável foram criados diagramas de fluxos de dados que detalham as ações realizadas pela máquina, a aquisição de dados via sensores, o processamento, o armazenamento e a comunicação de dados. Há nove fluxos de dados identificados durante o funcionamento de um alimentador automático de rebanhos de bovinos (Aguiar, 2022).

- Fluxo de Alimentação;
- Fluxo de Programação de Suplementação;
- Fluxo de Abastecimento do Silo;
- Fluxo de Atualização de Data e Hora;
- Fluxo de Calibração;
- Fluxo de Identificação dos animais (Identificação de Tag RFID);
- Fluxo de Envio de Dados para a Estação Rádio Base – ERB;
- Fluxo do Pluviômetro;
- Fluxo de Geração de Relatórios.

Todos os fluxos estão apresentados na forma de diagramas e estão no Anexo I deste documento.

### **3.4 Considerações Finais do Capítulo**

Neste capítulo foram apresentados conceitos sobre a suplementação de bovinos no Brasil. Destaca-se a importância da suplementação para o sucesso da bovinocultura, especialmente diante dos desafios às diferentes fases de criação, recria e terminação dos bovinos. A suplementação, quando bem planejada e executada, contribui significativamente para a maximização do ganho de peso, a melhoria da qualidade da carne e o aumento da

eficiência produtiva, estes são fatores essenciais para manter a competitividade do setor. A introdução de tecnologias avançadas, como os Alimentadores Automáticos Programáveis (PAFs), representa um passo significativo na automação e melhoria da suplementação de bovinos. Esses sistemas garantem uma distribuição precisa e eficiente dos suplementos, e também permitem um monitoramento detalhado e em tempo real, auxiliando na tomada de decisões mais assertivas. No próximo capítulo serão apresentados alguns trabalhos e seus experimentos focados nos temas da rede LoRa.

## 4. Trabalhos Relacionados

A literatura científica possui diversos estudos sobre monitoramento de máquinas, dispositivos e ambiente por meio da tecnologia LoRa. Alguns abrangem cidades inteligentes, agricultura e pecuária, saúde, indústria, entre outros. Este capítulo apresenta um conjunto de trabalhos que aplicaram a tecnologia LoRa em diferentes cenários e relataram os resultados obtidos com experimentos de simulação. Embora utilizados em diferentes cenários e aplicações, esses trabalhos guardam relação com a proposta deste trabalho.

### 4.1 Simulação e Avaliação da Rede LoRaWAN

Os pesquisadores Van Den Abeele et al. (2017) apresentaram a criação de uma modelagem de redes LoRaWAN no simulador NS-3. Trata-se de um modelo de erro para a modulação LoRa para diferentes taxas de código e fatores de espalhamento (SFs). A implementação no NS-3 LoRaWAN foi sobre dispositivos finais de classe A, uma rede com vários *gateways* e um servidor de rede (NS). Realizou-se também um estudo de escalabilidade por meio de mensagens confirmadas versus não confirmadas e no impacto do tráfego *downstream* em redes de grande escala LoRaWAN (Van Den Abeele, 2017). Para a realização da simulação foram considerados os seguintes parâmetros: distância de raio de 6100 Mts entre o *gateway* e os nós, o número de dispositivos para avaliação do desempenho no simulador foi 0 a 10000 nós, um período de *Upstream* de 600s, com um número de dispositivos finais variável e avaliado o sucesso de entrega dos pacotes.

Sobre os resultados alcançados de Van Den Abeele et al. (2017), os pesquisadores afirmam que a rede LoRaWAN suporta vários *gateways*. O módulo NS-3 possibilitou a análise de escalabilidade de LoRaWAN multi *gateways* de canal único. Os resultados desta análise mostram que alocar os parâmetros de rede: mensagens (confirmadas ou não confirmadas); taxa de dados; o número de *gateways* para dispositivos finais é extremamente importante para o desempenho das redes LoRaWAN. Os pesquisadores relataram que a capacidade de *downstream* fica limitada e se deteriora a taxa de entrega de pacotes de mensagens *upstream* confirmadas. Aumentar a densidade de *gateways* pode atrasar o início desse efeito, mas não o elimina completamente, alguns parâmetros adicionais utilizados no estudo são mostrados na Tabela 2.

Nas pesquisas dos autores Miles, et al. (2020) foi realizado um estudo aprofundado do desempenho da tecnologia LoRaWAN no contexto de uma aplicação IoT para uma fazenda

piloto. Foram considerados vários cenários usando o NS-3. Os autores propuseram um modelo matemático que prevê a taxa de entrega de pacotes bem-sucedida e foram avaliados os resultados do modelo com simulações em vários cenários. Sobre o cenário da simulação: um ambiente sem obstáculos, um único *gateway* com variação do número de nós finais a um raio de 7,5 km. Os nós e *gateways* estavam fixos e os pacotes transmitidos pelos nós foram 23 *bytes* (MILES et. al, 2020).

Tabela 2: Parâmetros Camada física LoRa para simulações BER, adaptada de (Van Den Abeele, 2017).

Largura de Banda (BW)	Fator de Espalhamento (SF)	taxas de código (CR)	SNR (dB)	Largura de Banda (BW)	Fator de Espalhamento (SF)	taxas de código (CR)	SNR (dB)
125 KHz	7	1,3	[-20..0]	125 KHz	11	1	[-23..-13]
125 KHz	8	1,3	[-20..0]	125 KHz	11	3	[-25..-13]
125 KHz	9	1,3	[-20, -8]	125 KHz	12	1, 3	[-26..-17]
125 KHz	10	1,3	[-22, -8]				

Para motivação do estudo, os autores fizeram as seguintes perguntas: 1) O LoRaWAN é adequado para aplicações de IoT na agricultura inteligente? 2) É possível prever o comportamento e desempenho da rede LoRa e escolher seus parâmetros corretos durante a fase de projeto sem realizar novas simulações? 3) Como escolher o ajuste adequado entre o número de nós e a duração do intervalo de transmissão? Para os autores, a arquitetura LoRaWAN pode estar evoluindo principalmente porque com um número maior de *gateways* melhora a cobertura e a confiabilidade do *uplink*, o protocolo é superior a outras tecnologias LPWANS em vários aspectos e estes são demonstrados pelos autores na Figura 5. Os autores afirmam ainda que a arquitetura LoRaWAN provou ser escalável, se houver um aumento no número de *gateways*, isto pode melhorar a cobertura e a confiabilidade do *uplink*, as simulações de Magrin et al. em (2017) demonstrou também que uma rede com vários *gateways* podem atender a uma rede mais de 15.000 nós, apresentando uma taxa de entrega de pacotes superior a 95% com tráfego de mensagens não confirmadas (Miles et. al, 2020). Os autores concluíram com a afirmação sobre o potencial do LoRaWAN para IoT na agricultura inteligente. Relataram que uma única rede de *gateway* com até 1000 nós, enviando pacotes

com um intervalo mínimo de transmissão de uma hora, é uma configuração adequada para várias aplicações agrícolas, tais como, monitoramento de solo e ar, irrigação, agricultura de ambiente controlado (estufa), criação de gado, entre outras.

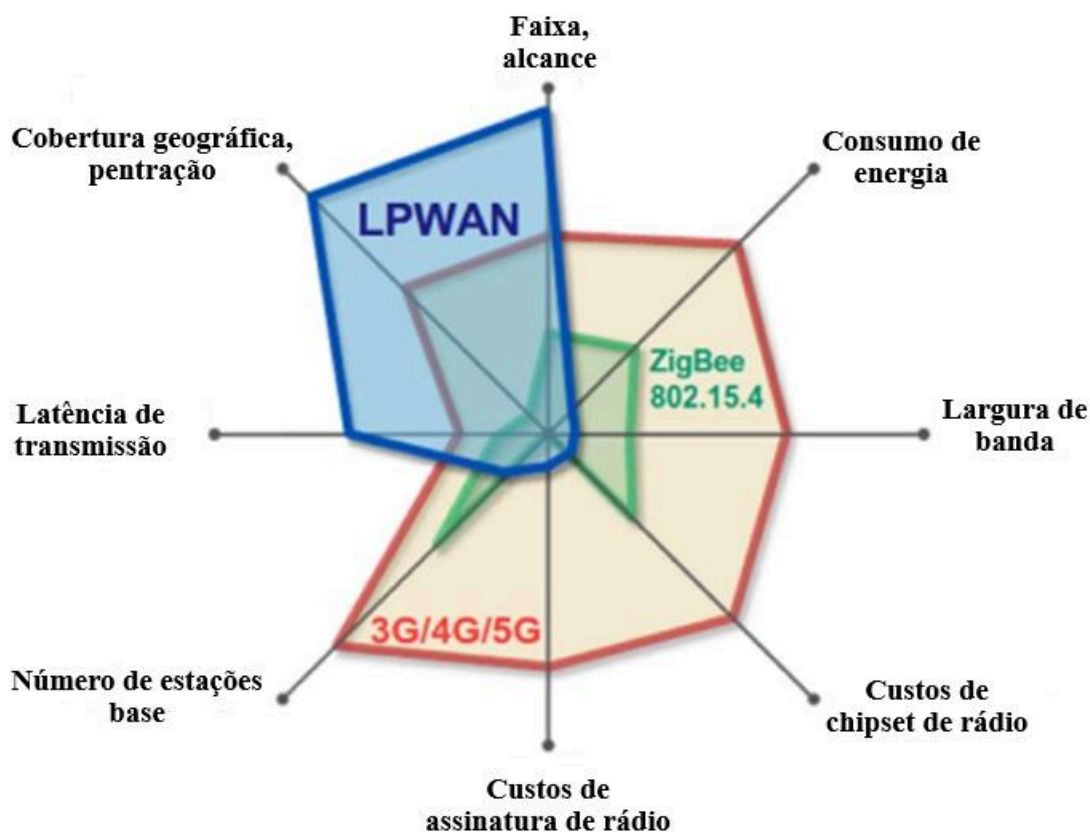


Figura 5: Comparação de tecnologias de telecomunicações (Miles et al, 2020).

Haxhibeqiri et al (2017) propuseram a investigação da escalabilidade em termos do número de dispositivos finais por *gateway* de LoRaWAN e análise da interferência intra-tecnologia por meio de simulação de rede e um modelo de interferência em ambiente externo para uma cidade de 100 km. Primeiramente, determinaram o comportamento da interferência intra-tecnologia com dois nós finais físicos, verificando o impacto de um nó interferente em um nó transmissor. Para realização do estudo, os pesquisadores colocaram dois transmissores, ambos conectados a um microcontrolador, que controlou os tempos de transmissão. Um atenuador sintonizável entre cada transmissor e um combinador foi usado para alterar e diminuir o RSSI no lado do receptor. Nas simulações, os pesquisadores utilizaram os seguintes parâmetros: seis comprimentos de *payloads*: 10, 20, 30, 40 e 50 bytes,

número de nós transmissores variou de um até mil (1000) por *gateway*, cada nó enviou 10 pacotes por teste, no intervalo de 15 min e cada teste foi repetido 100 vezes.

Os pesquisadores chegaram aos seguintes resultados: taxa de sucesso de pacote de até 80% para distâncias inferiores a 5 km do *gateway* e 60% de taxa de sucesso para distâncias de 5 a 10 km. Quando o número aumenta até mil (1000) nós por *gateway*, as perdas de pacotes são de até 32%. Os resultados mostraram que mesmo que um pacote faça parte de transmissões concorrentes ainda pode ser recebido corretamente. Isso depende da hora do início da colisão, bem como da força do sinal interferente. Se forem usados vários SFs, é possível aumentar para seis o número de canais lógicos sem interferência. Comparando o caso ao usar um único canal e um único SF, a escalabilidade é maior, pois para 200 nós por transmissor, apenas cerca de 50% dos pacotes colidiram em comparação com SF simples com 100% de colisões. Diante disso, os pesquisadores afirmaram que é possível enviar seis vezes mais tráfego com LoRaWAN do que com Aloha puro, para o mesmo número de dispositivos finais por *gateway* usando a largura de banda do canal de 125 kHz. Os pesquisadores determinaram o número de dispositivos que podem ser atendidos por um único *gateway* em diferentes casos de uso de aplicativos de IoT.

Já no trabalho de Reynders et al. [a] (2018) foi proposta uma nova camada MAC RS-LoRa para melhorar a escalabilidade e confiabilidade da rede LoRa. A inovação é um agendamento com duas etapas: 1) um *gateway* agenda os nós, especificando dinamicamente as potências de transmissão permitidas e SFs em cada canal; 2) os nós determinam sua própria potência de transmissão, SF, e quando e em qual canal transmitir.

Os pesquisadores propuseram desafios para poder demonstrar os índices de confiabilidade, escalabilidade e simulação. Três desafios foram criados: 1) Escalabilidade, tem muita importância por causa do longo alcance e dos milhares de dispositivos que podem usar o *gateway* simultaneamente; 2) Interferência de outras redes próximas, as bandas ISM são muito utilizadas por outras tecnologias sem fios, Banda larga, entre outras. Se o *Gateway* não puder reconhecer um quadro devido a interferência externa, os nós irão retransmitir seus pacotes; 3) Restrições no ciclo de trabalho que tornam os recursos *downlink* mais valiosos, desencorajando qualquer programação refinada de nós executada por *gateways*. Os resultados demonstram o benefício do RS-LoRa sobre o legado LoRaWAN, em termos de taxa de erro de pacote, taxa de transferência e imparcialidade. Por exemplo, em um cenário de célula única com 1.000 nós, o RS-LoRa pode reduzir a taxa de erro de pacote do legado LoRaWAN em quase 20%.



Em Reynders et al. 2018 [b] um módulo LoRaWAN para NS-3 foi desenvolvido e implementado. Esta implementação utiliza a classe A da especificação LoRaWAN 1.0. É altamente configurável e pode ser facilmente usado para explorar o impacto de diferentes parâmetros no desempenho do desempenho do LoRaWAN.

Para mostrar o desempenho, os pesquisadores avaliaram três cenários diferentes: Cenário 1) Topologia de rede simples, os nós estão espalhados em um círculo e enviando dados para um *gateway* central. Todos os nós transmitem dados, sem nenhuma confirmação. Portanto, o *gateway* responde apenas a cada 96 mensagens; Cenário 2) O segundo cenário é uma variação do primeiro cenário, mas com mais *gateways*; Cenário 3) É uma variação do primeiro cenário. Todos os nós transmitem mensagens confirmadas. Através deste cenário os pesquisadores quiseram demonstrar ser impossível reconhecer todas as mensagens na rede, porque a rede de baixa potência não tem vazão. Os parâmetros utilizados pelos pesquisadores foram os seguintes: número de nós 100, 500, 1000; comprimento do pacote (sem o cabeçalho) 51 *bytes*; distância máxima do *gateway* 1000 Mts; distância entre *gateways* 1000 Mts; intervalo de pacotes 120 segs.

