Dissertação de Mestrado

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

Plataforma de IoT baseada em tecnologia LoRa para Pecuária de Precisão

GUILHERME PIRES PIEDADE

ABRIL / 2024



PLATAFORMA DE IOT BASEADA EM TECNOLOGIA LORA PARA PECUÁRIA DE PRECISÃO

GUILHERME PIRES PIEDADE

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra.

Santa Rita do Sapucaí
2024

Piedade, Guilherme Pires

P613p

Plataforma de IoT baseada em tecnologia LoRa para Pecuária de Precisão / Guilherme Pires Piedade – Santa Rita do Sapucaí, 2024.
103p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra
Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.
Inclui bibliografia.

1.Pecuária de Precisão 2.Internet das Coisas 3.Redes de Sensores sem Fio 4.LoRa 5.Inteligência Artificial 6.Mestrado em Telecomunicações. I. Mafra, Samuel Baraldi II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Ficha Catalográfica elaborada pelo Bibliotecário da Instituição
CRB6-2718 – Paulo Eduardo de Almeida

Biblioteca "Ministro Oliveira Bilac Pinto"

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em _____/_____/_____, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra
INATEL

Prof. Dr. Felipe Augusto Pereira de Figueiredo
INATEL

Prof. Dr. Luis Henrique Assumpção Lolis
UFPR

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Camara Brito

“Tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá”

Ayrton Senna

À minha família,
por sempre incentivar, acreditar e me apoiar em todos os momentos.

Agradecimentos

Ao longo da trajetória até alcançar esta conquista muitas experiências foram adquiridas, desde lidar com incertezas sobre a capacidade para concluir um trabalho desta natureza, até mesmo superar as frustrações em momentos difíceis. Mas certo de que desistir não é uma opção, com muita luta, paciência para recomeçar quando necessário, resiliência e fé em Deus, tudo é possível. Sou grato a Deus pelo presente da vida, saúde e perseverança me concedidos para correr atrás de meus sonhos. Pelas pessoas colocadas no meu caminho, pela minha família que sempre me apoiou e incentivou em todas as decisões. Especialmente pela minha noiva Ohana Elisa Domingos, por todo amor, compreensão e paciência nos momentos de ausência durante estes últimos anos de dedicação a este projeto.

Aos professores, que mesmo diante dos desafios encontradas no dia a dia, se dedicam à sua vocação de ensinar. Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra, agradeço pela confiança depositada em minha pessoa e meu trabalho ao permitir minha entrada no grupo de pesquisadores IoT Research Group, o qual coordena com maestria, além de toda a ajuda com revisões e orientações durante esta jornada. À equipe IoT Research Group, agradeço pela convivência harmoniosa, pelas trocas de ideias e experiências, foi uma honra fazer parte de um grupo com pessoas tão talentosas. Sem o apoio desta equipe, muitos desafios não seriam superados.

Agradeço à FAPEMIG pelo apoio ao desenvolvimento desta dissertação por meio do projeto PPE 00124-23 e EMBRAPII-MCTI (XGM-FCRH-2024-1-2-1). Agradeço à Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (FINATEL) por toda oportunidade de aprendizados que me foi concedido, e seus colaboradores por todo respeito e comprometimento dedicados aos alunos. Sem a infraestrutura, laboratórios e equipamentos oferecidos por esta instituição, o desenvolvimento deste projeto seria inviável.

Agradeço à equipe de especialistas e veterinários da Cooperativa Regional Agropecuária de Santa Rita do Sapucaí-MG, CooperRita, pelas reuniões sobre definição do projeto, buscando integrar as necessidades da agropecuária com a capacidade tecnológica da instituição de ensino, além de todo suporte necessário para a escolha da fazenda e realização dos testes em campo. Assim como os proprietários da Fazenda Cachoeira, que não mediram esforços em contribuir com o andamento dos testes de validação, cedendo a fazenda e horas de trabalho. Por fim, a todos os amigos pelo apoio, em especial ao amigo Luiz Eduardo Costa Rodrigues, que contribuiu significativamente, intermediando o contato inicial com a CooperRita, participando da definição do projeto, emprestando componentes eletrônicos para o protótipo, além de todo o incentivo e discussões produtivas ao longo do trabalho.

Guilherme Pires Piedade

Sumário

Sumário x

Lista de Figuras xii

Lista de Tabelas xiii

Lista de Abreviaturas e Siglas xv

Resumo xvii

Abstract xix

1 Introdução 1
- 1.1 Motivação . . . 5
- 1.2 Objetivos Gerais . . . 7
- 1.3 Objetivos Específicos . . . 7
- 1.4 Contribuições . . . 8
- 1.5 Organização do documento . . . 9

2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica 11
- 2.1 Tecnologias Envolvidas . . . 11
  - 2.1.1 Redes de Sensores sem Fio . . . 11
  - 2.1.2 LPWAN . . . 13
  - 2.1.3 Redes M2M . . . 17
  - 2.1.4 Inteligência Artificial . . . 19
- 2.2 Internet das Coisas (IoT) . . . 22
  - 2.2.1 IoT na Agropecuária . . . 24
- 2.3 Revisão Bibliográfica . . . 25
- 2.4 Conclusão . . . 29

3 Plataforma IoT Proposta 31
- 3.1 Arquitetura da Plataforma IoT . . . 31
- 3.2 Componentes da Plataforma . . . 32
  - 3.2.1 Rede de Sensores . . . 33
  - 3.2.2 Processamento de dados . . . 40
  - 3.2.3 Interface Gráfica de Usuário . . . 47
- 3.3 Principais Requisitos e Limitações da Plataforma . . . 48

3.3.1 Requisitos 49
3.3.2 Limitações 49

4 Implementação prática e validação da Plataforma IoT 51
4.1 Construção dos componentes da Plataforma 51
4.1.1 Dispositivo de Sensoriamento 51
4.1.2 *Gateway* LoRa 58
4.1.3 Servidor TTN 60
4.1.4 *Broker* MQTT 66
4.1.5 Banco de dados 69
4.1.6 Node-RED 72
4.2 Aprendizado de Máquina 72
4.3 Testes em Campo 76
4.4 Conclusões sobre a implementação prática da Plataforma IoT 83

5 Conclusão 85
5.1 Principais Aprendizados Adquiridos 85
5.2 Principais Conclusões 86
5.3 Trabalhos Futuros 87

Referências Bibliográficas 91

Lista de Figuras

1.1 Tecnologias de comunicação sem fio para IoT 4

2.1 Arquitetura da pilha LoRaWAN 14
2.2 Variação da frequência em função do tempo para CSS 15
2.3 Arquitetura LoRaWAN 16
2.4 Funcionamento do MQTT 18
2.5 Tipos de Aprendizado de Máquina 21
2.6 Principais Aplicações de IoT 23
2.7 Exemplo de monitoramento bovino 25

3.1 Visão geral da plataforma proposta 32
3.2 Visão geral da RSSF proposta 34
3.3 Diagrama em blocos do dispositivo de sensoriamento 34
3.4 Esquema elétrico do dispositivo de sensoriamento 35
3.5 Visão do layout do dispositivo de sensoriamento, lado Top 36
3.6 Visão do layout do dispositivo de sensoriamento, lado Bottom 36
3.7 Modelo 3D do hardware de sensoriamento 37
3.8 Projeto da caixa mecânica do dispositivo de sensoriamento 38
3.9 Raspberry Pi 3 Model B+ 38
3.10 Rádio LoRaWAN 39
3.11 Projeto da caixa mecânica do *Gateway* 39
3.12 Banco de dados SQL em contraste com NoSQL 42
3.13 Funcionamento do algoritmo Florestas Aleatórias 45
3.14 Exemplo de funcionamento do Node-Red 47
3.15 Exemplo de Interface Gráfica de Usuário do Node-Red 48

4.1 Principais componentes eletrônicos utilizados 52
4.2 Dimensão da PCB desenvolvida 53
4.3 Lado Bottom da PCB confeccionada 53
4.4 Caixa mecânica impressa para o dispositivo de sensoriamento 56
4.5 Fluxograma do firmware desenvolvido para o dispositivo de sensoriamento 57
4.6 Testes do firmware em laboratório 58
4.7 Caixa mecânica impressa para o Gateway LoRa 59
4.8 Arquivo de configuração do Gateway 61
4.9 Página inicial do servidor TTN 62
4.10 Página de registro do Gateway 62

4.11 Configuração do endereço de servidor no Gateway 63
4.12 Leitura do parâmetro EUI no Gateway 63
4.13 Modo de ativação do End node 65
4.14 Chaves geradas pelo servidor TTN 65
4.15 Chaves implementadas no firmware do End node 66
4.16 Algoritmo de conversão dos pacotes LoRa 67
4.17 Integração com broker MQTT no servidor TTN 67
4.18 Configuração do nó MQTT Client presente no Node-Red 68
4.19 Ferramenta Wireshark para análise do protocolo MQTT 69
4.20 Configuração da conexão com banco de dados em nuvem 70
4.21 Operação de Insert no banco de dados em nuvem 70
4.22 Dados armazenados no MongoDB Compass 71
4.23 Dados armazenados no MongoDB Atlas 71
4.24 Índice THI e regiões de estresse térmico 73
4.25 Distribuição das classes no banco de dados 73
4.26 Vista aérea da fazenda escolhida para validação da plataforma IoT . . 77
4.27 Vista aérea do local de testes de distância com comunicação LoRa . . 79
4.28 Configuração do simulador Radio Mobile Online 80
4.29 Resultado da simulação com Radio Mobile Online 81
4.30 Área de alimentação do rebanho de gado leiteiro 81
4.31 Fechamento do colar de monitoramento bovino 82
4.32 Colar de monitoramento instalado no animal 82
4.33 Dashboard desenvolvida para visualização dos dados processados . . 83

Lista de Tabelas

2.1 Principais aplicações de RSSF. 13
2.2 Trabalhos recentes relacionados aos tópicos de estudo desta dissertação. 29

4.1 Especificação do Gateway LoRa. 59
4.2 Métricas de cada classe presente na base de dados de forma individual. 75
4.3 Métricas de cada classe presente na base de dados para treinamento com LSTM. 76
4.4 Medidas de distância e RSSI com comunicação LoRa. 79

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANN	Rede Neural Artificial (Artificial Neural Network)
API	Interface de Programação de Aplicações (Application Programming Interface)
BLE	Bluetooth Low Energy
CAD	Computer-Aided Design
CCN	Content Centric Networking
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
CV	Visão Computacional (Computer Vision)
DT	Árvore de decisão (Decision Tree)
ESG	Governança ambiental e social (Environmental, Social and Governance)
EUI	Extended Unique Identifier
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System)
GUI	Graphical User Interface
IA	Inteligência Artificial
ICN	Information Centric Networking
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet das Coisas (Internet of Things)
IP	Internet Protocol
ISM	Industriais, científicos e médicos (Industrial, Scientific and Medical)
JSON	JavaScript Object Notation
K-NN	K-Vizinhos mais Próximos (K-Nearest Neighbor)
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LSTM	Long Short Term Memory
LTE-M	Long Term Evolution for Machines
M2M	Machine to Machine
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
ML	Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
MLP	Multi Layer Perceptron
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport

NB-IoT	NarrowBand-Internet of Things
NDN	Named Data Networking
NFC	Near Field Communication
NLP	Processamento de Linguagem Natural (Natural Language Processing)
NoSQL	Not only SQL
OLED	Organic Light-Emitting Diode
ONU	Organização das Nações Unidas
AP	Agricultura de Precisão
PCB	Printed Circuit Board
PIB	Produto Interno Bruto
PLA	Ácido Polilático (Polylacticacid)
PoC	Prova de Conceito (Proof of Concept)
PqTec	Parque Tecnológico São José dos Campos
QoS	Quality of Service
RFID	Identificação por Radiofrequência (Radio-Frequency Identification)
RF	Florestas Aleatórias (Random Forest)
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SBrT	Sociedade Brasileira de Telecomunicações
SF	Fazendas Inteligentes (Smart Farming)
SOM	Self Organing Map
SQL	Structured Query Language
SSH	Secure Socket Shell
SVM	Support Vector Machine
THI	Temperature Humidity Index
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TLS	Transport Layer Security
TTN	The Things Network
URL	Uniform Resource Locator
VBP	Valor Bruto da Produção
WAN	Wide Area Network
RSSF	Rede de Sensores sem Fio (Wireless Sensor Networks)

Resumo

O aumento da demanda por alimentos frente ao crescimento populacional mundial é um problema a ser solucionado pelas gerações atuais e cada vez mais para as futuras gerações, pois já não há mais novas áreas disponíveis para aumento de plantio. Este fato gera a necessidade de se levar tecnologia e industrialização para o campo, abrangendo diversas áreas dentro do agronegócio, como agricultura e pecuária, para o aumento da eficiência produtiva. Sendo assim, diversas instituições de pesquisa e empresas vêm empenhando esforços para desenvolverem soluções que buscam aumentar a eficiência e produtividade no campo. Atualmente, termos como Agricultura de Precisão e Pecuária de Precisão são utilizados para se referenciar a propriedades rurais que empregam tecnologia para aumentar a eficiência de seus processos. Neste cenário, a Internet das Coisas assume um lugar de protagonismo no processo de industrialização agrícola. Isto é possível graças aos avanços tecnológicos em várias áreas, como processamento de dados, dispositivos sensores e inteligência artificial, que vêm demonstrando grande potencial para monitorar e controlar as fazendas e plantações. O emprego destas tecnologias no campo abre enormes oportunidades para a diminuição de métodos manuais e onerosos ao negócio, praticados desde a antiguidade. Neste sentido, a pesquisa desenvolvida neste trabalho de mestrado, tem como principais objetivos integrar várias tecnologias emergentes de IoT para o desenvolvimento de uma plataforma capaz de maximizar a produtividade e a eficiência nos processos existentes para a aplicação da pecuária leiteira. A plataforma IoT desenvolvida opera realizando o sensoriamento das vacas-leiteiras, capturando os dados referentes ao seu comportamento, saúde e condições ambientais. Os dados são processados através de Inteligência Artificial, armazenados em banco de dados e apresentados ao usuário final por meio de *dashboard* intuitiva, gerando gráficos e informações sobre o rebanho. O sistema de comunicação utilizado entre o sensoriamento local e os serviços em nuvem, utiliza uma abordagem de Rede de Sensores sem Fio, utilizando a tecnologia LoRa como principal meio de comunicação, a qual possui como principais características ampla área de cobertura e, ao mesmo tempo, baixo consumo de energia, o que a torna ideal para aplicações como esta, tanto pela característica do Brasil de possuir grandes extensões de terras e áreas remotas, quanto em relação ao dispositivo de sensoriamento, que utiliza bateria como fonte de energia.

***Palavras-Chave*:** Pecuária de Precisão, Internet das Coisas, Redes de Sensores sem Fio, LoRa, Inteligência Artificial.

Abstract

The increase in demand for food in the face of global population growth is a problem to be solved by current generations and increasingly for future generations, as there are no longer any new areas available for increased planting. This fact generates the need to bring technology and industrialization to the countryside, covering several areas within agribusiness, such as agriculture and livestock, to increase productive efficiency. Therefore, several research institutions and companies have been trying to develop solutions that seek to increase efficiency and productivity in the field. Currently, terms such as Precision Agriculture and Precision Livestock refer to rural properties that employ technology to increase the efficiency of their processes. In this scenario, the Internet of Things is leading in agricultural industrialization. Industrialization using the Internet of Things is possible thanks to technological advances in various areas, such as data processing, sensor devices, and artificial intelligence, which have demonstrated great potential for monitoring and controlling farms and plantations. The use of these technologies in the field opens up enormous opportunities to reduce manual methods practiced since ancient times and the cost of business. In this sense, the main objectives of the research developed in this master's work are to integrate several emerging IoT technologies to develop a platform capable of maximizing productivity and efficiency in existing processes for the application of dairy farming. The IoT platform developed operates by sensing dairy cows, capturing data relating to their behavior, health, and environmental conditions. The data is processed through Artificial Intelligence, stored in a database, and presented to the end user through an intuitive dashboard, generating graphs and information about the herd. The communication system used between local sensing and cloud services uses a Wireless Sensor Networks approach, using LoRa technology as the main means of communication, which has as its main characteristics a wide coverage area and, at the same time, low energy consumption, which makes it ideal for applications like this, both due to Brazil's characteristic of having large expanses of land and remote areas and concerning the sensing device, which uses a battery as an energy source.

***Keywords*:** Precision Livestock, Internet of Things, Wireless Sensor Networks, LoRa, Artificial Intelligence.

Capítulo 1

Introdução

O termo agronegócio já passou por diferentes definições ao longo da história. Em 1955 foi definido pelo acadêmico e diplomata John Herbert Davis como a soma total de todas as operações envolvidas na produção e distribuição de alimentos e fibras. Gradualmente o termo foi sofrendo alterações ao longo das revoluções tecnológicas, chegando ao momento atual com a definição de que o setor do agronegócio é composto por todas as organizações, grandes e pequenas, com fins lucrativos, que se dedicam à produção, distribuição, comercialização ou utilização de alimentos, fibras, produtos florestais ou biocombustíveis, incluindo aquelas que fornecem água e coletam resíduos dessas organizações. De forma direta, o agronegócio se refere à aplicação de teorias e práticas de administração de empresas e organizações envolvidas na agricultura, produtos e serviços relacionados à agricultura [1].

O agronegócio no Brasil ocupa posição relevante na balança comercial, atingindo 27,4% do Produto Interno Bruto (PIB) em 2021 e 25% em 2022, o que equivale a R$2,34 trilhões e R$2,48 trilhões, respectivamente. A participação do agronegócio no PIB brasileiro saltou de 12,8% em 2000 para 27,4% em 2021, de acordo com um levantamento do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) [2]. Dentro do agronegócio, tem-se a pecuária, que em média é responsável por 30% na composição do PIB correspondente. Mais especificamente, tem-se a pecuária leiteira, ocupando a quarta posição no ranking do Valor Bruto da Produção (VBP) agropecuária, resultando em R$79 bilhões e R$77,4 bilhões nos anos de 2020 e 2021, respectivamente [3] [4].

A cadeia produtiva do leite e derivados é um setor de grande importância econômica e social para o Brasil, sendo o terceiro maior produtor mundial de leite, com mais de 34 bilhões de litros por ano, com produção em 98% dos municípios brasileiros, tendo a predominância de pequenas e médias propriedades, empregando cerca de 4 milhões

de trabalhadores. O país conta com mais de um milhão de propriedades produtoras de leite e as projeções do agronegócio da Secretaria de Política Agrícola, estimam que, para 2030, irão permanecer os produtores mais eficientes, que se adaptarem à nova realidade de adoção de tecnologia, melhorias na gestão com maior eficiência técnica e econômica [5].

De acordo com projeções da Organização das Nações Unidas (ONU), um dos maiores desafios do século XXI, será produzir quantidade de alimentos o suficiente para atender uma demanda de crescimento populacional de 1,7 bilhões de pessoas até 2050 e 2,4 bilhões até 2100, atingindo um total de 10,4 bilhões de habitantes até o final do século XXI. O desafio se torna ainda maior quando se leva em consideração o fato de que o crescimento da produção deverá ocorrer na mesma área do globo terrestre já utilizada atualmente, respeitando as diretivas de sustentabilidade, governança ambiental e social (*Environmental, Social and Governance*, ESG), para manter o meio ambiente em equilíbrio [6].

Uma das principais ferramentas de transformação para superar tais desafios da atualidade, é o emprego de pesquisas, desenvolvimento de novas tecnologias e aplicação no agronegócio. A necessidade de inovação e investimentos no desenvolvimento tecnológico é inquestionável para qualquer setor da economia que queira manter sua competitividade e crescimento ao longo dos anos.

Graças ao desenvolvimento tecnológico e as revoluções industriais desde o século XVIII, atualmente têm-se as ferramentas necessárias para o desenvolvimento de pesquisas e inovação, tão necessários para suprir a previsão de demanda por alimentos em função do crescimento populacional. A primeira revolução pode ser caracterizada pela produção mecanizada, através da invenção da máquina a vapor. No século XX, a segunda revolução industrial é marcada pela eletricidade e indústria química. No mesmo século acontece a terceira revolução, com o desenvolvimento dos computadores, eletrônica e telecomunicações [7]. Na contemporaneidade, nos situamos entre a quarta revolução industrial com a digitalização da informação, o conceito de *Big Data* e o início da quinta revolução, que aponta para o aumento das relações entre humanos e máquinas, utilizando Inteligência Artificial (IA) como um dos principais meios de interação [8].

No contexto da quarta revolução industrial, ou industria 4.0, tem-se o avanço de diversas técnicas e sistemas inteligentes capazes de fornecer informações em tempo real para auxiliar na tomada de decisão em todos os seguimentos da indústria. Dentre estes sistemas, há a Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT), que traz o conceito de uma rede de dispositivos físicos conectados, trocando informações sobre o ambiente físico

onde se encontram, por meio de sensores capturando dados em tempo real, envolvendo *softwares* e sistemas sofisticados para tal propósito. O crescimento do número de dispositivos IoT conectados nos últimos anos demonstram sua eficácia e importância para o desenvolvimento tecnológico dos países. Em 2018 haviam 7 bilhões de dispositivos conectados, já em 2021 houve um aumento expressivo neste número, atingindo 31 bilhões de dispositivos. Projeções indicam que até o final de 2025 haverá mais de 75 bilhões de dispositivos IoT conectados [9].

Dentro do universo de IoT, algumas tecnologias empregadas se destacam durante sua implementação em produtos e serviços, como Identificação por Radiofrequência (*Radio-Frequency Identification*, RFID), Rede de Sensores sem Fio (*Wireless Sensor Networks*, RSSF), *Middleware*, Computação em nuvem e Interface de Programação de Aplicações (*Application Programming Interface*, API) [10]. Onde três das tecnologias apresentadas, serão utilizadas e detalhadas ao longo desta dissertação, RSSF, computação em nuvem e APIs. As RSSF são equipamentos capazes de detectarem alterações no ambiente onde estão presentes, realizando o sensoriamento de diversos aspectos físicos como alterações de temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade, movimentação, pressão, gás entre outros. As informações geradas pelos bilhões de sensores conectados são de extrema importância, o que leva ao conceito de *Big Data* e a necessidade de sistemas de armazenamento e análise. Os sensores estão em todas as áreas de indústria e cada vez mais no cotidiano de todos, presentes no agronegócio, carros, casas, vestuários, aviação entre outros.

A infinidade de possibilidades de uso de sistemas de IoT para resolver problemas e criar inovações em várias áreas do conhecimento e da indústria, demandam meios de comunicação capazes de escoar com confiabilidade e segurança os dados de toda a informação gerada. A disponibilidade da informação é de extrema importância para ser seja processada pelas aplicações de *softwares* e visualizada através de dados legíveis ao usuário final. Há vários meios de transmissão para os dados provenientes dos sensores, cada um oferecendo vantagens e desvantagens conforme a aplicação necessária, não existindo uma solução única de IoT que atenda todos os cenários existentes. A depender do tipo de dados trafegados, do volume de informações transmitidas, há tipos de infraestruturas diferentes. Por exemplo, a necessidade de transmissão de alto volume de dados, demanda alta largura banda no espectro de frequências, o que impacta na eficiência do consumo energético desta transmissão. Por outro lado, há aplicações que demandam longas distâncias de transmissão, demandando alto custo de implantação, como no uso de infraestrutura das operadoras de telefonia celular.

Para viabilizar a implantação de bilhões de sensores de IoT como descrito anteriormente, uma das premissas é manter o custo de operação baixo, impactando em

dispositivos de baixo poder de processamento e que possuam baixo consumo enérgico. Geralmente esses dispositivos são instalados em locais de difícil acesso, em áreas remotas, como no caso de uso do agronegócio. Onde os sensores são alimentados por baterias, em que se deseja um elevado tempo de autonomia das mesmas, gerando mínima necessidade de manutenção em campo, o que elevaria os custos da operação. Desta forma, há tecnologias desenvolvidas para aplicações IoT que atuam justamente com a proposta de otimizar a transmissão de dados, proporcionando longas distâncias ao mesmo tempo que mantêm um baixo consumo energético.

Há diversas tecnologias disponíveis para implementação de meio de transmissão sem fio para as RSSF, como Wi-Fi, RFID, *Near Field Communication (NFC)*, *Bluetooth Low Energy (BLE)*, ZigBee, redes celulares 2G, 3G, 4G e 5G [11], que são amplamente utilizadas em soluções inteligentes para vários setores da indústria, inclusive agronegócio, provendo sistemas de automação, controle e monitoramento [12]. Contudo, para aplicações de IoT que demandam operações em longas distâncias, como na agropecuária e mantendo baixo consumo enérgico, existem as redes do tipo *Low Power Wide Area Network (LPWAN)*. As redes LPWAN utilizam meio de transmissão sem fio e surgiram para conectar dispositivos de baixo poder de processamento e baixo valor agregado a redes de maior poder de processamento como computação em nuvem, a um custo de conexão menor do que as demais tecnologias capazes de realizar a mesma operação. Aprofundando nas redes LPWAN, pode-se destacar pelo menos quatro tipos de tecnologias com características de longo alcance a um baixo consumo energético, são elas *Long Term Evolution for Machines (LTE-M)*, *NarrowBand-Internet of Things (NB-IoT)*, *Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)* e Sigfox [13]. A comparação entre as características de cada tecnologia descrita é apresentada na Figura 1.1.

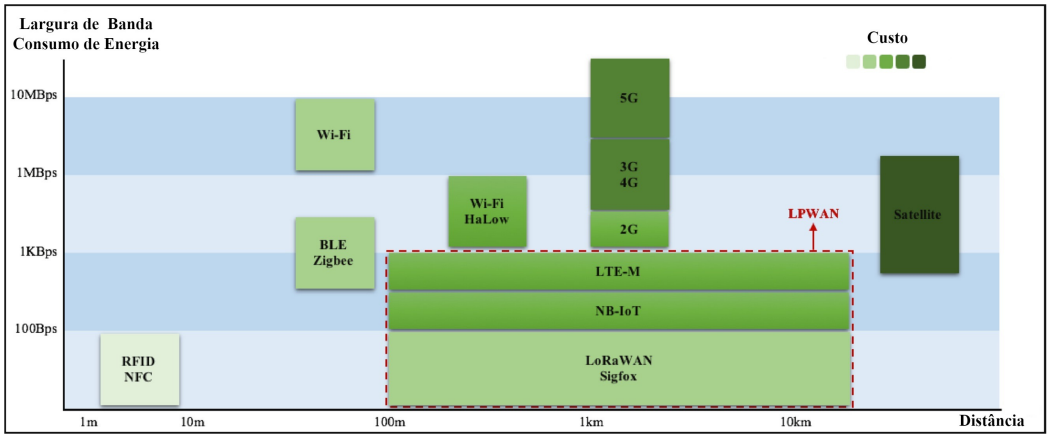


Figura 1.1: *Tecnologias de comunicação sem fio para IoT, adaptado de [13].*

A área da Inteligência Artificial aliada a sistemas de IoT pode e vem proporcionando consideráveis benefícios em todos os setores da economia. O campo de IA

abrange diversas técnicas como Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*, ML), Processamento de Linguagem Natural (*Natural Language Processing*, NLP) e Visão Computacional (*Computer Vision*, CV) [14]. Na agropecuária, pesquisadores já propuseram sistemas de CV onde a partir de técnicas de visão artificial, é possível monitorar a saúde animal, padrões de alimentação e estimativa de peso para o gado de corte. Também já foi proposto algoritmos de ML, que possibilita implementar sistemas capazes de aprender a identificar padrões a partir dos dados capturados pelas redes de sensores, automatizando trabalhos manuais no campo. A pecuária leiteira exige muitas horas de trabalhos manuais, a exemplo, a identificação do período fértil das vacas exige observação visual para realizar o processo de inseminação artificial na janela de tempo correta, ocasionando muitas perdas quando não há êxito. Para este caso, já se encontra na literatura modelos de ML com processamento autônomo, capazes de realizar a predição do momento ótimo para realizar a inseminação artificial. A capacidade destes sistemas inteligentes integrados com IoT e agronegócio, nos conduz aos termos Agricultura de Precisão (AP) e Fazendas Inteligentes (*Smart Farming*, SF), que vêm de encontro às necessidades de otimizar a produção de alimentos frente aos desafios de atender uma população mundial crescente, sem a possibilidade de aumentar as áreas de cultivo e pastagens existentes [15].

1.1 Motivação

Desde o início da humanidade a prática da agricultura e agropecuária são responsáveis pela produção de alimentos, permanecendo no tempo contemporâneo e futuramente. No entanto, assim como em diversos setores da economia, transformações digitais sem fazem necessárias para atender a demanda crescente por produção de alimentos, indicada nos últimos relatórios da ONU. Além da demanda por aumento da produção agrícola, outro fator importante a se considerar é o êxodo rural, que é crescente ao redor do mundo. Atualmente a urbanização mundial é de aproximadamente 49%, com previsão de aumento estimado para aproximadamente 70% até 2050 [16]. O Brasil, apesar de ser um dos principais países produtores de alimentos para o mundo, possui números de urbanização significativamente maiores. Em 1970, 56% dos brasileiros moravam em áreas urbanas, atualmente este número já avançou para aproximadamente 85%, com projeção de atingir urbanização de 92% até 2050 [17].

Nos últimos anos, várias tecnologias vêm sendo pesquisadas e desenvolvidas com o propósito de servir como meio para levar eficiência e aumento da produção para o campo. Tecnologias como IoT, RSSF, CV, ML e LPWAN estão sendo aplicadas em diversos países na agricultura e agropecuária. Os números previstos para o uso de IoT em

2050 demonstram a expressiva expectativa de uso destas tecnologias, com projeções de 2 bilhões de sensores instalados em 525 milhões de fazendas pelo mundo [18]. Neste contexto, IoT e as demais tecnologias citadas vêm sendo utilizadas com o propósito de automatizar e otimizar a cadeia dos processos manuais utilizados atualmente, principalmente no meio rural. RSSF e técnicas de ML podem ser utilizadas para processamento dos dados coletados de rebanhos de pecuária leiteira, gerando indicativos da saúde animal, produção leiteira e período de fertilidade para realização de inseminação artificial no momento certo, evitando ônus para a cadeia produtiva e o produtor.

Tendo em vista tamanha necessidade de implementação de tecnologia no campo e as oportunidades de desenvolvimento do país, o governo brasileiro, buscando fomentar o desenvolvimento de IoT na sociedade, instituiu o Plano Nacional de Internet das Coisas, por meio do Decreto nº 9.854, de 25 de junho de 2019, com a finalidade de implementar e desenvolver a Internet das Coisas no país, com base na livre concorrência de mercado [19]. Gerenciado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o Plano Nacional busca alcançar os seguintes objetivos:

- Melhorar a qualidade de vida das pessoas e promover ganhos de eficiência nos serviços, por meio da implementação de soluções de IoT;
- Promover a capacitação profissional relacionada ao desenvolvimento de aplicações de IoT e a geração de empregos na economia digital;
- Incrementar a produtividade e fomentar a competitividade das empresas brasileiras desenvolvedoras de IoT, por meio da promoção de um ecossistema de inovação neste setor;
- Buscar parcerias com os setores público e privado para a implementação da IoT;
- Aumentar a integração do País no cenário internacional, por meio da participação em fóruns de padronização, da cooperação internacional em pesquisa, desenvolvimento e inovação e da internacionalização de soluções de IoT desenvolvidas no País.

O Plano Nacional de IoT, evidencia a necessidade do desenvolvimento de pesquisas e projetos de IoT voltados para o avanço tecnológico do Brasil. Atualmente, há inúmeros projetos de pesquisas internacionais voltadas para agricultura e pecuária, demonstrando simulações e estudos de viabilidade. Porém, poucas soluções com implementação em aplicações reais que atenda o cenário da agropecuária do Brasil com todas suas especificidades e particularidades, como grandes extensões de áreas de pastagem, exigindo avanços tecnológicos das redes de telecomunicações com a demanda de cobertura de sinal, por outro lado, problemas relacionado a furto de animais.

1.2 Objetivos Gerais

Conforme o cenário apresentado sobre IoT no Brasil, tem-se como principal objetivo desta pesquisa, o desenvolvimento de uma plataforma de IoT com as últimas tecnologias *open source* disponíveis na literatura, que atenda a demanda pela digitalização do setor da pecuária leiteira brasileira. O projeto proposto visa reduzir horas de trabalhos manuais com a prática de monitoramento visual do rebanho, aumentar a produção de leite através do monitoramento automatizado e individual da saúde animal, por meio de colar contendo sensores que são acoplados ao pescoço de cada animal do rebanho, além de realizar o sensoriamento das condições ambientais e gerar alerta de estro (cio). Com a identificação precisa do período fértil das vacas, evitam-se prejuízos com perda de inseminação artificial, remédios para indução de estro, ou tempo de espera de 21 dias em média para um novo ciclo natural. Outra forma que este trabalho busca reduzir prejuízos para o produtor, é através de alerta de furto de gado, frequente em áreas remotas.

A plataforma desenvolvida deverá prover cobertura de sinal em áreas remotas, receber os dados capturados pelos sensores, processá-los em tempo real, detectar condições atípicas e apresentar os dados processados ao usuário, por meio de *dashboard*. Além disso, a proposta é desenvolver e implementar um projeto de baixo custo, que seja acessível tanto para fazendas de grande porte com larga escala, quanto para fazendas de pequeno porte.

1.3 Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica da literatura atual com aplicações de IoT em geral com as tecnologias disponíveis;
- Revisão bibliográfica da literatura atual com aplicações de IoT para agropecuária;
- Revisão bibliográfica da literatura atual para investigar as principais contribuições tecnológicas já propostas para a pecuária;
- Pesquisas na literatura atual para identificar oportunidades de contribuição, possibilidades de melhorias em trabalhos já desenvolvidos com IoT para a pecuária leiteira;
- Pesquisas sobre métodos de implementação de aprendizagem de máquina em cenário real;
- Estudo de caso prático em ambiente rural com a tecnologia LoRa;
- Desenvolvimento de *hardware* e *firmware* do dispositivo de sensoriamento bo-

vino;

- Desenvolvimento da plataforma que integra as soluções voltadas para o monitoramento bovino e disponibiliza os dados em *dashboard*;
- Desenvolvimento de uma Prova de Conceito (*Proof of Concept*, PoC) de um sistema IoT aplicado na pecuária leiteira;
- Testes de validação da plataforma em cenário real, realizados na fazenda Cachoeira, localizada em Santa Rita do Sapucaí-MG.

1.4 Contribuições

Uma das principais contribuições da pesquisa e desenvolvimento realizados que originaram esta dissertação, está na validação de uma plataforma de IoT voltada para o cenário real da pecuária brasileira, demonstrando sua viabilidade de implantação, levando em consideração fatores como custo-benefício e oportunidade de atender a demanda por tecnologia no campo através do desenvolvimento de uma solução nacional. A plataforma foi desenvolvida de maneira a oferecer escalabilidade, pensando em cenários de grandes rebanhos ou extensões de pastagem, assim como cenários de pecuária familiar. Várias tecnologias foram pesquisadas para avaliação do que poderia ser empregado na pecuária leiteira, por outro lado, várias pesquisas foram realizadas a fim de entender os processos manuais realizados no manejo do rebanho e que poderiam ser aprimorados com o emprego de IoT.

Durante o trabalho de pesquisa e testes iniciais foi desenvolvido um artigo, no qual foram descritos os resultados obtidos até então. Este artigo foi publicado e apresentado no XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, Sociedade Brasileira de Telecomunicações (SBrT), realizado no Parque Tecnológico São José dos Campos (PqTec). Além de participação como coautor na publicação de dois outros artigos relacionados com a área de IoT.

- Guilherme P. Piedade, Samuel B. Mafra, Danilo M. de Oliveira and Mateus R. da Cruz, “Design, Deployment, and Validation of a Low-Cost IoT Platform based on LoRa for Precision Dairy Farming”, Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023.
- D. M. Oliveira, M. R. Cruz, S. Mafra, e F. A. P. de Figueiredo, E. H. Teixeira e G.P. Piedade “Application of YOLOv7 for real-time detection of Aedes Aegypti”, Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023.

- Mateus R. Cruz, Adriana M. F. Grael, Guilherme P. Piedade, and Samuel B. Mafra, ”Smart Farming with Computer Vision: Detecting Diseases in Strawberry Crops via Mobile Applications”, Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023.

1.5 Organização do documento

A dissertação está estruturada de forma cronológica e dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 introduz a área de pesquisa e números do seguimento objeto de estudo desta dissertação, assim como descreve as principais motivações para realização da pesquisa, descreve os objetivos propostos de forma macro e também de forma específica. Expõe as principais contribuições alcançadas ao longo da pesquisa e desenvolvimento do projeto, além de apresentar a organização da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão teórica da literatura, abordando os principais trabalhos e contribuições relacionadas ao tema da área pesquisada. As principais tecnologias e conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho são apresentados como parte da fundamentação teórica. Dentre os quais pode ser citado IoT, LoRa, RSSF e ML.

O Capítulo 3 descreve a plataforma de IoT proposta, apresentando a arquitetura de *hardware*, *firmware* e aplicações desenvolvidas para realizar o monitoramento de saúde e comportamento bovino, bem como processar os dados capturados pela rede de sensores sem fio e apresentá-los em *dashboard*.

O Capítulo 4 discorre sobre os testes realizados em campo e avalia o desempenho da plataforma proposta, analisando testes exploratórios sobre a capacidade de alcance da rede de sensores em áreas remotas, funcionamento do *hardware* do dispositivo de sensoriamento proposto, sob condições de uso em ambiente real, além de analisar o desempenho dos servidores de computação em nuvem utilizados.

O Capítulo 5 conclui a dissertação, apresentando as principais contribuições, dificuldades encontradas e por fim sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

ESTE capítulo tem como objetivo apresentar a fundamentação teórica com as tecnologias, conceitos e protocolos utilizados no desenvolvimento da plataforma. Além de apresentar uma revisão bibliográfica levando em consideração os principais trabalhos desenvolvidos recentemente em IoT, voltado para monitoramento na agropecuária e agricultura.

2.1 Tecnologias Envolvidas

As aplicações de IoT são amplas, envolvendo diversas tecnologias para alcançar o propósito desejado com sua implantação. As redes de sensores sem fio, por exemplo, estão presentes em muitas aplicações de IoT e podem ser projetadas para operar em vários protocolos e meios de transmissão diferentes, seja para otimizar distância, priorizar consumo de energia ou taxa de transferência de dados. Esta seção tem por objetivo apresentar as principais tecnologias envolvidas na plataforma de IoT desenvolvida neste trabalho.

2.1.1 Redes de Sensores sem Fio

As RSSF estão presentes na maioria das aplicações IoT, sendo essenciais para garantir a comunicação de diferentes sistemas e, ao mesmo tempo, garantir escalabilidade ao projeto. São definidas como um sistema composto por transmissores e receptores de radiofrequência, sensores para interação com o meio físico, microcontroladores para processamento dos dados capturados e sistemas de energia. Há diversos casos de uso das RSSF na agricultura, agropecuária e fazendas inteligentes, provendo sis-

temas de monitoramento, automatização de tarefas repetitivas e melhor controle da produção [20].

Para a comunicação sem fio entre os sensores, há várias tecnologias disponíveis na literatura, sendo as principais BLE [21], ZigBee [22], RFID [23], LoRa [24] e Wi-Fi. Uma das principais vantagens desse tipo de rede está na possibilidade de implantação em ambientes externos, áreas de risco, de difícil acesso, entre outras. O que atende perfeitamente às aplicações no campo, em fazendas. Para o projeto de implantação das RSSF alguns fatores devem ser avaliados, como disponibilidade de acesso ao meio de comunicação, taxa de dados a ser trafegada, consumo de energia, forma de alimentação do sistema e latência. Onde a disponibilidade de acesso se refere a probabilidade de um determinado nó ter sucesso na transmissão dos dados. Enquanto a taxa de dados representa a quantidade de dados que podem ser transmitidos pela rede em um determinado período de tempo. Já o consumo de energia, está relacionado a quantidade de energia necessária para que um nó ou sensor da rede possa transmitir e receber dados. A alimentação da rede pode ser de diferentes formas, seja por bateria, painel solar ou outras fontes renováveis. Por último, a latência representa o tempo necessário para que os dados sejam transmitidos da origem até o destino. Todos esses fatores são levados em consideração para operação da RSSF com eficiência [25].

A eficiência de operação de uma RSSF também está relacionada a boa gestão da rede, que envolve o gerenciamento de energia e de dados na rede. O gerenciamento do consumo energético tem por objetivo a redução da demanda dos sensores por energia e melhorar o desempenho da rede. Enquanto gerenciamento de dados tem por objetivo otimizar a utilização da rede e minimizar a latência na transferência dos dados. Estratégias de gerenciamento passam pela escolha assertiva das tecnologias de transmissão de dados utilizadas, analisando o melhor custo-benefício entre consumo energético dos sensores e disponibilidade dos dados em tempo hábil para o processamento desejado. As escolhas devem se basear no cenário e realidade que a aplicação desejada demanda, nos objetivos que a solução desenvolvida pretende atender [26].

As RSSF estão associadas a várias aplicações IoT devido às suas principais características como:

- Escalabilidade na expansão da rede;
- Menor custo de implantação;
- Flexibilidade na instalação dos nós de sensoriamento;
- Maior capacidade de cobertura;
- Menor consumo de energia.

A Tabela apresenta um resumo das principais aplicações que utilizam RSSF [27].

Tabela 2.1: *Principais aplicações de RSSF.*

Aplicação	**Tipo de monitoramento**	**Parâmetros**
Pecuária	Comportamento e saúde	Aceleração, temperatura, batimento cardíaco, etc.
Agricultura	Plantação, solo e clima	Nutrientes, pH, umidade, etc.
Militar	Segurança e proteção	Infravermelho, movimentação, etc.
Saúde	Cuidados intensivos	Batimento cardíaco, pulsação, temperatura, etc.
Infraestrutura	Vigilância e controle	Temperatura, movimentação, vibração, deformação, força, etc.
Logística	Rastreabilidade	Radiofrequência, aceleração, etc.
Meio ambiente	Observação e controle	pH, Ferro, nutrientes, etc.

2.1.2 LPWAN

O uso das tecnologias tradicionais de acesso à Internet como Wi-Fi, Ethernet, 3G e 4G podem ser aplicadas à IoT, porém o consumo de bateria dos dispositivos é um dos principais fatores determinantes para a viabilidade ou não da utilização dessas tecnologias. No entanto, com o avanço tecnológico das tecnologias de comunicação, há outras opções de acesso à Internet, que apresentam menor consumo de energia. Aplicações que não demandam redes de longo alcance, podem utilizar redes com as tecnologias ZigBee e BLE. Porém, redes que necessitam de transmissão de dados em longas distâncias, mantendo baixo consumo de energia, requerem outro tipo de rede, denominada rede de Área Ampla de Baixa Potência, LPWAN [28].

As redes LPWAN foram projetadas para atenderem aplicações de IoT, que requerem conectividade a longas distâncias entre os nós da rede, com baixo consumo de energia em detrimento de baixas taxas de transmissão. Dentre as redes LPWAN, podem ser citadas como principais tecnologias: LTE-M, NB-IoT, LoRa e SigFox [13]. Estas redes se assemelham pelas características de baixo consumo de energia, topologia de rede em estrela e frequência de operação, que permite transmissões em longas distâncias.

Redes LTE-M e NB-IoT são fornecidas pelas operadoras de telefonia móvel, que utilizam bandas de frequências não ocupadas pelo 4G, mas que oferecem taxas de dados maiores do que as demais, a um custo de operação maior. O LoRa possui redes gratuitas, mas também é possível criar sua própria rede privada, com taxas de transferência razoáveis. Enquanto SigFox possuem redes de operação privadas de algumas empresas que fornecem o serviço, apresentando taxas de transferência de dados limitada [29].

LoRa

A tecnologia *Long Range (LoRa)* foi desenvolvida a partir de uma *startup* francesa em 2010 e adquirida pela fabricante de semicondutores Semtech Corporation em 2012, que é a atual detentora da tecnologia. A arquitetura de uma rede LoRa pode ser dividida em duas camadas: A camada física (PHY), no qual está inserida a modulação LoRa, e a camada de enlace (MAC), onde está presente o protocolo LoRaWAN. A Figura 2.1 ilustra a separação entre as camadas [29]. O LoRa Alliance é um padrão de código aberto que pode ser utilizado livremente para desenvolvimento de dispositivos e *Gateways* para as redes LPWAN [30].

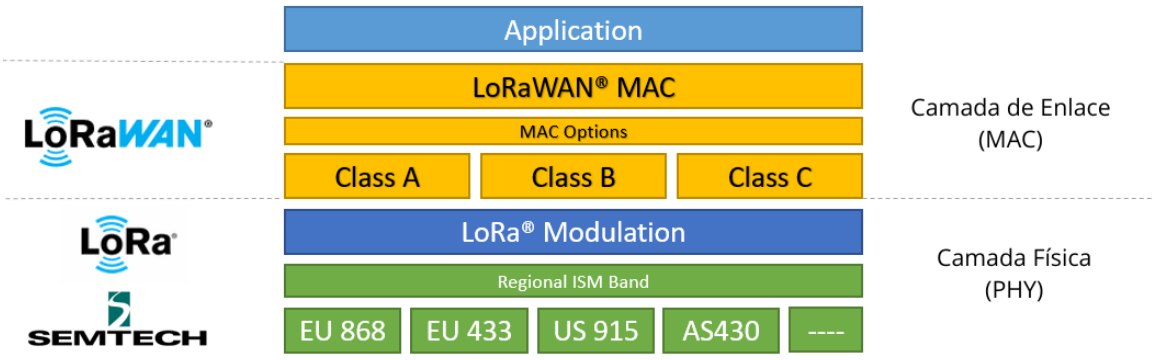


Figura 2.1: *Arquitetura da pilha LoRaWAN, adaptado de [31].*

A modulação LoRa utiliza a faixa sub-GHz, onde no Brasil opera na faixa de 915 MHz a 928 MHz, o que permite alcançar distâncias de 5 km em áreas urbanas a até 15 km em áreas rurais com baixo consumo de energia. Possui segurança com criptografia baseada no algoritmo AES-128b e apresenta como fatores de atração o seu custo aceitável e adesão de diversos fabricantes de *hardware* que a estão adotando em seus produtos. A modulação consiste em um esquema de espalhamento espectral baseado em *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, que foi desenvolvida para aplicações em radar na década de 1940, tradicionalmente a modulação CSS vinha sendo utilizada apenas em aplicações militares. A primeira vez que ela foi proposta para sistemas de comunicação data de 1962, quando Winkler introduziu o conceito da modulação sugerindo que a

sinalização binária pudesse ser alcançada usando um par de *chirps* lineares [32] [33].

O uso desta técnica de modulação tem aumentado nos últimos anos, devido às suas características robustas e com baixa potência de transmissão. Isso confere não só redução no consumo de energia, como também longo alcance, mantendo robustez diante da degradação do canal por mecanismos como multipercurso, desvanecimento, efeito Doppler e interferências. CSS utiliza pulsos de *chirp* modulados em frequência que varia linearmente com o tempo por toda a banda para codificar informações. Logo, um símbolo é um *chirp*. Para gerá-lo, o modem modula a fase de um oscilador. O número de vezes por segundo que o modem ajusta a fase é chamada de *chiprate*, e define a largura da banda da modulação [34]. Tipicamente, as larguras de bandas utilizadas são de 125 kHz para canais de *uplink* e 500 kHz para *downlink*. Como exemplo, considere que em uma banda de 125 kHz temos 125.000 *chirps* por segundo e seu período é de 8 microssegundos. Ou seja, um *chirp* é enviado por segundo por Hz da banda [35]. A Figura 2.2 mostra o gráfico da modulação LoRa.

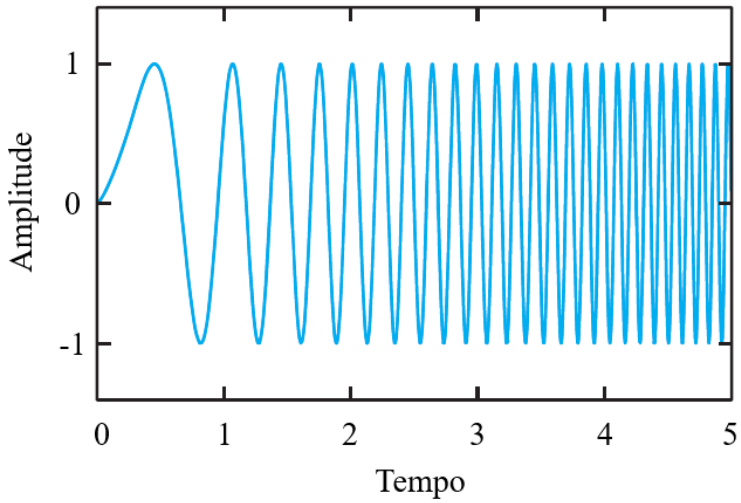


Figura 2.2: *Variação da frequência em função do tempo para CSS, adaptado de [31].*

LoRaWAN

LoRaWAN é um dos protocolos e arquiteturas pertencentes as redes LPWAN. Utiliza bandas de frequência não licenciadas na faixa de sub-GHz e são caracterizadas por links de rádio de longo alcance. Embora a camada física de LoRa seja proprietária, o restante da pilha de protocolos, conhecida como LoRaWAN, é mantida aberta. Seu desenvolvimento é realizado pela LoRa Alliance, liderada por IBM, Actility, Semtech e Microchip [36]. Dentre os principais elementos de sua arquitetura, pode ser citado os dispositivos finais (*End nodes*), que são os sensores, concentradores (*Gateways*),

servidores de rede (*Network Servers*) e servidores de aplicação (*Application Server*), conectados conforme apresentado na Figura 2.3.

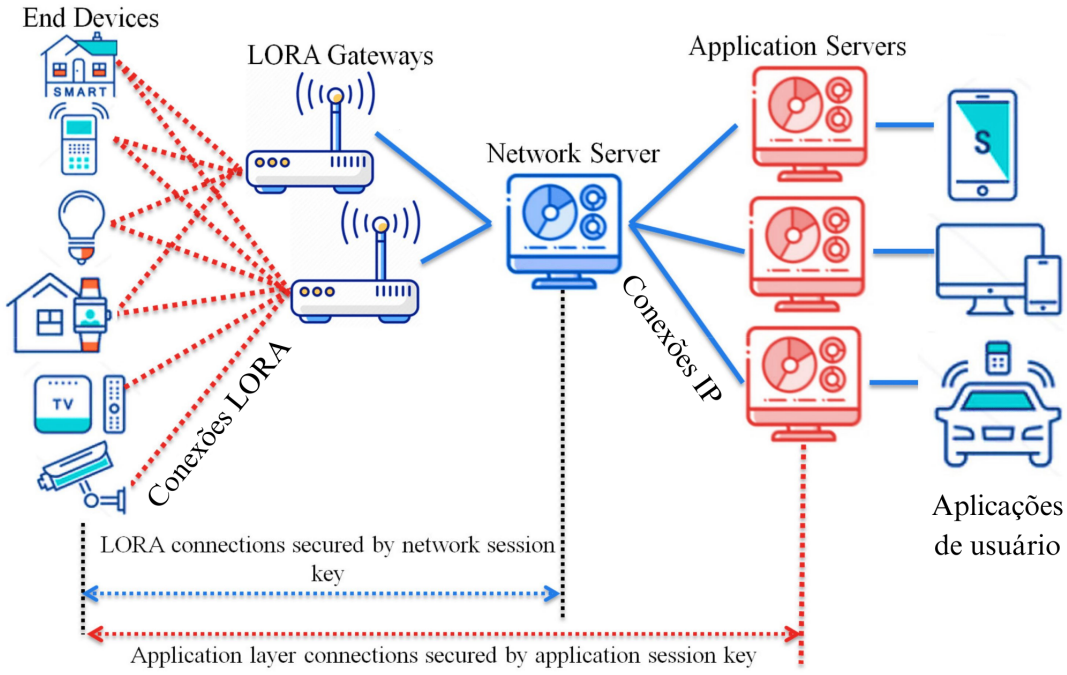


Figura 2.3: *Arquitetura LoRaWAN, adaptado de [37].*

As funções de cada elemento são descritas de maneira resumida a seguir:

- *End node* ou *End device*: É o dispositivo de sensoriamento que realiza leituras periódicas do meio físico. Geralmente possui incorporados microcontrolador, sensores, bateria e rádio LoRa. São conectados em topologia estrela por meio de *link* de rádio bidirecional a um ou mais *Gateways* por um único salto, como mostra a Figura 2.3.
- *Gateway*: É responsável por retransmitir mensagens entre os *End nodes* e os *Network Servers*, realizando a interface de comunicação entre o *End node* e a rede *Internet Protocol (IP)*. O *Gateway* não realiza nenhum tratamento nos dados, apenas verifica a integridade dos dados de cada pacote recebido. Se a integridade estiver comprometida, ou seja, com *Cyclic Redundancy Check (CRC)* incorreto, o pacote é descartado. Se estiver correta, o pacote é encaminhado para o *Network Server* com alguns metadados, como o nível de potência do sinal recebido *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* e *timestamp*.

  Ao contrário dos sistemas de telefonia móvel, os *End nodes* não precisam se associar a um determinado *Gateway* para obter acesso à rede, neste caso é necessário se associar apenas ao *Network Server*. Desta maneira, vários *Gateways* podem receber o mesmo pacote de um único *End node*. Pois o *Network Ser-*

ver filtra e elimina pacotes duplicados com base nos níveis RSSI de pacotes idênticos, escolhendo o *Gateway* que recebeu o pacote com o melhor nível de potência de sinal. Este modelo de funcionamento simplifica o gerenciamento de operação da rede, permitindo a troca de localidade dos sensores por exemplo, permutando entre diferentes *Gateways*, uma vez que a complexidade do gerenciamento dos nós é transferida para o *Network Server*.

- *Network Server*: Responsável por realizar a gerência da rede, estabelece conexões seguras para aplicações de usuários finais e elimina mensagens duplicadas recebidas por diferentes *Gateways*. Ademais, garante não só a autenticidade de todos os *End nodes* e *Gateway* conectados à rede, mas também a integridade dos pacotes.
- *Application Server*: É responsável pelo processamento, manipulação e apresentação dos dados enviados pelos *End nodes* para os usuários finais. A partir do *Application Server*, é possível criar interfaces gráficas e *dashboards*, além de oferecer a possibilidade de envio de comandos para os *End nodes* [37].

2.1.3 Redes M2M

Com objetivo de proporcionar uma rede escalável, que possibilite interoperabilidade entre dispositivos de fabricantes diferentes, foi verificado a necessidade do desenvolvimento de protocolos *Machine to Machine (M2M)*. Esse conceito de rede é aplicado geralmente a Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) que são capazes de monitorar, entregar, processar e reagir às informações de maneira autônoma. As mensagens são trocadas diretamente entre os dispositivos sem intervenção humana. Um dos principais protocolos de comunicação para redes M2M, é o MQTT, reconhecido como referência por sua simplicidade, eficiência e segurança [38].

MQTT

O protocolo MQTT foi criado pela IBM no fim da década de 90, para transmissão de mensagens entre oleodutos e satélites. Projetado para ser um protocolo escalável, sua principal característica é desmembramento entre emissor e receptor da mensagem. Ou seja, a comunicação entre os envolvidos é assíncrona e não sofre influências com latência da rede. Por se tratar de um protocolo leve, ele possibilita a sua implementação em *hardware* que tem recursos de rede limitados, como a largura de banda e alta latência [39].

O roteamento de pacotes baseado em IP se torna complexo em cenários onde os nós da rede são móveis. Para aumentar a flexibilidade das RSSF, há arquiteturas baseadas

em nome, como *Named Data Networking (NDN)*, *Content Centric Networking (CCN)* e *Information Centric Networking (ICN)*. O MQTT pertence à categoria protocolos baseados na arquitetura ICN, e estudos demonstram sua capacidade de redução da sobrecarga de protocolo, assim como possuir uma comunicação altamente eficiente [40].

No MQTT a comunicação é estabelecida por meio de trocas de mensagens *Publish* e *Subscribe*. Quando algum dispositivo deseja enviar uma mensagem, esta mensagem é transmitida através de um *publish* para o *Broker*. O *broker*, por sua vez, é o elemento mediador entre a troca de mensagens de *publish* e *subscribe*. Assim sendo, quando um dispositivo deseja receber dados de um tipo específico, ele faz o *subscribe* desses dados solicitando ao *broker*, ou seja, o *broker* estabelece uma interface entre dispositivos diferentes que realizam a operação de *publish* e *subscribe*. O MQTT permite o usuário configurar três tipos de parâmetros relacionados a garantia de entrega da mensagem, *Quality of Service (QoS)*. São eles: QoS 0, QoS 1 e QoS 2. No modo QoS 0 a mensagem é enviada uma única vez e não existe confiabilidade de entrega, caso o *broker* não receba essa mensagem ela será perdida. Já no QoS 1, a mensagem é entregue pelo menos uma vez, exigindo confirmação de recebimento pelo *broker* e tornando esse modo de transmissão confiável. Por último, o QoS 2 exige confirmações em ambos os sentidos, tanto de quem recebe as mensagens quanto de quem as envia. A definição de qual QoS utilizar deve ser decidida com base no cenário onde a solução será aplicada, avaliando o impacto no desempenho do sistema, sendo que a definição do QoS utilizado na comunicação é feita separadamente entre *Publishers* e *broker*, e entre *Subscribers* e *broker* [41]. O funcionamento do MQTT pode ser observado na Figura 2.4.

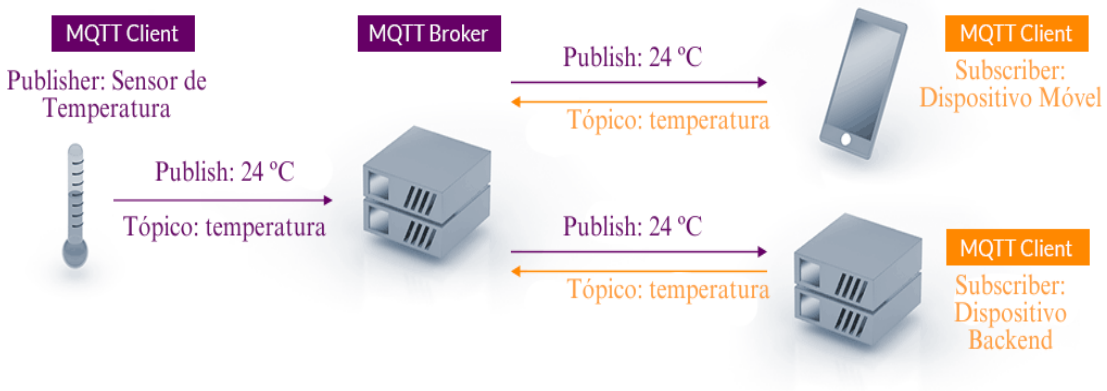


Figura 2.4: *Funcionamento do MQTT, adaptado de [42].*

2.1.4 Inteligência Artificial

A IA é um campo de estudo que busca desenvolver sistemas de computadores capazes de realizar tarefas repetitivas, que normalmente exigiriam inteligência humana. Sistemas de IA são desenvolvidos para aprender a resolver problemas complexos do meio físico em um ambiente em constante mudança, de forma autônoma [43]. Dentro da IA, têm-se as áreas de ML e CV, onde ML está relacionada ao uso de algoritmos para treinar sistemas de IA para identificar padrões e realizar previsões, baseado em grande quantidade de dados. Enquanto a CV envolve o uso de algoritmos para interpretar imagens ou vídeos para os mesmos propósitos. Sistemas de IA podem utilizar ML e CV separadamente ou em combinação para automatizar processos que exigiriam intervenção humana. Existem diversas técnicas além de ML e CV dentro do universo de IA, como aprendizagem profunda, Rede Neural Artificial (*Artificial Neural Network*, ANN) e processamento de linguagem natural, cada uma com suas peculiaridades e aplicações, atendendo as mais variadas demandas do mercado [44].

Aprendizado de Máquina

O ML é o aprendizado de máquina de forma autônoma, onde um sistema de computador consegue aprender e se adaptar a novas situações a partir da experiência com os dados. Esse processo pode ser realizado por algoritmos específicos para atender determinada aplicação, no qual analisam os dados e os comparam com os objetivos da aplicação [45]. Desta maneira, o algoritmo consegue identificar padrões e aprender a se adaptar a eles, tornando-se cada vez mais inteligente. A área de ML é um dos principais objeto de pesquisas dentro da AI, pois tem se mostrado cada vez mais eficiente na automação de tarefas complexas, que envolvam riscos e podem ser onerosas para os seres humanos. Ademais, o processo de aprendizagem automática pode ser usado para desenvolver ou aprimorar o desempenho de sistemas inteligentes, que utilizam linguagem natural e reconhecimento de imagem [46].

Diversas técnicas de ML têm sido desenvolvidas, utilizando algoritmos avançados para analisar dados e reconhecer padrões em extensas bases de dados. Com base nos padrões estabelecidos pela base de dados de treinamento do algoritmo, o modelo pode prever cenários, valores, comportamentos e tomar as melhores decisões para cada situação [47]. Essas características são extremamente úteis para lidar com a enorme quantidade de dados gerados por tecnologias como IoT e RSSF, se utilizadas em conjunto com estas tecnologias, pode tornar os objetos conectados à Internet inteligentes. Como exemplo, um veículo conectado à Internet poderia utilizar ML para aprender um determinado percurso e conseguir se locomover de forma autônoma, de forma otimi-

zada para o menor consumo de energia possível, através de um dos métodos de ML, como o Florestas Aleatórias (*Random Forest*, RF) [48].