A primeira simulação é um cenário de *gateway* único, onde todos os nós tentam se comunicar com o *Gateway* GW 1, devido à natureza ALOHA do protocolo. Claramente, quanto mais perto do *gateway*, maior a potência recebida e, portanto, menor a taxa de erro de pacotes, por causa do efeito de captura. Este efeito permite que pacotes de alta potência sobrevivam a colisões, enquanto pacotes de baixa potência são descartados.

Em seguida foi avaliado o desempenho do modelo em cenários de vários *gateways*. Portanto, um dos pacotes enviados desses dois nós será recebido pelo *gateway* central GW1, e o pacote do outro nó será descartado. Quando houver mais *gateways* disponíveis na rede, é possível que o pacote descartado anteriormente seja recebido por um *gateway* vizinho e, portanto, seja decodificado com sucesso. Com esse resultado, o desempenho da rede é melhorado e os pesquisadores apontam que uma direção interessante seria fazer a interface LoRaWAN com o módulo 6LOWPAN. Isso permitiria endereços IPv6 para todos os dispositivos LoRa e criaria flexibilidade extra para soluções e simulações de ponta a ponta. No momento, isso ainda não está desenvolvido no modelo.

Os autores da pesquisa de Petajajarvi et al. (2015) avaliaram a tecnologia LoRa em ambiente externo, realizados na cidade de Oulu, na Finlândia, durante 14 dias na primavera e no verão de 2015. Os experimentos foram aplicados da seguinte forma: um nó foi no solo (sobre um carro), outro na água (no mastro de um barco) reportando seus dados para uma

estação base. Os objetivos dos pesquisadores foram encontrar o alcance máximo de comunicação dos nós que ocorreram no mar e solo. Os nós foram configurados para usar o maior possível fator de espalhamento (12) sem mecanismos para controle de entrega e retransmissões automáticas. Os pesquisadores descreveram que foram usados os seguintes parâmetros: banda 868 MHz, potência de transmissão 14 dBm, fator de espalhamento 12. Cada pacote incluía um número de sequência e coordenadas de GPS que foram usadas para estimar a taxa de perda de pacotes e a posição do nó.

Sobre as medições no solo, os pesquisadores relataram que o veículo foi conduzido ao longo das estradas principais respeitando os limites de velocidade (40-100 km). Dentre os resultados apontados destacam-se: dentro do alcance de 2 km da estação base, o sinal geralmente excede -100 dBm. No entanto, 12% dos 894 pacotes transmitidos foram perdidos. Isso por conta de obstáculos ou interferência de outros sistemas de rádio. Entretanto, foi observado que nenhum pacote originário dos dispositivos LoRa além dos usados para teste foi recebido durante os experimentos.

Os pesquisadores identificaram que os resultados do estudo sobre as medições mostram que no solo em distâncias de até 5 km a quantidade de pacotes entregues com sucesso excedeu 80%, mais de 60% dos pacotes foram recebidos corretamente nas distâncias de 5 a 10 km. Já nas distâncias superiores a 10 km, a maioria dos pacotes enviados foi perdida. Identificaram também que o alcance máximo de comunicação no solo foi de mais de 15 km e próximo a 30 km na água. Quase 30 km de alcance de comunicação foram alcançados com cerca de 70% dos pacotes entregues com sucesso em distâncias abaixo de 15 km na água.

Os pesquisadores apontaram que uma única célula LoRaWAN pode atender a vários milhões de nós enviando poucos *bytes* de dados por dia. No entanto, apenas uma pequena parte desses dispositivos pode estar longe da estação base. A maioria dos dispositivos, e especialmente aqueles com maiores necessidades de tráfego de *upload*, devem estar localizados nas proximidades da estação base. Conforme análise, LoRa pode ser usada para redes relativamente densas de dispositivos de tráfego muito baixo que não impõem requisitos rígidos de latência ou confiabilidade.

## 4.2 Síntese dos Trabalhos Relacionados

Os trabalhos de Van Den Abeele et al. (2017), Miles et. al (2020), Haxhibeqiri et al (2017), Reynders, et al. (2018 [a]), Reynders, et al. (2018 [b]) realizaram análises da

escalabilidade pelo sucesso de entrega de pacotes por meio do simulador de rede NS-3 com mensagens confirmadas ou não confirmadas de recebimento, variando o raio e número de nós finais.

Van Den Abeele et al. (2017) destaca-se por criar um modelo de erro (BER) para análise da escalabilidade. O BER avalia o desempenho de um sistema, incluindo o transmissor, o receptor e o meio entre os dois (Sadeque, 2015). Miles et al. (Miles et. al, 2020) realizaram análise da escalabilidade por meio de um modelo matemático que prevê com precisão a taxa de entrega de pacotes bem-sucedida, com variação de vários parâmetros e cenários.

Haxhibeqiri et al (2017) apresentaram estudo que investiga também a interferência intra tecnologia com dois nós finais físicos, verificando o impacto de um nó interferente em um nó transmissor.

Em Reynders, et al. [a] (2018) foi proposta uma nova camada MAC RS-LoRa para melhorar a escalabilidade e confiabilidade da rede LoRa. Como inovação, traz agendamento com duas etapas: 1) *Gateway* agendam os nós; 2) Um nó determina sua potência de transmissão, SF e canal para transmissão. No estudo de Petajajarvi et al. (2015) foi avaliada a cobertura da tecnologia LoRa desenvolvida por meio de medições em ambiente externo, no solo (um carro) ou na água (um barco) (Petajajarvi et al. 2015).

Os estudos apresentados são utilizados como referência de estado-da-arte sobre a avaliação da tecnologia LoRaWAN em sistemas IoT neste trabalho. O Quadro 1 apresenta a relação dos trabalhos científicos avaliados e características consideradas relevantes para análise deste trabalho. Observa-se o enfoque dos trabalhos na análise da escalabilidade e avaliações considerando taxa de erros, taxa de ruído e o sucesso na entrega dos pacotes. A maioria dos estudos realizou simulações utilizando a ferramenta NS-3 mas apenas um dos trabalhos avaliou cenários considerando a mobilidade e parâmetros de interferência sobre os nós. Esses resultados fornecem indicativos sobre a metodologia adotada neste trabalho para avaliação da tecnologia LoRa em cenários da bovinocultura.

**Quadro 1:** Análise comparativa entre os artigos.

<b>Características</b>	<b>(Van Den Abeele, 2017)</b>	<b>(MILES et al, 2020)</b>	<b>(Haxhibeqiri et al, 2017)</b>	<b>(Reynders, et al.[a], 2018)</b>	<b>(Reynders, et al.[b], 2018)</b>	<b>(Petajajarvi et al., 2015)</b>
<b>Análise da escalabilidade</b>	x	x	x	x	x	x
<b>Análise de taxa de erro (BER)</b>	x	x			x	
<b>Taxa de ruído (SNR)</b>		x	x			
<b>Uso do simulador NS3</b>	x	x		x	x	
<b>Sucesso na entrega de pacotes</b>	x	x		x	x	x
<b>Modelos de simulação com mobilidade</b>						x

Fonte: Autor

### **4.3 Considerações Finais do Capítulo**

Este capítulo apresentou trabalhos científicos, cujo enfoque estão relacionados com o objetivo desta dissertação. Quanto ao uso de ferramentas e estruturas de automação experimental, a maioria utiliza o NS-3 como ferramenta de análise da rede LoRa e o único artigo que usa simulação com mobilidade é o trabalho de Petajajarvi et al., (2015). No próximo capítulo será apresentada a avaliação da tecnologia LoRa em cenários de suplementação de bovinos, com resultados obtidos pelo simulador de rede NS-3, além do projeto de modelos preditores sobre o número de pacotes recebidos.

## 5. Avaliação da Tecnologia LoRa em Cenários de Suplementação de Bovinos

Este capítulo apresenta os cenários de utilização, onde a tecnologia LoRa foi aplicada e avaliada. O capítulo também apresenta modelos de predição que estimam a quantidade de pacotes de dados recebidos com sucesso, a partir das variáveis independentes estabelecidas durante os experimentos.

### 5.1 Infraestrutura de Simulação

Durante as atividades de avaliação da tecnologia LoRa, houve necessidade de se estabelecer uma infraestrutura computacional que possibilitasse a simulação de cenários e análise dos resultados obtidos. Nesse sentido, a Figura 6 a seguir apresenta as ferramentas utilizadas durante essas atividades. As ferramentas VirtualBox e sistema operacional Linux Ubuntu constituem os softwares básicos utilizados para dar suporte às demais ferramentas. O simulador de rede NS-3 versão 3.32 foi utilizado para simulação e avaliação da tecnologia LoRa em diferentes cenários. A ferramenta Rstudio foi utilizada para análise dos resultados e desenvolvimento de modelos preditivos a partir dos dados obtidos com a simulação.

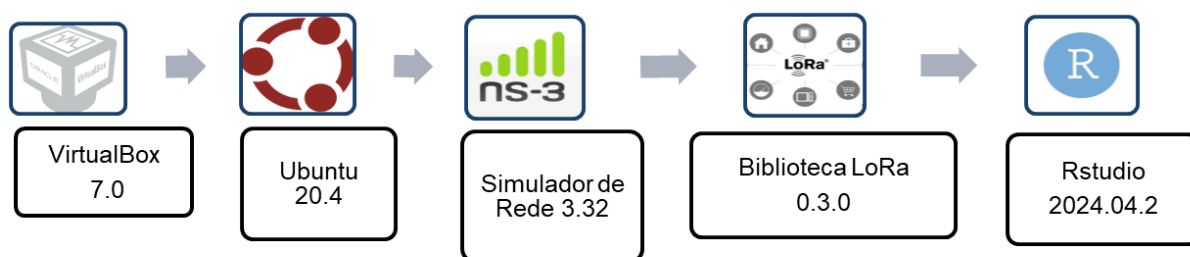


Figura 6: Infraestrutura de simulação (Fonte: Autor).

O cerne da infraestrutura de simulação utilizada neste trabalho é o simulador NS-3 (Nsnam, 2022). NS-3 é uma ferramenta desenvolvida para fornecer uma plataforma de simulação de rede aberta e extensível para pesquisa e educação em rede. Ele fornece modelos de como as redes de pacotes de dados funcionam e um mecanismo de simulação para que os pesquisadores conduzam seus experimentos de simulação. O simulador foi projetado como um conjunto de bibliotecas que podem ser combinadas entre si e também com outras bibliotecas de software externas. Para usar o simulador, é indicado que o pesquisador deva

estar familiarizado com os *sockets* Berkeley e também desenvolvimento de software C++ e Python (Nsnam, 2022).

## 5.2. Cenários e Experimentos

As simulações sobre a utilização da tecnologia LoRa na atividade de suplementação de rebanhos de bovinos foram baseadas na utilização real desta atividade na Fazenda Escola da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (latitude: -20.44166659749671, longitude: -54.846819891632464), situada a 30 km de Campo Grande no município de Terenos com área total de 308 ha. A Fazenda Escola da UFMS possui cinco unidades de alimentadores automáticos (PAFs) com diferentes capacidades e configurações tecnológicas que variam desde a capacidade de atendimento de animais, os recursos de sensores, até a capacidade de armazenamento suplemento.

O trato de suplementação dos animais tem por objetivo maximizar ou manter o ganho de peso independente da condição do pasto. A suplementação é distribuída para os animais durante horários específicos previamente configurados nos alimentadores PAFS. Há diversos e possíveis cenários de utilização da suplementação, variando desde as etapas de manejo (cria, recria, engorda), a distância do piquete onde o rebanho está situado até a sede da fazenda, o relevo da fazenda, o tipo de suplemento a ser utilizado. Essa quantidade e complexidade de fatores sobrecarrega a infraestrutura de processamento e comunicação de dados presente nessas máquinas. A Figura 7 apresenta a definição das distâncias estabelecidas nos experimentos de simulação, entre cada PAF (vermelho) e o *gateway* (azul).



Figura 7: Local dos experimentos fazenda escola - UFMS e distâncias dos PAFs para o *Gateway* (Fonte: autor adaptado Google Maps).

Sobre os locais destinados para os experimentos, foram apontados inicialmente cinco locais onde estão situados os alimentadores automáticos destinados ao trato dos animais: Local 1 (um) 500 Mts, Local 2 (dois) 700Mts, Local 3(três) 750Mts, Local 4(quatro) 1000Mts e Local 5(cinco) 1500Mts que é local próximo ao limite da área da fazenda. Para fins de estudo da tecnologia, foram adicionados ainda outros cinco locais visando avaliar o comportamento da comunicação de dados sobre longas distâncias: Local 6(seis) 2000 Mts, Local 7(sete) 3000 Mts, Local 8(oito) 5000 Mts, Local 9 (nove) 10000 Mts, Local 10 (dez) 15000 Mts.

O desenvolvimento de cenários de simulação considerou todas as dez localizações, com a possibilidade de uso de vários *gateways* e número de dispositivos. Para os experimentos foram considerados os seguintes parâmetros de configuração: payload 32 *bytes*, tempo de simulação 600s (10 min.), classe tipo A, para alocação do *gateway* foi considerado o sistema celular, onde onde o(s) *gateway(s)* atua(m) como estação rádio base (ERB) e nós finais como dispositivos celulares. Os nós foram alocados de forma dinâmica, automática e circular em torno de um *gateway* situado junto à sede para atender a um raio de 7500 Mts e poder cobrir um alcance total de 15000 Mts. Outra configuração de cenários refere-se a dois *gateways*, um *gateway* junto à sede e outro *gateway* à distância de 15000 Mts, ambas configurações estão conforme consta na Figura 8. Todos os nós transmitiram dados sem confirmação e o número de pacotes foi criado automaticamente pelo script que se encontra no Anexo III deste trabalho.

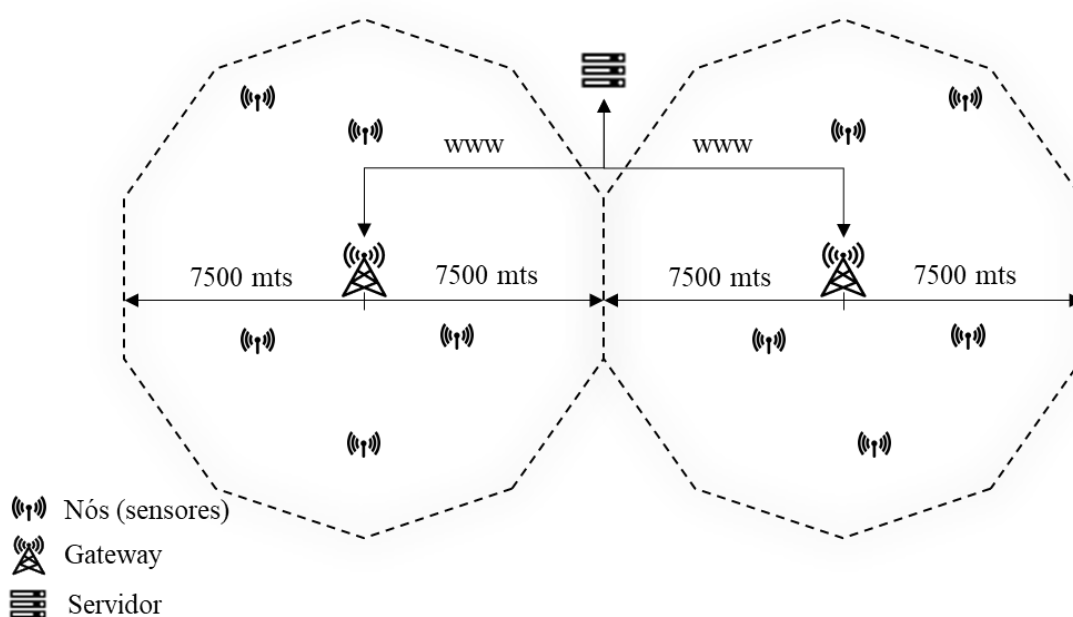


Figura 8: Cenários de simulação (Fonte: Autor).