O aprendizado de máquina segue uma hierarquia que define suas características e aplicações. A indução é a forma de inferência lógica que permite obter conclusões genéricas sobre um conjunto particular de exemplos, sendo caracterizada como o raciocínio que se origina em um conceito específico e o generaliza. O objetivo do aprendizado indutivo é encontrar uma hipótese h que represente um conjunto de exemplos, uma hipótese é considerada satisfatória quando possui uma boa capacidade de generalização. O aprendizado indutivo pode ser dividido em supervisionado, não supervisionado e por reforço. No aprendizado supervisionado, o algoritmo recebe um conjunto de exemplos de treinamento para os quais os rótulos da classe associada são conhecidos, cada exemplo (instância ou padrão) é descrito por um vetor de valores (atributos) e pelo rótulo da classe associada, onde o intuito é construir um classificador que possa determinar corretamente a classe de novos exemplos ainda não rotulados. Já o aprendizado não supervisionado, analisa os exemplos fornecidos e tenta determinar se alguns deles podem ser agrupados de alguma maneira, formando agrupamentos ou *clusters*, após a determinação dos agrupamentos, em geral, é necessária uma análise para determinar o que cada agrupamento significa no contexto do problema que está sendo analisado. Por fim, no aprendizado por reforço, os modelos são treinados para tomarem uma sequência de decisões em um ambiente incerto e complexo. Nessa abordagem, os agentes possuem um estado que é alterado após realizar uma ação que é executada de forma aleatória, com base nessa ação, os agentes podem ser penalizados ou recompensados, a cada recompensa a ação é reforçada para o seu próximo estado, e assim o modelo pode utilizar a tentativa e erro para maximizar suas recompensas. A Figura 2.5 ilustra os tipos de aprendizado de máquina, bem como suas características.

Existem diversos paradigmas de ML, tais como: Simbólico, Estatístico, Baseado em exemplos, Conexionista e Genético, brevemente descritos a seguir.

- **Simbólico**: Os sistemas de aprendizado simbólico buscam construir representações simbólicas de um conceito através da análise de exemplos e contra-exemplos desse conceito. As representações simbólicas estão tipicamente na forma de alguma expressão lógica, árvore de decisão, regras ou rede semântica.
- **Estatístico**: Neste paradigma é utilizado um modelo estatístico que encontre uma hipótese que possua uma boa aproximação do conceito a ser induzido. O aprendizado consiste em encontrar os melhores parâmetros para o modelo. Estes modelo podem ser paramétricos, quando fazem alguma suposição sobre a distribuição dos dados, ou podem ser não paramétricos. Os modelos Bayesianos



Figura 2.5: *Tipos de Aprendizado de Máquina, adaptado de [49].*

são um exemplo do paradigma estatístico.

- **Baseado em Exemplos**: Uma forma de classificar um exemplo é lembrar de outro similar cuja classe é conhecida e assumir que o novo exemplo terá a mesma classe. Essa filosofia exemplifica os sistemas baseados em exemplos, que classificam exemplos nunca vistos através de exemplos similares conhecidos. A técnica de raciocínio baseado em casos é um exemplo de técnica que utiliza este paradigma.
- **Conexionista**: O nome conexionista vem da área de pesquisa de redes ANN, que é um modelo computacional inspirado no funcionamento do cérebro humano. Uma ANN possui três componentes principais: unidade de processamento, que seriam os neurônios; Conexões, representando as sinapses e uma Topologia. As redes neurais possuem como principal característica aprender por meio de exemplos e poder de generalização. As redes *Multi Layer Perceptron (MLP)* e *Self Organing Map (SOM)* são exemplos de técnicas que utilizam este paradigma de aprendizado.
- **Genético**: Este paradigma de aprendizado é derivado do modelo evolucionário de aprendizado. Um classificador genético consiste em uma população de elementos de classificação que competem entre si para fazer a predição. Elementos que possuem um desempenho ruim são descartados, enquanto os elementos mais fortes proliferam, produzindo variações de si mesmos. Este paradigma

possui uma analogia direta com a teoria de Darwin, na qual sobrevivem os mais bem adaptados ao ambiente. Algoritmos genéticos e Programação genética são exemplo de técnicas que utilizam este paradigma [50].

As RF fazem parte dos métodos de ML, que são modelos do tipo *ensemble methods*, onde combinam a predição de um conjunto de árvores de decisão, para obter uma única resposta como saída, que tende a apresenta melhor desempenho que as obtidas com cada árvore do modelo em separado, devido à redução de variância. Este modelo lida bem com conjunto de dados de alta dimensão e com presença de multicolinearidade. RF são usualmente utilizadas não apenas para classificação, mas também para regressão, estudo de importância e seleção de variáveis, além de detecção de *outliers*. Com estas características, várias aplicações vêm se beneficiando das RF, como as áreas de diagnóstico médico por imagem, predição rápida de movimentos, sensoriamento remoto, análise de *Big Data*, detecção de falhas, dentre outras [51].

A pecuária e agricultura são setores da economia que estão passando por grandes transformações, devido ao emprego das tecnologias no campo e adoção de IA, proporcionando automatização dos processos praticados ao longo de décadas, reduzindo a utilização de insumos como defensivos agrícolas, fertilizantes, gastos com remédios e médicos veterinários para o rebanho, identificando rapidamente um animal doente e aumentando a produtividade das plantações. A IA também está sendo utilizada para identificar o período de estro das vacas-leiteiras, aumentando a eficiência da produção leiteira, uma vez que a inseminação no período incorreto causa grandes impactos financeiros. No processo de colheita das plantações a IA também tem se mostrado eficiente, identificando quais frutas estão maduras para serem colhidas e quais ainda precisam de mais tempo, aumentando o aproveitamento e eficiência da produção para determinada cultura. Outro campo de atuação de IA que está relacionado ao agronegócio, é a capacidade dos sistemas de prever tendências de preços no mercado, com base nos dados históricos coletados em cada segmento de atuação no mercado. Assim, pode ser uma ferramenta poderosa para auxiliar na tomada de decisões sobre a estratégia de produção, estocagem e comercialização dos produtos [52].

2.2 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas é um termo considerado recente ao longo da história, sendo mencionado pela primeira vez pelo executivo Kevin Ashton em um seminário sobre logística, no ano de 1999. Kevin Ashton trabalhava em uma empresa de rastreamento de mercadorias, Procter & Gamble [53]. Inicialmente, IoT foi uma rede de sensores que permitia que as coisas ou objetos fossem rastreados e monitorados remotamente.

Porém, com os avanços tecnológicos, IoT se expandiu para rede de objetos conectados que podem trocar quantidade massiva de informações entre si, controlar processos, processar dados de diferentes fontes, entre outros [54].

Atualmente, IoT se refere a integração de diversos dispositivos do mundo físico com o mundo virtual, revolucionando o mercado e como as pessoas interagem com os objetos. No qual os objetos são dotados de capacidade para interagirem de forma autônoma entre si, coletar dados do mundo físico e disponibilizá-los para uma central de monitoramento. O que possibilita ao usuário da tecnologia obter uma visão detalhada dos processos e tomar as melhores decisões, baseado nas informações coletadas pelos sensores. IoT está presente em diversas áreas relevantes para a economia de um país e bem-estar social, como saúde [55], indústria 4.0 [56], logística [57], agronegócio [58], cidades inteligentes [59], entre outros.

As aplicações práticas com IoT ainda estão no início de suas implementações, ainda assim, já apresentam diversas vantagens em diferentes setores. Já que permite aumentar a eficiência da produtividade, reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos ou serviços. Além de permitir a criação de novos serviços e negócios, aumentando assim a competitividade entre as empresas, beneficiando o consumidor final. Outro benefício das redes de IoT é a segurança dos objetos e processos, uma vez que os dados coletados podem ser analisados para identificar possíveis riscos relacionado a cibersegurança [60]. A Figura 2.6 ilustra algumas das principais aplicações de IoT.

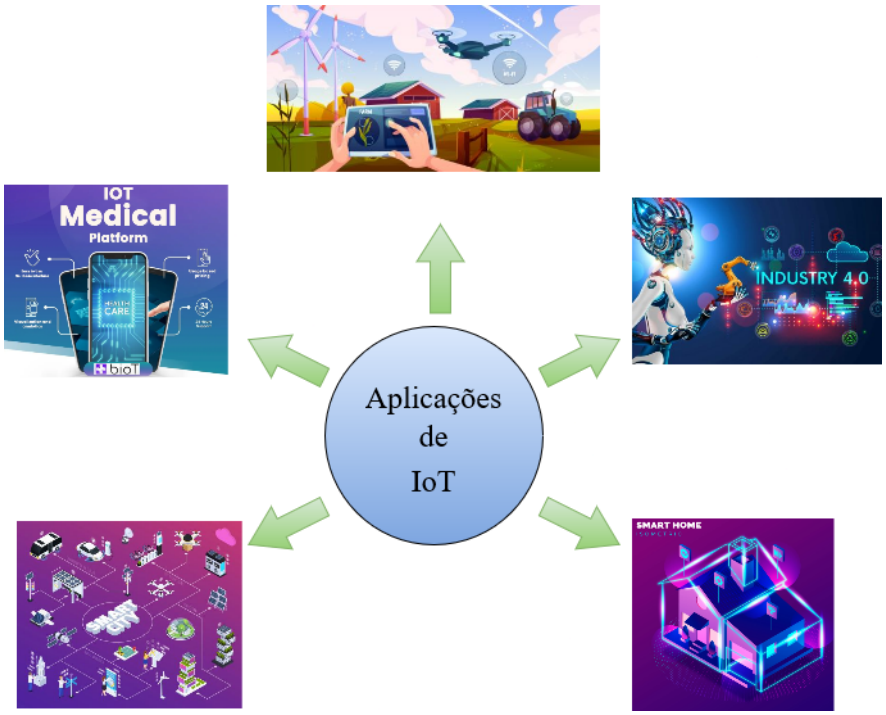


Figura 2.6: *Principais Aplicações de IoT.*

2.2.1 IoT na Agropecuária

O uso de IoT na agropecuária tem se mostrado promissor em países que já iniciaram a implantação da tecnologia, pois a demanda no campo é crescente. IoT pode fornecer novas ferramentas e métodos que permitem monitoramento e automação de processos e tarefas repetitivas do campo que exigem horas de trabalho em excesso. E ainda, o uso dessas ferramentas tem possibilitado novas abordagens e metodologias de manejo, disponibilizando dados que podem ser utilizados pelo pecuarista para a tomada de decisão em tempo hábil [61]. Assim sendo, as diversas opções da aplicação das RSSF no campo, consegue auxiliar os produtores de diversas maneiras. Por exemplo, em um rebanho bovino com elevado número de animais, torna inviável o acompanhamento da saúde de maneira individual, levando a prejuízos com identificação tardia de doenças e comprometimento da produção leiteira [62].

Para a identificação de estro, atualmente os métodos manuais utilizam identificação visual do pecuarista para monitorar a alteração do comportamento animal, algo que causa muito ônus ao processo na medida em que o rebanho aumenta, além de causar prejuízos com uso de inseminação artificial no momento errado. Para tentar amenizar este processo de aguardar o estro, que depende da biologia do animal, há a possibilidade de utilização de injeção para indução forçada do estro, o que eleva o custo da produção. Sistemas inteligentes de IoT podem coletar dados de cada animal individualmente e gerar alerta de saúde, estro, entre outros [63] [64].

Nos últimos anos novos termos vêm surgindo para o uso das tecnologias no campo, como agricultura de precisão, pecuária de precisão e fazendas inteligentes. No qual todas as abordagens se baseiam na utilização de dados provenientes de sensores remotos, satélites e redes remotas para auxiliar os produtores a obterem informações em tempo real de seus processos e tomarem as melhores decisões [65]. Os sensores coletam dados sobre o comportamento da movimentação, temperatura dos animais, sobre plantações, condições da água, do solo, microclimas, entre outras possibilidades. Todos esses dados auxiliam na aplicação de pesticidas, defensivos agrícolas, adubos, manejos de forma precisa, apenas onde há necessidade, aumentando a eficiência dos processos e diminuindo os custos com insumos, evitando que alguma doença em um animal infectado se alastre pelo rebanho [66]. A Figura 2.7 apresenta a coleta de dados de vacas-leiteiras a partir de um colar de monitoramento bovino.

Outra aplicação de IoT presente no campo é o monitoramento da safra utilizando sensores instalados nas plantações e estoques, permitindo monitorar a produção de grãos, a umidade do solo, a temperatura e índice pluviométrico. Este tipo de monitoramento direcionado permite tomar ações preventivas antes que prejuízos ocorram [67].



Figura 2.7: *Exemplo de monitoramento bovino.*

Além do monitoramento com precisão, as redes de IoT estão sendo utilizadas para otimizar o uso de máquinas agrícolas, automatizar os processos de irrigação, assim como localização e gerenciamento de itens estocados [68].

Assim sendo, obter informações com dados confiáveis no campo torna-se essencial para aumentar a eficiência dos processos, seja na produção leiteira, de gado de corte, plantio ou colheita de lavouras. A disponibilidade da informação em tempo real e precisa, é fundamental para o planejamento estratégico e agilidade para tomar decisões da alto impacto na produtividade das fazendas.

2.3 Revisão Bibliográfica

Várias pesquisas vêm sendo realizadas por pesquisadores de diversos países com o propósito de levar tecnologia para o campo, tanto para a atividade de agricultura, quanto para a pecuária. Tecnologias como RSSF e IA aliadas ao conceito de IoT, já vêm sendo exploradas e apresentando resultados promissores para propósitos como aumentar a eficiência da produção no meio agrícola e da agropecuária.

Sasankar *at al*. [63] propõem um sistema de detecção de estro usando ML e IoT. Para o monitoramento do comportamento animal, foi considerado utilizar quatro tipos de sensores, acelerômetro com giroscópio na orelha, além de sensores de temperatura e deformação para mensurar a força aplicada, sendo estes posicionados na base da cauda. A ideia foi utilizar um microcontrolador Arduino para receber os dados de sensoriamento e encaminhá-los para um módulo Wi-Fi, que por sua vez envia os dados

para um banco de dados para processamento futuro. Para o processamento é proposto o método de ML *Support Vector Machine (SVM)*, utilizado com o propósito de ter melhor precisão para uma grande quantidade de dados. A ideia foi aplicar ML a partir do banco de dados, utilizando processamento em computador remoto. Para o sistema de sensoriamento foram considerados o sensor acelerômetro e giroscópio MPU6050, o sensor de temperatura LM35 e o de pressão *Thin film*.

Gokul Krishna *at al*. [64] evidenciaram a necessidade de desenvolvimento de um sistema de análise de dados para detectar doenças no rebanho de maneira eficaz. Propuseram um sistema que utiliza técnicas de ML para detecção antecipada de doenças. A ideia é utilizar ferramentas de mineração e análise de dados para auxiliar os pecuaristas e médicos veterinários no diagnóstico de doenças do gado individualmente, com base na análise de uma grande base de dados gerados pelos dispositivos de sensoriamento. Para a mineração de dados são abordados métodos como Weka, Rapidminer and Orange. Enquanto para as técnicas de ML são abordadas *Neural Networks*, *Support Vector Machines*, *Bayesian theory*, *Decision Trees*, e *Random Forest*.

De acordo com Debdas *at al*. [69], para aumento da produtividade leiteira, é necessário explorar diversas informações com diferentes sensores de cada animal individualmente no rebanho. Assim sendo, proporam uma solução de IoT para o monitoramento de saúde e rastreabilidade do rebanho, por meio de cinco sensores diferentes. O objetivo da solução é monitorar a localização em tempo real utilizando Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*, GPS), ingestão de alimentos, saúde e produção leiteira. Para a aquisição dos dados monitorados foram utilizados os sensores de temperatura LM35, movimentação ADXL335, gás MQ2, batimento cardíaco e condutividade para análise do leite produzido. O envio dos dados é realizado por meio da tecnologia LoRa, que transmite os dados para processamento em nuvem.

S. Benaissa *at al*. [70], afirmam que a combinação entre diferentes sistemas de monitoramento é essencial para a agropecuária de precisão. O objetivo do trabalho foi desenvolver um sistema para detecção de parto e estro com algumas horas de antecedência. Para obter os dados a serem analisados, foram utilizados dois sensores acelerômetros, sendo um no pescoço por meio de colar e outro na perna traseira do animal por meio de pedômetro, ambos produtos de mercado, além de um sistema de localização *indoor*, no qual foi colocado um sensor no colar, transmitindo sinal para um rádio fixo no estábulo. Para realizar o rastreamento do animal, o estábulo foi dividido em três zonas, sendo elas: descanso, bebedouro e alimentação. Os testes foram realizados em ambiente fechado com vinte e cinco vacas em confinamento. Para o processamento dos dados foram utilizados algoritmos de ML, utilizando Matlab para processar os cálculos de predição.

Wang *at al*. [71], também utilizam combinações de aquisições de dados de fontes diferentes para melhorar o desempenho dos claissifcadores. A proposta foi desenvolver um conjunto de classificadores para reconhecimento de padrões de comportamento das vacas em tempo real, por meio de acelerômetro e localização do animal em confinamento. Considerou classificar o comportamento do animal em sete categorias: deitado, deitando, em pé, se levantando, se alimentando, caminhada normal e caminhada rápida. O acelerômetro ADXL345 foi posicionado na perna traseira do animal em conjunto com microcontrolador, rádio 433 MHz e bateria, já os sensores de presença foram distribuídos em seis pontos fixo dentro do estábulo, identificando área de alimentação, descanso ou transição. O experimento utilizou cinco vacas-leiteiras. Sendo considerado o uso de câmeras com gravação de vídeo para posterior comparação e validação dos dados obtidos com o classificador proposto.

Para Tran *at al*. [72], a melhor maneira de monitorar o comportamento do rebanho bovino, é utilizar uma base de dados confiável e que represente fielmente a realidade do comportamento que se deseja monitorar, ao invés de desenvolver otimizações das técnicas existentes de ML. A proposta foi desenvolver um sistema de IoT para reconhecimento de comportamento do animal, utilizando dois sensores acelerômetros, GPS, microcontroladores Atmega328 e rádios de comunicação LoRa. Os acelerômetros foram posicionados em um colar e pedômetro na perna dianteira do animal. Os dados coletados foram transmitidos para uma estação de controle via LoRa. A estação recebe os pacotes, armazena em banco de dado e realiza o processamento de ML utilizando a técnica RF, que classifica o comportamento do animal em quatro categorias: caminhando, em pé, deitado e se alimentando. Os testes práticos foram conduzidos em cinco vacas, sendo que em duas houve a ação de deixar os dispositivos afixados por duas semanas antes dos testes, de modo a acostumarem com a presença dos sensores. Foi verificado melhora nos resultados neste dataset, que possuía menos ruído na captura dos sensores.

Chen *at al*. [73], ressalta em sua pesquisa os métodos ineficientes e onerosos utilizados atualmente para identificação do período de estro das vacas-leiteiras em meio ao rebanho. Desta forma, porpõe um sistema de IoT para monitoramento de estro, baseado em captura de dados de acelerômetro, temperatura corporal e detecção de imagens. A ideia foi propor um pedômetro com sensor acelerômetro ADXL345, colar com acelerômetro e sensor de temperatura DS18B20, ambos com conectividade NB-IoT através do módulo BC95-HB. Os acelerômetros foram configurados para gerar *trigger* de transmissão via NB-IoT se for atingido certo limiar de valor de módulo de aceleração, disponibilizado pelo próprio modelo de sensor. O microcontrolador considerado para integrar os sensores e módulo de comunicação é o STM32L431. Além do

sistema de sensoriamento descrito, foi proposto câmera de alta definição e algoritmo de reconhecimento de imagem *OpenCV*, para identificar comportamentos como monta de animais e agitação, causados no período de estro.

Pratama *at al*. [74], propõem o *design* e implementação de um colar bovino inteligente, capaz de realizar o monitoramento de saúde e comportamento utilizando IoT e microserviços em nuvem. A ideia foi obter dados de temperatura corporal, frequência cardíaca e padrão comportamental. Foram utilizados os sensores acelerômetro e giroscópio GY-25, de temperatura MLX90615 e de frequência cardíaca MAX30100. Além do uso de um microcontrolador com conectividade Wi-Fi Wemos D1 Mini. Para alimentação do sistema utilizou bateria e pequenas placas solares posicionadas na caixa do colar. O colar transmite os dados via Wi-Fi para um servidor local, desenvolvido utilizando placa Raspberry Pi, que por sua vez se comunica com servidor WEB em nuvem. O servidor realiza predições de saúde através da técnica SVM, que classifica entre normal, menos normal e anormal. Além de realizar a predição de comportamento por meio da técnica de ML Árvore de decisão (*Decision Tree*, DT), que classifica entre em pé, deitado e se alimentando.

Para Bovo *at al*. [75], a melhor forma de aumentar a produção leiteira, é monitorar as condições ambientais onde rebanho esteja inserido, pois fatores como temperatura e umidade relativa do ar influenciam diretamente na produção do leite. A proposta foi desenvolver um sistema capaz de monitorar as condições climáticas em ambientes internos e externos como temperatura, umidade, velocidade do vento e pressão. Realizando a captura dos dados através dos sensores e disponibilizando-os para um servidor em nuvem, o que permite a visualização dos dados em *dashboards*. Para transmissão dos dados dos sensores, está sendo utilizado uma rede LoRa, que comunica com o *Gateway*, responsável por transferir os dados diretamente para o servidor em nuvem realizar o processamento e apresentação visual das condições meteorológicas do ambiente sob monitoramento.

Uma das principais doenças que podem acometer o rebanho de vacas-leiteiras, é denominada claudicação, onde bactérias causam danos no casco do animal, o fazendo mancar, diminuir a ingestão de alimentos e consequentemente, a produção leiteira. Taneja *at al*. [76], propõem um sistema para análise de comportamento do gado leiteiro e detecção da claudicação. A ideia foi utilizar um pedômetro de mercado, com sensor acelerômetro capaz de detectar três atividades: animal deitado, caminhando (contador de passos) e estado de transição entre os dois anteriores. E a partir desses dados, classificar o animal com a presença ou ausência de claudicação. Para realizar a classificação, foi obtido a média do comportamento de cento e cinquenta vacas-leiteiras utilizando o pedômetro. A partir dos valores obtidos, o rebanho foi divido em três grupos que pos-

suem comportamentos similares, visando aumentar a precisão do classificador. Foram analisados e testados quatro tipos de algoritmos: SVM, RF, DT, e K-Vizinhos mais Próximos (*K-Nearest Neighbor*, K-NN). Utilizou rede LoRa para transmissão dos dados do pedômetro para o *Gateway* LoRa, que utilizou o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*, para enviar os dados ao servidor em nuvem.

O artigo produzido no decorrer deste trabalho de pesquisa também pode ser citado como parte integrante da revisão bibliográfica, Piedade at al. [77], contribuindo com as pesquisas para implementações em campo, envolvendo sistemas de IoT e pecuária. No qual apresenta o desenvolvimento de *hardware* e *firmware* de um colar de monitoramento bovino, com os sensores de temperatura DHT11, acelerômetro e giroscópio MPU6050, batimento cardíaco MAX30102 e tecnologia LoRa como principal meio de comunicação entre sensores e aplicação desenvolvida. Os dados são recebidos pelo servidor *The Things Network (TTN)* e enviados para a aplicação desenvolvida em Node-Red, através do protocolo MQTT. Onde o Node-Red realiza a integração entre os diferentes sistemas e protocolos, além de armazenar os pacotes recebidos em banco de dados para processamento futuro com IA.

A Tabela 2.2 apresenta os trabalhos considerados mais relevantes na literatura relativos à pecuária, que foram analisados nesta revisão bibliográfica.

Tabela 2.2: *Trabalhos recentes relacionados aos tópicos de estudo desta dissertação.*

Artigo	Ano	Implementação	Funcionalidades
[63]	2023	Laboratório	Detecção de estro
[64]	2023	Laboratório	Monitoramento de saúde
[69]	2022	Simulação	Monitoramento e rastreabilidade
[70]	2020	Pecuária	Detecção de estro e parto
[71]	2018	Pecuária	Padrão comportamental
[72]	2022	Pecuária	Padrão comportamental
[73]	2019	Laboratório	Detecção de estro
[74]	2019	Pecuária	Monitoramento de saúde
[75]	2020	Laboratório	Condições climáticas
[76]	2019	Pecuária	Detecção de doença
[77]	2023	Pecuária	Monitoramento do padrão comportamental e condições climáticas

2.4 Conclusão

Este capítulo apresentou as principais tecnologias associadas às redes de IoT que foram utilizadas neste trabalho de mestrado, como redes de sensores sem fio, LPWAN,

LoRa, LoRaWAN, redes M2M, MQTT, inteligência artificial e aprendizado de máquina. Além de relacionar os principais trabalhos de pesquisa realizados na literatura para a melhoria dos processos e gestão na agropecuária.

Grande parte dos trabalhos relacionados presentes na literatura, são propostas desenvolvidas e avaliadas em ambiente de simulação, dentro dos laboratórios das instituições de ensino. Por outro lado, grande parte das áreas rurais não dispõem de conectividade, acesso às redes de Internet ou computadores. O que torna necessário o desenvolvimento de pesquisas capazes de disponibilizar às tecnologias para o campo, e ainda, que atenda a realidade de cada país, com suas particularidades e necessidades. Assim sendo, o principal diferencial no artigo desenvolvido e posteriormente neste trabalho de mestrado, consiste em desenvolver uma PoC capaz de levar tecnologia para o campo, que atenda as peculiaridades do Brasil, como utilização da rede LoRa para cobrir grandes extensões territoriais em áreas remotas, possibilidade de uma rede de sensores escalável o suficiente para atender pequenas propriedades, constituídas pela agricultura familiar, e, ao mesmo tempo, por grandes fazendas. A PoC busca ser abrangente o suficiente para atender os diferentes tipos de pecuária como de leite e de corte, com seus diferentes sistemas de confinamento, quando propõe o monitoramento de temperatura e umidade no animal, ao invés de pontos fixos em um perímetro predeterminado pela solução proposta, conforme desenvolvido por alguns trabalhos na literatura. Além do desenvolvimento de sistema anti-furto, problema recorrente nos rebanhos brasileiros.

Capítulo 3

Plataforma IoT Proposta

ESTE capítulo tem como objetivo apresentar a plataforma de IoT proposta por esta dissertação, bem como seus componentes e requisitos necessários para o desenvolvimento e implantação em campo, além de apresentar as capacidades de aplicação para o usuário.

O propósito da plataforma é desenvolver e implementar um sistema de monitoramento bovino, capaz de entregar ao setor da pecuária leiteira, uma solução nacional que atenda às especificidades do país, levando tecnologia e automatização de processos manuais para o campo, juntamente com o conceito de pecuária de precisão.

3.1 Arquitetura da Plataforma IoT

A arquitetura da plataforma pode ser dividida em quatro camadas principais: (I) Camada de Sensoriamento, (II) Camada de Rede, (III) Camada de Processamento e (IV) Camada de Aplicação. Cada camada é responsável por desempenhar funções específicas na plataforma, que juntas são capazes de oferecer diversas funcionalidades ao usuário. A camada de sensoriamento é a fonte de dados para a plataforma, pois é onde se concentra os sensores responsáveis pela coleta local de dados do meio físico. Os dados coletados pelos sensores são: temperatura, umidade relativa do ar, movimentação de cada animal por meio de acelerômetro e giroscópio, batimento cardíaco e estado do fechamento do colar bovino. Nesta camada, também acontece o pré-processamento dos dados pelo microcontrolador presente em cada colar, onde os dados coletados pelos sensores são organizados e estruturados para o meio de transmissão utilizado e as camadas posteriores.

A camada de rede ou transporte é responsável por prover a infraestrutura necessária para que os dados sejam transferidos da camada de sensoriamento para a camada de

processamento. Desta forma, trata-se de uma camada intermediária entre a coleta e processamento dos dados obtidos. A plataforma proposta utiliza a tecnologia de transmissão LoRa e o protocolo MQTT como meio principal para transmissão de dados de múltiplos sensores.

A camada de processamento tem como função receber os dados transmitidos via LoRa, realizar a decodificação dos pacotes recebidos, tratar e processar os dados conforme cada finalidade, por exemplo, os dados utilizados para ML, serão armazenados em banco de dados, já as informações que serão apresentadas ao usuário, recebem o tratamento conforme o tipo do dado a ser transmitido para a camada de aplicação.

A camada de aplicação visa fornecer um ambiente de interação entre o usuário e a plataforma, apresentando todas as informações pertinentes à aplicação voltada para pecuária leiteira, como monitoramento individualizado de cada animal do rebanho. A Figura 3.1 apresenta a ilustração da arquitetura da plataforma proposta, bem como as camadas e suas funcionalidades.

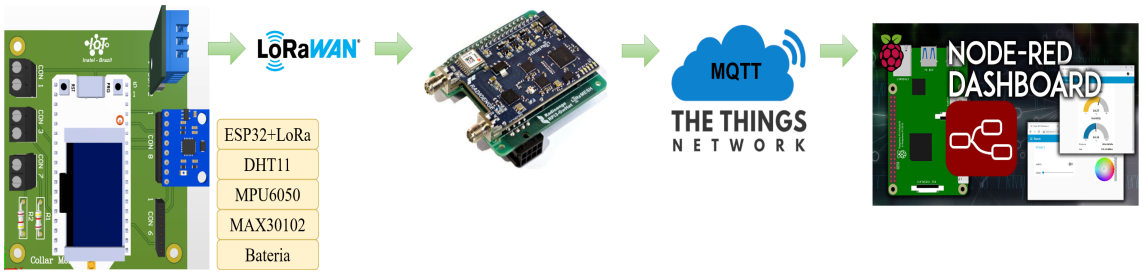


Figura 3.1: *Visão geral da plataforma proposta.*

3.2 Componentes da Plataforma

A plataforma proposta agrega diversas componentes, contando com *hardwares*, *firmwares*, *softwares* e caixas mecânicas, desenvolvidos exclusivamente para a aplicação proposta. Onde cada componente presente, é responsável por uma ou mais funcionalidades. Estes componentes podem ser divididos em três categorias macros na plataforma, são eles: componentes físicos, componentes de serviços e componentes de *Graphical User Interface (GUI)*. No qual os componentes físicos são responsáveis pela interação direta com o animal, implementando o sensoriamento necessário. Já os componentes de serviço, têm como função a execução de *firmwares* e *softwares*, bem como a integração destes com APIs utilizadas pelo sistema. Por fim, os componentes de GUI têm como função a apresentação de informações pertinentes à aplicação proposta.

A maior parte dos componentes de *firmwares* e *softwares* utilizados em todo o sis-

tema proposto são executados no *back-end*, ou seja, sem a intervenção do usuário, como o processamento dos dados coletados pelos sensores, banco de dados e modelos de aprendizado de máquina. Desta maneira, o usuário tem acesso apenas aos resultados dos dados já processados, facilitando a análise das informações obtidas de cada animal monitorado. Como GUI para o usuário, foi desenvolvida uma *dashboard* própria para a aplicação, com interface intuitiva e de fácil compreensão. Os principais componentes serão detalhados a seguir.

3.2.1 Rede de Sensores

A rede de sensores desenvolvida para a plataforma IoT proposta é composta por três dispositivos principais, sendo eles *End node*, *Gateway* LoRa e o servidor TTN. A operação em conjunto de tais dispositivos permite a implantação da plataforma com escalabilidade e flexibilidade em fazendas de gado leiteiro. Uma vez que os dados capturados pelos *End nodes* estejam disponíveis no servidor TTN, os mesmos podem ser armazenados em banco de dados, processados e apresentados aos usuários por *dashboard*.