Foram realizadas dez simulações para cada um dos cenários 1.1, 1.2 e 1.3 com um nó: para cada uma das respectivas dez distâncias (Local 1 (um) 500 Mts a Local 10 (dez) 15000 Mts) variando o intervalo de envio (30, 60, 90 s), número de gateways (1 ou 2) e parâmetro realístico (1 (ligado) ou 0 (desligado)), simulações semelhantes foram aplicadas para os cenários 2.1, 2.2, 2.3 e 3.1, 3.2, 3.3, conforme Tabela 3. Destaca-se que cada cenário foi executado com duas configurações considerando (ou não) perdas de dados com edifícios e sombras (parâmetro `RealisticChannelModel=True | False`). Os resultados completos das simulações podem ser verificados em forma tabular no Anexo II.

Tabela 3: Cenário dos experimentos

<b>Cenários</b>	<b>Intervalo de envio (segs)</b>	<b>Número de nós</b>
1.1	30	1
1.2	30	10
1.3	30	100
2.1	60	1
2.2	60	10
2.3	60	100
3.1	90	1
3.2	90	10
3.38	90	100

Fonte: Autor

### 5.3 Resultados da Simulação

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas nos cenários. A análise sobre esses resultados foi realizada utilizando a ferramenta R com a IDE RStudio. Os dados completos obtidos como resultados das simulações estão no formato de tabelas e podem ser encontrados no Anexo II deste trabalho.

Para uma análise mais detalhada sobre quais fatores foram estatisticamente significativos para a avaliação da tecnologia LoRa, avaliou-se o impacto dessa tecnologia em sistemas com 1 nó (1 PAF), 10 nós (10 PAFs) e 100 nós (100 PAFs). Essa avaliação foi realizada por meio do projeto de modelos de predições que considerou como variável dependente (variável alvo) o total de Pacotes Recebidos e variáveis independentes: Distância, Parâmetro Realístico, Intervalo de Envio, Pacotes Enviados.

Para cada modelo, foi realizado teste de normalidade (teste de Shapiro<sup>3</sup>), uma vez que mais de um modelo de predição mostrou-se adequado, testes de Akaike<sup>4</sup> (AIC) foram aplicados sobre esses modelos a fim de determinar qual pode ter melhor ajuste e representação sobre os dados.

Os gráficos de *boxplot* das Figuras 9-14 indicam como a variável dependente (Pacotes Recebidos) se comporta mediante as mudanças de valores das variáveis independentes. Deve-se atentar que as Figuras 9 e 10 correspondem aos resultados obtidos com os cenários (1.1, 1.2, 1.3) que utilizam apenas um nó, enquanto que as Figuras 11-12 cenários (2.1, 2.2, 2.3) e 13-14 cenários (3.1, 3.2, 3.3) representam os resultados obtidos com 10 nós e 100 nós, respectivamente.

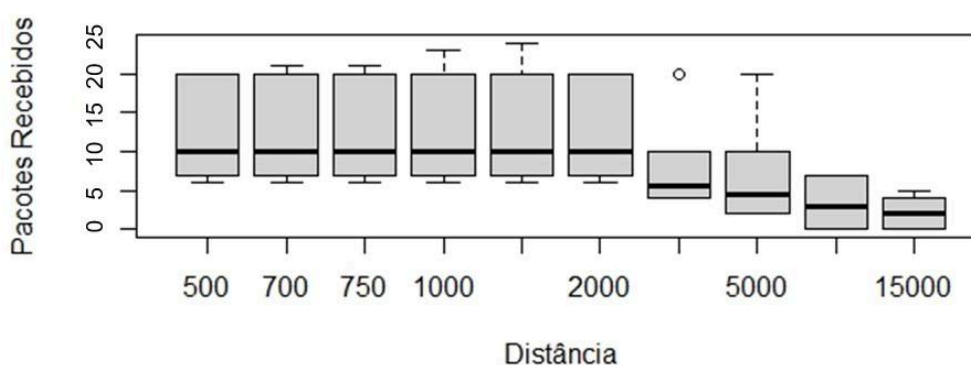


Figura 9: Pacotes Recebidos versus Distância de um nó (Fonte: Autor).

<sup>3</sup> O teste proposto por Shapiro e Wilk (1965) é até os dias de hoje um dos mais utilizados devido ao fato dele ser o mais sensível para diversas distribuições. O teste indica se uma amostra segue uma distribuição normal ou não.  $p\text{-value} < 0,005$  indica insignificância.

<sup>4</sup> O critério de informação de Akaike (AIC), desenvolvido por Hirotugu Akaike sob o nome de “um critério de informação”, em 1971 e proposto, em Akaike (1974), é uma medida relativa da qualidade de ajuste de um modelo estocástico estimado.

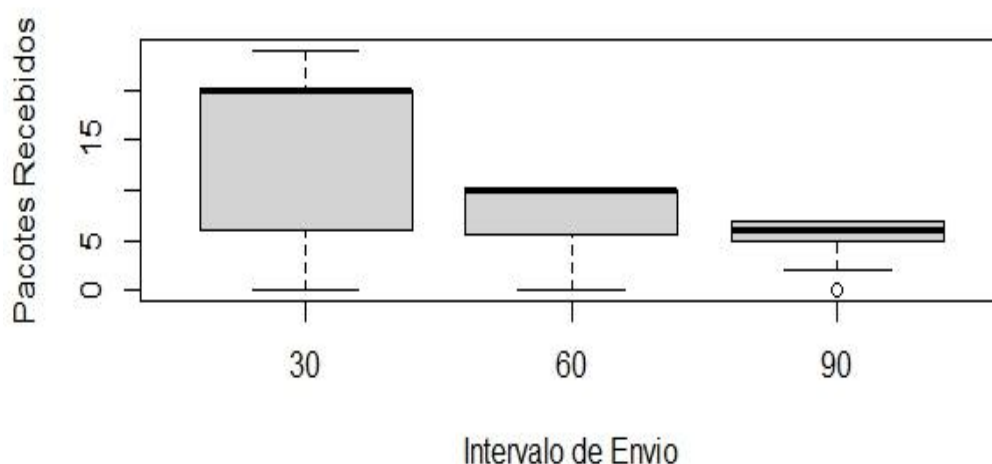


Figura 10: Gráfico Pacotes Recebidos versus Intervalo de Envio de um Nó (Fonte: Autor).

Na Figura 9 observa-se que o limite superior da quantidade de pacotes recebidos (eixo y) mantém-se inalterada, 20 pacotes recebidos (mediana em 10 pacotes recebidos) durante 600 segs de simulação, com intervalos de 30 segs entre envios, até a distância de 2000 Mts. A partir de 3000 Mts, a perda de pacotes começa a aumentar, acompanhando também o aumento da distância entre o nó de envio e *gateway*. Observou-se que com a distância de 5000 Mts a taxa de sucesso é reduzida de 50 a 60% conforme Anexo II (Resultados dos experimentos agrupados por um nó). Na Figura 10, a mediana dos pacotes recebidos reduz significativamente. No total de pacotes recebidos considerando os aumento do intervalos entre envios de pacotes, apresentou os seguintes resultados (30 segs: 20 pacotes, 60 segs: 10 pacotes, 90 segs:  $\cong$  7 pacotes), constatou-se redução significativa de pacotes recebidos, ocasionado pelo distanciamento do *gateway*, por conta de alto fator de espalhamento e baixa taxa de Bits no recebimento dos pacotes, conforme Tabela 1 (Cap. 2).

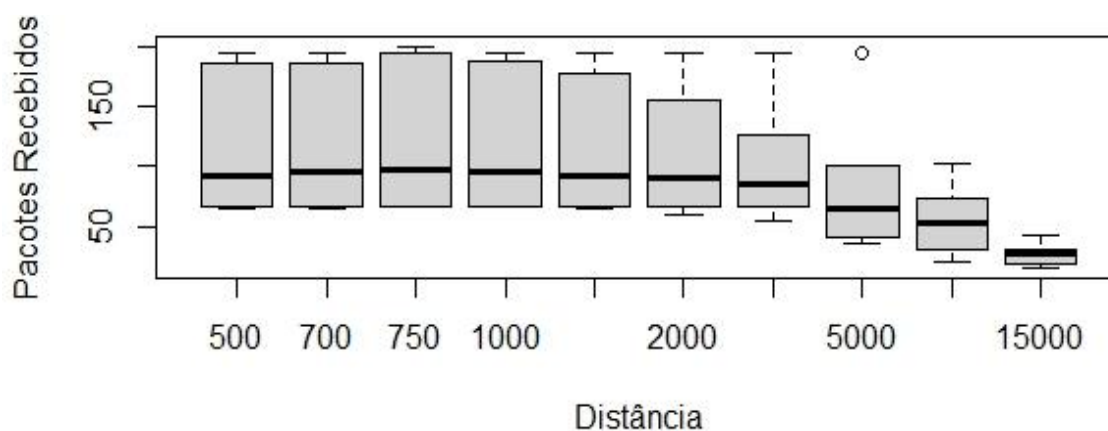


Figura 11: Pacotes Recebidos versus Distância de 10 nós (Fonte: Autor).

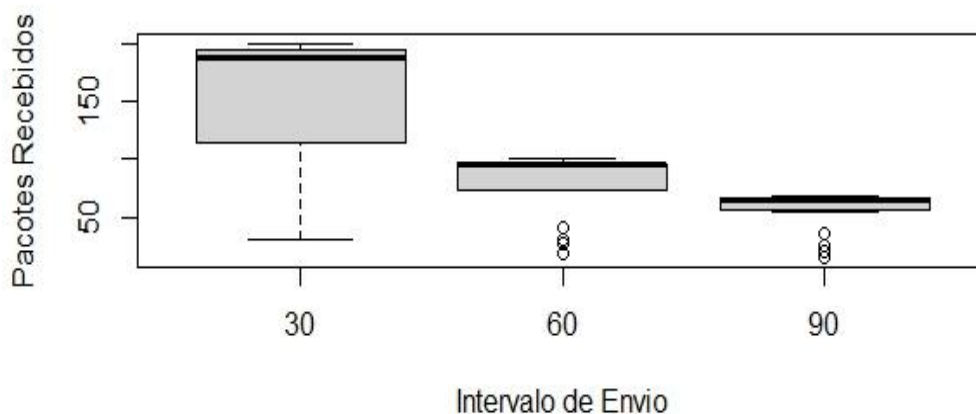


Figura 12: Pacotes Recebidos versus Intervalo de Envio de 10 nós (Fonte: Autor).

A Figura 11 apresenta os resultados sobre os pacotes recebidos (eixo y) de cenário com a utilização de 10 nós e intervalos de envio de 30 segs. Observa-se que dos 194 pacotes (mediana de 100 pacotes) recebidos mantém-se inalterado até a distância de 3000 Mts, embora ocorram mudanças sobre o total de pacotes recebidos em cada quartil. Notou-se que a taxa de sucesso de pacotes recebidos está na faixa de 97% a 100%. A partir de 10000 Mts ocorre aumento das perdas de pacotes devido ao distanciamento entre o Nó e *Gateway*. Observou-se que acima de 10000 Mts a taxa de sucesso de envio é reduzida para 66%. A partir de 5000 Mts, a taxa de sucesso reduz para 72,6%, e a partir de 10000 Mts a taxa de sucesso está abaixo de 50%. Na Figura 12, com transmissão no intervalo de tempo de 90 segs, a mediana dos pacotes recebidos reduz significativamente. No total de pacotes recebidos considerando os aumento do intervalos entre envios de pacotes, apresentou os seguintes resultados (30 segs:  $\cong$  200 pacotes, 60 segs:  $\cong$  100 pacotes, 90 segs:  $\cong$  70 pacotes), constatou-se redução significativa de pacotes recebidos, ocasionado também pelo distanciamento do *gateway*, por conta de alto fator de espalhamento e baixa taxa de Bits no recebimento dos pacotes, conforme Tabela 1 (Cap. 2).

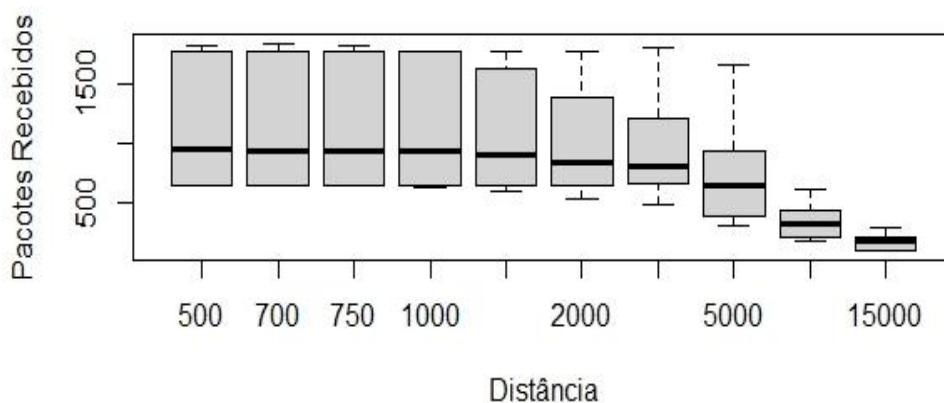


Figura 13: Pacotes Recebidos versus Distância de 100 nós (Fonte: Autor).