O *End node* é o dispositivo de sensoriamento da plataforma, enquanto o *Gateway* é o elemento responsável por concentrar os dados recebidos dos nós sensores e encaminhá-los via rede TCP/IP para o servidor TTN, que é responsável por receber os pacotes, realizar pré-processamento dos dados recebidos e disponibilizá-los para o servidor de aplicação. A comunicação entre dispositivo de sensoriamento e o *Gateway* é estabelecida por meio da tecnologia de comunicação sem fio LoRa. A comunicação LoRa é conhecida por sua alta capacidade de alcance, mantendo baixo consumo de energia, o que se apresenta como uma excelente alternativa de comunicação para a aplicação de IoT e RSSF em questão, cujo objetivo é atender áreas rurais remotas, que normalmente não contam com cobertura de sinal por parte das empresas de telefonia móvel celular. O *Gateway*, além de possuir comunicação LoRa, conta com conectividade Ethernet e Wi-Fi, permitindo o *upload* via rede IP dos dados coletados para o servidor em nuvem, TTN. A Figura 3.2 ilustra a RSSF proposta.

Dispositivo de Sensoriamento

Os dispositivos de sensoriamento são responsáveis pela leitura e o envio dos dados capturados de cada animal do rebanho. Cada dispositivo é composto por um colar bovino, caixa mecânica e placa base de integração de *hardware* projetados e desenvolvidos exclusivamente para a plataforma IoT. O colar bovino foi projetado para manter a caixa mecânica fixada na lateral do pescoço do animal, para a captura dos dados,

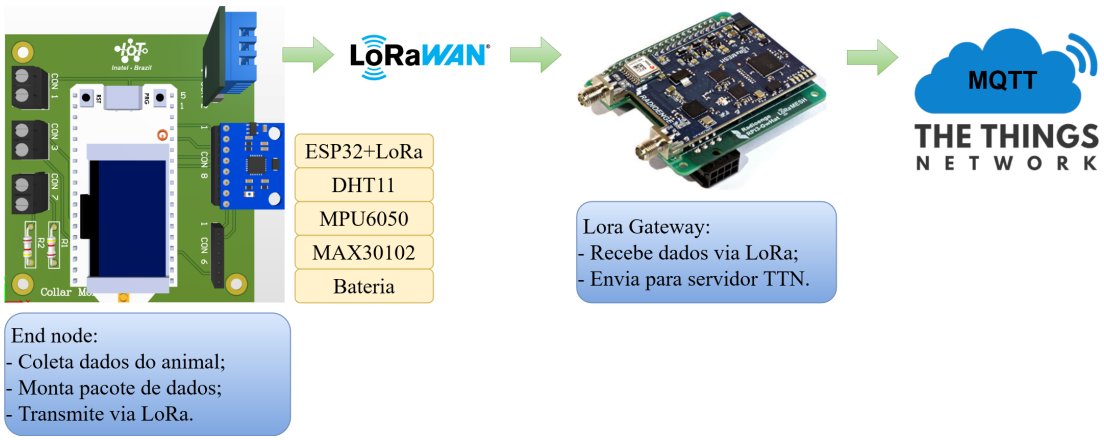


Figura 3.2: *Visão geral da RSSF proposta.*

além de ser utilizado como dispositivo de segurança anti-furto, por meio de monitoramento do fechamento de sua trava com conector do tipo *Plug* P4. Já a caixa mecânica foi projetada para abrigar e oferecer segurança ao *hardware* com os sensores, antena LoRa e bateria. O desenvolvimento da placa base de integração tem como propósito realizar a interligação entre o microcontrolador, sensores, bateria e antena LoRa.

Um dos principais componentes do dispositivo de sensoriamento é o microcontrolador, o qual é o responsável pela comunicação com os sensores, realizando a leitura periódica e o pré-processamento necessário para montar o pacote de dados a ser transmitido via interface LoRa. Foi utilizado o microcontrolador de modelo ESP32 Heltec Wi-Fi LoRa 32 (V2) [78], que conta com rádio LoRa, Bluetooth, Wi-Fi e *display Organic Light-Emitting Diode (OLED)* já integrados. Para a captura dos dados, foram utilizados os sensores de temperatura e umidade DHT11 [79], acelerômetro e giroscópio MPU6050 [80] e batimento cardíaco MAX30102 [81]. Como fonte de energia deste sistema, foi utilizada uma bateria recarregável de *lithium-ion* 3,7V/5800mAh. O diagrama em blocos com a interligação dos principais componentes do dispositivo de

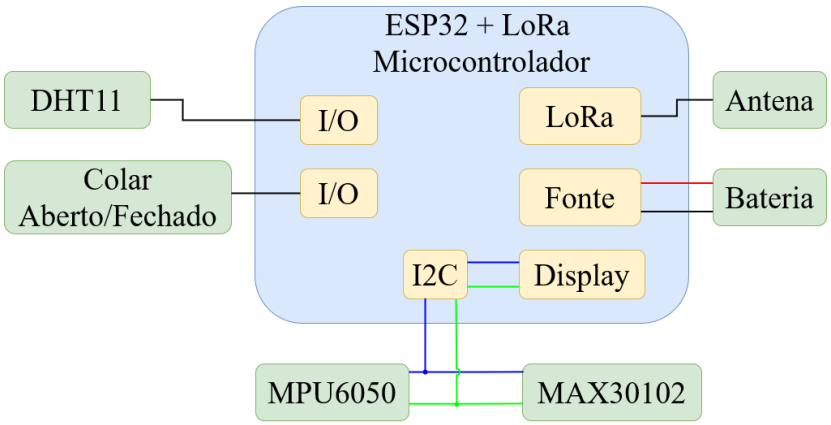


Figura 3.3: *Diagrama em blocos do dispositivo de sensoriamento.*

sensoriamento é apresentado na Figura 3.3.

A placa base de integração foi projetada para comportar conectores de acesso à fiação externa, utilizada para o sensor de batimento cardíaco e para o sistema de segurança do fechamento do colar, conector de expansão de acesso aos terminais do microcontrolador para uso futuro de novos sensores, além de circuito de proteção para a fiação externa. O projeto do esquema elétrico e *layout* foram desenvolvidos através do *software* de *Computer-Aided Design (CAD)* Altium Designer [82]. A Figura 3.4 apresenta o esquema elétrico da placa de integração. Enquanto as Figuras 3.5 e 3.6 apresentam as *layers top* e *bottom* do *layout*, respectivamente.

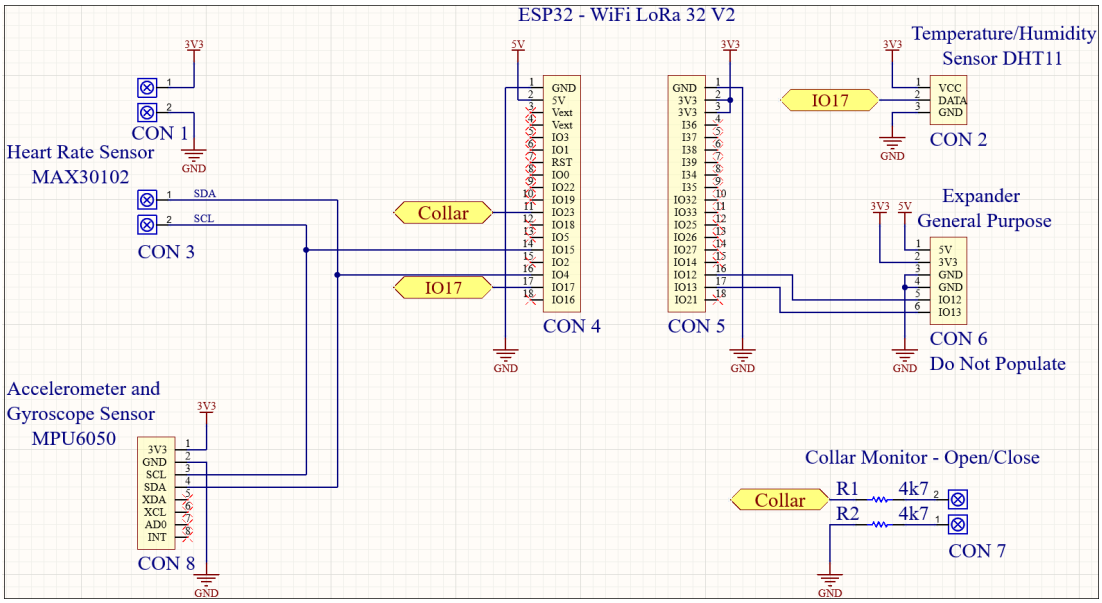


Figura 3.4: *Esquema elétrico do dispositivo de sensoriamento.*

O *software* Altium Designer permite realizar o *upload* do modelo 3D de cada componente utilizado na placa base de integração, viabilizando a simulação de integração com a caixa mecânica e visualização 3D de todo o projeto de *hardware* antes da produção de ambas, o que contribui com a redução de custo em eventuais erros de projeto. A Figura 3.7 ilustra o modelo 3D do *hardware* desenvolvido para o dispositivo de sensoriamento.

Após a conclusão do projeto de *hardware*, a caixa mecânica foi projetada para oferecer além de proteção da eletrônica envolvida, suporte para a melhor fixação possível no animal sem causar nenhum dano ou interferência em seus hábitos. Para o desenvolvimento da caixa mecânica foi utilizado o *software* de CAD Fusion 360 [83]. A Figura 3.8 apresenta o projeto mecânico, com as dimensões em milímetro. Para a fixação da caixa mecânica no pescoço do animal, foi projetado um colar de material flexível, *nylon*, semelhante ao utilizado em cintos de segurança automotivo. Com dimensões

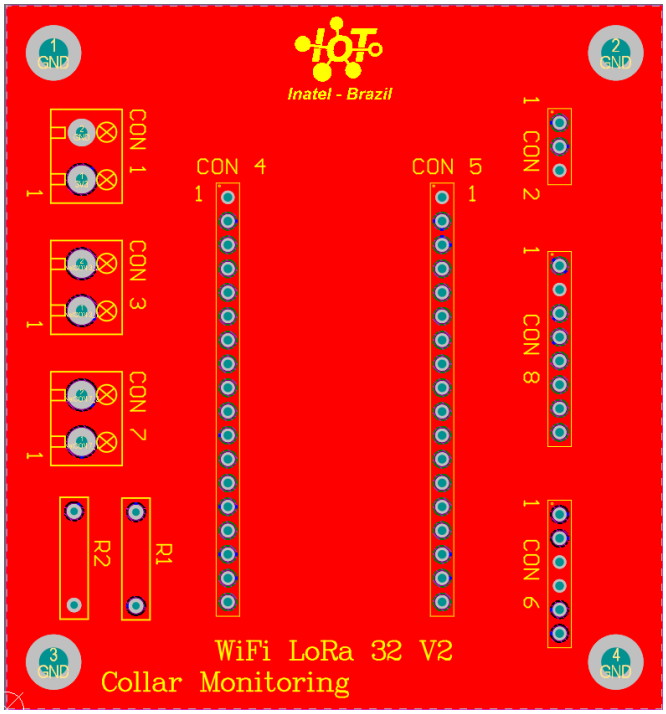


Figura 3.5: *Visão do layout do dispositivo de sensoriamento, lado Top.*

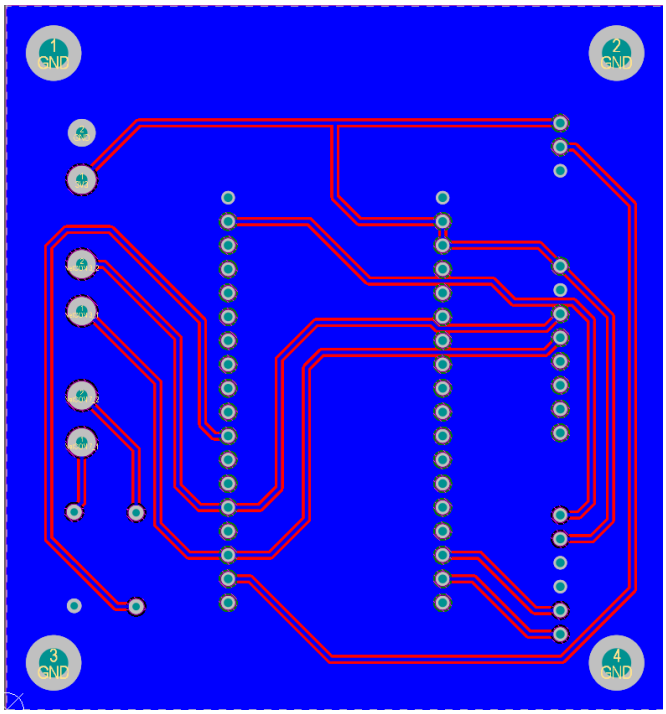


Figura 3.6: *Visão do layout do dispositivo de sensoriamento, lado Bottom.*

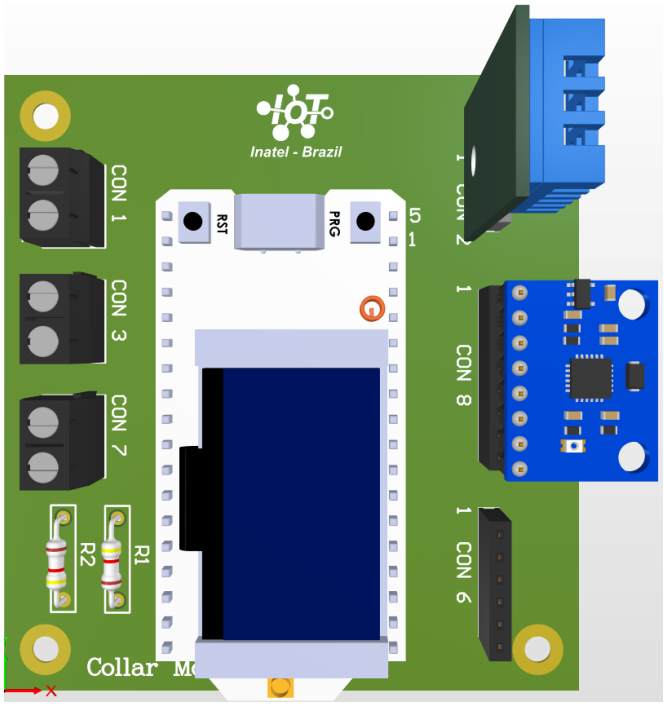


Figura 3.7: *Modelo 3D do hardware de sensoriamento.*

de 150 cm x 6 cm, o colar foi desenvolvido para oferecer possibilidade de ajuste no sistema de fechamento, sem deixar folgas.

Gateway LoRa

O *Gateway* LoRa é parte integrante da camada de rede da plataforma IoT. Seu principal objetivo é atuar como um dispositivo centralizador dos *End nodes*, realizando a tradução de pacotes LoRa recebidos para pacotes IP a serem transmitidos para o servidor TTN. O projeto do *Gateway* utilizado é composto por uma placa de desenvolvimento do modelo Raspberry Pi 3 Model B+ [84], juntamente com o módulo RD43HATGPS [85], que é um rádio LoRaWAN produzido pela empresa brasileira Radioenge [86]. Onde o módulo RD43HATGPS possui conectores projetados para encaixar nos terminais *General Purpose Input/Output (GPIO)* da placa Raspberry Pi, além de conectores para as antenas LoRa e GPS, que é uma funcionalidade opcional para localização em tempo real do *Gateway*. O fabricante disponibiliza o *software* base para ser utilizado na Raspberry Pi, sendo necessário apenas algumas configurações sobre frequências regionais de operação do LoRa. Desta forma, este conjunto de *hardwares* e *software* descritos formam o *Gateway* LoRa utilizado neste trabalho, que pode operar simultaneamente com até 8 canais LoRa. As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam as placas Raspberry Pi 3 e módulo RD43HATGPS, respectivamente.

Considerando a aplicação prática em fazendas ou currais, foi projetada uma caixa

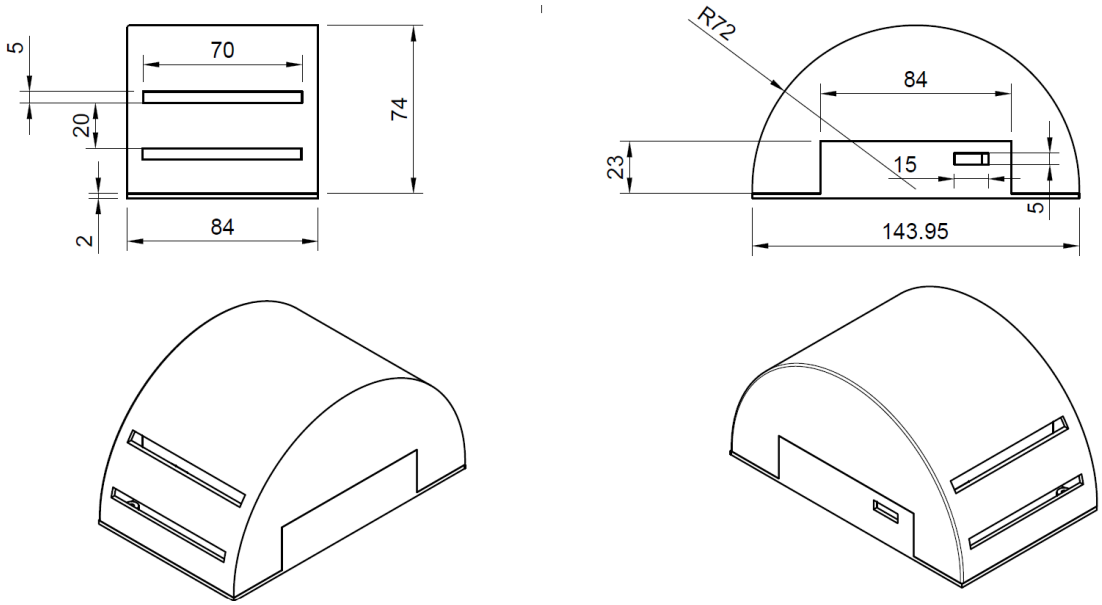


Figura 3.8: *Projeto da caixa mecânica do dispositivo de sensoriamento.*

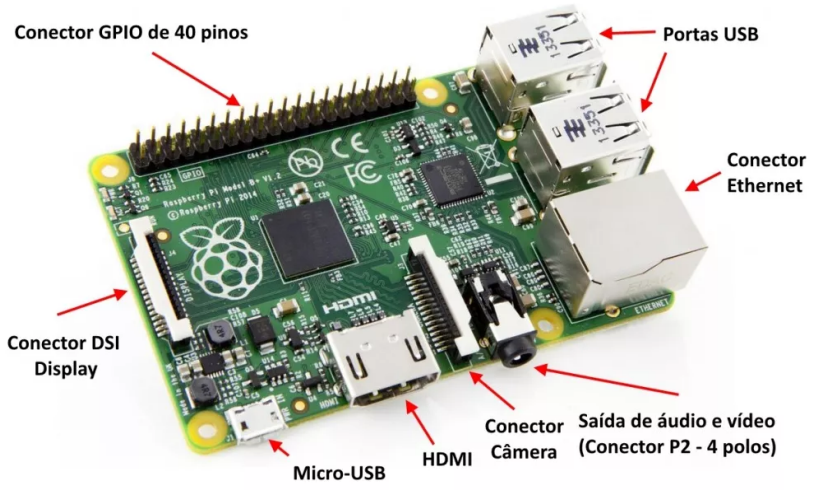


Figura 3.9: *Raspberry Pi 3 Model B+, adaptado de [84].*

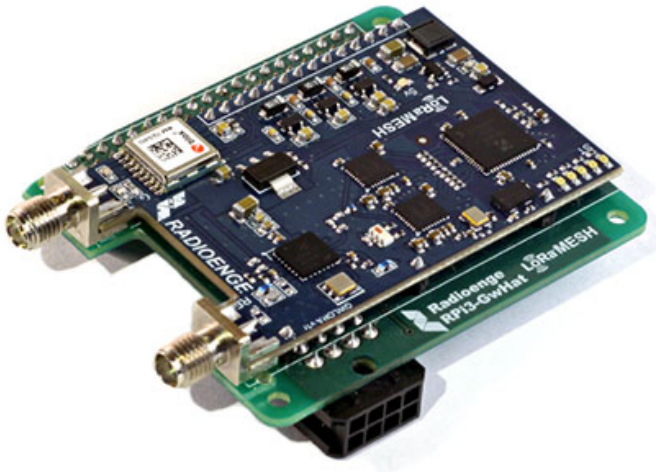


Figura 3.10: *Rádio LoRaWAN [85].*

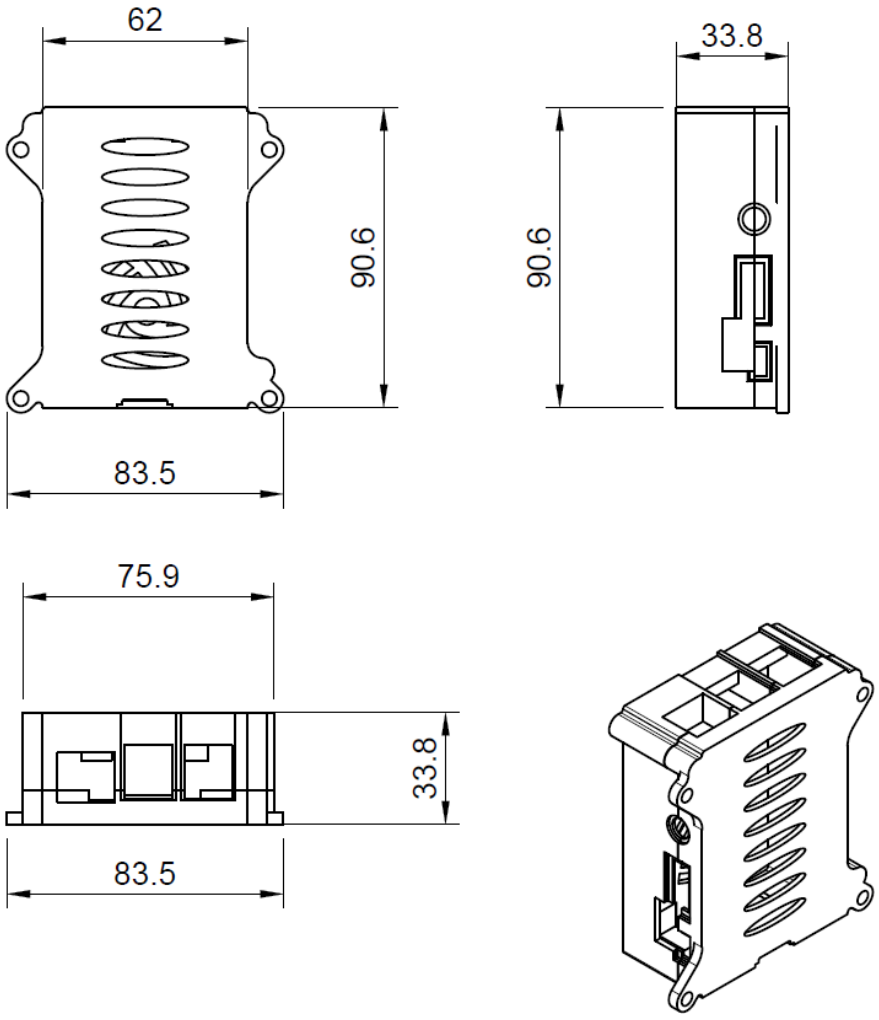


Figura 3.11: *Projeto da caixa mecânica do Gateway.*

mecânica para comportar todo o *hardware* do *Gateway* e protegê-lo de possíveis intempéries, dado o ambiente hostil de operação. A Figura 3.11 apresenta o projeto mecânico da caixa, com as dimensões em milímetro.

Servidor TTN

A *The Things Network* ou TTN, é uma rede aberta e colaborativa baseada em *cloud servers* que conecta os *Gateways* LoRaWAN ao redor do planeta. Assim, cada vez que alguém compra uma estação base LoRa e o conecta à TTN, sua cobertura pode ser expandida para todos os usuários. A rede TTN utiliza o protocolo LoRaWAN objetivando uma cobertura em longo alcance para os dispositivos da rede, caracterizando-a assim como uma *Wide Area Network (WAN)*. Devido às suas capacidades de baixo consumo de energia e ao uso da tecnologia LoRa, é denominada uma rede LPWAN [87].

A plataforma de IoT proposta utiliza a rede TTN para o funcionamento da RSSF, que atua como um servidor na camada de rede. Uma vez que os *Gateways* e *End nodes* tenham sido devidamente registrados na rede TTN, através de chaves de segurança, os dados coletados pelos *Gateways* são disponibilizados para o servidor de aplicação, que permite a visualização dos pacotes de dados LoRa recebidos em tempo real, bem como a integração com protocolos para a transmissão dos dados para as aplicações utilizadas. Neste trabalho, foi utilizada a integração com o protocolo MQTT, responsável por disponibilizar os dados para a camada de aplicação. O método de registro e ativação do *Gateway* e *End node* será apresentado em detalhes no próximo capítulo.

3.2.2 Processamento de dados

Processamento no Servidor TTN

O *console* do servidor TTN é dividido em duas áreas distintas para configuração e visualização dos dados tanto do *Gateway*, quanto dos *End nodes*. Onde na área de aplicações é possível configurar e visualizar os dados de cada *End node* individualmente [88]. Como processamento desenvolvido para a plataforma proposta, foi utilizado algoritmo descrito em JavaScript para realizar a conversão dos *bytes* recebidos do *Gateway* no formato hexadecimal para valores decimais, além de fazer a conversão de *bytes* para objetos no formato *JavaScript Object Notation (JSON)* [89]. Esta conversão foi realizada para facilitar o processo de integração entre diferentes sistemas, tanto o banco de dados utilizado quanto o algoritmo de IA, que estão preparados para receber dados em formato JSON.

Broker MQTT

O MQTT é um protocolo de mensagens leve e otimizado para redes TCP/IP, desenvolvido especificamente para utilização em sensores e dispositivos de baixo poder computacional. O servidor TTN oferece integração para diversos protocolos de IoT, no qual foi utilizado o protocolo MQTT para o projeto proposto. A partir do endereço com *Uniform Resource Locator (URL)* e credenciais do *broker* MQTT disponibilizado pelo TTN, é possível acessar todos os dados de cada *End node*, por meio da operação de *subscribe* em qualquer aplicação utilizada, desde que utilize alguma API de MQTT *Client* [90]. Há diversas APIs e bibliotecas gratuitas para utilização de MQTT *Client*, possibilitando as operações de *publish* e *subscribe*. Na plataforma proposta, está sendo utilizado o MQTT *Client* disponibilizado pela ferramenta Node-RED.

Banco de dados

Os dados obtidos de qualquer aplicação nunca foram tão importantes como atualmente para todos os segmentos. Essas informações podem ser valiosas para a tomada de decisões estratégicas de um negócio. Por esse motivo, é importante a utilização de um banco de dados para armazenamento da informação. Por exemplo, quando uma empresa armazena os dados relacionados a seus clientes, é possível utilizar tecnologias de análise de dados para analisar essas informações, identificando fatores como o nível de satisfação ou um padrão de navegação dentro do *site* da companhia. Existem diversos tipos de bancos de dados disponíveis e cada um possui suas próprias características e funcionalidades, sendo os principais tipos: *Structured Query Language (SQL)* e o *Not only SQL (NoSQL)*. A principal diferença entre SQL e NoSQL é a forma como os dados são armazenados. O SQL utiliza um modelo de tabela relacional, altamente estruturado e requer que os dados sejam organizados em tabelas com esquemas pré-definidos. Enquanto o NoSQL utiliza um modelo de documento par chave-valor, gráfico ou tabela, que é mais flexível e permite que os dados sejam armazenados em documentos que não precisam seguir um esquema rígido, tornando a solução altamente escalável [91]. A Figura 3.12 ilustra as diferenças entre os banco de dados do tipo SQL e NoSQL.

Para o desenvolvimento da plataforma proposta foi utilizado um banco de dados do tipo NoSQL, justamente por oferecer flexibilidade quanto ao tipo de dado a ser armazenado, assim como escalabilidade para a solução proposta. Desta forma, foi adotado o banco de dados MongoDB [93], que é um banco não-relacional orientado a documentos, ou seja, que não utiliza de tabelas e colunas pré-definidas, mas armazena documentos em formato JSON, que por sua vez, trazem a definição da própria

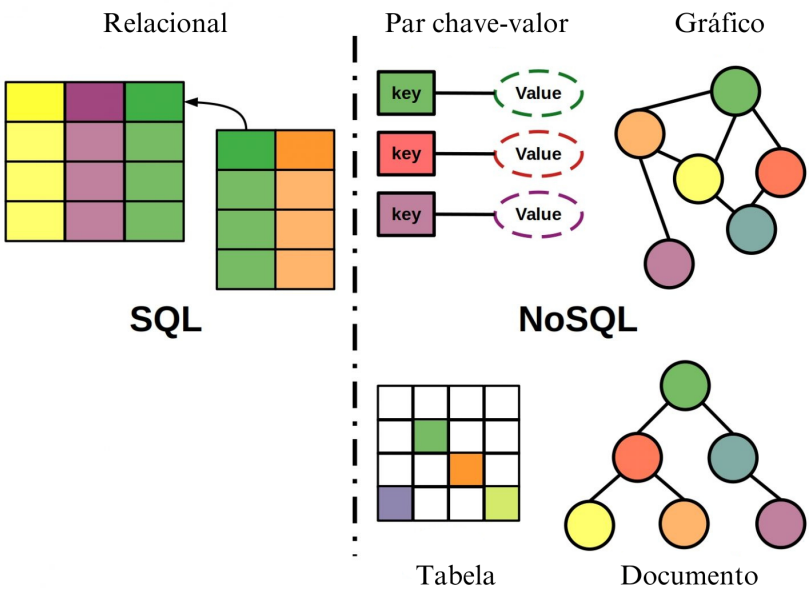


Figura 3.12: *Banco de dados SQL em contraste com NoSQL, adaptado de [92].*

estrutura. Lançado em 2009, ele foi desenvolvido na linguagem C++, e possui código aberto (*open source*). É uma ferramenta muito versátil, que pode ser utilizada nas principais ferramentas de *cloud computing* como AWS, Azure e Google Cloud, por meio da versão em nuvem MongoDB Atlas [94].

O MongoDB oferece um ecossistema de desenvolvimento com diversas opções de ferramentas. Foram realizados testes e avaliadas as ferramentas MongoDB Compass [95], utilizada como banco de dados local, e MongoDB Atlas, utilizada como banco de dados em nuvem. Onde esta, possui a vantagem de ter acesso em tempo real e *online*, aumentando a flexibilidade da plataforma. Ambas funcionaram e atenderam bem o propósito de armazenar os dados capturados pelos sensores do dispositivo de sensoriamento implementado.

Aprendizado de Máquina

A plataforma proposta faz uso de uma das técnicas de ML para adicionar vários recursos à rede de sensores e extrair o máximo de informação dos dados coletados. Seu uso em conjunto com o banco de dados potencializa a implementação prática da solução, pois além dos dados coletados serem armazenados, os resultados apresentados pelos modelos são armazenados para futuras consultas, além de serem apresentados em *dashboard* para o usuário final.