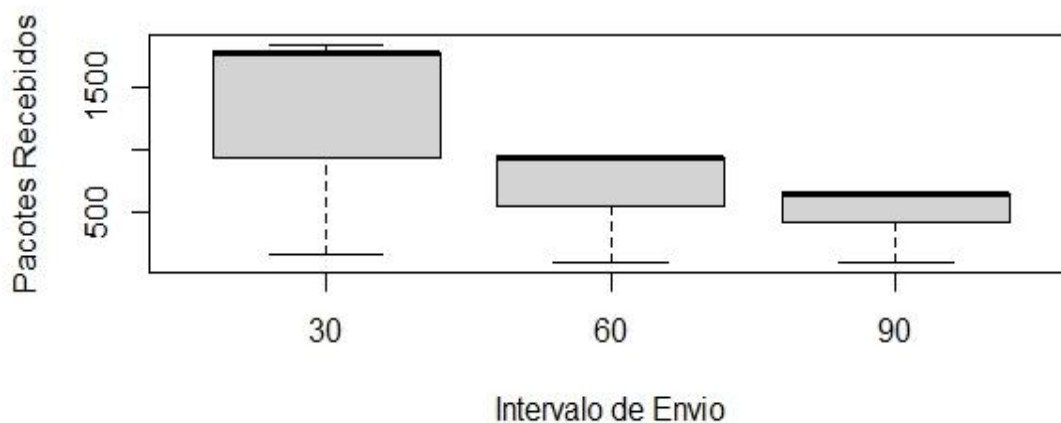


Figura 14: Pacotes Recebidos versus Intervalo de Envio de 100 nós (Fonte: Autor).

A Figura 13 apresenta os resultados sobre os pacotes recebidos (eixo y) no cenário com cem nós, com intervalo de envio de 30 segs. Foi constatado que também que dos 2000 pacotes (mediana de 1000 pacotes) recebidos se manteve de certa forma estável até 3000 Mts, ainda assim, ocorreram mudanças sobre o total de pacotes recebidos em cada quartil com taxa de sucesso variando entre 89,3% a 90,5%. A partir de 10000 Mts ocorre aumento das perdas de pacotes devido ao distanciamento entre o nó e *gateway*. Observou-se que até 5000 Mts a taxa de sucesso de envio é reduzida para 68,3%. A Figura 14, com transmissão no intervalo de tempo de 90 segs, a mediana dos pacotes recebidos reduz significativamente. Na Figura 14, com transmissão no intervalo de tempo de 90 segs, a mediana dos pacotes recebidos reduz significativamente. No total de pacotes recebidos considerando os aumento dos intervalos entre envios de pacotes, apresentou os seguintes resultados (30 segs:  $\cong$  2000 pacotes, 60 segs:  $\cong$  1000 pacotes, 90 segs:  $\cong$  700 pacotes), constatou-se redução significativa de pacotes recebidos, ocasionado também pelo distanciamento do gateway, por conta de alto fator de espalhamento e baixa taxa de Bits no recebimento dos pacotes, conforme Tabela 1 (Cap. 2).

#### 5.4 Projeto dos Modelos de Predição

Esta seção apresenta os resultados obtidos com análise de modelos de predição desenvolvidos para estimar a variável pacotes recebidos utilizada nos experimentos de simulação para avaliar a tecnologia LoRa. Os modelos de predição foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar quais variáveis independentes são estatisticamente significativas para descrever a variabilidade de pacotes recebidos. A Tabela 4 apresenta a associação entre as variáveis utilizadas na simulação e a representação dessas nos modelos de predição.

Tabela 4: Associação entre variáveis e dos parâmetros utilizados nos modelos de predição.

Variável	Parâmetro do modelo
Pacotes.Recebidos	$\hat{y}$
Dist	$x_1$
Realístico	$x_2$
IntervaloEnvio	$x_3$
PacotesEnviados	$x_4$

Fonte: Autor.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os modelos lineares de predição considerando 1 nó, 10 nós e 100 nós, respectivamente. Para fins de comparação entre os modelos, em cada tabela são apresentados: os coeficientes e as variáveis que compõem cada modelo, o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), o erro residual, o  $p$ -value obtido com o teste de normalidade, e o resultado do teste Akaike (AIC). Ressalta-se que para fins de apresentação no texto, os valores dos coeficientes dos modelos foram arredondados para 2 casas decimais.

Tabela 5: Modelos de predição com 1 nó

ID	Modelo	$R^2$ Ajustado	RSE (Res. standard error)	$p$ -value	AIC
1.1	$\hat{y}=1,27e+01 - 8e-04x_1$	0,281	5,821	7,90E-06	385,6230
2.1	$\hat{y}=1,42e01-8e - 04x_1 - 2,93e - 04x_2$	0,3165	5,676	7,312E-06	383,5478
3.1	$\hat{y}=2,43e01-8e - 04x_1 - 2,93x_2 - 1,70e-01x_3$	0,6946	3,794	4,509E-15	336,1547
4.1	$\hat{y}=-1,56e-02 - 1,63e-04x_1 - 9,91e-01x_2$ $+ 6,34e-03x_3 + 1,02x_4$	0,9799	0,9745	<2,20E-16	173,9551
5.1	$\hat{y}=6,61e-01 - 1,77e-04x_1 - 1,03x_2 + 1x_4$	0,98	0,9712	<2,2E-16	<b>172,6239</b>

Fonte: Autor.

Na Tabela 5 observa-se que os modelos 4.1 e 5.1 possuem os maiores valores de  $R^2$  enquanto os menores erros residuais (RSE). O  $p$ -value abaixo de  $\alpha=0.05$  (índice de significância) indica que o modelo (e suas variáveis independentes) conseguem descrever a variável alvo. A aplicação do teste AIC mostra que o modelo 5.1 apresenta-se como o modelo

que melhor representa a relação das variáveis independentes (Distância, Parâmetro Realístico e os Pacotes Enviados) com a variável alvo.

Tabela 6: Modelos de Predição com 10 nós

ID	Modelo	R <sup>2</sup> Ajustado	R.S.E. (Res. standard error)	<i>p-value</i>	AIC
1.10	$\hat{y}=1,22e+02 - 6,51e-03x_1$	0,2833	48,51	1,20E-02	640,0554
2.10	$\hat{y}=1,31e+02 - 6,51e-03x_1 - 19,66x_2$	0,2897	47,88	2,19E-02	639,4494
3.10	$\hat{y}=2,28e02 - 6,514e-03x_1 - 1,96e01x_2 - 1,60x_3$	0,8027	25,9	< 2.2e-16	566,654
4.10	$\hat{y}=-1,248e+01 - 1,199e-03x_1 - 5,88x_2 + 1,38e01x_3 + 1,04x_4$	0,9898	5,953	< 2.2e-16	<b>391,1148</b>
5.10	$\hat{y}=-3,97 - 1,52e-03x_1 - 6,65x_2 + 9,73e-01x_4$	0,9889	6,15	< 2.2e-16	394,1134

Fonte: Autor.

A Tabela 6 exibe os modelos de predição projetados para estimativa do valor de pacotes recebidos com 10 nós. Nota-se que os modelos 4.10 e 5.10 possuem maiores valores R<sup>2</sup> e os menores erros residuais (RSE). A aplicação do teste AIC mostra que o modelo 4.10 apresenta-se como o modelo que melhor representa a relação das variáveis independentes (Distância, Parâmetro Realístico, Intervalo de Envio e os Pacotes Enviados) como variáveis alvo.

Tabela 7: Modelos de Predição com 100 nós

ID	Modelo	R <sup>2</sup> Ajustado	R.S.E. (Res. standard error)	<i>p-value</i>	AIC
1100	$\hat{y}=1,17+e03 - 7,21e-02x_1$	0,3754	435,7	1,96E-04	903,467
2100	$\hat{y}=1,25+e03 - 7,21e-02x_1 - 1,62e-02x_2$	0,3767	431,5	5,27E-04	903,2694
3100	$\hat{y}=2,12e+03 - 7,21e-02x_1 - 1,62e-02x_2 - 1,44e-01x_3$	0,8211	237,3	< 2.2e-16	832,4387
4100	$\hat{y}=-9,88e+01 - 2,05e-02x_1 - 2,54e+01x_2 + 1,58x_3 + 9,61e-01x_4$	0,9934	46,02	< 2.2e-16	<b>636,5308</b>
5100	$\hat{y}=9,01e+01 - 2,43e-02x_1 - 3,65e+01x_2 + 8,89e-01x_4$	0,9921	49,82	< 2.2e-16	645,1405

Fonte: Autor.

Na Tabela 7 pode ser notado que os modelos 4.100 e 5.100 possuem os maiores valores de  $R^2$  enquanto os menores erros residuais (RSE). A aplicação do teste AIC mostra que o modelo 4.100 apresenta-se como o modelo que melhor representa a relação das variáveis independentes (Distância, Parâmetro Realístico, Intervalo de Envio e Pacotes Enviados) com a variável alvo para o cenário com 100 nós.

## 5.5 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou os resultados da análise de modelos preditivos para estimar a quantidade de pacotes recebidos em experimentos de simulação para avaliar a tecnologia LoRa. O objetivo foi identificar as variáveis independentes que influenciaram significativamente essa quantidade. As Tabelas 5, 6 e 7 mostraram os modelos de predição para cenários com 1, 10 e 100 nós, respectivamente, incluindo coeficientes,  $R^2$  ajustado, erro residual, *p-value* e AIC, e estes são os resultados:

**1 nó:** Os modelos 4.1 e 5.1 têm os maiores  $R^2$  e menores erros residuais. Pelo critério AIC, o modelo 5.1 é o mais adequado.

**10 nós:** Os modelos 4.10 e 5.10 apresentam bons resultados, sendo o modelo 4.10 o mais adequado, seguindo o critério AIC.

**100 nós:** Os modelos 4.100 e 5.100 têm os melhores resultados, e o modelo 4.100 é o mais representativo para essa quantidade de nós de acordo com o critério AIC.

Os testes realizados indicam que esses modelos capturam bem a relação entre variáveis como Distância, Parâmetro Realístico e Pacotes Enviados com a variável de pacotes recebidos.



## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho de mestrado teve como propósito avaliar a tecnologia LPWAN LoRa utilizada para transmissão de dados de sistemas de alimentação automatizados PAFs (nós), com o *gateway* que é o dispositivo que recebe e envia esses dados via *link* de internet para avaliação posterior no servidor. Especificamente, o objetivo deste trabalho foi mensurar os limites da tecnologia LoRa, por meio de diferentes simulações em vários cenários de utilização de suplementação de rebanhos de bovinos.

As simulações foram realizadas através do software NS-3. O trabalho de análise e engenharia de dados, projeto e desenvolvimento dos modelos de predição foi realizado utilizando o software R - Rstudio. Conforme os resultados apresentados a partir da Figura 7 e tabelas (Anexo II), os resultados da simulação do NS-3 mostraram uma rede confiável sem perdas de pacotes até 10000 Mts sem considerar edificações e 5000 Mts considerando edificações (modelo de parâmetro realístico aplicado). Em distâncias maiores foi possível observar a degradação com perda de pacotes.

Os resultados com os modelos de predição do número de pacotes entregues com sucesso permitiu observar que as variáveis que representaram os parâmetros: número de nós, distância de nós, intervalo de envio e parâmetro realístico, influenciaram na taxa de sucesso dos pacotes. Embora não avaliado exaustivamente, notou-se que a adoção de mais *gateways* pode auxiliar na redução da perda de pacotes nos cenários avaliados.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu observar os benefícios que a tecnologia LoRa pode trazer sobre a aplicação de suplementação automatizada de rebanhos de bovinos. Entende-se que para a grande maioria dos cenários reais de utilização dessa aplicação, a tecnologia mostra-se como alternativa econômica e tecnicamente viável transmissão de dados a fim de melhorar o monitoramento, controle e a tomada de decisões.

Algumas possibilidades de trabalhos futuros são:

- Avaliar, sob os mesmos cenários e parâmetros, outras tecnologias de comunicação de longa distância voltadas para dispositivos de IoT como Sigfox e NB-IoT;
- Definir e simular novos cenários contendo diferentes quantidades de *gateways* e aumento do número de mensagens;
- Implementar algum(ns) desses cenários em ambiente de produção e comparar os resultados práticos com obtidos com a simulação.

## 7. Referências Bibliográficas

Adelantado, Ferran et al. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications magazine*, v. 55, n. 9, p. 34-40, 2017.

Aguiar, Ricardo Espíndola. Plataforma Eletrônica para Aquisição de Sinais Fisiológicos de Bovinos a Pasto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 2022.

Akaike, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Notre Dame, v. 19, n. 6, p. 717-723, 1974.

Althouse, L. A.; Ware, W. B.; Ferron, W. B. Detecting departures from normality: A monte carlo simulation of a new omnibus test based on moments. *Annual Meeting of the American Educational Research Association*, p. 3–6, 1998.

ANATEL. Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil. 2015. <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/radiofrequencia/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>. Acessado em 10 de novembro de 2022.

Associação das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC). Beef Report. 2022. Disponível em: <http://abiec.com.br/en/publicacoes/beef-report-2022-2/>. Acesso em: 1 de fevereiro de 2024.

Augustin, Aloÿs et al. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.

Benkahla, Norhane et al. Enhanced ADR for LoRaWAN networks with mobility. In: 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2019. p. 1-6.

Bisaglia, Carlo et al. Automatic and frequency-programmable systems for feeding tmr: state of the art and available technologies. In: XVIIth World Congress of the International Commission of Agriculture and Biosystems Engineering-“Sustainable Biosystems through Engineering”. 2010. p. 10-10.

Bungenstab, D. J. Santos, R. R. E-feeder: Alimentador Automático para Rebanhos de Bovinos. 2021. Disponível em: <https://ppgcianimal.ufms.br/fazenda-escola-ufms-conheca-o-alimentador-automatico-para-bovinos/>. Acessado em 10 de julho de 2022.

Carneiro, Orlando. Silos e sua construção. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, v. 5, p. 3-34, 1948. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0071-12761948000100001>. Acessado em: 05/07/2023.

Codeluppi, G.; Cilfone, A.; Davoli, L.; Ferrari, G. LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. *Sensors* 2020, 20, 2028. <https://doi.org/10.3390/s20072028>.

Coleman S, Lippke H, Gill M. Estimating the nutritive potential of forages. *Nutritional Ecology of Herbivores* HG Jung and GC Fahey eds American Society for Animal Science, Savoy, IL. 1999:647-95.

Da Costa, Iris Eduarda Cardoso et al. Implantação do Sistema Intensivo na Criação de Bovino Leiteiro em uma Propriedade Rural no município do Carmo/Rj–Relato De Caso. *Revista de Medicina Veterinária do UNIFESO*, v. 2, n. 01, 2022. Disponível em: <https://www.unifeso.edu.br/revista/index.php/revistaveterinaria/article/download/3083/1181>. Acesso em 05/05/2013.

Davide, Magrin. Network level performances of a LoRa system. Directores: Lorenzo Vangelista, 2017.

Defalque, Guilherme Augusto. Uma Contribuição para o Desenvolvimento de Arquiteturas de IoT no Processo de Suplementação de Bovinos. Dissertação de Doutorado Faculdade de Computação da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul 2023.

Euclides, V. P. B. Produção animal em pasto. In: Simpósio Nacional Sobre Produção e Gerenciamento Da Pecuária De Corte, 3., 2004, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 2004. 1 CD-ROM.

Euclides, V. P. B. et al. Suplementação animal em pastagens e seu impacto na utilização da pastagem. simpósio sobre manejo da pastagem, v. 22, p. 33-70, 2005.

FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação). How to Feed the World in 2050. Roma, FAO, pg. 8, 2012. Disponível em: [https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How\\_to\\_Feed\\_the\\_World\\_in\\_2050.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf). Acessado em 21 de Outubro de 2021.

Fernandes, C. Recria intensiva a pasto - RIP: o que é e como aplicar essa técnica. Disponível em: <https://rehagro.com.br/blog/recria-intensiva-a-pasto-rip-o-que-e-e-como-aplicar/>. Acessado em 08 de outubro de 2024.

Fernandes GA, de Oliveira AS, de Araújo CV, Couto VRM, de Moraes KAK. by Moraes EHBK. Prediction of pasture intake by beef cattle in tropical conditions. *Tropical Animal Health and Production*. 2022;5-1(1):1-9.

Frost A, Schofield C, Beulah S, Mottram T. Lines J, Wathes C. A review of livestock monitoring and the need for integrated systems. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1997;17(2):139-59.

Gomes, R. da C. et al. Protein-energy supplementation of Nellore heifers grazing Marandu pastures during the rainy season in Central Brazil. In: Reunião Annual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 50, 2013, Campinas.

Haxhibeqiri, J.; Van den Abeele, F.; Moerman, I.; Hoebeke, J. LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements. *Sensors* 2017, 17, 1193. <https://doi.org/10.3390/s17061193>.

Ítavo, L.C.V., Ítavo, C.C.B.F., Dias, A.M., Silva, F.F. Aspectos Relacionados à terminação de Bovinos de Corte em Confinamento. 30º Congresso Paranaense de Estudantes de Zootecnia. Maringá, 2009.

J. Catalano; I. Di Giusto; P. Duffy; Y. Gaudin; M. 61 Gilbert; R. Gilson; D. Hunt; R. Husson; J. Jongboom; D. Kjendal; J. Knapp; S. 63 Lebreton; M. Legourrierec; M. Luis; Paratte; D. Smith; N. Sornin; O. Seller; R. Soss; P. Struhsaker; Z. Tao; D. Tholl; P. Thomsen; A. Yegin; X. Yu; D. Yuming. Lora Alliance. RP002-1.0.4 Regional Parameters, 2022. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>. Acessado em 28 de outubro de 2024.

Jain, R. The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling. Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc., 1991.

Jouhari, Mohammed et al. A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023.

Lora-Developers. A Tech Overview Downloadable, 2019. Disponível em: [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa\\_and\\_LoRaWAN-A\\_Tech\\_Overview-Downloadable.pdf](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf). Acessado em: 6 de novembro de 2022.

Lora-Developers. What is LoRa® and LoRaWAN®? Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>. Acesso em 6 de novembro de 2022.

Luchiari Filho, A. Pecuária da carne bovina. A. Luchiari Filho, 2000. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683448/mod\\_resource/content/1/Pecuarria%20da%20carne%20bovina.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683448/mod_resource/content/1/Pecuarria%20da%20carne%20bovina.pdf). Acessado em 19 de fevereiro de 2024.

Magrin, Davide; Centenaro, Marco; Vangelista, Lorenzo. Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario. In: 2017 IEEE International Conference on communications (ICC). iee, 2017. p. 1-7.

Malau-Aduli, Aduli; Holman, Benjamin. / World beef production. Beef cattle production and trade. editor / David Cottle; Lewis Kahn. Collingwood, VIC: CSIRO Publishing, 2020. pp. 108-131. Disponível em: <https://researchoutput.csu.edu.au/en/publications/world-beef-production>. Acessado em 20 de fevereiro de 2024.

Miles, Badreddine et al. A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture. Computer Communications, v. 164, p. 148-157, 2020.

Mroue, Hussein et al. Analytical and simulation study for LoRa modulation. In: 2018 25th International conference on telecommunications (ICT). IEEE, 2018. p. 655-659.

NSNAM. User Guide, 2022, Disponível em: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.37/tutorial/html/quick-start.html>. Acessado em: 6 de novembro de 2022.

ONU. 57ª sessão da Comissão de População e Desenvolvimento. Perspectiva Global

Reportagens Humanas, 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/04/1830966>. Acessado em 07 de novembro de 2024.

Panwar, Vinay; Kumar, Sanjeet. Bit error rate (ber) analysis of rayleigh fading channels in mobile communication. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* Vol. 2, 2012. Disponível em: [https://www.ijmer.com/papers/vol2\\_issue3/AM23796798.pdf](https://www.ijmer.com/papers/vol2_issue3/AM23796798.pdf). Acessado em 14 de novembro de 2022.

Pereira, Thiago Quadros Maluf; Benetel, Gabriela Cavalcante; Marchesin, Wilson Aparecido; Moraes, André Luís de; Luz, Pedro Henrique de Cerqueira; Herling, Valdo Rodrigues. Substituição de NNP e de NP de suplementos proteicos por uréia encapsulada na recria de fêmeas Nelore. 2007, Anais.. São Paulo: USP, 2007. Acessado em: 18 nov. 2024.

Petajajarvi, Juha, Konstantin Mikhaylov, Antti Roivainen, Tuomo Hänninen, Marko Pettissalo. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In: 2015 14th international conference on its telecommunications (ITST). IEEE, 2015. p. 55-59.

Poppi, D. P., Quigley, S. P., Silva, T. A. C. C. da ., & McLennan, S. R.. (2018). Challenges of beef cattle production from tropical pastures. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 47, e20160419. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/rbz4720160419>. Acessado em 17 de fevereiro de 2023.

Porto, M. O., Paulino, M. F., Valadares Filho, S. de C., Detmann, E., Sales, M. F. L., & Couto, V. R. M.. (2009). Fontes de energia em suplementos múltiplos para bezerros Nelore em creep-feeding: desempenho produtivo, consumo e digestibilidade dos nutrientes. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 38(7), p. 1329–1339. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000700024>. Acessado em 17 de fevereiro de 2023.

Reynders [a], Brecht et al. Improving reliability and scalability of LoRaWANs through lightweight scheduling. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 3, p. 1830-1842, 2018.

Reynders [b], Brecht; WANG, Qing; POLLIN, Sofie. A LoRaWAN module for ns-3: Implementation and evaluation. In: *Proceedings of the 2018 Workshop on ns-3*. 2018. p. 61-68.

Ribeiro, Isadora Neme, Maretti, Júlio Ramos e Carnielli, Renan Liupekevicius. Como funcionam as antenas- IFGW, UNICAMP, 2019. Disponível em: <https://sites.ifi.unicamp.br/mbonanca/files/2019/11/tema10L.pdf>. Acessado em: 05/07/2023.

Sadeque, Golam et al. Bit error rate (ber) comparison of awgn channels for different type's digital modulation using matlab simulink. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, v. 13, n. 1, p. 61-71, 2015.

Santos, A.S. et al. Performance and economic analysis of Nellore cattle finished in feedlot during dry and rainy seasons. *Livestock Science*, v. 260, p. 104903, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104903>. Acessado em: 02/11/2024.

Semtech, Academy for LoRaWAN - Selecting the Correct Battery, 2022. Disponível em: <https://learn.semtech.com/mod/page/view.php?id=84>. Acessado em: 07/11/2024.

Semtech, Product Details SX1276, 2020. Disponível em: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276#diagrams>. Acesso em: 30/07/2023.

SENAR. Bovinocultura: manejo e alimentação de bovinos de corte em confinamento, 2018. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/232-BOVINOCULTURA.pdf>. Acesso em: 17/06/2023.

Sornin, Nicolas et al. Lorawan specification. LoRa alliance, v. 1, 2015. NSNAM. Tutorial, 2022, Acessado em: 6 de novembro de 2022. Disponível em: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.37/tutorial/html/quick-start.html>.

Starlink. Technology. 2024. Disponível em: <https://www.starlink.com/pt/technology>. Acessado em: 22/04/2024.

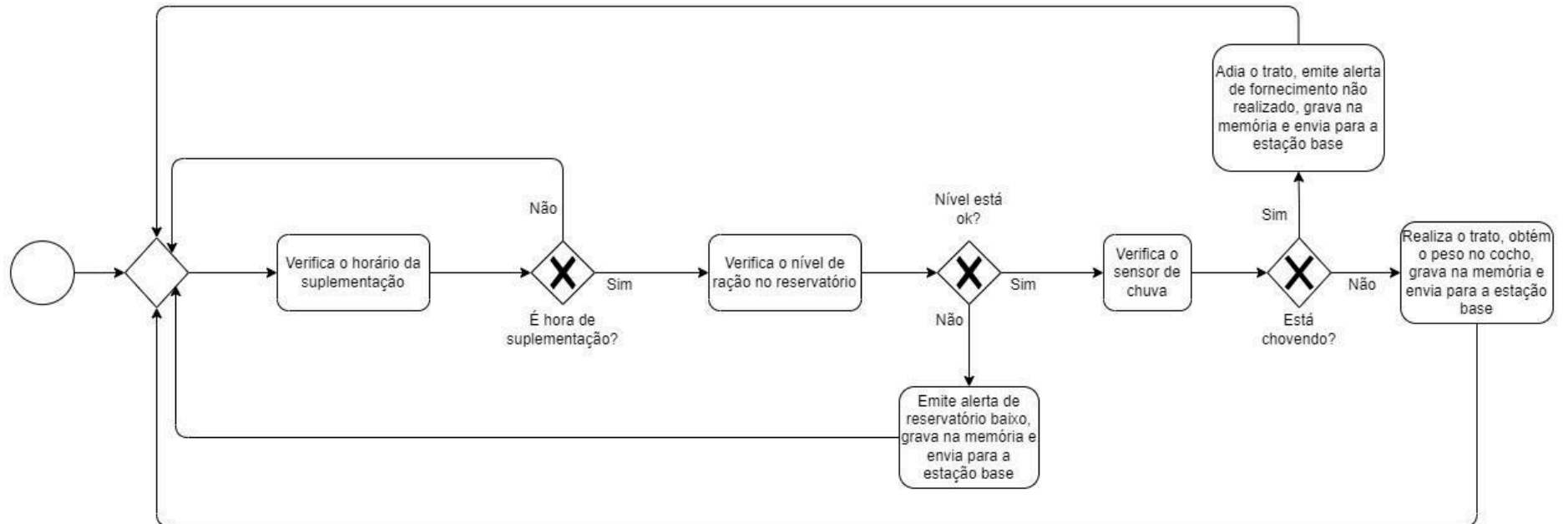
Thiago, L. R. L. de S. Silva, J. M. da. Suplementação de bovinos em pastejo. Embrapa Gado de Corte, 2001. Campo Grande, MS. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/325191>. Acessado em: 20 de fevereiro de 2024.

Valente, Antonio et al. Low-cost LoRaWAN node for agro-intelligence IoT. Electronics, v. 9, n. 6, p. 987, 2020.

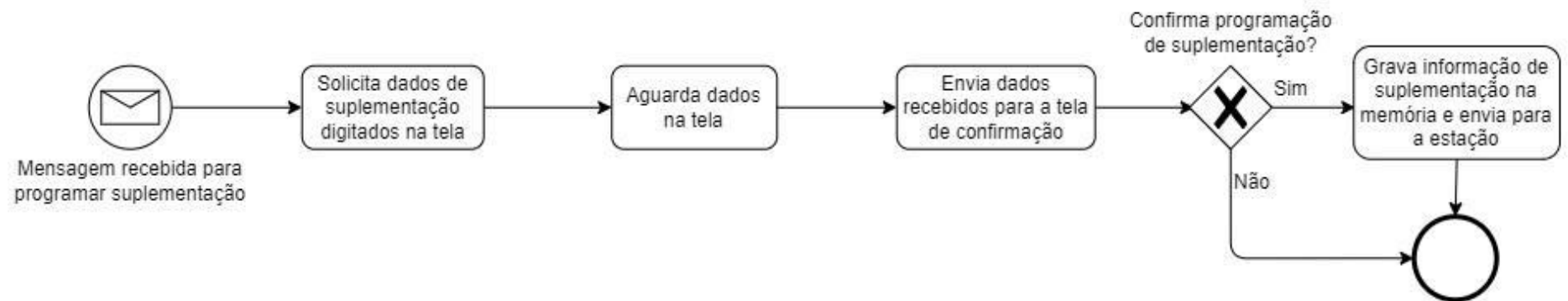
Van Den Abeele, Floris et al. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3. IEEE Internet of Things Journal, v. 4, n. 6, p. 2186-2198, 2017.[a].