Predição de comportamento do gado leiteiro com ML

O monitoramento comportamental do gado leiteiro bem como as condições de saúde são essenciais para garantir a qualidade e eficiência da produção leiteira, garantindo a lucratividade ao longo de todo o processo produtivo. Através de alterações no padrão de comportamento, é possível realizar detecção de doenças antecipadamente ou logo no início, evitando danos maiores à produção. Ademais, as técnicas atuais de identificação de estro são onerosas ao produtor, pois exigem, na maioria dos casos, horas excessivas de trabalho para realizar a identificação de estro por meio visual, o que dificulta acertar com precisão a detecção à medida que o rebanho aumenta. Por outro lado, há casos em que se utiliza inseminação artificial, nesta condição uma identificação equivocada do período de estro, leva a prejuízos com o custo da inseminação, médico veterinário, além do custo para manter o animal e aguardar o próximo ciclo.

Um modelo baseado em ML foi desenvolvido e implementado na plataforma IoT para o monitoramento do comportamento bovino. O objetivo do desenvolvimento e teste do modelo está na validação da técnica de ML, Florestas Aleatórias (RF), para predição de doenças e estro, através do padrão de comportamento. A escolha desta técnica foi baseada nos trabalhos pesquisados durante a revisão bibliográfica, que em sua grande maioria utilizaram RF para realizar predição. O sistema foi desenvolvido utilizando a linguagem Python e a biblioteca Scikit Learn para classificar alguns comportamentos, com base nos valores capturados pelo sensor acelerômetro. Como uma primeira abordagem de implementação, optei por utilizar apenas os dados do acelerômetro para o treinamento do modelo de ML. Porém, o sensor MPU6050 também dispõe de sensor giroscópio, que pode ser utilizado para aumentar a base de dados e refinar o modelo de predição. A identificação de estro foi implementada através da identificação de um valor considerado *outlier* em um dos três eixos do acelerômetro, para aumentar a eficiência na detecção de estro, poderia ser utilizado também o sensor de temperatura para monitorar a aumento na temperatura corporal do animal. Para este caso, seria necessário utilizar outro modelo de sensor, que possua maior precisão para capturar a temperatura, dado que a variação de temperatura corporal do animal durante o estro é sutil, o sensor DHT22 [96] poderia atender este requisito.
Os comportamentos a serem classificados são:

I. Em pé;
II. Caminhando;
III. Deitado;
IV. Se alimentando;

V. Estro;

VI. Alerta de furto.

Deste modo, cada animal portando o colar de monitoramento pode ser supervisionado remotamente pelo produtor, de maneira individual, gerando alerta de estro e furto. O furto de gado, infelizmente, é um problema recorrente no Brasil, levando prejuízos à muitas fazendas. Para gerar alerta de furto, a proposta é estabelecer para o modelo de ML, um valor padrão de movimentação de cada animal através do sensor acelerômetro. Por exemplo, não é esperado que o gado se desloque a uma velocidade média de 60 km/h. E ainda, para aumentar a possibilidade de detectar furto, foram projetados dois sistemas de monitoramento independentes, que não fazem uso de ML. Um deles é o fechamento de colar, de modo a identificar qualquer rompimento do colar. O outro, é a passibilidade de criar uma zona segura por meio dos valores de RSSI que o *Gateway* calcula e disponibiliza a cada transmissão realizada pelo *End node*. Embora a informação da área utilizada pelo rebanho dependa de cada fazenda, esta informação poder ser configurada na plataforma, por meio de medições dos valores de RSSI em função da distância, realizadas em cada local.

A aplicação utiliza o algoritmo Florestas Aleatórias para analisar os dados coletados pelos sensores e prever o comportamento de cada indivíduo do rebanho. As florestas aleatórias são um algoritmo de aprendizagem de máquina que pertencem à família dos algoritmos de aprendizagem por comitê. Os algoritmos de aprendizagem em conjuntos são um conjunto de algoritmos de aprendizagem que funcionam combinando as previsões de vários aprendentes individuais (*Decision tree*) para produzir uma previsão mais assertiva e assim melhorar a precisão do classificador. As RF são um tipo particularmente popular de algoritmo de aprendizagem de conjuntos, porque são rápidos e precisos durante o processo de classificação. A técnica funciona através da construção de um número de árvores de decisão, em seguida, realiza a média das previsões de todas as árvores individuais. Este processo de cálculo da média ajuda a reduzir a variância das previsões e resulta numa previsão mais assertiva [97]. A Figura 3.13 ilustra o funcionamento do algoritmo Florestas Aleatórias, onde o sistema realiza a predição do tipo da fruta selecionada em um universo de quatro possibilidades, nomeadas classes. No exemplo apresentado, são utilizadas três árvores de decisão, onde cada uma realiza sua predição individual, contribuindo para a predição final que é realizada a partir da votação majoritária do resultado de cada árvore.

O desenvolvimento do modelo pode ser dividido em três fases: (I) Pré-processamento dos dados, (II) Configuração de hiper-parâmetros e (III) Treinamento do modelo. Na etapa de pré-processamento é realizada a limpeza dos dados, removendo inexatidões

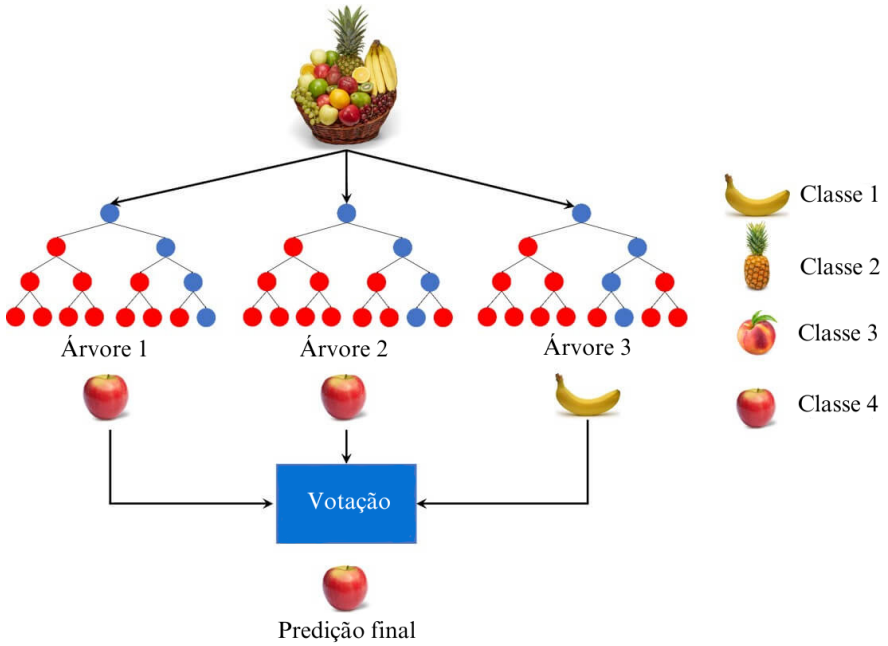


Figura 3.13: *Funcionamento do algoritmo Florestas Aleatórias, adaptado de [98].*

e inconsistências. Este processo pode envolver a identificação e correção de valores incoerentes, remoção de entradas duplicadas e a padronização dos formatos dos dados. O conjunto de dados contém dados de aceleração nos eixos X, Y e Z, sendo estas as características utilizadas para o treinamento. Para realizar o treinamento foram utilizadas 5.636 observações, capturadas pelo colar de monitoramento utilizado em uma vaca-leiteira.

A segunda fase está relacionada com a configuração dos hiper-parâmetros do modelo. O modelo de RF desenvolvido foi treinado utilizando a biblioteca Scikit-Learn e exportado com auxílio da biblioteca pickle [99]. Algumas configurações devem ser realizadas para projetar e atingir bons resultados em relação à precisão do modelo. A quantidade de árvores geradas, a função que mede a qualidade das divisões no modelo, e a profundidade máxima das árvores são configuráveis. Para esta implementação, foram utilizados o valores padrão de hiper-parâmetros disponibilizados pela biblioteca Scikit-Learn, não havendo nenhum ajuste ou otimização hiperparamétrica após os resultados obtidos com o treinamento do modelo. A divisão dos dados é feita para treinar e testar o modelo, desta forma foi considerada uma fração de 70% do conjunto de dados para treinamento e 30% para o teste. Por fim, um modelo de ML é treinado e as métricas de desempenho são geradas a partir dos resultados obtidos com os dados de teste. Após o treinamento, o modelo é exportado e utilizado para realizar a predição de novos dados capturados pelo colar de monitoramento bovino.

Node-RED

O Node-Red é uma ferramenta de programação que realiza a integração entre dispositivos físicos e oferece vários serviços em nuvem por meio de API. A ferramenta oferece um ambiente para a criação de fluxos de dados de maneira rápida e intuitiva, permitindo o desenvolvimento ágil de aplicações [100]. O Node-Red é utilizado na plataforma com o propósito de enviar os dados coletados simultaneamente para diversos serviços e aplicações, além de facilitar a escalabilidade no fluxo de dados coletados pelos *End nodes*. Ambas tecnologias, Node-Red e MQTT, trabalhando em conjunto podem oferecer diversos benefícios para a Plataforma IoT proposta, já que a execução e configuração do fluxo dos dados se torna intuitiva e permite que usuários menos experientes possam adaptar a solução para outras aplicações práticas de IoT, além da pecuária leiteira. Ao mesmo tempo que utiliza um protocolo extremamente simples, leve e com interoperabilidade com outros protocolos para troca de mensagens, como o MQTT. A Figura 3.14 apresenta um exemplo de aplicação da ferramenta Node-Red realizando integração entre o servidor TTN, protocolo MQTT, processamento local dos dados recebidos e interface gráfica de usuário. Esta integração foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho, onde os dados são recebidos do servidor TTN através do nó MQTT Client, fornecido pelo Node-Red, que por meio do protocolo MQTT estabelece comunicação com o servidor TTN. Os nós de processamento são responsáveis por acessar um arquivo JSON e realizar a leitura do objeto desejado, além de realizar o envio do dado processado para o nó de interface gráfica.

As operações realizadas no Node-Red podem ser divididas em três partes distintas: (I) Recepção dos dados, (II) Organização do fluxo de dados para o destino requerido e (III) Apresentação dos resultados ao usuário. A primeira tarefa executada dentro do ambiente do Node-Red é responsável pelo recebimento e organização dos dados em relação ao seu respectivo nó sensor, para identificar a origem dos dados recebidos. Para que a identificação individual seja possível, cada nó sensor possui seu próprio tópico dentro do protocolo MQTT utilizado. Desta forma, cada *End node* cadastrado no servidor TTN possui seu respectivo tópico, no qual o Node-Red recebe os dados por meio da operação de *subscribe*.

A organização do fluxo de dados se inicia com a recepção dos dados em seu devido tópico. A criação de um fluxo de dados se faz necessário visto que os dados são utilizados simultaneamente em diversos serviços. Um dos serviços que recebe os dados é a *dashboard*, desenvolvida através do próprio Node-Red, que é responsável por exibir as últimas métricas capturadas do gado leiteiro, bem como os alertas gerados pelo processamento. Outro serviço utilizado é para o armazenamento dos dados, no qual

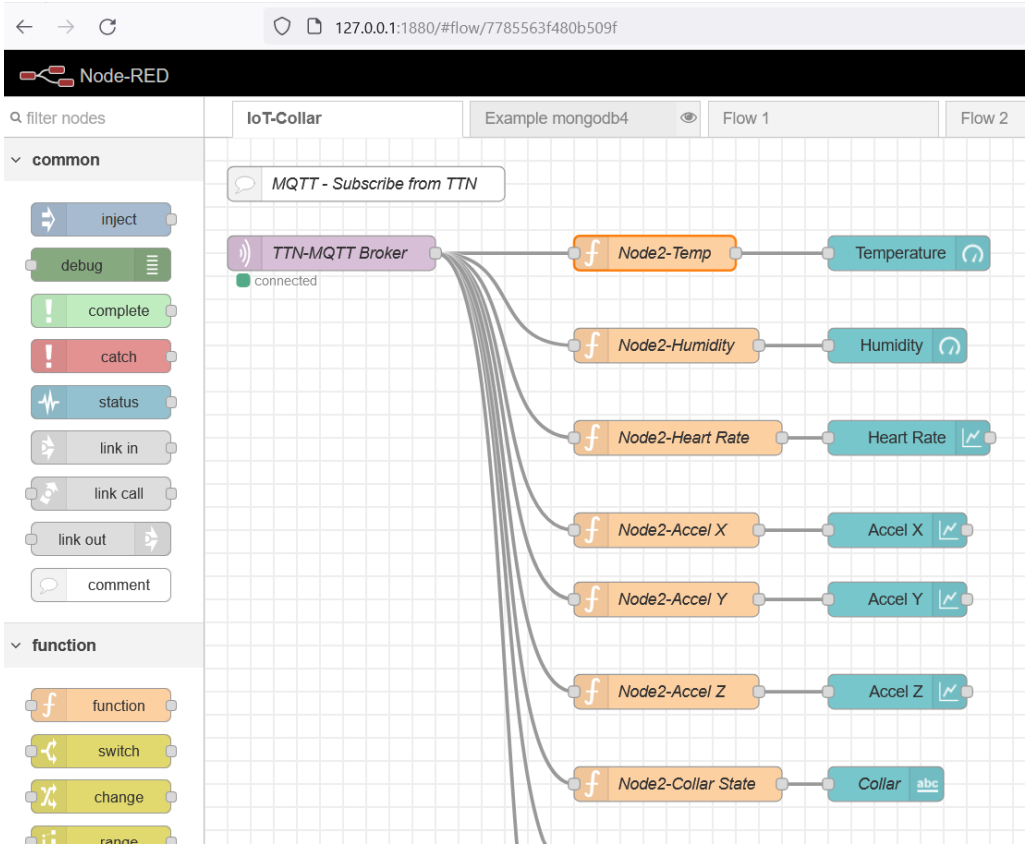


Figura 3.14: *Exemplo de funcionamento do Node-Red.*

foi utilizado o serviço de armazenamento em nuvem por meio do banco de dados MongoDB Atlas.

3.2.3 Interface Gráfica de Usuário

Para apresentação dos dados coletados e resultados das operações, bem como processamento realizado, foi desenvolvida uma *dashboard* simples, porém intuitiva para usuários menos experientes com o meio tecnológico. Para seu desenvolvimento, foi utilizado o próprio ambiente e ferramentas oferecidas pelo Node-Red, onde as informações de movimentação do gado são exibidas em formato de gráficos de aceleração no eixo X, Y e Z em função do tempo, assim como a informação de batimento cardíaco. Já as informações de temperatura, umidade e índice de estresse térmico *Temperature Humidity Index (THI)*, que é calculado a partir dos valores de temperatura e umidade, são exibidas em formato de *gauges*. Enquanto as informações do estado de fechamento do colar e alerta de estro, são apresentadas em formato de texto. A Figura 3.15 apresenta um exemplo de interface gráfica, utilizada no artigo referente às pesquisas iniciais desta dissertação.

O processamento projetado para ser executado em Node-Red, assim como a *dash-*

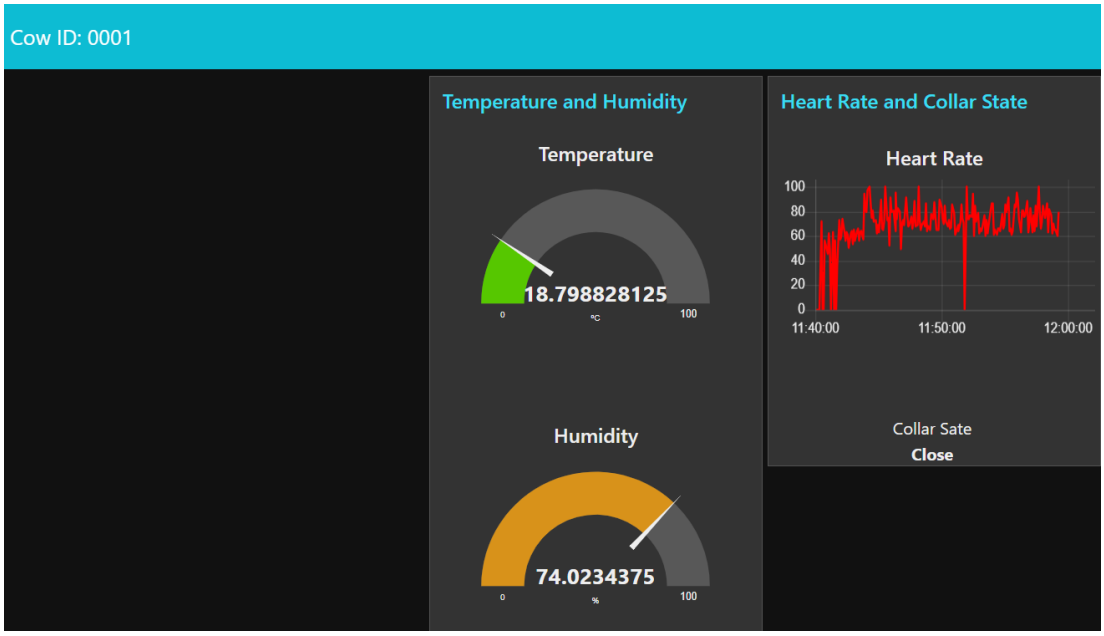


Figura 3.15: *Exemplo de Interface Gráfica de Usuário do Node-Red.*

board, estão sendo suportados por uma placa de desenvolvimento do modelo Raspberry Pi 3 Model B+ [84]. Esta placa pode ser considerada um microcomputador de tamanho reduzido, possuindo as principais características de 1 GB de memória RAM, processador de 64 bits ARMv8 Cortex-A53 Quad-Core e frequência de trabalho de 1,2 GHz. A placa Raspberry Pi permite o acesso da *dashboard* desenvolvida localmente, através dos periféricos suportados pela placa, como portas HDMI e USBs para monitor, teclado e *mouse*. Permite também o acesso remoto, através da conexão de rede *Secure Socket Shell (SSH)*, permitindo maior flexibilidade ao usuário da plataforma.

3.3 Principais Requisitos e Limitações da Plataforma

A plataforma de IoT é formada por diversos componentes de *hardware*, *firmware*, *software* e APIs, sendo assim alguns requisitos devem ser satisfeitos. O uso de cada ferramenta está intimamente relacionado com as necessidades de cada tipo de rebanho, localidade e usuário. Algumas das ferramentas presentes, permitem sua utilização de maneira isolada, o que possibilita maior flexibilidade ao usuário. Cada bloco desenvolvido na plataforma também apresenta requisitos e limitações quanto ao seu funcionamento, que serão apresentados a seguir.

3.3.1 Requisitos

Os elementos descritos neste capítulo apresentam o planejamento e como a plataforma foi implementada. Cada elemento possui requisitos para implementação, de forma a manter o bom funcionamento de todo o sistema. Todos os modelos treinados de ML usaram um conjunto de dados específico e representativo para as condições locais da fazenda utilizada durante os testes. Para a implementação da plataforma em outro local ou outro tipo de rebanho, se torna necessário um novo treinamento do modelo com um novo conjunto de dados que consiga descrever ao modelo as condições a serem classificadas. Neste caso, o novo treinamento se torna necessário para representar a diferença entre o comportamento de um rebanho da pecuária extensiva com grandes extensões de pastagem, e o rebanho em confinamento, possuindo um comportamento de movimentação muito diferente. E ainda, o método de ML utilizado faz uso de aprendizado supervisionado para classificação dos dados, necessitando também de uma base de dados rotulada ou o rotulamento manual.

A tecnologia de comunicação LoRa utilizada na plataforma para a transmissão dos dados coletados pelos sensores para o *Gateway*, tem como requisito que todos os colares de monitoramento sejam devidamente configurados para operarem no mesmo plano de frequências, no caso foi utilizado de 915 MHz a 928 MHz. Outro requisito que pode ser citado, é a necessidade de um *Gateway* LoRa para concentrar os pacotes de dados transmitidos pelos sensores e executar a transmissão via protocolo TCP/IP para algum servidor de serviços IoT em nuvem.

Para que o colar de monitoramento funcione de maneira satisfatória, é necessário que a fixação no animal seja feita de maneira a manter a caixa mecânica presa na lateral do pescoço, sem a possibilidade de movimentação ao longo do colar e descer pela ação da força da gravidade. Para evitar este tipo de situação, foi utilizado um sistema de contrapeso, ao qual foi utilizado um peso de 750 g na parte inferior do colar.

3.3.2 Limitações

Todas as funcionalidades e blocos foram desenvolvidos e testados para aplicação em pecuária leiteira. Portanto, a aplicação da plataforma em outro cenário da pecuária, como a de corte, por exemplo, requer adaptações, como criação de base de dados e treinamento dos modelos de ML. Para este exemplo citado, a infraestrutura de comunicação, processamento, armazenamento e exibição dos dados pode ser mantida. Deste modo, a rede de sensores sem fio continua sendo aplicável.

Cada funcionalidade possui limitações específicas de operação e instalação que de-

vem ser consideradas durante a implementação da plataforma. A rede de sensores, por exemplo, possui uma limitação que deve ser considerada em relação à escalabilidade em campo da solução desenvolvida, no qual o *Gateway* LoRa utilizado permite a transmissão simultânea em até oito canais, o que significa que é possível utilizar até oito colares de monitoramento transmitindo ao mesmo tempo. É possível aumentar a capacidade de transmissão da rede de sensores, porém demanda desenvolver um sistema de janelamento de tempo, para que cada *End node* realize a transmissão em uma determinada janela de tempo, assim, diminuindo a probabilidade de colisão de pacotes e a taxa de erro na recepção do sinal.

Energia também pode ser considerado um ponto de atenção e limitação da plataforma, que foi desenvolvida para operar com qualquer bateria de 3,7V. Neste caso, quanto maior a amperagem, maior a autonomia. A autonomia da bateria está relacionada a diversas funcionalidades da plataforma, por exemplo, é possível configurar o número de transmissões realizadas por dia, configurando a frequência de leitura dos sensores a um determinado tempo. E ainda, é possível diminuir o processamento parcial da plataforma em detrimento do melhor custo-benefício do ponto de vista energético. O microcontrolador proposto, possue cinco modos de *sleep* que podem ser utilizados para este propósito.

Capítulo 4

Implementação prática e validação da Plataforma IoT

ESTE capítulo apresenta a construção da Plataforma IoT proposta e descrita nos capítulos anteriores, bem como sua implementação prática em uma fazenda de pecuária leiteira e apresentação dos resultados obtidos. Como a plataforma possui diversos blocos, os principais serão apresentados em subcapítulos. Todo o desenvolvimento dos blocos de *hardware*, *firmware* e *software*, assim como sua construção e implementação serão apresentados em conjunto com os resultados obtidos. Além da apresentação de resultados de desempenho da rede LoRa projetada.

4.1 Construção dos componentes da Plataforma

4.1.1 Dispositivo de Sensoriamento

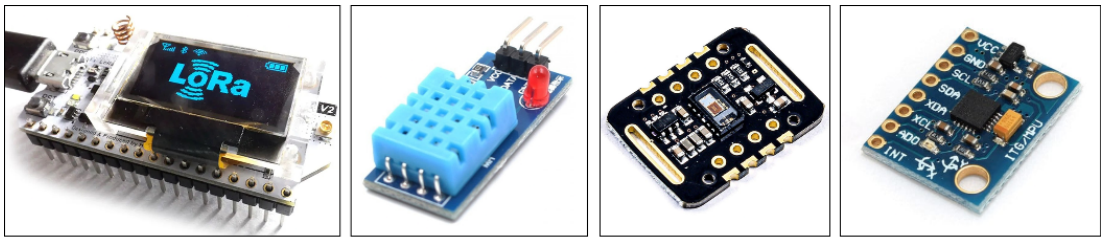
O protótipo do dispositivo de sensoriamento foi inteiramente projetado e desenvolvido para esta aplicação de monitoramento bovino, onde foi realizado o desenvolvimento de *hardware* para a integração física entre microcontrolador e sensores, de caixa mecânica para abrigar os componentes eletrônicos do ambiente hostil de operação, além de proporcionar a fixação dos sensores ao corpo do animal. E ainda, o desenvolvimento de *firmware* para a troca de comunicação entre microcontrolador, sensores e *Gateway* LoRa.

Hardware

O *design* do *hardware* foi elaborado considerando características físicas dos sensores, modos de operação e funcionalidades oferecidas para o usuário. A manutenção

em campo do colar de monitoramento é uma tarefa onerosa para este tipo de aplicação, que pode envolver longas distâncias e lugares remotos. Pensando neste aspecto, o *hardware* foi projetado para ser modular, facilitando o acesso e substituição dos sensores e demais componentes. Desta forma, a *Printed Circuit Board (PCB)* possui conectores de encaixe rápido, tanto dos sensores, quanto da fiação utilizada ao longo do colar, para monitoramento da ação de rompimento do mesmo.

Após a validação do funcionamento do circuito eletrônico projetado e a comunicação entre microcontrolador e sensores, uma PCB foi desenvolvida com o auxílio do *software* Altium Design. Primeiramente, foram desenvolvidas bibliotecas próprias para cada componente utilizado, no qual foram desenvolvidos os símbolos esquemático e os *footprints*, assim como os modelos 3D, importados de cada fabricante utilizado. Os modelos 3D auxiliam a simulação mecânica e evita erros de projeto, antes da produção da placa eletrônica. A Figura 4.1 apresenta os principais componentes eletrônicos utilizados no dispositivo de sensoriamento, com seus respectivos nomes de identificação.



ESP32 LoRa V2 DHT11 MAX30102 MPU6050

Figura 4.1: *Principais componentes eletrônicos utilizados.*

Após as bibliotecas, o esquema elétrico foi desenvolvido com as devidas interligações necessárias. Em seguida, o *layout* foi desenvolvido utilizando duas camadas para garantir boas práticas de aterramento. As dimensões da PCB foram projetadas para comportar além do microcontrolador e sensores, os periféricos como bateria e antena LoRa. Desta forma, a placa eletrônica possui a dimensão 70 mm x 75 mm. A Figura 4.2 apresenta a visão do lado *top* do *layout* com a dimensão da PCB.

De posse do *layout*, o próximo passo foi gerar os arquivos de fabricação através do mesmo *software* Altium Design. Dois tipos de arquivos foram gerados, denominados *Gerber* e *NC Drill*, que em suma, representam cada camada e perfuração presente na PCB. Para a fabricação da placa, utilizou-se material de fibra de vidro (FR-4) [101] com cobre dos dois lados. A impressão do circuito na placa foi realizada por meio da máquina de prototipagem LPKF [102]. No qual demandou aproximadamente 4 horas e 15 minutos para realizar o trabalho de impressão. A Figura 4.3 mostra o lado *bottom* da placa com o resultado obtido.

Após montagem do protótipo com seus periféricos, foram realizados testes de au-

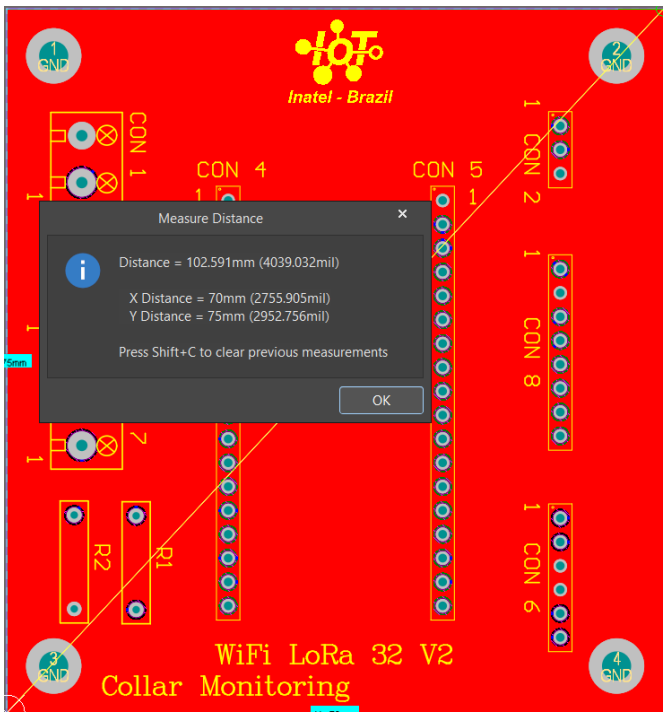


Figura 4.2: *Dimensão da PCB desenvolvida.*

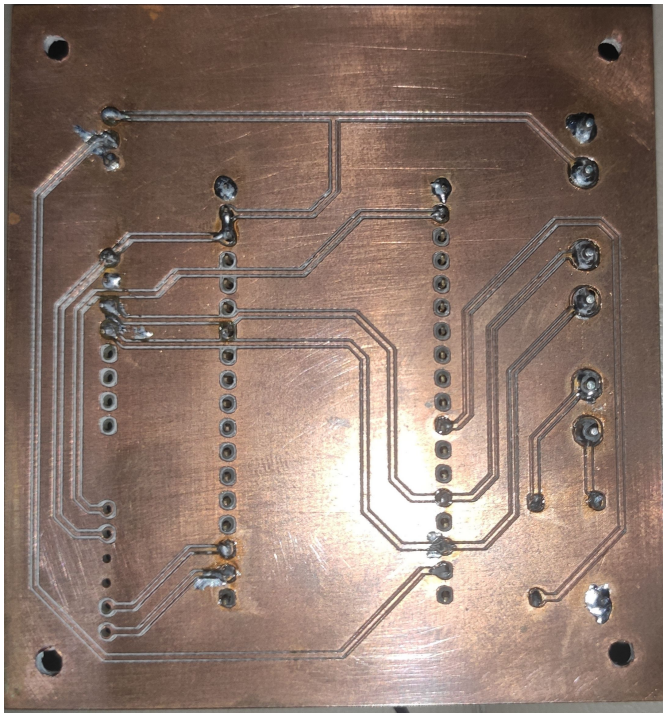


Figura 4.3: *Lado Bottom da PCB confeccionada.*

tonomia da bateria utilizada, modelo lithium-ion 3,7V/5800mAh. O qual utilizou a configuração padrão do microcontrolador no que se refere a economia de consumo de energia, não utilizando os modos de sleep disponíveis. Neste sentido, a única configuração realizada foi o desligamento do rádio LoRa nos momentos de ociosidade do sistema, conforme tempo de transmissão configurável. Desta forma, foram realizadas medidas em laboratório do consumo de corrente elétrica da bateria através do multímetro digital Fluke, obtendo os valores de 80mA e 300mA para os estados de ociosidade da rede LoRa e transmissão de pacotes, respectivamente. Analisando o datasheet do microcontrolador, é possível verificar que a tensão mínima necessária para manter o circuito funcionando é de 2,55V, desta maneira, este é o valor mínimo de tensão que a bateria precisa fornecer. Considerando estes dados, a autonomia alcançada com este modelo de bateria em testes no campo foi de 7 dias.