## Anexo I

## Diagrama de Fluxo de Alimentação

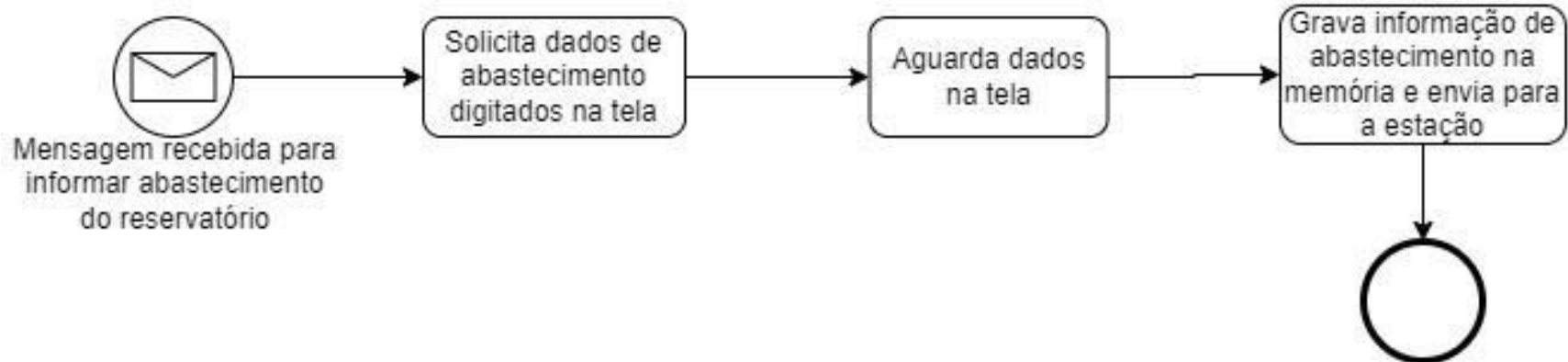


## Diagrama de Fluxo de Programação de Suplementação

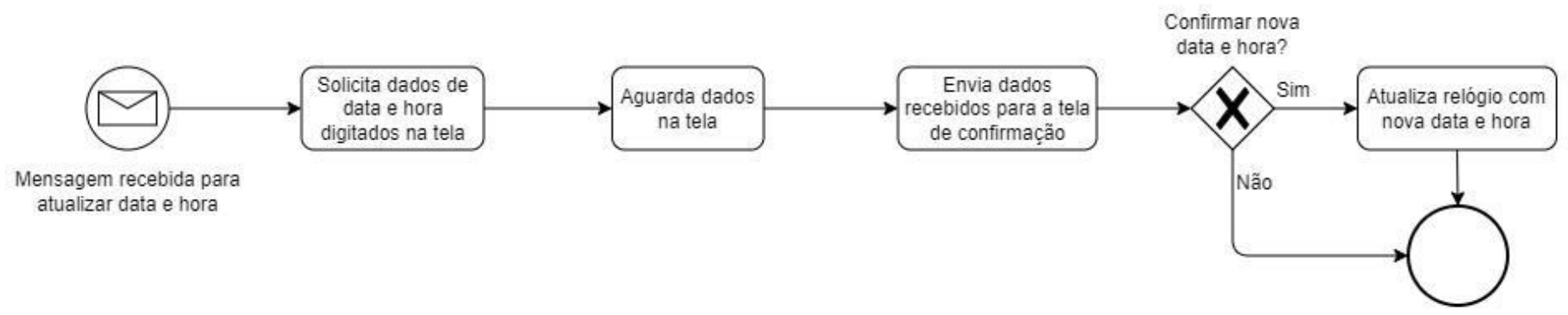




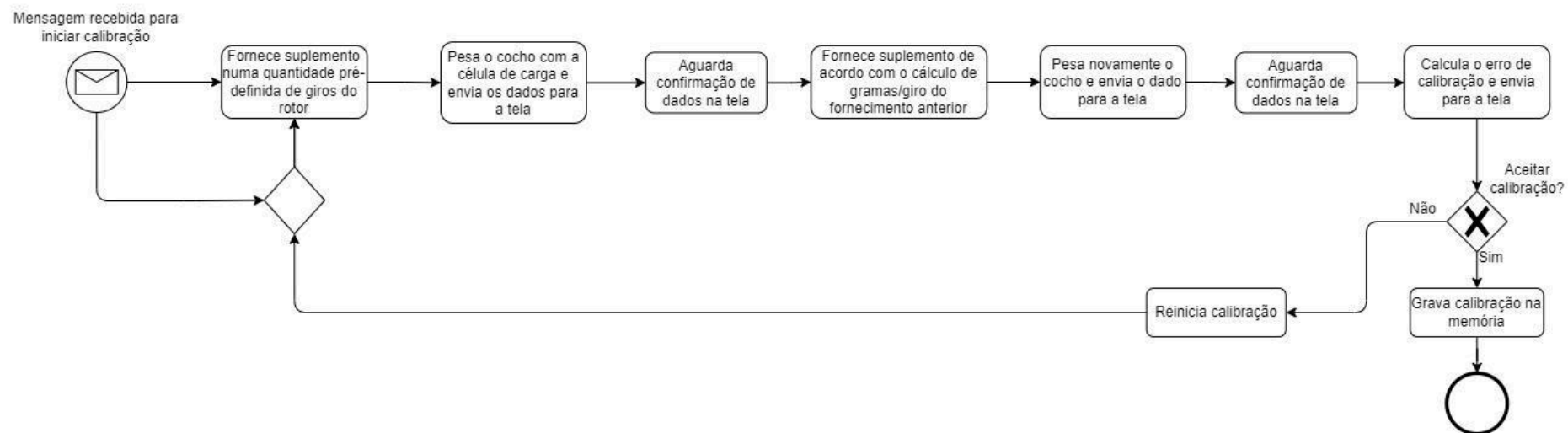
## Diagrama de Fluxo de Abastecimento



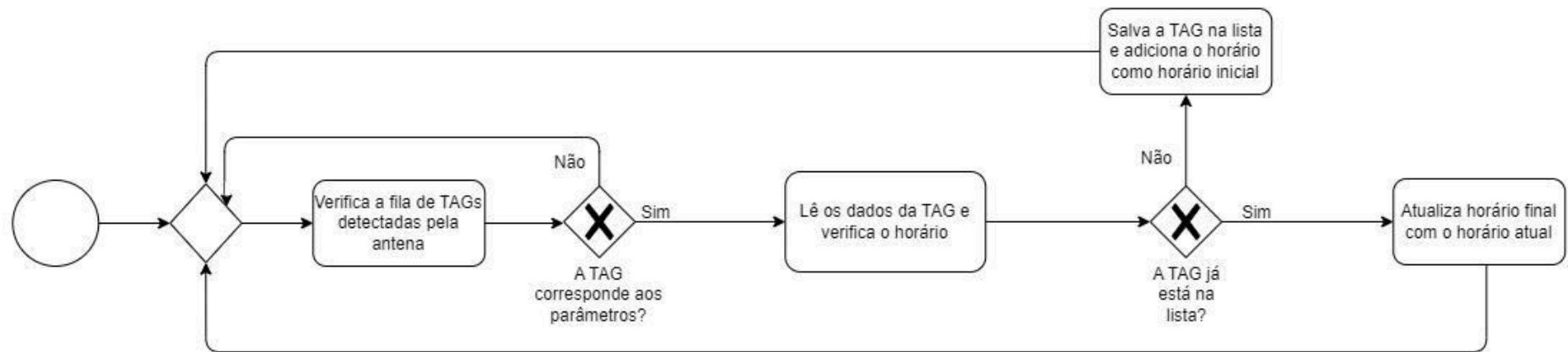
### Diagrama de Fluxo de Atualização de Data e Hora



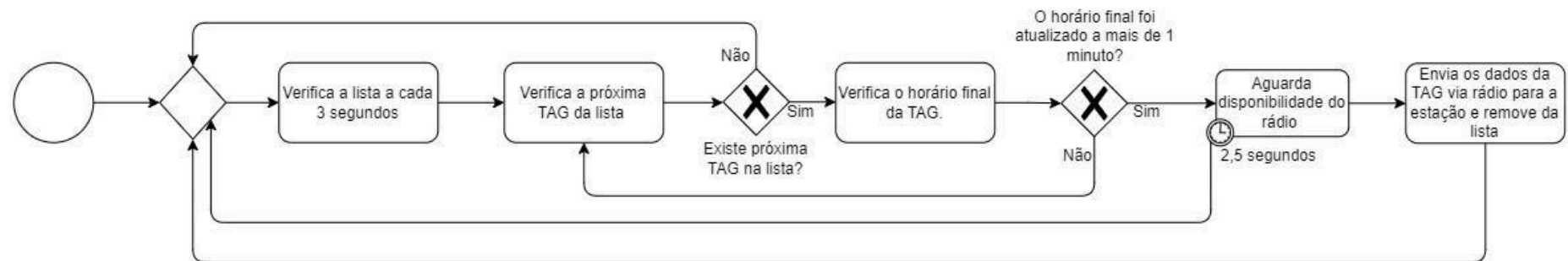
## Diagrama de Fluxo de Calibração



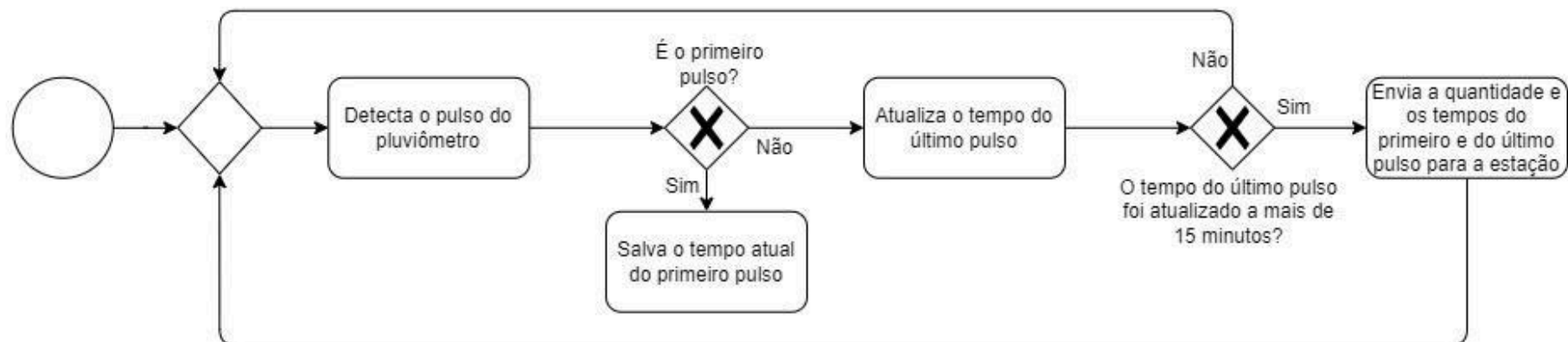
## Diagrama de Fluxo de Identificação de TAG



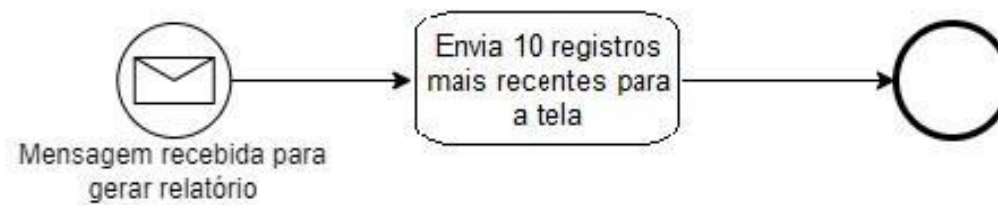
## Diagrama de Fluxo de Envio de Dados para a Estação Rádio Base - ERB



## Diagrama de Fluxo do Pluviômetro



## Diagrama de Fluxo de Geração de Relatórios



## Anexo II

### Tabelas com todos os resultados dos experimentos

Fluxo 32 Bytes	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de Gateways	Par. <i>Realistic = True</i>	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
Local 2	700	600	30	1	1	0	21	21	100	0	7	0,0719
Local 3	750	600	30	1	1	0	22	21	95	5	7	0,0719
Local 4	1000	600	30	1	1	0	23	23	100	0	7	0,0719
Local 5	1500	600	30	1	1	0	24	24	100	0	7	0,0719
Local 6	2000	600	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
Local 7	3000	600	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
Local 8	5000	600	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
Local 9	10000	600	30	1	1	0	7	7	100	0	11	0,9870
Local 10	15000	600	30	1	1	0	5	5	100	0	12	1,8100
Local 1	500	600	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
Local 2	700	600	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
Local 3	750	600	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
Local 4	1000	600	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
Local 5	1500	600	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
Local 6	2000	600	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
Local 7	3000	600	30	1	1	1	5	5	100	0	12	1,8104
Local 8	5000	600	30	1	1	1	5	3	60	40	12	1,8104
Local 9	10000	600	30	1	1	1	5	0	0	100	12	1,8104
Local 10	15000	600	30	1	1	1	5	0	0	100	12	1,8104



Fluxo 32 <i>Bytes</i>	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de <i>Gateways</i>	Par. <i>Realistic = True</i>	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
Local 2	700	600	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
Local 3	750	600	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
Local 4	1000	600	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
Local 5	1500	600	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
Local 6	2000	600	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
Local 7	3000	600	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
Local 8	5000	600	30	10	1	0	194	194	100	0	10	0,4526
Local 9	10000	600	30	10	1	0	103	103	100	0	12	1,8104
Local 10	15000	600	30	10	1	0	65	43	66,2	33,8	12	1,8104
Local 1	500	600	30	10	1	1	200	186	93,0	7,0	7	0,0719
Local 2	700	600	30	10	1	1	200	186	93,0	7,0	7	0,0719
Local 3	750	600	30	10	1	1	200	200	100	0,0	7	0,0719
Local 4	1000	600	30	10	1	1	187	187	100	0,0	7	0,0719
Local 5	1500	600	30	10	1	1	179	177	98,9	1,1	12	1,8104
Local 6	2000	600	30	10	1	1	170	155	91,2	8,8	12	1,8104
Local 7	3000	600	30	10	1	1	136	126	92,6	7,4	12	1,8104
Local 8	5000	600	30	10	1	1	84	61	72,6	27,4	12	1,8104
Local 9	10000	600	30	10	1	1	83	48	57,8	42,2	12	1,8104
Local 10	15000	600	30	10	1	1	65	30	46,2	53,8	12	1,8104

Fluxo 32 <i>Bytes</i>	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de <i>Gateways</i>	Par. <i>Realistic = True</i>	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
Local 2	700	600	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
Local 3	750	600	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
Local 4	1000	600	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
Local 5	1500	600	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
Local 6	2000	600	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
Local 7	3000	600	30	100	2	0	2000	1813	90,7	9,3	7	0,0719
Local 8	5000	600	30	100	2	0	1838	1664	90,5	9,5	10	0,4526
Local 9	10000	600	30	100	2	0	884	606	68,6	31,4	12	1,8100
Local 10	15000	600	30	100	2	0	671	286	42,6	57,4	12	1,8100
Local 1	500	600	30	100	2	1	1994	1838	92,2	7,8	10	0,4526
Local 2	700	600	30	100	2	1	1975	1856	94,0	6,0	11	0,9871
Local 3	750	600	30	100	2	1	1954	1828	93,6	6,4	12	1,8104
Local 4	1000	600	30	100	2	1	1895	1788	94,4	5,6	12	1,8104
Local 5	1500	600	30	100	2	1	1719	1633	95,0	5,0	12	1,8104
Local 6	2000	600	30	100	2	1	1529	1387	90,7	9,3	12	1,8104
Local 7	3000	600	30	100	2	1	1402	1214	86,6	13,4	12	1,8104
Local 8	5000	600	30	100	2	1	955	652	68,3	31,7	12	1,8104
Local 9	10000	600	30	100	2	1	660	285	43,2	56,8	12	1,8104
Local 10	15000	600	30	100	2	1	586	159	27,1	72,9	12	1,8104

Fluxo 32 Bytes	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de Gateways	Par. <i>Realistic = True</i>	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 2	700	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 3	750	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 4	1000	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 5	1500	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 6	2000	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 7	3000	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 8	5000	600	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
Local 9	10000	600	60	1	1	0	7	7	100	0	11	0,9871
Local 10	15000	600	60	1	1	0	4	4	100	0	12	1,8104
Local 1	500	600	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
Local 2	700	600	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
Local 3	750	600	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
Local 4	1000	600	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
Local 5	1500	600	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
Local 6	2000	600	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
Local 7	3000	600	60	1	1	1	4	4	100	0	12	1,8104
Local 8	5000	600	60	1	1	1	4	2	50	50	12	1,8104
Local 9	10000	600	60	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104
Local 10	15000	600	60	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104

Fluxo 32 <i>Bytes</i>	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de <i>Gateways</i>	Par. <i>Realistic = True</i>	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
Local 2	700	600	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
Local 3	750	600	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
Local 4	1000	600	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
Local 5	1500	600	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
Local 6	2000	600	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
Local 7	3000	600	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
Local 8	5000	600	60	10	1	0	100	100	100	0	10	0,4526
Local 9	10000	600	60	10	1	0	73	73	100	0	11	0,9871
Local 10	15000	600	60	10	1	0	46	28	60,9	39,1	12	1,8104
Local 1	500	600	60	10	1	1	100	90	90	10,0	7	0,0719
Local 2	700	600	60	10	1	1	100	95	95	5,0	7	0,0719
Local 3	750	600	60	10	1	1	100	100	100	0,0	7	0,0719
Local 4	1000	600	60	10	1	1	97	96	99	1,0	7	0,0719
Local 5	1500	600	60	10	1	1	94	89	94,7	5,3	7	0,0719
Local 6	2000	600	60	10	1	1	88	84	95,5	4,5	12	1,8104
Local 7	3000	600	60	10	1	1	79	74	93,7	6,3	11	0,9871
Local 8	5000	600	60	10	1	1	58	41	70,7	29,3	11	0,9871
Local 9	10000	600	60	10	1	1	58	31	53,4	46,6	10	0,4526
Local 10	15000	600	60	10	1	1	46	18	39,1	60,9	12	1,8104

Fluxo 32 Bytes	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de Gateways	Par. <i>Realistic = True</i>	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
Local 2	700	600	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
Local 3	750	600	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
Local 4	1000	600	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
Local 5	1500	600	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
Local 6	2000	600	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
Local 7	3000	600	60	100	2	0	1000	949	94,9	5,1	7	0,0719
Local 8	5000	600	60	100	2	0	1000	935	93,5	6,5	7	0,0719
Local 9	10000	600	60	100	2	0	595	433	72,8	27,2	11	0,9871
Local 10	15000	600	60	100	2	0	479	208	43,4	56,6	12	1,8104
Local 1	500	600	60	100	2	1	1000	956	43,4	56,6	7	0,0719
Local 2	700	600	60	100	2	1	997	953	43,4	56,6	11	0,9871
Local 3	750	600	60	100	2	1	985	946	43,4	56,6	11	0,9871
Local 4	1000	600	60	100	2	1	970	928	43,4	56,6	7	0,0719
Local 5	1500	600	60	100	2	1	916	873	43,4	56,6	11	0,9871
Local 6	2000	600	60	100	2	1	847	743	43,4	56,6	11	0,9871
Local 7	3000	600	60	100	2	1	775	674	43,4	56,6	11	0,9871
Local 8	5000	600	60	100	2	1	622	389	43,4	56,6	11	0,9871
Local 9	10000	600	60	100	2	1	478	202	43,4	56,6	11	0,9871
Local 10	15000	600	60	100	2	1	439	100	43,4	56,6	12	1,8104

Fluxo 32 Bytes	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de Gateways	Par. Realistic = True	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 2	700	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 3	750	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 4	1000	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 5	1500	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 6	2000	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 7	3000	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 8	5000	600	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
Local 9	10000	600	90	1	1	0	6	6	100	0	11	0,9871
Local 10	15000	600	90	1	1	0	4	4	100	0	12	1,8104
Local 1	500	600	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
Local 2	700	600	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
Local 3	750	600	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
Local 4	1000	600	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
Local 5	1500	600	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
Local 6	2000	600	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
Local 7	3000	600	90	1	1	1	4	4	100	0	12	1,8104
Local 8	5000	600	90	1	1	1	4	2	50	50	12	1,8104
Local 9	10000	600	90	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104
Local 10	15000	600	90	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104

Fluxo 32 Bytes	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de Gateways	Par. Realistic = True	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
Local 2	700	600	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
Local 3	750	600	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
Local 4	1000	600	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
Local 5	1500	600	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
Local 6	2000	600	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
Local 7	3000	600	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
Local 8	5000	600	90	10	1	0	68	68	100,0	0	8	0,1336
Local 9	10000	600	90	10	1	0	57	57	100,0	0	11	0,9871
Local 10	15000	600	90	10	1	0	42	25	59,5	40,5	12	1,8104
Local 1	500	600	90	10	1	1	68	64	94,1	5,9	7	0,0719
Local 2	700	600	90	10	1	1	68	65	95,6	4,4	7	0,0719
Local 3	750	600	90	10	1	1	67	67	100	0	7	0,0719
Local 4	1000	600	90	10	1	1	67	67	100	0	7	0,0719
Local 5	1500	600	90	10	1	1	65	65	100	0	12	1,8104
Local 6	2000	600	90	10	1	1	62	60	96,8	3,2	12	1,8104
Local 7	3000	600	90	10	1	1	59	54	91,5	8,5	11	0,9871
Local 8	5000	600	90	10	1	1	52	35	67,3	32,7	11	0,9871
Local 9	10000	600	90	10	1	1	48	20	41,7	58,3	12	1,8104
Local 10	15000	600	90	10	1	1	43	15	34,9	65,1	12	1,8104

Fluxo 32 <i>Bytes</i>	Distância (m)	Tempo da simulação (s)	Intervalo de tempo de envio (s)	Nós	Número de <i>Gateways</i>	Par. <i>Realistic = True</i>	Qtde de pacotes enviados	Qtde pacotes recebidos (sucesso)	Sucesso (%)	Pacotes perdidos (%)	Fator de espalhamento (SF)	Tempo no Ar (TOA) (s)
Local 1	500	600	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
Local 2	700	600	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
Local 3	750	600	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
Local 4	1000	600	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
Local 5	1500	600	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
Local 6	2000	600	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
Local 7	3000	600	90	100	2	0	671	656	97,8	2,2	7	0,0719
Local 8	5000	600	90	100	2	0	671	639	95,2	4,8	9	0,2467
Local 9	10000	600	90	100	2	0	502	353	70,3	29,7	12	1,8104
Local 10	15000	600	90	100	2	0	440	176	40	60	12	1,8104
Local 1	500	600	90	100	2	1	659	640	97,1	2,9	7	0,0719
Local 2	700	600	90	100	2	1	669	648	96,9	3,1	7	0,0719
Local 3	750	600	90	100	2	1	661	639	96,7	3,3	7	0,0719
Local 4	1000	600	90	100	2	1	653	626	95,9	4,1	12	1,8104
Local 5	1500	600	90	100	2	1	631	599	94,9	5,1	11	0,9871
Local 6	2000	600	90	100	2	1	598	526	88,0	12,0	11	0,9871
Local 7	3000	600	90	100	2	1	569	478	84,0	16,0	12	1,8104
Local 8	5000	600	90	100	2	1	507	297	58,6	41,4	12	1,8104
Local 9	10000	600	90	100	2	1	438	166	37,9	62,1	12	1,8104
Local 10	15000	600	90	100	2	1	418	89	21,3	78,7	12	1,8104



### Tabelas com resultados dos experimentos agrupados por um nó (node)

Dist	IntervaloEnvio	Nós	Gateways	Realístico	PacotesEnviados	Pacotes Recebidos	TaxaSukcesso	PacotesPerdidos	FatorEspalhamento	TOA
500	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
700	30	1	1	0	21	21	100	0	7	0,0719
750	30	1	1	0	22	21	95	5	7	0,0719
1000	30	1	1	0	23	23	100	0	7	0,0719
1500	30	1	1	0	24	24	100	0	7	0,0719
2000	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
3000	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
5000	30	1	1	0	20	20	100	0	7	0,0719
10000	30	1	1	0	7	7	100	0	11	0,987
15000	30	1	1	0	5	5	100	0	12	1,81
500	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
700	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
750	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
1000	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
1500	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
2000	30	1	1	1	20	20	100	0	7	0,0719
3000	30	1	1	1	5	5	100	0	12	1,8104
5000	30	1	1	1	5	3	60	40	12	1,8104
10000	30	1	1	1	5	0	0	100	12	1,8104
15000	30	1	1	1	5	0	0	100	12	1,8104
500	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719

700	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
750	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
1000	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
1500	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
2000	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
3000	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
5000	60	1	1	0	10	10	100	0	7	0,0719
10000	60	1	1	0	7	7	100	0	11	0,9871
15000	60	1	1	0	4	4	100	0	12	1,8104
500	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
700	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
750	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
1000	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
1500	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
2000	60	1	1	1	10	10	100	0	7	0,0719
3000	60	1	1	1	4	4	100	0	12	1,8104
5000	60	1	1	1	4	2	50	50	12	1,8104
10000	60	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104
15000	60	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104
500	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
700	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
750	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
1000	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
1500	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
2000	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719

3000	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
5000	90	1	1	0	6	6	100	0	7	0,0719
10000	90	1	1	0	6	6	100	0	11	0,9871
15000	90	1	1	0	4	4	100	0	12	1,8104
500	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
700	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
750	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
1000	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
1500	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
2000	90	1	1	1	7	7	100	0	7	0,0719
3000	90	1	1	1	4	4	100	0	12	1,8104
5000	90	1	1	1	4	2	50	50	12	1,8104
10000	90	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104
15000	90	1	1	1	4	0	0	100	12	1,8104

### Tabelas com resultados dos experimentos agrupados por dez nós

Dist	IntervaloEnvio	Nós	Gateways	Realístico	PacotesEnviados	Pacotes Recebidos	TaxaSukcesso	PacotesPerdidos	FatorEspalhamento	TOA
500	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
700	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
750	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
1000	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
1500	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
2000	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
3000	30	10	1	0	200	194	97	3	7	0,0719
5000	30	10	1	0	194	194	100	0	10	0,4526
10000	30	10	1	0	103	103	100	0	12	1,8104
15000	30	10	1	0	65	43	66,2	33,8	12	1,8104
500	30	10	1	1	200	186	93	7	7	0,0719
700	30	10	1	1	200	186	93	7	7	0,0719
750	30	10	1	1	200	200	100	0	7	0,0719
1000	30	10	1	1	187	187	100	0	7	0,0719
1500	30	10	1	1	179	177	98,9	1,1	12	1,8104
2000	30	10	1	1	170	155	91,2	8,8	12	1,8104
3000	30	10	1	1	136	126	92,6	7,4	12	1,8104
5000	30	10	1	1	84	61	72,6	27,4	12	1,8104
10000	30	10	1	1	83	48	57,8	42,2	12	1,8104
15000	30	10	1	1	65	30	46,2	53,8	12	1,8104
500	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
700	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719

750	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
1000	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
1500	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
2000	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
3000	60	10	1	0	100	95	95	5	7	0,0719
5000	60	10	1	0	100	100	100	0	10	0,4526
10000	60	10	1	0	73	73	100	0	11	0,9871
15000	60	10	1	0	46	28	60,9	39,1	12	1,8104
500	60	10	1	1	100	90	90	10	7	0,0719
700	60	10	1	1	100	95	95	5	7	0,0719
750	60	10	1	1	100	100	100	0	7	0,0719
1000	60	10	1	1	97	96	99	1	7	0,0719
1500	60	10	1	1	94	89	94,7	5,3	7	0,0719
2000	60	10	1	1	88	84	95,5	4,5	12	1,8104
3000	60	10	1	1	79	74	93,7	6,3	11	0,9871
5000	60	10	1	1	58	41	70,7	29,3	11	0,9871
10000	60	10	1	1	58	31	53,4	46,6	10	0,4526
15000	60	10	1	1	46	18	39,1	60,9	12	1,8104
500	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
700	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
750	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
1000	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
1500	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
2000	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
3000	90	10	1	0	68	66	97,1	2,9	7	0,0719
5000	90	10	1	0	68	68	100	0	8	0,1336

10000	90	10	1	0	57	57	100	0	11	0,9871
15000	90	10	1	0	42	25	59,5	40,5	12	1,8104
500	90	10	1	1	68	64	94,1	5,9	7	0,0719
700	90	10	1	1	68	65	95,6	4,4	7	0,0719
750	90	10	1	1	67	67	100	0	7	0,0719
1000	90	10	1	1	67	67	100	0	7	0,0719
1500	90	10	1	1	65	65	100	0	12	1,8104
2000	90	10	1	1	62	60	96,8	3,2	12	1,8104
3000	90	10	1	1	59	54	91,5	8,5	11	0,9871
5000	90	10	1	1	52	35	67,3	32,7	11	0,9871
10000	90	10	1	1	48	20	41,7	58,3	12	1,8104
15000	90	10	1	1	43	15	34,9	65,1	12	1,8104

### Tabelas com resultados dos experimentos agrupados por cem nós

Dist	IntervaloEnvio	Nós	<i>Gateways</i>	Realístico	PacotesEnviados	Pacotes Recebidos	TaxaSukcesso	PacotesPerdidos	FatorEspalhamento	TOA
500	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
700	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
750	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
1000	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
1500	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
2000	30	100	2	0	2000	1786	89,3	10,7	7	0,0719
3000	30	100	2	0	2000	1813	<b>90,7</b>	9,3	7	0,0719
5000	30	100	2	0	1838	1664	90,5	9,5	10	0,4526
10000	30	100	2	0	884	606	68,6	31,4	12	1,81
15000	30	100	2	0	671	286	<b>42,6</b>	57,4	12	1,81
500	30	100	2	1	1994	1838	92,2	7,8	10	0,4526
700	30	100	2	1	1975	1856	94	6	11	0,9871
750	30	100	2	1	1954	1828	93,6	6,4	12	1,8104
1000	30	100	2	1	1895	1788	94,4	5,6	12	1,8104
1500	30	100	2	1	1719	1633	95	5	12	1,8104

2000	30	100	2	1	1529	1387	90,7	9,3	12	1,8104
3000	30	100	2	1	1402	1214	86,6	13,4	12	1,8104
5000	30	100	2	1	955	652	68,3	31,7	12	1,8104
10000	30	100	2	1	660	285	43,2	56,8	12	1,8104
15000	30	100	2	1	586	159	27,1	72,9	12	1,8104
500	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
700	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
750	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
1000	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
1500	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
2000	60	100	2	0	1000	939	93,9	6,1	7	0,0719
3000	60	100	2	0	1000	949	94,9	5,1	7	0,0719
5000	60	100	2	0	1000	935	93,5	6,5	7	0,0719
10000	60	100	2	0	595	433	<b>72,8</b>	27,2	11	0,9871
15000	60	100	2	0	479	208	43,4	56,6	12	1,8104
500	60	100	2	1	1000	956	43,4	56,6	7	0,0719
700	60	100	2	1	997	953	43,4	56,6	11	0,9871
750	60	100	2	1	985	946	43,4	56,6	11	0,9871
1000	60	100	2	1	970	928	43,4	56,6	7	0,0719



1500	60	100	2	1	916	873	43,4	56,6	11	0,9871
2000	60	100	2	1	847	743	43,4	56,6	11	0,9871
3000	60	100	2	1	775	674	43,4	56,6	11	0,9871
5000	60	100	2	1	622	389	43,4	56,6	11	0,9871
10000	60	100	2	1	478	202	43,4	56,6	11	0,9871
15000	60	100	2	1	439	100	43,4	56,6	12	1,8104
500	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
700	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
750	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
1000	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
1500	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
2000	90	100	2	0	671	653	97,3	2,7	7	0,0719
3000	90	100	2	0	671	656	97,8	2,2	7	0,0719
5000	90	100	2	0	671	639	<b>95,2</b>	4,8	9	0,2467
10000	90	100	2	0	502	353	<b>70,3</b>	29,7	12	1,8104
15000	90	100	2	0	440	176	40	60	12	1,8104
500	90	100	2	1	659	640	97,1	2,9	7	0,0719
700	90	100	2	1	669	648	96,9	3,1	7	0,0719
750	90	100	2	1	661	639	96,7	3,3	7	0,0719