Caixas de proteção

O dispositivo de sensoriamento foi projetado para operar em ambiente agressivo em relação à eletrônica envolvida, pois além de condições ambientais adversas, está sujeito ao comportamento do animal, que naturalmente tem a tendência de tentar remover o corpo estranho preso ao seu pescoço. Diante deste cenário de aplicação em campo, foi projetada uma caixa mecânica para abrigar todos os componentes e, ao mesmo tempo, servindo de base de apoio para o sensor de batimento cardíaco, desenvolvido para operar em contato direto com o corpo do animal. A caixa foi desenvolvida considerando os aspectos físicos de cada componente, como o melhor posicionamento dos sensores para ler as variáveis de mensuração com o menor nível de ruído possível, por exemplo, um sensor de temperatura mal posicionado pode sofrer interferência térmica gerada pelos próprios componentes eletrônicos presentes na placa. A bateria demandou uma atenção especial no projeto da caixa, pois não pode sofrer aquecimento do circuito elétrico em funcionamento, apesar de estar operando em ambiente fechado, além de administrar o fator peso, que é relevante em relação aos demais componentes, em caso de deslocamento da mesma dentro da caixa. Outro componente crítico observado é a antena do rádio LoRa, que foi acomodada entre os componentes e fixada para operar dentro da caixa.

A caixa foi planejada para operar em conjunto com um colar de fixação, utilizando sistemas de travamento e de contrapeso para manter a caixa em uma posição fixa na região do pescoço do animal, de forma a possibilitar o sensoriamento de cada movimento da vaca-leiteira de forma precisa. A caixa foi projetada para possuir um *design* arredondado na sua parte superior e possuir aberturas em suas laterais para a passagem do colar, para pressioná-la contra o corpo do animal e auxiliar na fixação. Em

contrapartida, a caixa precisa ser vedada o suficiente para evitar a entrada de água, dado às condições do ambiente de operação. Para contornar este desafio de vedação, foram criadas paredes internas na caixa, de maneira a criar uma espécie de invólucro para os componentes eletrônicos. A isolação não foi completa devido a uma abertura de 15 mm x 5 mm, necessária para o sensor de temperatura e umidade capturar estas variáveis do ambiente em que o animal se encontra.

Além da caixa para o dispositivo de sensoriamento, foi desenvolvida também uma caixa para abrigar o *Gateway* LoRa. Pois apesar de não estar em contato direto com o animal, pode operar também em condições ambientais desfavoráveis. O *Gateway* é instalado em local com acesso à Internet, seja dentro da sede da fazenda, ou até mesmo em local abrigado no curral. A caixa foi projetada com aberturas para oferecer ventilação e acesso aos periféricos presentes na placa Raspberry Pi, além de acesso aos conectores da antena LoRa e GPS.

Ambas as caixas foram desenvolvidas de maneira digital através do *software* Fusion 360, desta forma, o *design* digital serve como molde para realizar a impressão 3D das peças. Antes de iniciar a impressão, ainda foi feito um tratamento no arquivo 3D para realizar o fatiamento do *design* digital, necessário para o processo da impressora 3D. Este tratamento foi utilizado com auxílio do *software* CURA, o qual é um *software* de código aberto para fins de fatiamento desenvolvido para impressoras 3D, essencial para configuração da impressão [103].

Atualmente há uma ampla gama de materiais disponíveis no mercado para realizar a impressão 3D. Neste trabalho, foi utilizado um material de baixo impacto ambiental e, ao mesmo tempo, de baixo custo. Desta maneira, o material escolhido para o desenvolvimento da plataforma foi o Ácido Polilático (*Polylacticacid*, PLA), um polímero constituído por moléculas de ácido láctico, um ácido orgânico de origem biológica que é obtido a partir de recursos renováveis. Além desta característica, o PLA é o segundo plástico biodegradável mais produzido devido as suas características químicas que tornam o plástico estável às variações de temperatura, comumente encontradas no campo. Temperaturas acima de 80 °C podem ser danosas para o PLA, que pode sofrer deformações [104]. De posse do arquivo de fatiamento gerado e do tipo de material definido, as peças foram produzidas por meio de impressora 3D. A parte superior da caixa do dispositivo de sensoriamento demandou cerca de 14 horas e 18 minutos para imprimir, enquanto a parte inferior, demandou cerca de 7 horas e 37 minutos. A Figura 4.4 apresenta o resultado obtido com a impressão 3D.



Figura 4.4: *Caixa mecânica impressa para o dispositivo de sensoriamento.*

Firmware

O desenvolvimento de *firmware* é parte fundamental para aplicações IoT, pois sua arquitetura e planejamento estão diretamente relacionados com a eficiência do projeto, seja em termos de consumo de energia, seja em termos de custo de operação com a utilização de serviços em nuvem, por exemplo. Para a plataforma proposta, foi arquitetado e desenvolvido uma aplicação de *firmware* exclusiva para este projeto, que foi responsável por estabelecer a troca de comunicação entre microcontrolador, sensores e rádio LoRa. Para facilitar o entendimento do fluxo de comunicação entre os componentes presentes no dispositivo de sensoriamento, a Figura 4.5 apresenta o fluxograma do código desenvolvido.

Uma vez definido os componentes de *hardware* necessários para o projeto, o primeiro passo para o desenvolvimento do *firmware* foi pesquisar por bibliotecas disponíveis para cada tipo de componente utilizado, sendo o mais desafiador o rádio LoRa. O qual demandou algumas tentativas e testes em diferentes bibliotecas, até que fosse possível estabelecer uma conexão estável com o servidor TTN. Desta forma, após quatro tentativas foi validado e utilizado como base, o projeto de código aberto presente em [105]. Já os sensores utilizaram bibliotecas de código aberto disponibilizadas pelas empresas Adafruit [106] e SparkFun [107]. O código desenvolvido para a aplicação proposta, utiliza a linguagem de programação C/C++ [108], embora o código tenha sido escrito em linguagem C, as bibliotecas disponibilizadas, estão codificadas em C++.

Atualmente existem diversas ferramentas e *Integrated Development Environment*

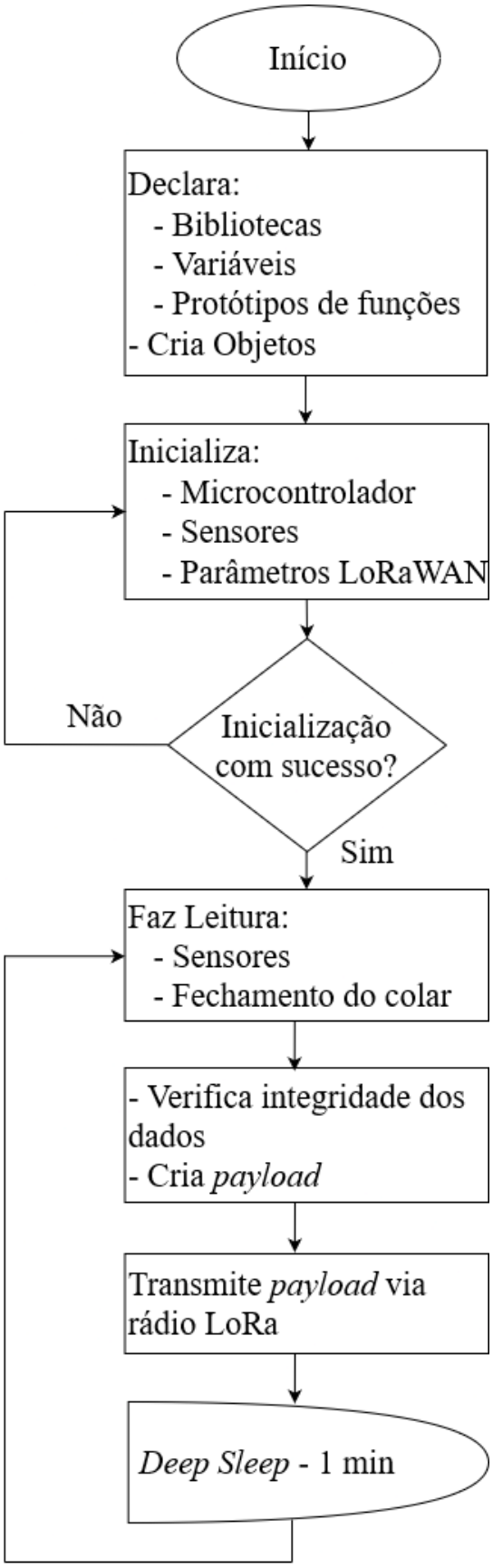


Figura 4.5: *Fluxograma do firmware desenvolvido para o dispositivo de sensoriamento.*

(IDE) gratuitas disponíveis para desenvolvimento de *firmware*. Como este projeto utiliza um microcontrolador do modelo ESP32 LoRa V2 Heltec, a própria fabricante Espressif Systems [109] disponibiliza um *framework*, que é um conjunto de componentes de *software* reutilizáveis e que aumenta a eficiência no desenvolvimento de novas aplicações em linguagem C/C++, além de fornecer ampla documentação com orientações para o uso de diversas IDEs. É possível utilizar o *framework* em IDE mais simples e didáticas como a Arduino IDE [110], assim como IDEs que ofereçam mais recursos e consequentemente estejam mais próximas de aplicações práticas da indústria, a exemplo da PlatformIO IDE [111]. Para o desenvolvimento do *firmware* utilizado na aplicação de IoT em questão, foi utilizado a PlatformIO IDE em conjunto com o *software* editor de texto e código-fonte Visual Studio Code, que é uma ferramenta desenvolvida pela empresa Microsoft, onde é possível instalar diversas extensões de *softwares* [112]. Desta forma, a IDE PlatformIO foi instalada e utilizada como uma extensão no ambiente de *software* do Visual Studio Code. A Figura 4.6 demonstra os resultados obtidos em testes de validação do *firmware* em ambiente de laboratório, apresentando os dados coletados pelos sensores, estado do fechamento do colar, quantidade de pacotes LoRa transmitidos até o momento, além do intervalo de tempo entre leituras e número de identificação do *End node* através do *display* OLED.

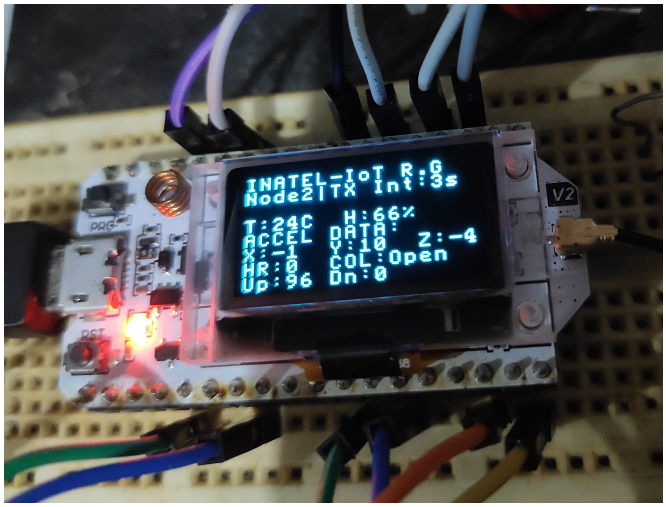


Figura 4.6: *Testes do firmware em laboratório.*

4.1.2 *Gateway* LoRa

Conforme citado anteriormente, também foi desenvolvida uma caixa mecânica para proteção do *Gateway*, onde esta demandou cerca de 12 horas e 25 minutos para realizar a impressão da parte superior, e cerca de 5 horas e 48 minutos para realizar a impressão da parte inferior. A Figura 4.7 apresenta o resultado obtido com a impressão 3D.

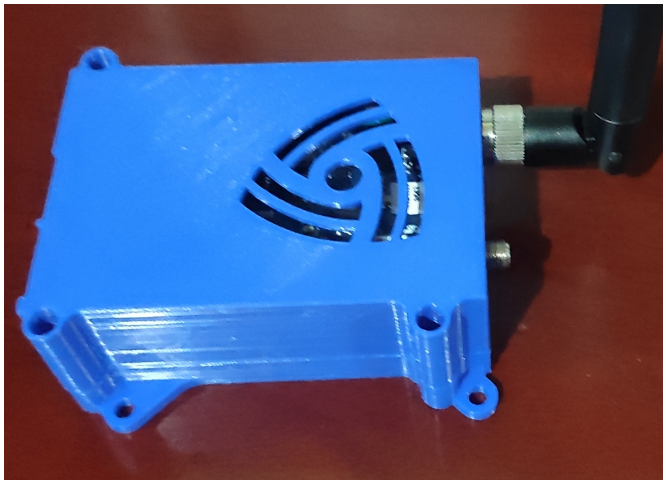


Figura 4.7: *Caixa mecânica impressa para o Gateway LoRa.*

O *Gateway* LoRa é um dos principais componentes utilizados na RSSF proposta, pois é através dele que as plataformas em nuvem têm acesso aos dados capturados pelos dispositivos de sensoriamento. O projeto de *hardware* e *software* de um *Gateway* LoRa é padronizado pela organização LoRa Alliance®, que gerencia a tecnologia, padronizando, certificando e controlando *hardwares* criados mundialmente, assim permitindo o rápido crescimento da aplicação da tecnologia da LoRa [113]. Como já citado, este projeto utiliza o *Gateway* de modelo RD43HATGPS, que possui as características e parâmetros de radiofrequência listados na Tabela 4.1 [114].

Tabela 4.1: *Especificação do Gateway LoRa.*

Especificação	**Descrição**
Frequency	902.5-907 MHz / 915-928 MHz
Data rate	21.9 kbps
Bandwidth	125 kHz / 250 kHz / 500 kHz
Output power	+27 dBm
Frequency tolerance	±5.0 ppm
Modulation/Scattering	LoRa / CSS
Sensitivity (BER 0.1%)	-137 dBm
Input level	-20 dBm
Connector	SMA-M

Para realizar transmissões utilizando a modulação LoRa no Brasil não é necessário licença ou autorização de agências governamentais para o uso do espectro de frequências. Pois a faixa de frequências de operação no país, que são 902-907,5 MHz e 915-928 MHz, se enquadram na categoria de equipamentos de uso em ambientes industriais, científicos e médicos (*Industrial, Scientific and Medical*, ISM). Essa faixa de frequência é usada para comunicação sem fio de dispositivos que não estão relacionados a telecomunicações tradicionais [115]. Desta maneira, os parâmetros regionais de

frequências já vieram previamente configurados no *software* do *Gateway*, por meio de arquivo JSON, conforme apresentado na Figura 4.8.

4.1.3 Servidor TTN

A plataforma IoT proposta utiliza como *Network Server* o servidor TTN, que é um servidor gratuito e com ampla documentação disponível. Para que o mesmo funcione corretamente no projeto, recebendo os dados LoRa e enviando-os para o servidor de aplicações, é necessário criar um usuário na rede TTN, além de realizar o registro e ativação tanto do *Gateway* quanto do *End node* na rede. Como pode ser visto na Figura 4.9, a página inicial do servidor é dividida em duas áreas distintas, aplicações e *Gateways*.

Área do *Gateway*

Acessando a área relativa ao *Gateway*, três parâmetros precisam ser configurados:

I. *Gateway ID*;

II. *Gateway EUI*;

III. *Frequency plan*.

O parâmetro *Gateway* ID se refere a um identificador único criado pelo usuário, que vai dar nome ao *Gateway* na rede. Já o *Gateway Extended Unique Identifier (EUI)* também é um identificador único de cada dispositivo, porém, este parâmetro é fornecido pelo fabricante do *Gateway*. Enquanto *Frequency plan* está relacionado ao plano de frequências a ser utilizado. As configurações utilizadas para o projeto em específico, pode ser visualizada na Figura 4.10.

O registro do *Gateway* no servidor foi realizado com auxílio da documentação fornecida pelo fabricante Radioenge. Onde é fornecido as linhas de comandos necessários para acessar os arquivos da placa Raspberry Pi, acoplada ao módulo LoRaWAN, e ter acesso às configurações necessárias [116]. Desta forma, foi configurado em um arquivo JSON o campo *"server-address"* com o endereço *"au1.cloud.thethings.network"*, apresentado na Figura 4.11. Este endereço de servidor escolhido, leva ao seguinte *Frequency plan* indicado pelo fabricante, Australia 915-928 MHz, FSB2. Para obter o *Gateway* EUI, o comando específico também foi fornecido, onde é realizada a leitura de um campo numérico de 8 *bytes*, formatados em hexadecimal, conforme mostrado na Figura 4.12.

pi@LoRaWAN_GW_img: /opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd

GNU nano 2.7.4

```
{
    "SX1301_conf": {
        "lorawan_public": true,
        "clksrc": 1, /* radio_1 provides clock to concentrator */
        "antenna_gain": 0, /* antenna gain, in dBi */
        "radio_0": {
            "enable": true,
            "type": "SX1257",
            "freq": 917200000,
            "rssi_offset": -166.0,
            "tx_enable": true,
            "tx_freq_min": 915000000,
            "tx_freq_max": 928000000
        },
        "radio_1": {
            "enable": true,
            "type": "SX1257",
            "freq": 917900000,
            "rssi_offset": -166.0,
            "tx_enable": false
        },
        "chan_multiSF_0": {
            /* Lora MAC channel, 125kHz, all SF, 916.8 MHz */
            "enable": true,
            "radio": 0,
            "if": -400000
        },
        "chan_multiSF_1": {
            /* Lora MAC channel, 125kHz, all SF, 917.0 MHz */
            "enable": true,
            "radio": 0,
            "if": -200000
        },
        "chan_multiSF_2": {
            /* Lora MAC channel, 125kHz, all SF, 917.2 MHz */
            "enable": true,
            "radio": 0,
            "if": 0
        },
        "chan_multiSF_3": {
            /* Lora MAC channel, 125kHz, all SF, 917.4 MHz */
            "enable": true,
            "radio": 0,
            "if": 200000
```

Figura 4.8: *Arquivo de configuração do Gateway.*

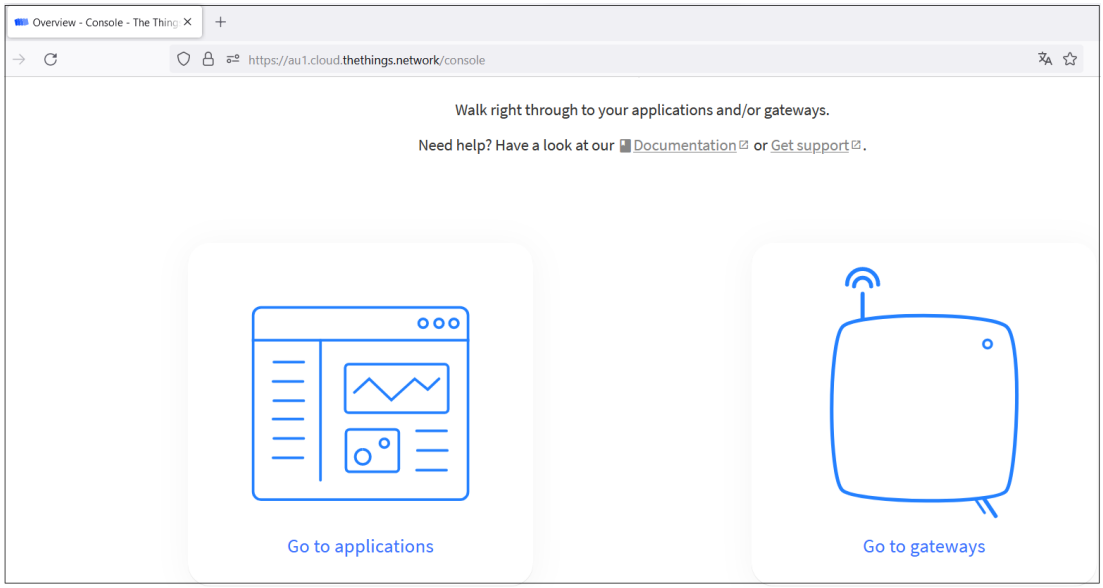


Figura 4.9: *Página inicial do servidor TTN.*

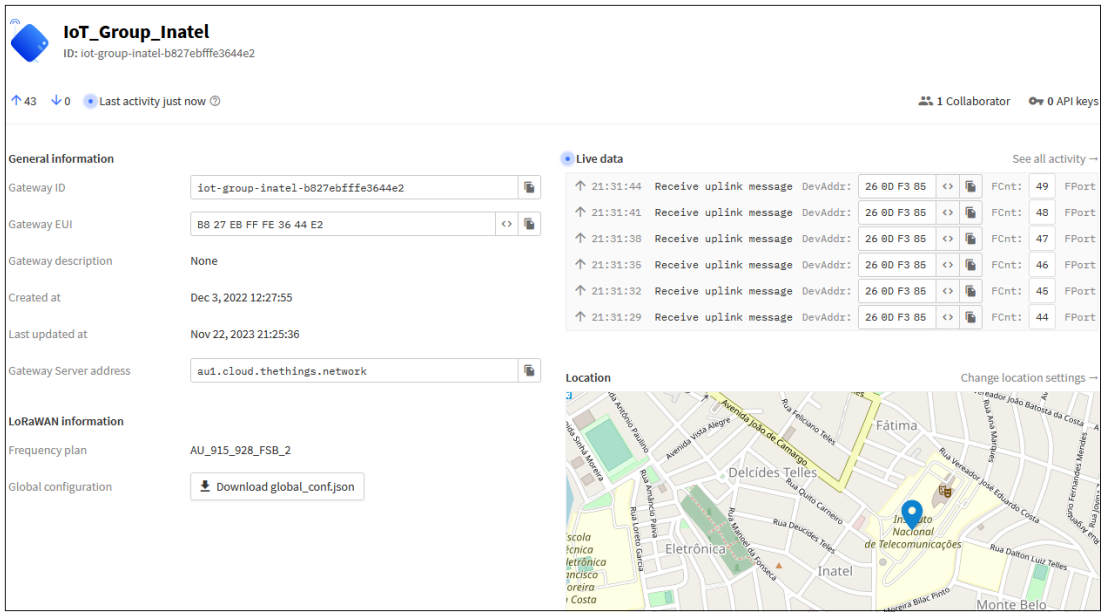


Figura 4.10: *Página de registro do Gateway.*

```
"gateway_conf": {
    "gateway_ID": "AAAAAAAAAAAAAAAA",//  Gateway Radioenge
    /* change with default server address/ports, or overwrite in local_conf.json */
    "server_address": "au1.cloud.thethings.network",
    "serv_port_up": 1700,
    "serv_port_down": 1700,
    /* adjust the following parameters for your network */
    "keepalive_interval": 10,
    "stat_interval": 30,
    "push_timeout_ms": 1000,
    /* forward only valid packets */
    "forward_crc_valid": true,
    "forward_crc_error": false,
    "forward_crc_disabled": false,
    /* GPS configuration */
    "gps_tty_path": "/dev/ttyAMA0",
    /* GPS reference coordinates */
    "ref_latitude": 0.0,
    "ref_longitude": 0.0,
    "ref_altitude": 0
}
```

Figura 4.11: *Configuração do endereço de servidor no Gateway.*

```
pi@LoRaWAN_GW_img: /opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd
pi@LoRaWAN_GW_img:~ $ cd /opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd/
pi@LoRaWAN_GW_img:/opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd $ sudo ./update_gwid.sh local_conf.json
sed: couldn't flush /sedL3Jivb: No space left on device
Gateway_ID set to b827ebFFFE8cad01 in file local_conf.json
pi@LoRaWAN_GW_img:/opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd $
```

Figura 4.12: *Leitura do parâmetro EUI no Gateway.*

Área de Aplicações

A área de aplicações se destina aos *End nodes*, possibilitando o registro, visualização dos dados recebidos, pré-processamento dos dados, além de possuir ferramentas de integração com diversos protocolos de comunicação e servidores de aplicações em nuvem. O registro do *End node* foi realizado também com auxílio da documentação fornecida pelo fabricante Radioenge [117]. Neste caso, o registro é realizado apenas na plataforma do TTN, onde é necessário preencher alguns campos como *Application* ID, que é um nome fornecido pelo usuário, LoRaWAN *version* e *Frequency plan*, que são parâmetros fornecidos pelo fabricante. E ainda, *Activation mode*, que é o modo de ativação a ser definido pelo usuário, com três opções possíveis:

I. *Over-The-Air-Activation (OTAA)*;

II. *Activation By Personalization (ABP)*;

III. *Define multicast group (ABP & Multicast)*.

A diferença entre os três modos está no nível de segurança na troca dos dados entre *End node* e o servidor TTN, onde o OTAA possui mais camadas de segurança, enquanto o ABP possui maior velocidade na troca de informações. No trabalho proposto, foi utilizado o método ABP, conforme mostrado Figura 4.13, que apresenta as configurações descritas.

Durante o processo de registro do *End node* na plataforma TTN, há a necessidade de se gerar chaves de autenticação para serem utilizadas em cada *End node*, ou seja, para cada dispositivo na rede, o servidor utiliza chaves específicas para a identificação e troca de pacotes LoRa. Os endereços e chaves geradas são:

I. *DevEUI*;

II. *Device address*;

III. *NwkSKey*;

IV. *SnwkSIntKey*;

V. *NwkSEncKey*;

VI. *AppSKey*.

A Figura 4.14 apresenta as chaves geradas pela plataforma. Ao longo da implementação e testes da comunicação com o *End node*, foi verificado que nem todas as chaves foram necessárias. A Figura 4.15 mostra as chaves implementadas no *firmware* do *End node*.

A implementação do *firmware* no *End node* considera as casas decimais para a leitura de cada sensor com precisão, desta forma, cada parâmetro de leitura é armazenado

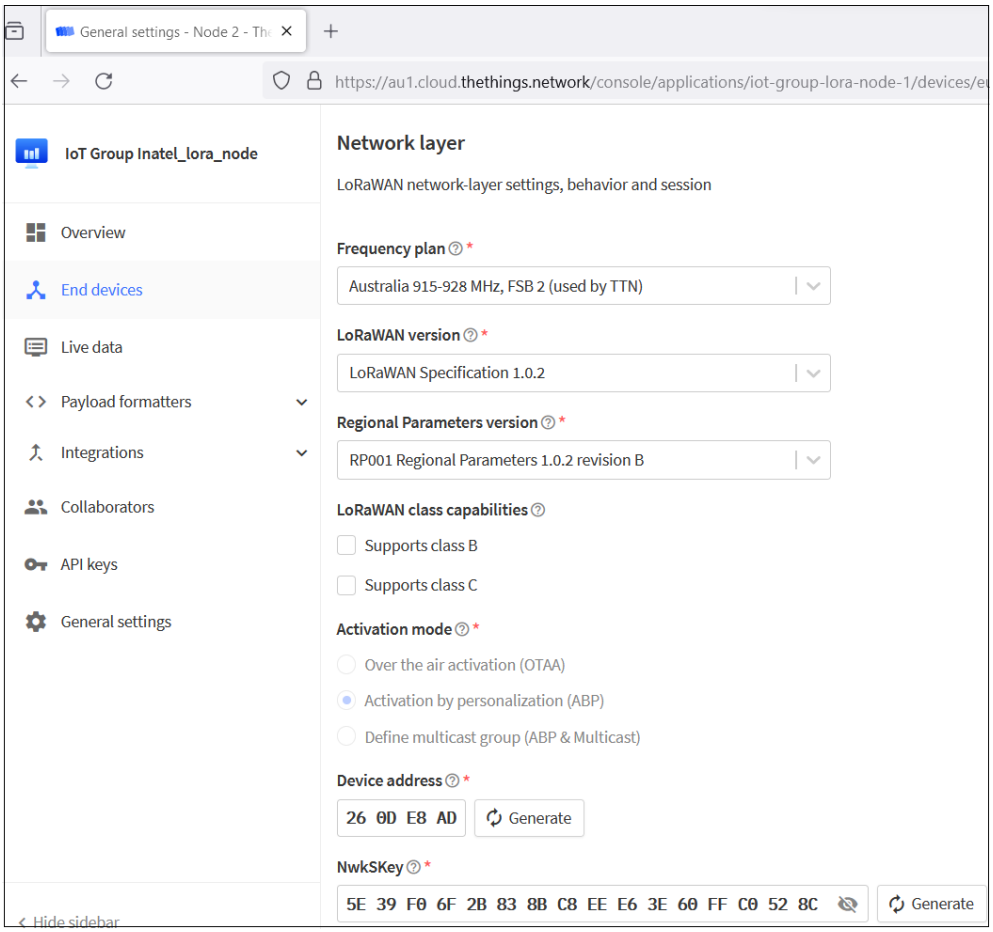


Figura 4.13: *Modo de ativação do End node.*

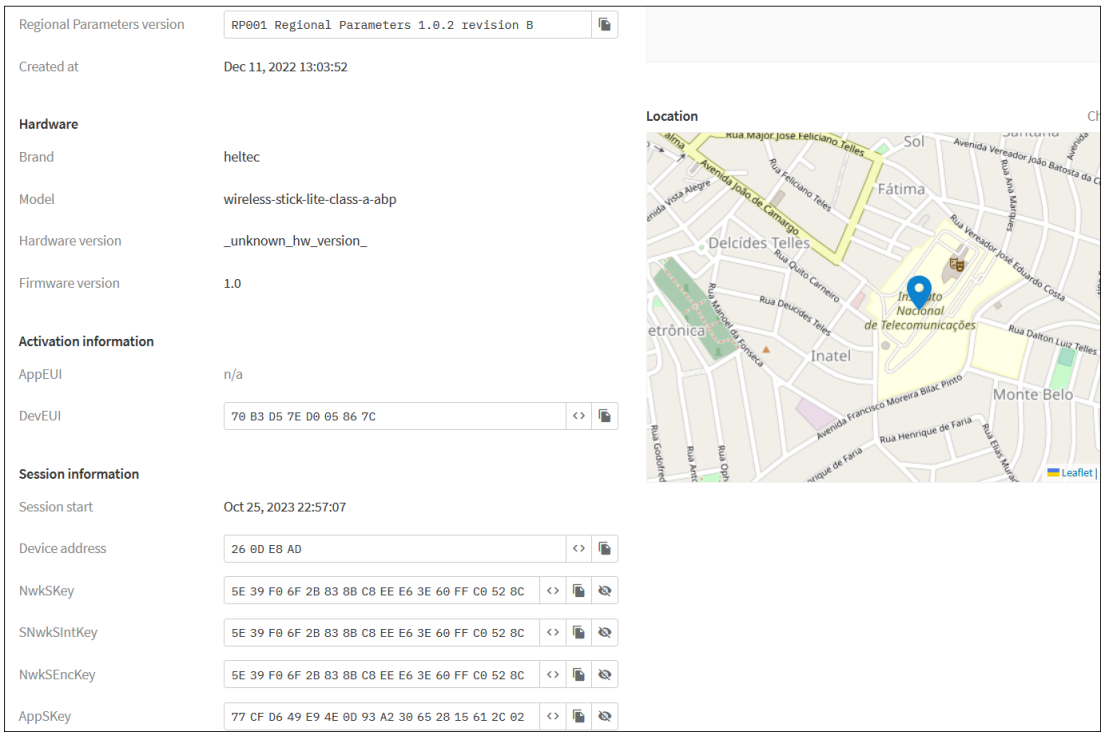


Figura 4.14: *Chaves geradas pelo servidor TTN.*

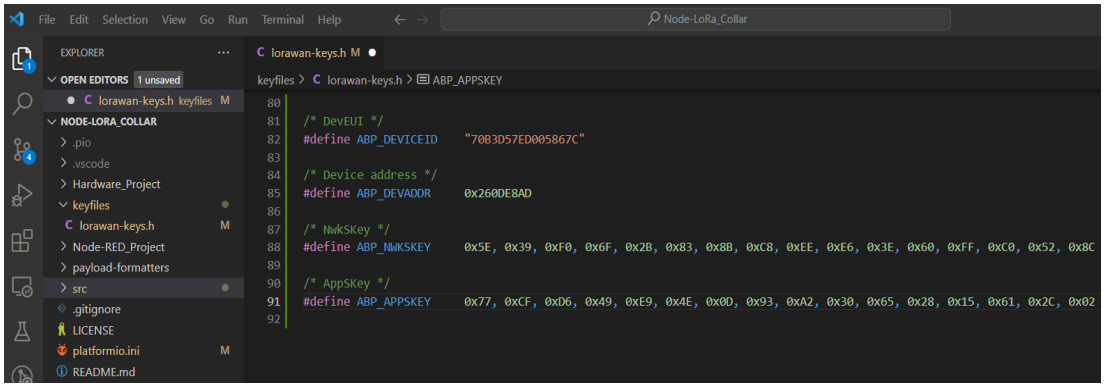


Figura 4.15: *Chaves implementadas no firmware do End node.*

e transmitido utilizando 2 *bytes*, exceto a variável que armazena a informação do fechamento do colar, que utiliza apenas 1 *byte*, assim, totalizando 19 *bytes* transmitidos por cada *End Node*. O pacote recebido com os 19 *bytes* pelo servidor, pode ser visualizado através da área de aplicação, porém, com valores em hexadecimal, o que dificulta a visualização e integração com as ferramentas para aplicações de usuário final. O servidor TTN oferece uma área para formatação do *payload* LoRa recebido. Onde é possível utilizar formatadores disponibilizados pela própria plataforma ou customizado. Para o projeto em questão foi utilizado um formatador customizado, no qual foi desenvolvido um algoritmo em JavaScript para realizar a conversão dos *bytes* recebidos do *Gateway* no formato hexadecimal para valores decimais. A Figura 4.16 ilustra a área de customização, assim como parte do algoritmo implementado. Desta forma, o servidor TTN disponibiliza os pacotes LoRa convertidos em valores decimais via objeto JSON, que pode ser utilizado pelas plataformas de integração com aplicações em nuvem.