1000	90	100	2	1	653	626	95,9	4,1	12	1,8104
1500	90	100	2	1	631	599	94,9	5,1	11	0,9871
2000	90	100	2	1	598	526	88	12	11	0,9871
3000	90	100	2	1	569	478	84	16	12	1,8104
5000	90	100	2	1	507	297	58,6	41,4	12	1,8104
10000	90	100	2	1	438	166	37,9	62,1	12	1,8104
15000	90	100	2	1	418	89	<b>21,3</b>	78,7	12	1,8104

## Anexo III

### Código Fonte Script LoRa

```
/* Este código fonte foi adaptado e foi baseado no trabalho de David Magrin, Martina
Capuzzo, Stefano Romagnolo e Michele Luvisotto, pode ser acessado em
https://github.com/signetlabdei/lorawan
*/
```

```
*/
```

```
/*
```

```
* This script simulates a complex scenario with multiple gateways and end
* devices. The metric of interest for this script is the throughput of the
* network.
```

```
*/
```

```
/*
```

```
* Este script simula um cenário complexo com vários gateways e
* dispositivos. A métrica de interesse para este script é a taxa de transferência da rede.
```

```
*/
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <iostream>
```

```
#include "ns3/end-device-lora-phy.h"
```

```
#include "ns3/gateway-lora-phy.h"
```

```
#include "ns3/class-a-end-device-lorawan-mac.h"
```

```
#include "ns3/gateway-lorawan-mac.h"
```

```
#include "ns3/simulator.h"
```

```
#include "ns3/log.h"
```

```
#include "ns3/pointer.h"
```

```
#include "ns3/constant-position-mobility-model.h"
```

```
#include "ns3/lora-helper.h"
```

```
#include "ns3/node-container.h"
```

```
#include "ns3/mobility-helper.h"
```

```
#include "ns3/position-allocator.h"
```

```
#include "ns3/double.h"
```

```
#include "ns3/random-variable-stream.h"
```

```
#include "ns3/periodic-sender-helper.h"
```

```
#include "ns3/command-line.h"
```

```
#include "ns3/network-server-helper.h"
```

```
#include "ns3/correlated-shadowing-propagation-loss-model.h"
```

```
#include "ns3/building-penetration-loss.h"
```

```
#include "ns3/building-allocator.h"
```

```
#include "ns3/buildings-helper.h"
```

```
#include "ns3/forwarder-helper.h"
```

```
#include <algorithm>
```

```
#include <ctime>
```

```

using namespace std;
using namespace ns3;
using namespace lorawan;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("ComplexLorawanNetworkExample");

// Network settings
//Configurações da rede
int nDevices = 200; //200
int nGateways = 1; //1
double radius = 6440; //6440 Note that due to model updates, 7500 m is no longer the
maximum distance
        //Observe que, devido às atualizações do modelo, 7500 m não é mais a distância
máxima
double simulationTime = 600; //600 segundos ou 10 minutos

// Channel model
// Modelo de canal
bool realisticChannelModel = false; //false

int appPeriodSeconds = 600; //600

// Output control
bool print = true;

int main (int argc, char *argv[])
{

    cout << "Digite o número desejado de dispositivos finais a incluir na simulação: ";
    cin >> nDevices;
    cout << endl;
    cout << "Digite O raio da área em metros para a simulação: ";
    cin >> radius;
    cout << endl;
    cout << "Digite o tempo em segundos para o qual deseja simular: ";
    cin >> simulationTime;
    cout << endl;
    cout << "Digite o período em segundos a ser usado na retransmissão dos pacotes: ";
    cin >> appPeriodSeconds;
    cout << endl;
    cout << "Deseja imprimir os resultados?(se desejar digite print) ";
    cin >> print;
    cout << endl;
    /*

```

```

int main (int argc, char *argv[])
{

    CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("nDevices", "Number of end devices to include in the simulation",
nDevices);
    cmd.AddValue ("radius", "The radius of the area to simulate", radius);
    cmd.AddValue ("simulationTime", "The time for which to simulate", simulationTime);
    cmd.AddValue ("appPeriod", "The period in seconds to be used by periodically transmitting
applications",
        appPeriodSeconds);
    cmd.AddValue ("print", "Whether or not to print various informations", print);
    cmd.Parse (argc, argv);
*/

// Set up logging  Configuração dos registros log
LogComponentEnable ("ComplexLorawanNetworkExample", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("LoraChannel", LOG_LEVEL_INFO); //Scheduling reception of
the packet
    LogComponentEnable("LoraPhy", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("EndDeviceLoraPhy", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("GatewayLoraPhy", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("LoraInterferenceHelper", LOG_LEVEL_ALL); //Found an
interferer
// LogComponentEnable("LorawanMac", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("EndDeviceLorawanMac", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("ClassAEndDeviceLorawanMac", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("GatewayLorawanMac", LOG_LEVEL_ALL);
LogComponentEnable("LogicalLoraChannelHelper", LOG_LEVEL_ALL); //Time on air
// LogComponentEnable("LogicalLoraChannel", LOG_LEVEL_ALL); //Canal logico
// LogComponentEnable("LoraHelper", LOG_LEVEL_ALL); //exibe mac adress
// LogComponentEnable("LoraPhyHelper", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("LorawanMacHelper", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("PeriodicSenderHelper", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("PeriodicSender", LOG_LEVEL_ALL); // Starting up application
with seconds delay
// LogComponentEnable("LorawanMacHeader", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("LoraFrameHeader", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("NetworkScheduler", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("NetworkServer", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("NetworkStatus", LOG_LEVEL_ALL);
// LogComponentEnable("NetworkController", LOG_LEVEL_ALL);

/*****
* Setup *

```

```

*****/

// Create the time value from the period
Time appPeriod = Seconds (appPeriodSeconds);

// Mobility
MobilityHelper mobility;
mobility.SetPositionAllocator ("ns3::UniformDiscPositionAllocator", "rho", DoubleValue
(radius),
                                "X", DoubleValue (0.0), "Y", DoubleValue (0.0));
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");

/*****
* Create the channel *
*****/

// Create the lora channel object
Ptr<LogDistancePropagationLossModel> loss =
CreateObject<LogDistancePropagationLossModel> ();
loss->SetPathLossExponent (3.76);
loss->SetReference (1, 7.7);

if (realisticChannelModel)
{
    // Create the correlated shadowing component
    // Criar o componente de sombreamento correlacionado
    Ptr<CorrelatedShadowingPropagationLossModel> shadowing =
        CreateObject<CorrelatedShadowingPropagationLossModel> ();

    // Aggregate shadowing to the logdistance loss
    // Sombreamento agregado à perda de distância do log
    loss->SetNext (shadowing);

    // Add the effect to the channel propagation loss
    // Adicione o efeito à perda de propagação do canal
    Ptr<BuildingPenetrationLoss> buildingLoss = CreateObject<BuildingPenetrationLoss>
();

    shadowing->SetNext (buildingLoss);
}

Ptr<PropagationDelayModel> delay =
CreateObject<ConstantSpeedPropagationDelayModel> ();

Ptr<LoraChannel> channel = CreateObject<LoraChannel> (loss, delay);

```

```

/*****
* Create the helpers *
*****/

// Create the LoraPhyHelper
LoraPhyHelper phyHelper = LoraPhyHelper ();
phyHelper.SetChannel (channel);

// Create the LorawanMacHelper
LorawanMacHelper macHelper = LorawanMacHelper ();

// Create the LoraHelper
LoraHelper helper = LoraHelper ();
helper.EnablePacketTracking (); // Output filename
//helper.EnableSimulationTimePrinting ();
//Create the NetworkServerHelper
NetworkServerHelper nsHelper = NetworkServerHelper ();

//Create the ForwarderHelper
ForwarderHelper forHelper = ForwarderHelper ();

/*****
* Create End Devices / Criando dispositivos finais *
*****/

// Create a set of nodes
// Criando um conjunto de nós
NodeContainer endDevices;
endDevices.Create (nDevices);

// Assign a mobility model to each node
// Atribui um modelo de mobilidade a cada nó
mobility.Install (endDevices);

// Make it so that nodes are at a certain height > 0
// Faça com que os nós fiquem em uma certa altura > 0
for (NodeContainer::Iterator j = endDevices.Begin (); j != endDevices.End (); ++j)
{
    Ptr<MobilityModel> mobility = (*j)->GetObject<MobilityModel> ();
    Vector position = mobility->GetPosition ();
    position.z = 1.2;
    mobility->SetPosition (position);
}

```

```

// Create the LoraNetDevices of the end devices
// Cria os LoraNetDevices dos dispositivos finais
uint8_t nwkId = 54;
uint32_t nwkAddr = 1864;
Ptr<LoraDeviceAddressGenerator> addrGen =
    CreateObject<LoraDeviceAddressGenerator> (nwkId, nwkAddr);

// Create the LoraNetDevices of the end devices
// Cria os LoraNetDevices dos dispositivos finais
macHelper.SetAddressGenerator (addrGen);
phyHelper.SetDeviceType (LoraPhyHelper::ED);
macHelper.SetDeviceType (LorawanMacHelper::ED_A);
helper.Install (phyHelper, macHelper, endDevices);

// Now end devices are connected to the channel
// Agora os dispositivos finais estão conectados ao canal

// Connect trace sources
//Conectar fontes de rastreamento
for (NodeContainer::Iterator j = endDevices.Begin (); j != endDevices.End (); ++j)
{
    Ptr<Node> node = *j;
    Ptr<LoraNetDevice> loraNetDevice = node->GetDevice
(0)->GetObject<LoraNetDevice> ();
    Ptr<LoraPhy> phy = loraNetDevice->GetPhy ();
}

/*****
* Create Gateways *
*****/

// Create the gateway nodes (allocate them uniformly on the disc)
NodeContainer gateways;
gateways.Create (nGateways);

Ptr<ListPositionAllocator> allocator = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
// Make it so that nodes are at a certain height > 0
allocator->Add (Vector (0.0, 0.0, 15.0));
mobility.SetPositionAllocator (allocator);
mobility.Install (gateways);

// Create a netdevice for each gateway
phyHelper.SetDeviceType (LoraPhyHelper::GW);
macHelper.SetDeviceType (LorawanMacHelper::GW);
helper.Install (phyHelper, macHelper, gateways);

```



```

/*****
* Handle buildings *
*****/

double xLength = 130;
double deltaX = 32;
double yLength = 64;
double deltaY = 17;
int gridWidth = 2 * radius / (xLength + deltaX);
int gridHeight = 2 * radius / (yLength + deltaY);
if (realisticChannelModel == false)
{
    gridWidth = 0;
    gridHeight = 0;
}
Ptr<GridBuildingAllocator> gridBuildingAllocator;
gridBuildingAllocator = CreateObject<GridBuildingAllocator> ();
gridBuildingAllocator->SetAttribute ("GridWidth", UIntegerValue (gridWidth));
gridBuildingAllocator->SetAttribute ("LengthX", DoubleValue (xLength));
gridBuildingAllocator->SetAttribute ("LengthY", DoubleValue (yLength));
gridBuildingAllocator->SetAttribute ("DeltaX", DoubleValue (deltaX));
gridBuildingAllocator->SetAttribute ("DeltaY", DoubleValue (deltaY));
gridBuildingAllocator->SetAttribute ("Height", DoubleValue (6));
gridBuildingAllocator->SetBuildingAttribute ("NRoomsX", UIntegerValue (2));
gridBuildingAllocator->SetBuildingAttribute ("NRoomsY", UIntegerValue (4));
gridBuildingAllocator->SetBuildingAttribute ("NFloors", UIntegerValue (2));
gridBuildingAllocator->SetAttribute (
    "MinX", DoubleValue (-gridWidth * (xLength + deltaX) / 2 + deltaX / 2));
gridBuildingAllocator->SetAttribute (
    "MinY", DoubleValue (-gridHeight * (yLength + deltaY) / 2 + deltaY / 2));
BuildingContainer bContainer = gridBuildingAllocator->Create (gridWidth * gridHeight);

BuildingsHelper::Install (endDevices);
BuildingsHelper::Install (gateways);

// Print the buildings
//Imprime os resultados da Building
if (print)
{
    std::ofstream myfile;
    myfile.open ("buildings.txt");
    std::vector<Ptr<Building>>::const_iterator it;
    int j = 1;
    for (it = bContainer.Begin (); it != bContainer.End (); ++it, ++j)

```

```

    {
        Box boundaries = (*it)->GetBoundaries ();
        myfile << "set object " << j << " rect from " << boundaries.xMin << ", " <<
boundaries.yMin
        << " to " << boundaries.xMax << ", " << boundaries.yMax << std::endl;
    }
    myfile.close ();
}

/*****
 * Set up the end device's spreading factor *
*****/

macHelper.SetSpreadingFactorsUp (endDevices, gateways, channel);

NS_LOG_DEBUG ("Completed configuration");

/*****
 * Install applications on the end devices *
*****/

Time appStopTime = Seconds (simulationTime);
PeriodicSenderHelper appHelper = PeriodicSenderHelper ();
appHelper.SetPeriod (Seconds (appPeriodSeconds));
appHelper.SetPacketSize (23); //23
Ptr<RandomVariableStream> rv = CreateObjectWithAttributes<UniformRandomVariable> (
    "Min", DoubleValue (0), "Max", DoubleValue (10));
ApplicationContainer appContainer = appHelper.Install (endDevices);

appContainer.Start (Seconds (0));
appContainer.Stop (appStopTime);

/*****
 * Create Network Server *
*****/

// Create the NS node
NodeContainer networkServer;
networkServer.Create (1);

// Create a NS for the network
nsHelper.SetEndDevices (endDevices);
nsHelper.SetGateways (gateways);
nsHelper.Install (networkServer);

```

```

//Create a forwarder for each gateway
forHelper.Install (gateways);

//////////
// Simulation //
//////////

Simulator::Stop (appStopTime + Hours (1));

NS_LOG_INFO ("Running simulation...");
Simulator::Run ();

Simulator::Destroy ();

//////////
// Print results to file //
//////////
//NS_LOG_INFO ("Computing performance metrics...");
NS_LOG_INFO ("Calculando métricas de desempenho...");

LoraPacketTracker &tracker = helper.GetPacketTracker (); //auxiliar para obter Rastreador
de Pacotes
std::cout << tracker.CountMacPacketsGlobally (Seconds (0), appStopTime + Hours (1)) <<
std::endl; //Conte pacotes Mac globalmente
return 0;
}

```