4.1.4 *Broker* MQTT

O servidor TTN oferece integração com diversos protocolos de IoT, possibilitando transmitir os dados recebidos dos *End nodes*, para qualquer aplicação desejada. Na plataforma IoT desenvolvida, foi utilizada a integração com o protocolo MQTT, onde este, por sua vez, foi integrado com a aplicação desenvolvida no Node-Red. Com esta integração, toda a informação recebida pelo TTN, é convertida em objeto JSON, onde os dados devidamente formatados em JSON são transmitidos para o Node-Red através do protocolo MQTT. Ainda na área de aplicações do servidor TTN, dentro da área de integrações, foram criadas credenciais de acesso ao *broker* disponibilizado pelo servidor, que oferece opções de conexão pública ou conexão segura, por meio do protocolo de segurança *Transport Layer Security (TLS)*. A Figura 4.17 demonstra a configuração realizada no servidor TTN para ter acesso ao *broker* MQTT.

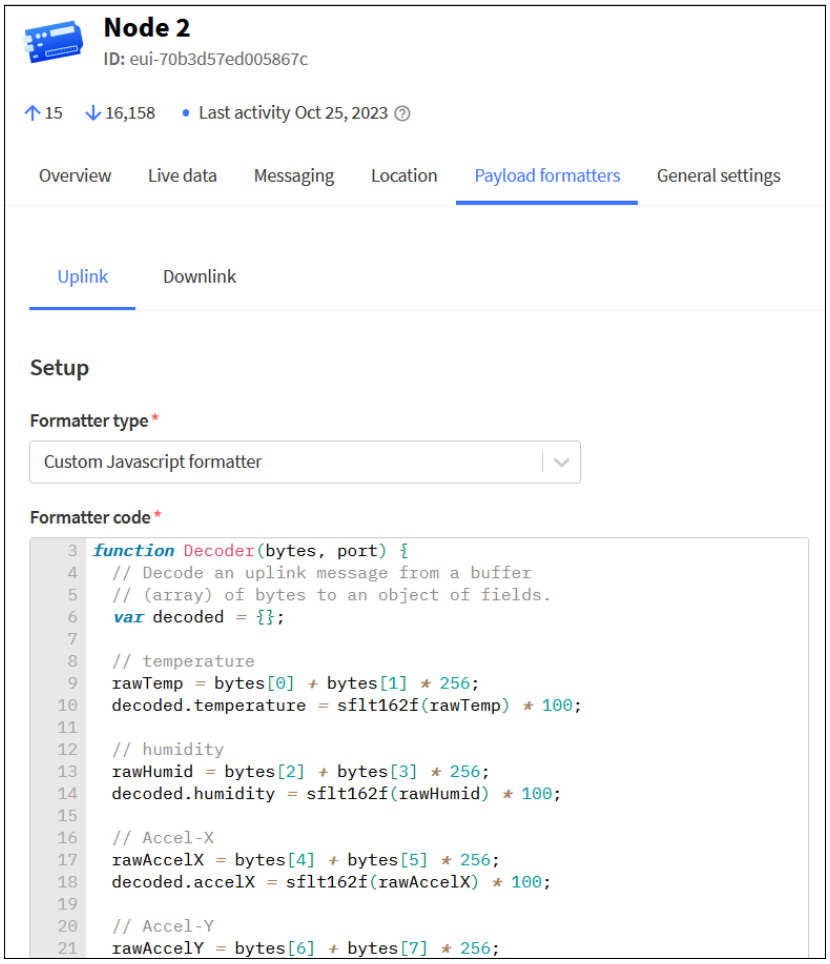


Figura 4.16: *Algoritmo de conversão dos pacotes LoRa.*

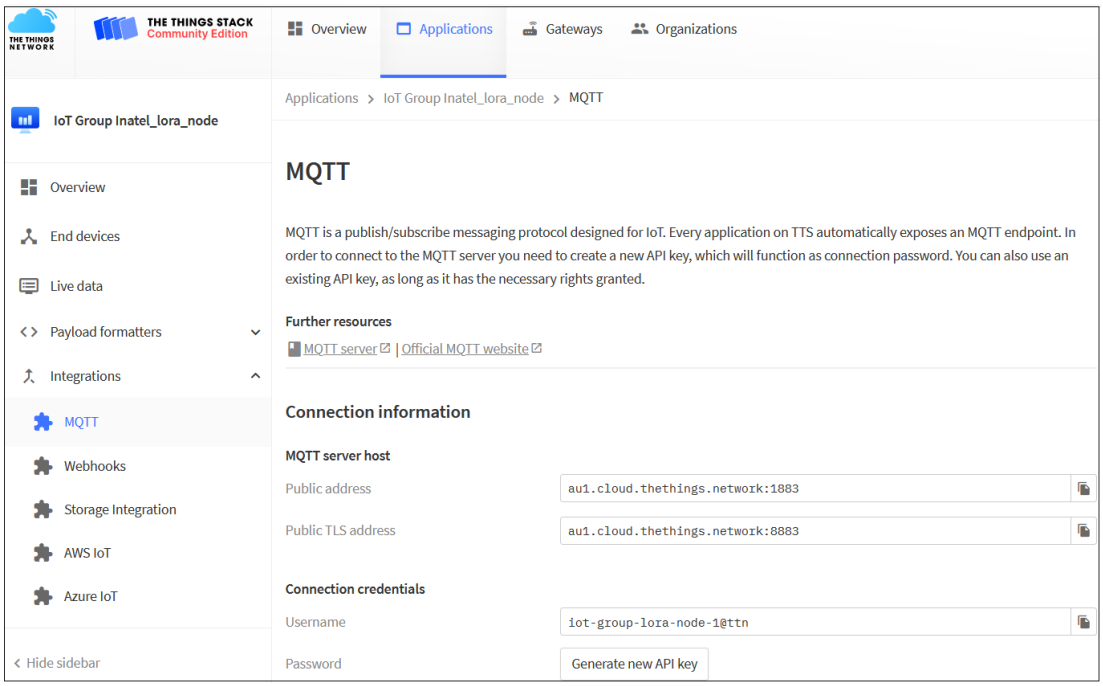


Figura 4.17: *Integração com broker MQTT no servidor TTN.*

Para que os dados transmitidos pelo *broker* MQTT sejam recebidos pela aplicação presente no Node-Red, é necessário configurar o nó MQTT-IN do Node-Red, com as credenciais do *broker*, além de configurar a operação de *subscribe* no tópico específico criado para cada *End node* cadastrado na rede RSSF desenvolvida. O nó MQTT-IN é uma API de MQTT *Client*, que permite as operações de *publish* e *subscribe*. Para fins experimentais, foi utilizado QoS 0 na recepção dos dados, este valor de QoS não oferece confiabilidade na entrega do pacote, entretanto, possibilita maior velocidade na troca de informações, evitando retransmissões de pacotes. A Figura 4.18 apresenta as configurações realizadas no Node-Red.

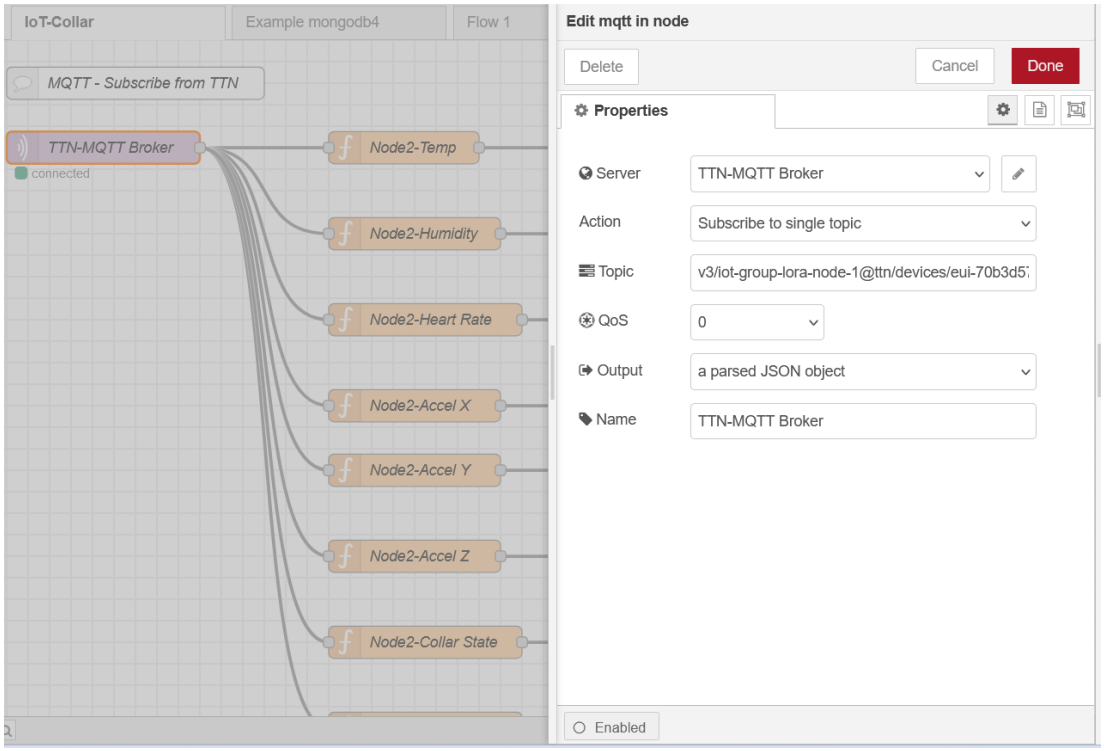


Figura 4.18: *Configuração do nó MQTT Client presente no Node-Red.*

Com o auxílio da ferramenta de análise de tráfego de rede, Wireshark [118], é demonstrada e validada a troca de comunicação entre servidor TTN e plataforma desenvolvida no Node-Red por meio do protocolo MQTT. Conforme detalhado na Figura 4.19, o MQTT *Client* presente no Node-Red, que está utilizando o IP local 192.168.0.110, inicia a conexão com o *broker*, realiza a operação de *subscribe* com QoS 0 no respectivo tópico do *End node*. Após a conexão estabelecida é possível verificar a transmissão de dados do *broker*, que está utilizando o IP 13.238.174.71, para a aplicação em Node-Red através da operação de *publish* no tópico do *End node*.

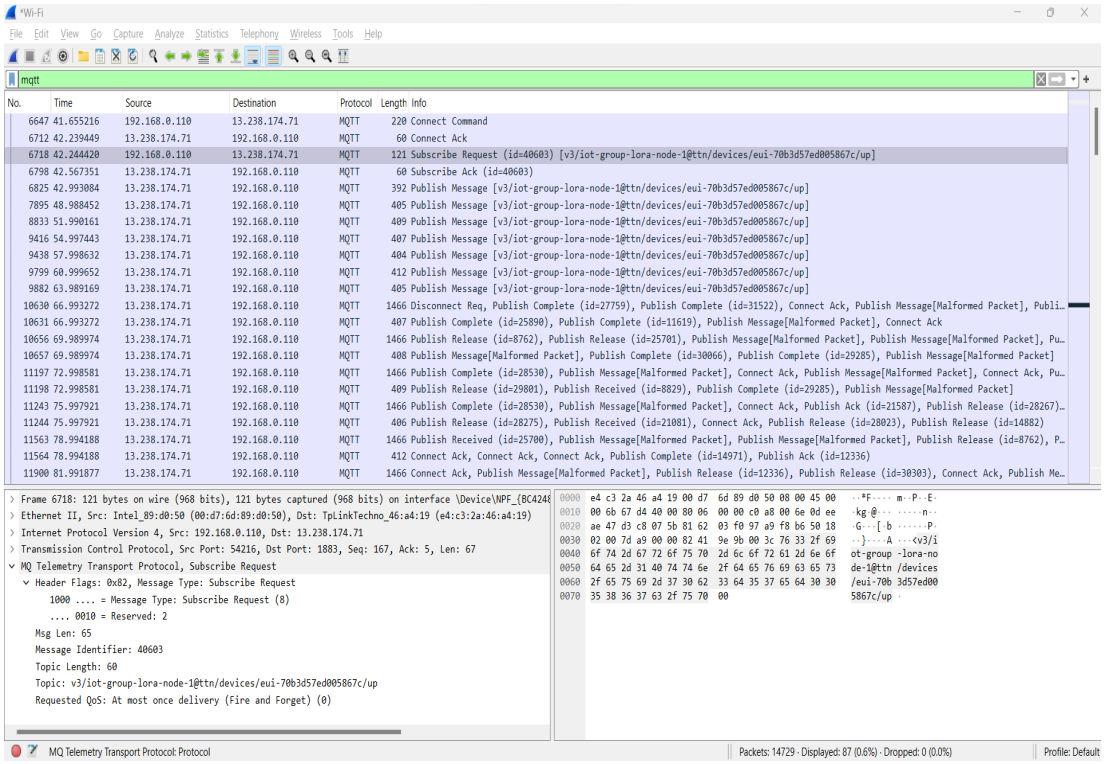


Figura 4.19: *Ferramenta Wireshark para análise do protocolo MQTT.*

4.1.5 Banco de dados

O banco de dados utilizado na plataforma desenvolvida foi o MongoDB, pois é uma ferramenta versátil de armazenamento de dados do tipo NoSQL, além de ser amplamente utilizada na indústria. O MongoDB foi inserido no processamento desenvolvido na plataforma Node-Red, onde todas as informações recebidas dos sensores por meio do protocolo MQTT, são armazenadas diretamente no banco de dados. Estas informações chegam no formato JSON e são armazenadas neste mesmo formato. Dentro do ambiente de desenvolvimento do MongoDB há diversas ferramentas oferecidas, dentre elas as ferramentas de armazenamento local como MongoDB Compass, e armazenamento em nuvem como MongoDB Atlas. Ambas foram implementadas e validadas com testes práticos, realizando os processos de inserção de dados com o método *Insert* e consulta (*Query*) com o método *Find*. As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam a configuração da conexão entre a aplicação desenvolvida em Node-Red e MongoDB em nuvem, e a operação de inserção dos dados no banco, respectivamente.

Ademais, foram pesquisados e instalados nós de integração no Node-Red, tanto para o banco de dados local quanto para o banco de dados em nuvem, respectivamente apresentados, node-red-contrib-mongodb4 [119] e node-red-contrib-mongodb-aleph [120]. As operações de escrita e leitura no banco são as mesmas, havendo alterações apenas na forma de conexão. O MongoDB Compass foi instalado local-

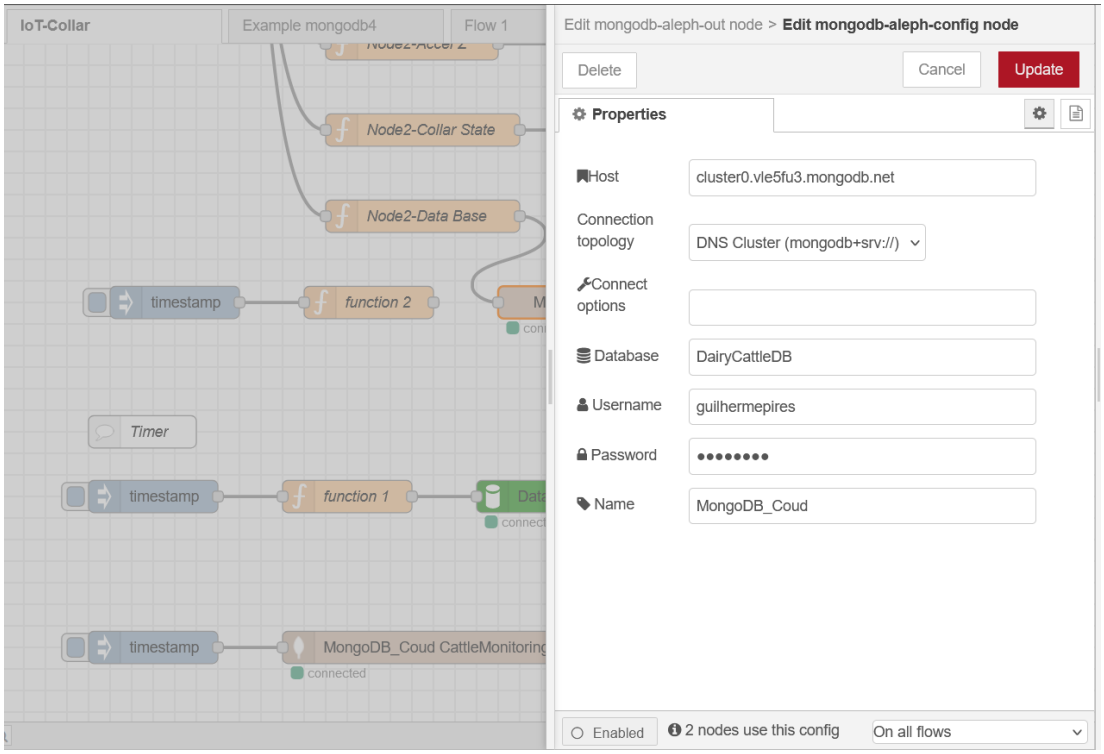


Figura 4.20: *Configuração da conexão com banco de dados em nuvem.*

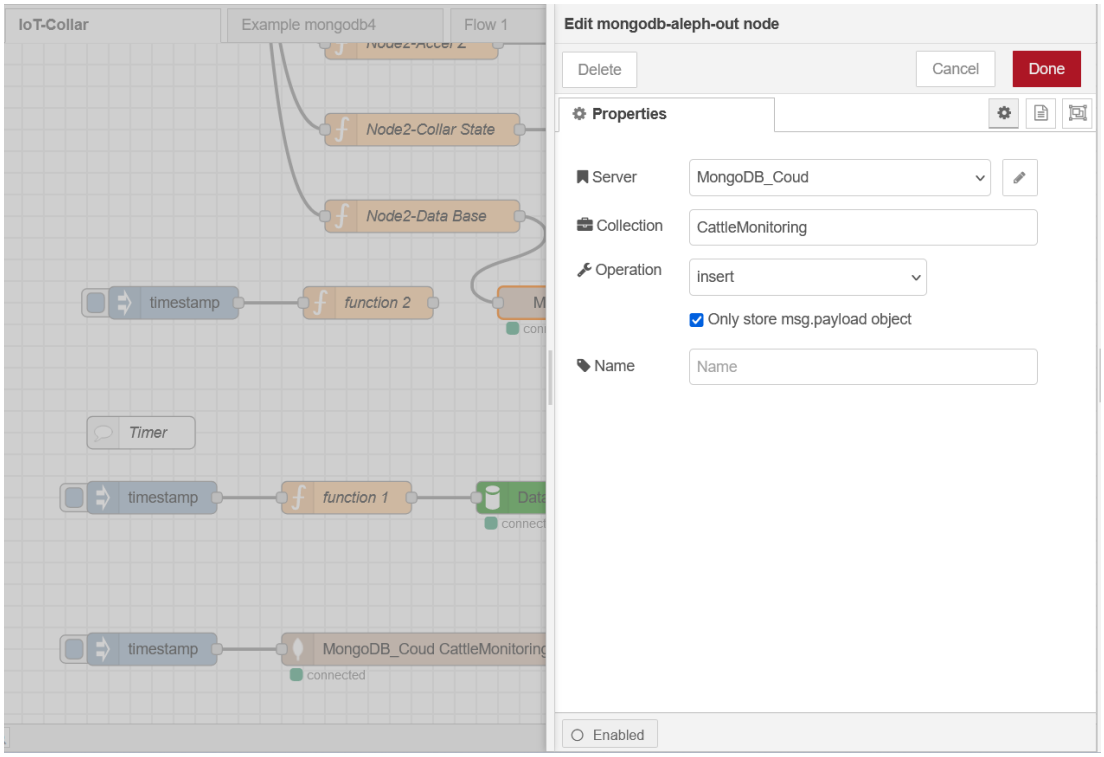


Figura 4.21: *Operação de Insert no banco de dados em nuvem.*

mente em computador que utiliza sistema operacional Windows 11, já para o MongoDB Atlas foi criado um usuário mediante cadastro na plataforma disponibilizada. A Figura 4.22 demonstra o MongoDB Compass com os dados coletados armazenados, enquanto a Figura 4.23 mostra os dados no MongoDB Atlas.

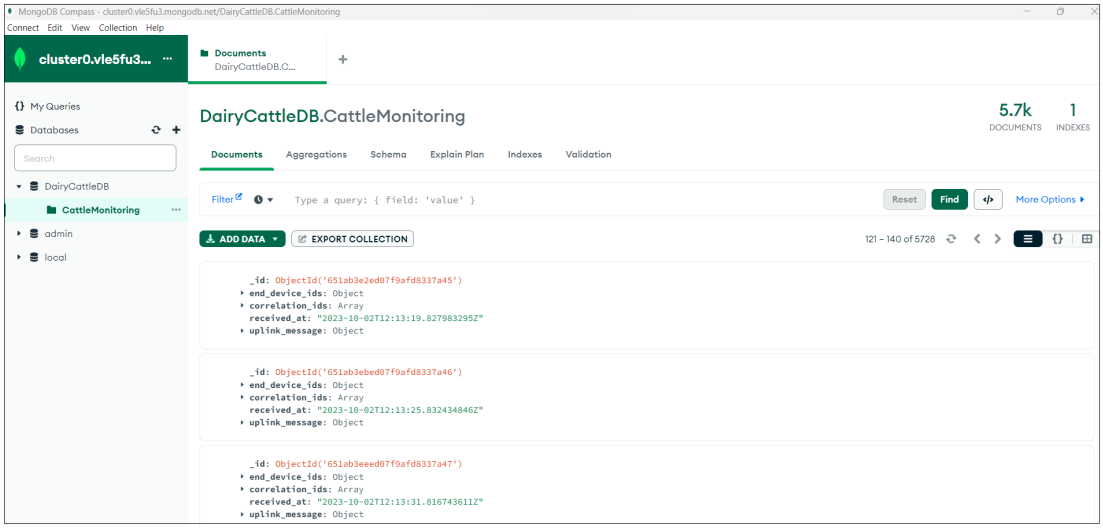


Figura 4.22: *Dados armazenados no MongoDB Compass.*

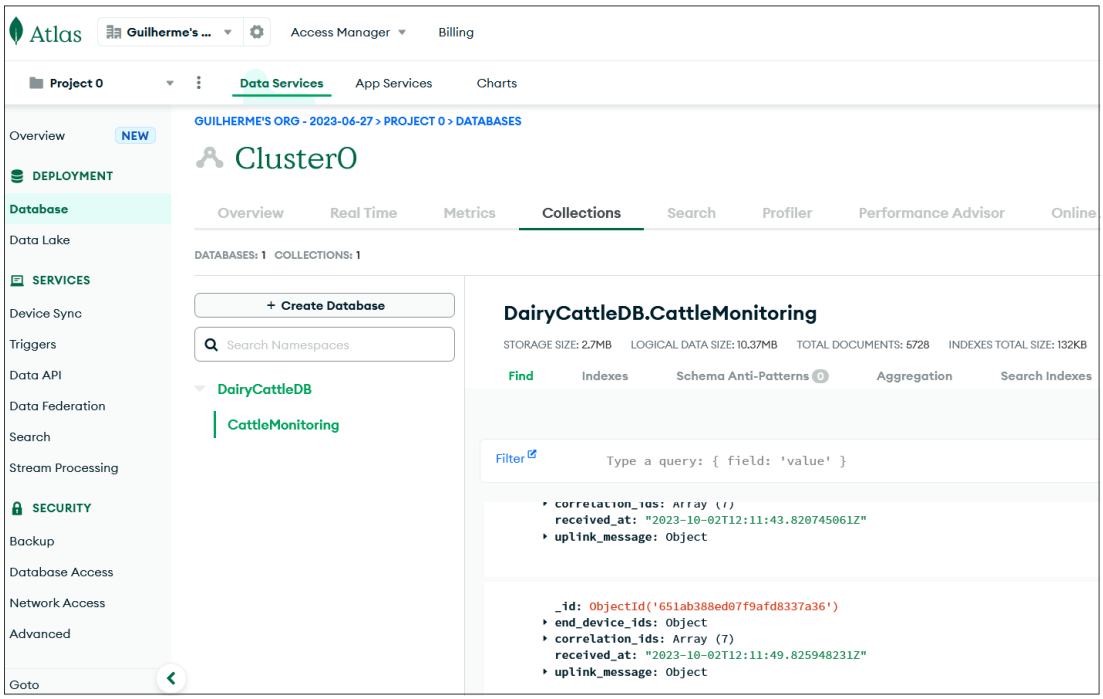


Figura 4.23: *Dados armazenados no MongoDB Atlas.*

4.1.6 Node-RED

A ferramenta Node-Red foi utilizada como ambiente de desenvolvimento do *back-end* da plataforma IoT, onde é realizada toda a integração entre diferentes sistemas, além de ser implementado todo o processamento dos dados, desde a recepção proveniente da RSSF até a apresentação dos resultados para o usuário final. A própria ferramenta já possui diversos blocos ou nós instalados, como o nó de MQTT *Client*. Porém, para a aplicação desenvolvida foi necessário instalar nós externos para uso de banco de dados, ML, *dashboard* e nós específicos para a construção do *dashboard*, como gráficos com *timeline*. O Node-Red foi instalado em uma placa Raspberry Pi 3, no qual apresentou capacidade computacional suficiente para executar localmente e de maneira paralela todas as funções e capacidades presentes na plataforma.

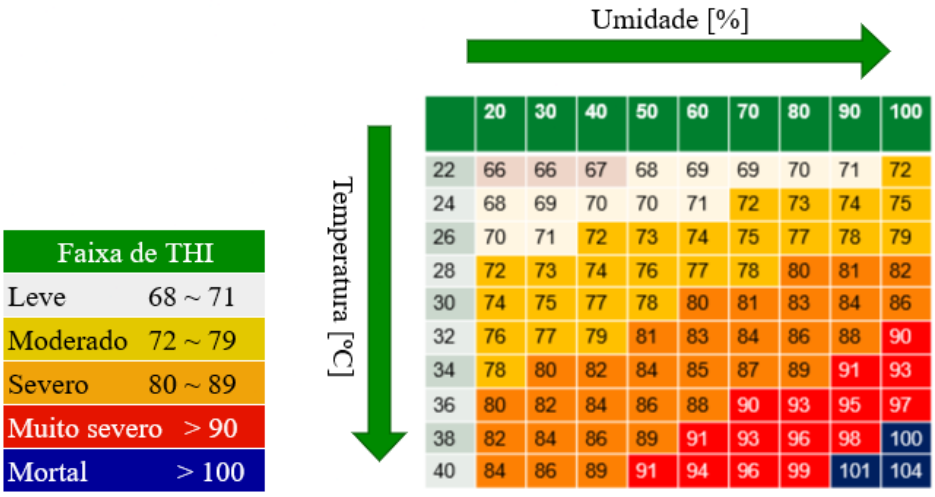
Além das funcionalidades descritas, foi implementada no Node-Red uma função que informa ao produtor um indicativo muito relevante, que impacta diretamente a produção leiteira, o índice THI. Este índice informa se o animal está sob condições de estresse térmico ou não. Esta informação é de extrema importância para a pecuária de precisão, pois já é conhecido e determinado por diversas pesquisas a relação da queda da produção leiteira na condição do animal sob influência de estresse térmico. Este índice é calculado a partir das informações de temperatura e umidade relativa do ambiente em que o animal se encontra. Onde em média, níveis abaixo de 65 representa animal em zona de conforto térmico, passando por diferentes zonas de estresse térmico na medida em que o índice calculado aumenta. A Figura 4.24 ilustra a relação entre o valor do índice e as regiões de estresse térmico. O cálculo do índice THI pode ser obtido através da equação que relaciona temperatura e umidade relativa do ar como

$$THI = 1.8 * Ta - (1 - RH) * (Ta - 14.3) + 32 \tag{4.1}$$

onde Ta representa a temperatura em °C, enquanto RH representa a umidade relativa como a fração da unidade % [121].

4.2 Aprendizado de Máquina

A análise e classificação do comportamento animal foi desenvolvido e implementado utilizando a técnica Florestas Aleatórias. Esta é uma técnica de aprendizado supervisionado, que utiliza um conjunto de dados para treinar um modelo a reconhecer padrões, visando futuramente utilizá-lo para classificar novos dados apresentados. O conjunto de dados utilizado para treinar o modelo foi criado partir dos testes práticos na fazenda, formando uma base de dados desbalanceada em relação à distribuição das



	20	30	40	50	60	70	80	90	100
22	66	66	67	68	69	69	70	71	72
24	68	69	70	70	71	72	73	74	75
26	70	71	72	73	74	75	77	78	79
28	72	73	74	76	77	78	80	81	82
30	74	75	77	78	80	81	83	84	86
32	76	77	79	81	83	84	86	88	90
34	78	80	82	84	85	87	89	91	93
36	80	82	84	86	88	90	93	95	97
38	82	84	86	89	91	93	96	98	100
40	84	86	89	91	94	96	99	101	104

Figura 4.24: *Índice THI e regiões de estresse térmico, adaptado de [122].*

classes, por exemplo, é esperado que as classes que representam estro e furto possuam pouca ocorrência na base de dados. A Figura 4.25 apresenta um gráfico de barras que mostra como está distribuída as porcentagens das seis classes na base de dados. Como implementação inicial, não foi realizado nenhum tratamento para lidar com este desbalanceamento. Na aplicação em questão, os novos dados apresentados são as informações capturadas pelos sensores e armazenadas em banco de dados. Desta forma, um algoritmo desenvolvido em Python realiza leituras periódicas no banco de dados, importa o modelo treinado e realiza a classificação. Por meio de integração com Node-Red, o script criado em linguagem Python é executado e os resultados apresentados no *dashboard*.

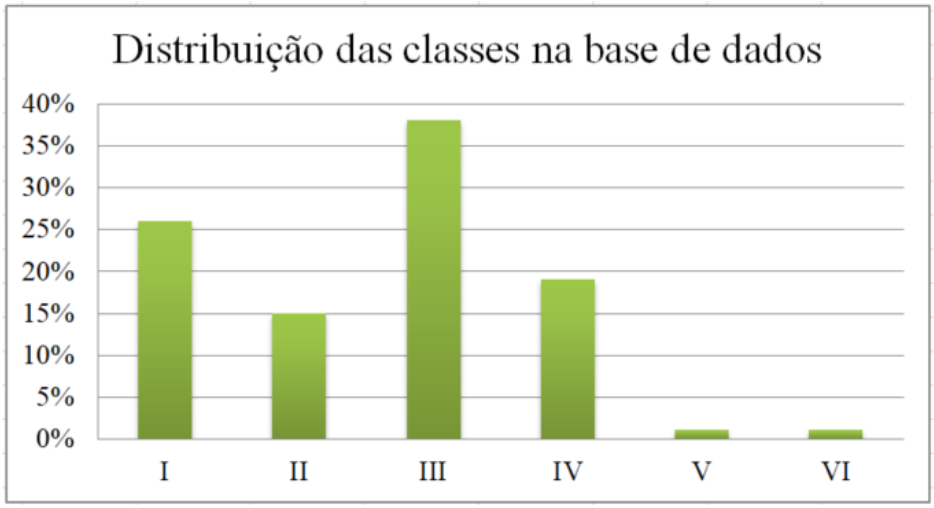


Figura 4.25: *Distribuição das classes no banco de dados.*

Para realizar o treinamento do modelo, a base de dados foi criada a partir dos testes práticos realizados em campo, dado que nas pesquisas no início do trabalho, não

foi encontrado um *dataset* exclusivo para a pecuária leiteira. Os dados capturados através do sensor acelerômetro foram rotulados e divididos em seis classes, descritas no Capítulo 3. A divisão da base de dados em seis classes foi realizada a partir da observação visual do animal com o colar de monitoramento durante 1 dia, onde foi anotado o comportamento e horário. Cada pacote LoRa transmitido do *Gateway* LoRa para o servidor TTN possui informação de *timestamp*, desta forma, foi realizado manualmente o casamento entre o comportamento do animal e dado capturado através da referência de horário.

O modelo treinado com as 5.636 amostras capturadas, utilizando os hiper-parâmetros e demais valores padrão, como a divisão de 25% da base de dados para teste e 75% para treinamento, foi validado com algumas das métricas utilizadas em ML. Para avaliar a eficiência do modelo, é necessário utilizar um conjunto de dados reais. Onde o algoritmo deve ser capaz de identificar corretamente as classes em que novas entradas de dados são apresentadas ao modelo. Assim sendo, três métricas foram utilizadas para a plataforma desenvolvida:

I. *Recall*;

II. Precisão;

III. *F1-Score*.

As métricas de *Recall* e Precisão são implementadas a partir de variáveis que medem o grau de assertividade do modelo, no qual estas variáveis recebem as seguintes denominações: Verdadeiro Positivo (VP), Verdadeiro Negativo (VN), Falso Positivo (FP) e Falso Negativo (FN). Os verdadeiros positivo e negativo são classificações realizadas corretamente, ou seja, o dado foi reconhecido corretamente pelo modelo. Enquanto os falsos positivo e negativo representam que o dado não foi identificado corretamente pelo modelo.

A métrica *Recall* é utilizada em sistemas de ML para mensurar a precisão da capacidade de um modelo identificar um objeto ou classe de objetos desejada. É calculada através da divisão do número de objetos corretamente identificados pelo número verdadeiros positivos adicionados ao número de falsos negativos, como

$$Recall = \frac{VP}{VP + FN} \tag{4.2}$$

A métrica Precisão é utilizada como uma medida de qualidade do algoritmo de ML, onde representa o grau de assertividade do algoritmo em relação aos dados apresentados a entrada, ou seja, é a quantidade de erros cometidos pelo modelo em relação à quantidade de acertos. Desta maneira, calcula a taxa de acerto de um modelo através do

número de vezes que o modelo acertou pelo número verdadeiros positivos adicionados ao número de falsos positivos, como

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP} \tag{4.3}$$

O *F1-Score* é uma métrica utilizada para medir a precisão de forma geral do modelo de classificação. Pois é uma média ponderada entre as métricas *Recall* e Precisão resultantes do sistema, onde os pesos são o inverso das taxas de falsos positivos e falsos negativos. Este tipo de métrica é utilizada para verificar se o modelo está equilibrando adequadamente as métricas *Recall* e Precisão [123]. Apresentada como

$$F1 - Score = \frac{2 * Precisão * Recall}{Precisão + Recall} \tag{4.4}$$

As métricas apresentadas foram utilizadas para demonstrar como o modelo classifica na prática cada uma das seis classes representando o comportamento da vaca-leiteira, a partir da base de dados criada durante os testes na fazenda. A Tabela 4.2 apresenta os resultados de desempenho do modelo em relação às classes.

Tabela 4.2: *Métricas de cada classe presente na base de dados de forma individual.*

	Recall	**Precisão**	**F1-Score**
Em pé	0.82	0.67	0.74
Caminhando	0.57	0.42	0.48
Deitado	0.76	0.88	0.82
Se alimentando	0.44	0.51	0.47
Estro	0.71	0.57	0.63
Alerta de furto	0.93	0.95	0.94

Analisando os resultados demonstrados na Tabela 4.2, verifica-se a necessidade de melhorias na base dados para treinamento, como aumento na quantidade de dados. Pois para algumas classes como Em pé, Deitado e Alerta de furto o modelo apresentou uma boa capacidade de classificar, enquanto para a demais classes o desempenho não foi satisfatório.

Após os resultados obtidos com o treinamento do modelo utilizando a técnica Florestas Aleatórias, foi realizado um novo estudo com outra técnica de ML. Com o intuito de buscar resultados melhores, foi realizado o treinamento utilizando a mesma base de dados com a técnica *Long Short Term Memory (LSTM)*, que é um tipo de rede neural recorrente adequada para classificar, processar e prever séries temporais com intervalos de tempo de duração desconhecida [124]. O treinamento foi realizado com auxílio da biblioteca Keras [125]. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos, demonstrando

uma ligeira melhora na classificação.

Tabela 4.3: *Métricas de cada classe presente na base de dados para treinamento com LSTM.*

	Recall	**Precisão**	**F1-Score**
Em pé	0.88	0.73	0.80
Caminhando	0.69	0.61	0.65
Deitado	0.80	0.91	0.85
Se alimentando	0.56	0.64	0.60
Estro	0.68	0.70	0.69
Alerta de furto	0.91	0.93	0.92

4.3 Testes em Campo

A etapa de testes em campo tem como objetivo a validação de todo o conceito proposto e desenvolvido para a plataforma IoT. A ideia é validar diversos aspectos operacionais na integração das diferentes ferramentas e a conectividade por meio da rede LoRa. Esta etapa se torna necessária para realizar uma prova de conceito, visto que o propósito final é levar tecnologia para o campo, o que é um grande desafio na prática, em um ambiente totalmente oposto ao ambiente controlado dos laboratórios em que as tecnologias são desenvolvidas. Até então, todos os resultados esperados com a plataforma IoT foram simulados em laboratório, devendo ser posteriormente avaliados em campo para obter resultados fidedignos e validar o trabalho desenvolvido.

Os principais testes buscam validar o funcionamento do dispositivo de sensoriamento acoplado ao animal através do colar, realizando leitura periódica dos sensores. Avaliar a conexão LoRa em ambientes externos e não controlados, a execução dos modelos de ML para integridade dos dados enviados pelos sensores e comportamento animal, armazenamento dos dados capturados através de banco de dados em nuvem, além da apresentação dos resultados em *dashboard*, assim como o funcionamento geral do *back-end*.

Os testes em campo foram realizados em fazenda de produção leiteira, no qual o colar foi afixado em uma vaca-leiteira da raça Holstein-Frísia, popularmente conhecida por raça holandesa. A fazenda está localizada no bairro rural Vintém, em Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil. Neste cenário, as vacas possuem um baixo raio de circulação, cerca de 300 metros ao redor do curral, que possui ração disponível nos alimentadores o tempo todo. Ao lado do curral existe a área de ordenha, onde as vacas são ordenhadas três vezes ao dia. A Figura 4.26 apresenta uma visão aérea da fazenda.

O primeiro passo para implantação da plataforma é a análise da área de cobertura



Figura 4.26: *Vista aérea da fazenda escolhida para validação da plataforma IoT.*

necessária e validação da comunicação LoRa. O protocolo LoRaWAN possui a característica de atingir longas distâncias de comunicação, alcançando entre 2 e 5 km em áreas urbanas e até 15 km em áreas rurais, sendo muito superior ao necessário para o cenário utilizado. Para a validação da comunicação LoRa o *Gateway* foi instalado dentro da sede da fazenda, distante cerca de 90 metros do curral, onde o dispositivo de sensoriamento estava em contato com o animal, um dos principais motivos de posicionar o *Gateway* dentro da sede, foi devido ao acesso à rede de Internet. A sede fica em um terreno acidentado, de forma que o curral fica em nível consideravelmente inferior ao nível da sede, contando com obstáculos para o meio de comunicação como paredes, árvores, máquinas agrícolas e o próprio rebanho. Mesmo diante deste cenário desfavorável para a qualidade do sinal, os resultados foram satisfatórios, não havendo perdas de pacotes. Além da análise visual na plataforma para verificar a recepção dos dados, foi avaliado o nível de potência do sinal recebido através do parâmetro RSSI, que em média foi de -90 dB, em um range de valores possíveis entre -30 dB, indicando sinal excelente e -120 dB, indicando sinal ruim [126].

Antes da validação completa da plataforma desenvolvida, foram realizados testes práticos com a comunicação via LoRa, isoladamente entre *Gateway* e dispositivo de sensoriamento. Além do ambiente de laboratório, foram realizados testes em campo aberto na área rural, em fazenda localizada no bairro Cachoeirinha, em Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil. Os testes tiveram como objetivo validar e estimar a capacidade máxima de alcance na comunicação entre *Gateway* e dispositivo de sensoriamento, considerando o cenário real de região com solo acidentado, montanhas e áreas de mata. Além de coletar dados para serem utilizados em artigo desenvolvido no decorrer das etapas deste trabalho. Para realizar os testes, foram feitas quatro medições ao redor do *Gateway*, o qual foi fixado em um ponto central, enquanto o dispositivo de sensoriamento foi deslocado em quatro direções distintas, até que o sinal recebido pelo *Gateway* fosse atenuado o suficiente para ocorrer perdas de pacote. Desta forma, os valores máximos de distâncias atingidas foram computadas em uma tabela, bem como os valores de RSSI correspondentes a cada distância. A Figura 4.27 demonstra a visão aérea do local utilizado para os testes, bem como os pontos considerados para medição, onde P_0 representa a posição do *Gateway*, e os pontos de P_1 a P_4, as extremidades da área de cobertura. A Tabela 4.4 apresenta a relação das medições realizadas em campo.

Como pode ser observado, os resultados práticos de alcance divergem de maneira significativa em relação ao valor teórico esperado. Existem três fatores que contribuíram para o resultado final, baixo valor de ganho para as antenas, antena não casada com a frequência de operação e o relevo acidentado da região montanhosa de Minas Gerais. O dispositivo de sensoriamento utilizou a antena padrão do *kit* do mi-



Figura 4.27: *Vista aérea do local de testes de distância com comunicação LoRa.*

Tabela 4.4: *Medidas de distância e RSSI com comunicação LoRa.*

	Distância [km]	RSSI [dBm]
P1	3.68	−108
P2	3.24	−110
P3	3.57	−103
P4	3.76	−107

crocontrolador, com ganho de 2dBi. Já a antena utilizada no *Gateway* não foi adequada para aplicação, sendo a mesma utilizada em roteador Wi-Fi, que possui ganho de 3dBi e casamento de impedância para a frequência de 2,4 GHz, ao invés de 915 MHz.

Além do teste prático apresentado para a capacidade da transmissão via LoRa, também foi realizada uma simulação por meio da ferramenta Radio Mobile Online [127], que permite configurar parâmetros como ganho das antenas, frequência de operação e principalmente informação de relevo do local utilizado na prática, via coordenadas georreferenciadas, sendo este o principal objetivo da simulação, ou seja, investigar a causa raiz do resultado prático com a distância máxima alcançada estar distante do valor máximo teórico. Apesar do simulador permitir configurar vários parâmetros relevantes do ambiente e cenário real, não foi possível representar o descasamento de impedância para a antena utilizada no *Gateway*. É possível visualizar todas as configurações da simulação na Figura 4.28. A simulação apresenta como resultado a área de cobertura do sinal, nível do sinal recebido na borda e estimativa de população atendida pela cobertura, conforme apresentado na Figura 4.29. A cor verde-claro representa a cobertura do sinal com nível alto de potência, já o vermelho representa pontos em que é esperado sinal com nível baixo de potência, atingindo cobertura máxima de 13 km^2. Como pode ser observado, a simulação revela a alta influência do relevo

acidentado nos testes práticos, certamente em regiões do Brasil com relevo plano os resultados com a cobertura de sinal seriam melhores.

Radio Mobile Online Coverage report

Description	LoRa Validation
Frequency	915 MHz
Base Name	LoRa Validation Cachoeirinha
Latitude	-22.31522236 °
Longitude	-45.71814537 °
Latitude	22° 18' 54.80"S
Longitude	045° 43' 05.32"W
QRA	GG77DQ
UTM (WGS84)	23K E426036 S7532106
Elevation	873.9 m
Base Antenna Height	1.5 m
Base Antenna Gain	3.0 dBi
Base Antenna Type	omni
Base Antenna Azimuth	0 °
Base Antenna Tilt	0 °
Mobile Antenna Height	1.5 m
Mobile Antenna Gain	2.0 dBi
Tx Power	0.02600 W
Tx Line Loss	3.0 dB
Rx Line Loss	0.5 dB
Rx Threshold	0.500 µV (-113.0 dBm)
Required Reliability	70%
Strong signal margin	10.0 dB
Weak signal field	21.4 dBµV/m
Strong signal field	31.4 dBµV/m
Weak signal covered area	13 km^2
Strong signal covered area	10 km^2
Weak signal population reached	1145 pop
Strong signal population reached	700 pop
Landcover used	Yes
Two rays method used	Yes
User ID	guilhermepires
Radio coverage ID	RM941452F914B0_0
Generated on	5/11/2024 2:41:42 PM

Figura 4.28: *Configuração do simulador Radio Mobile Online.*

O segundo passo da validação, foi a implementação do colar com o dispositivo de sensoriamento no animal. Foi selecionada uma vaca-leiteira para o experimento que poderia entrar no período de estro durante os próximos dias. Assim, o colar foi afixado no pescoço do animal de maneira a mantê-lo imóvel, com auxílio de contrapeso na parte inferior do colar, juntamente com o sistema de fechamento do mesmo. O colar ficou preso ao animal realizando leituras por 72 horas ininterruptas, capturando dados durante toda a rotina diária do animal, com as ordenhas, alimentação no comedouro, ingestão de água, pastagem e ruminação. Os dados coletados foram movimentações, por meio do sensor acelerômetro e giroscópio, estado de fechamento do colar, temperatura e umidade ambiente, além de tentativa de capturar batimento cardíaco. As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 apresentam respectivamente o curral com o rebanho de gado leiteiro e o colar de monitoramento devidamente instalado no animal.

O terceiro passo da validação, foi analisar se os pacotes LoRa estavam chegando corretamente no servidor TTN, contendo todos os 19 *bytes* transmitidos pelo colar bovino, além dos parâmetros próprios de cada pacote inseridos pelo *gateway*, como o valor de RSSI. Além da validação do envio dos dados do servidor TTN para a *dashboard*, transmitidos via protocolo MQTT, proveniente da integração entre *broker* TTN e

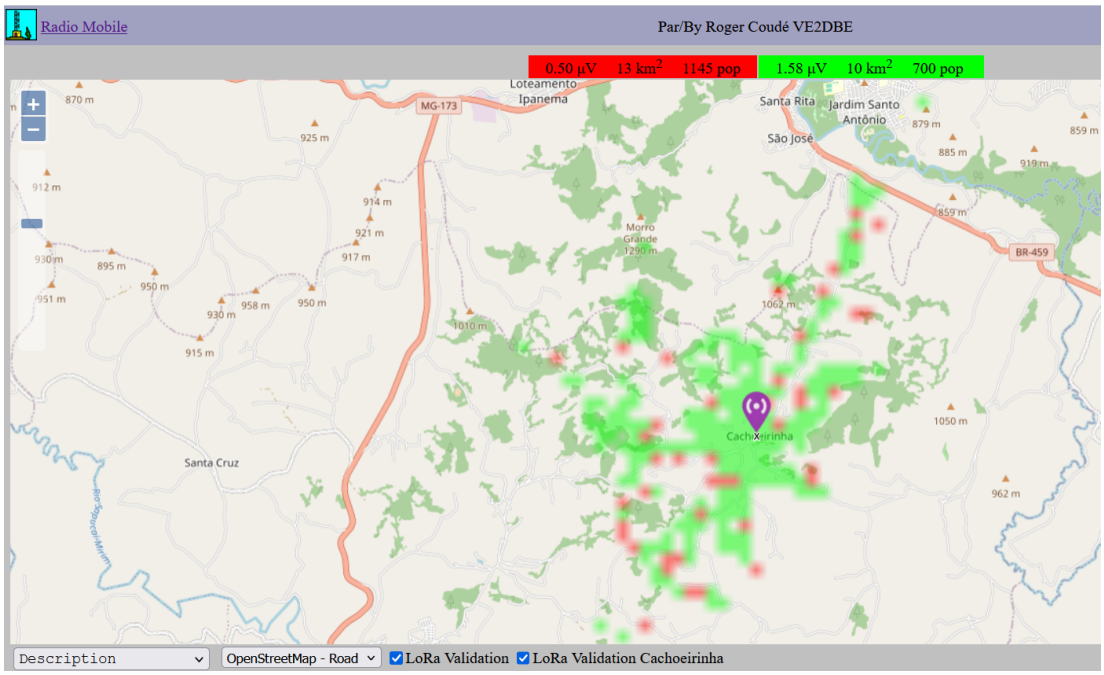


Figura 4.29: *Resultado da simulação com Radio Mobile Online.*



Figura 4.30: *Área de alimentação do rebanho de gado leiteiro.*



Figura 4.31: *Fechamento do colar de monitoramento bovino.*



Figura 4.32: *Colar de monitoramento instalado no animal.*

componente MQTT *Client* desenvolvida no Node-Red. O *dashboard* foi desenvolvido através do Node-Red e instalado em placa Raspberry Pi 3. Desta forma, a plataforma oferece acesso local ao *dashboard* por meio dos periféricos como monitor, teclado e *mouse*. Além de acesso remoto por meio de conexão via SSH através de rede de Internet. Ambas as formas de acesso foram validadas na fazenda e no laboratório via acesso remoto. A Figura 4.33 apresenta a *dashboard* desenvolvida com a apresentação das principais métricas oferecidas pela plataforma. Os dados são atualizados periodicamente, conforme o tempo de leitura dos sensores configurado no *firmware*.

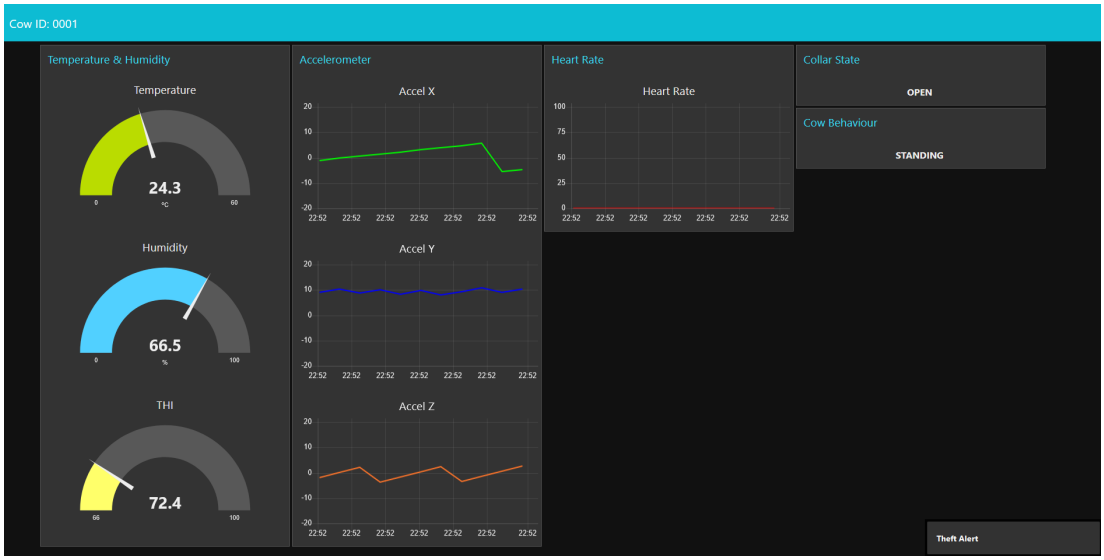


Figura 4.33: *Dashboard desenvolvida para visualização dos dados processados.*

4.4 Conclusões sobre a implementação prática da Plataforma IoT

Após a implementação prática da Plataforma IoT proposta em ambiente real de uso na agropecuária, verificou-se que a mesma foi capaz de executar todas as funcionalidades propostas de maneira satisfatória. Disponibilizando ao usuário uma ferramenta capaz de entregar dados sensíveis ao negócio, como o índice THI, assim melhorando a gestão da produção leiteira, possibilitando rápida atuação do produtor em caso de anomalias nos valores esperados para cada rebanho e cada ciclo do animal sob monitoramento.

O modelo de ML proposto foi validado na prática analisando a resposta em *dashboard* e o comportamento da vaca-leiteira. Conforme os resultados obtidos com as métricas de precisão do modelo, algumas classes apresentaram resultados melhores que outras. Foi observado um acerto maior na classificação dos comportamentos de

animal em pé, deitado e caminhando. Já a validação da detecção de estro não foi possível concluir, pois o animal conseguiu remover o colar antes de entrar no período de estro. O animal possui o comportamento natural de tentar remover o corpo estranho de seu pescoço, após pesquisas foi verificado duas formas utilizadas para acostumar o animal a receber este tipo de colar, sendo a primeira, colocar um colar no bezerro para que ele cresça e o corpo estranho se torne natural. A segunda, seria prender um colar qualquer na vaca adulta por volta de três semanas antes de realizar o monitoramento.

Para testes de estresse da rede LoRa e, ao mesmo tempo, criar uma ampla base de dados para aplicações com IA, a plataforma foi configurada para realizar leituras periódicas dos sensores a cada três segundos. Mesmo neste cenário de sobrecarga, a RSSF e o sistema desenvolvido se mostrou robusto em sua totalidade, não havendo perdas de pacotes ou dados corrompidos na dashboard. Foi observado que os dados recebidos do sensor de batimento cardíaco estavam sempre com o valor nulo, após análise, foi verificado que pelo tipo de característica de funcionamento do sensor, não foi possível realizar leituras devido à espessura grossa do couro do animal. Algumas alternativas a serem exploradas com o sensor de batimento cardíaco seriam desenvolver formas de afixar o sensor na parte inferior do animal, por meio de um cinto passando entre as penas dianteiras e o pescoço, ou na parte interna da orelha, onde o couro é mais fino e há passagem sanguínea.

Capítulo 5

Conclusão

ESTE capítulo conclui o trabalho de pesquisa e implementação realizados, apresentando os principais aprendizados obtidos ao longo do projeto, as principais conclusões com os resultados alcançados, além de descrever possibilidades de projetos e implementações futuras, a partir das experiências adquiridas ao longo do desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

5.1 Principais Aprendizados Adquiridos

Este trabalho proporcionou diversos aprendizados ao longo do processo, que podem embasar futuros trabalhos envolvendo plataformas de IoT voltadas para a área de agricultura em geral. O conhecimento prévio das condições de operação dos protótipos desenvolvidos, é de suma importância para realizar testes de longa duração em ambientes hostis. Pois foi verificado a necessidade de se projetar paredes mais espessas para a caixa mecânica do dispositivo de sensoriamento que foi acoplada ao animal. Não apenas, verificou-se sobreaquecimento no *Gateway* LoRa depois de alguns dias de operação ininterruptos em campo, devido ao processamento da placa Raspberry Pi 3 acoplada ao mesmo. Desta forma, este conjunto requer sistema de ventilação para o melhor funcionamento.

Para evitar perdas financeiras e atrasos com retrabalhos, é importante estabelecer previamente o tipo de tecnologia que será empregada para produzir as placas eletrônicas utilizadas nos protótipos. Pois este conhecimento prévio define o tipo de projeto necessário para realizar o *layout*, definindo quantidade de *layers* e tipo de furação, por exemplo. Para o desenvolvimento do projeto de *firmware*, a escolha de bibliotecas já consolidadas com boas fontes de referência, pode facilitar o processo de integração da comunicação entre microcontrolador e sensores de diferentes fabrican-

tes.

A plataforma IoT desenvolvida com as aplicações e ferramentas empregadas consegue coletar, processar e exibir as informações pertinentes a pecuária de precisão para N nós na rede. O *Gateway* LoRa utilizado possui oito canais operando simultaneamente, na medida em que o valor de N aumenta, é necessário desenvolver técnicas de janelas de transmissão para cada nó em um mesmo canal. No limite desta abordagem, outra opção seria aumentar o número de *Gateways* na rede.

Como os testes práticos em campo foram realizados em uma vaca-leiteira, é importante fazer um trabalho prévio antes dos testes finais, que consiste em colocar o dispositivo de sensoriamento durante alguns dias para o animal se acostumar com o corpo estranho. Pois seu instinto natural é tentar remover o dispositivo, ocasionando muito ruído na base de dados coletada, afetando drasticamente os resultados do processamento com IA, além do estresse gerado no animal diminuir a produção de leite. Devido ao ruído gerado na base de dados, foi verificado que o número de amostras coletadas foi baixo para atingir os melhores resultados possíveis com o algoritmo de IA utilizado. Outro fator observado foi a necessidade de se aumentar o poder computacional do dispositivo utilizado para realizar o processamento das funcionalidades da plataforma, IA e ainda apresentar os dados ao usuário em *dashboard*. Foi observado sobreaquecimento em testes de longa duração.

A plataforma IoT conta com diferentes sistemas operando simultaneamente, a integração entre os diversos blocos de *firmware* e *software* se torna um desafio à medida que as interações aumentam. Uma alternativa para mitigar conflitos de integração, é desenvolver formas de realizar testes isolados em cada sistema, bloco de *software* ou funcionalidades de forma independentes. Além de recorrer a boas práticas de programação, como inserir comentários relevantes nos códigos desenvolvidos, sendo de fundamental importância para o momento de análise de *bugs*.

5.2 Principais Conclusões

Várias tecnologias e os mais recentes protocolos utilizados nos cenários de telecomunicações e IoT foram integrados e implementados na prática ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pelos quais um dos principais objetivos era demonstrar a viabilidade de se levar tecnologia para o setor da agropecuária brasileira, o qual possui alta demanda de novos métodos tecnológicos para aumentar a produção de alimentos. Atualmente existem produtos disponíveis no mercado para a mesma aplicação proposta por esta dissertação, porém, são produtos importados ou com apenas montagem

brasileira. O protótipo desenvolvido pode ser utilizado como uma PoC, atendendo possíveis demandas por um produto nacional, de baixo custo.

Diversos sistemas de IoT foram implementados para construir uma plataforma capaz de oferecer maior controle da produção e automatização de métodos manuais utilizados no setor, como a detecção de estro, proporcionando o acesso a inovações como a Pecuária de Precisão. Como diferencial em relação aos produtos existentes no mercado, e principais contribuições, a plataforma além de sensorear o comportamento do animal, gera informações importantes ao produtor, como índice THI que está relacionado diretamente com eficiência da produção leiteira, além de oferecer um sistema de monitoramento anti-furto, que é um problema presente e recorrente no cenário brasileiro. E ainda, o setor agropecuário brasileiro tem como característica possuir grandes extensões de terras, o que inviabiliza a utilização de operadoras convencionais de telefonia, por exemplo, para proporcionar cobertura de sinal. O emprego da tecnologia LoRa neste trabalho tenta mitigar esta característica de extensão territorial.

A validação da RSSF proposta utilizando a tecnologia LoRa foi realizada com sucesso. Pois mesmo em testes de estresse da rede, com sobrecarga de transmissões, a rede se comportou de maneira estável, sem perdas de pacotes. Todos os blocos do sistema foram validados com sucesso, desde o *hardware* com os sensores, passando pelo projeto de *firmware*, *softwares* como banco de dados e algoritmos de IA. Ao longo dos testes finais algumas oportunidades de melhorias foram identificadas, como aumentar a robustez da caixa mecânica do dispositivo de sensoriamento, pois o mesmo permanece em constante contato com o corpo de animal. Em relação aos resultados obtidos com o classificador de IA, o algoritmo pode ter seu desempenho melhorado, por meio de aumento da base de dados e mais testes com otimizações no modelo treinado.

5.3 Trabalhos Futuros

Após o término das pesquisas, implementações e testes em campo da plataforma, pode-se elencar algumas possibilidades de trabalhos futuros a partir desta dissertação de mestrado. Esta seção se dedica a contribuir com novas oportunidades de ideias para implementações futuras envolvendo IoT no setor da agropecuária.

As tecnologias empregadas no desenvolvimento da plataforma possuem flexibilidade para modificações e adequações, conforme a necessidade exigida pela aplicação. Uma aplicação mais direta que pode ser citada, se refere ao monitoramento de gado de corte, comportando seus três tipos de sistemas de produção: Extensivo, Semi-Intensivo e Intensivo. Já que o raio de cobertura da tecnologia LoRa permite o monitoramento

do gado criado a base de confinamento até a extensas áreas de pastagens. Ademais, outras aplicações como monitoramento para agricultura de precisão pode ser atendida, com alterações no *hardware* do dispositivo de sensoriamento. Além disso, pode ser realizado testes práticos em fazenda utilizando a capacidade máxima do sistema para analisar o funcionamento do mesmo em condições de estresse da rede, como utilizar oito colares funcionando ao mesmo tempo, para explorar a capacidade de transmissão simultânea do *Gateway* LoRa utilizado.

A capacidade de um sistema IoT capturar dados de batimento cardíaco do rebanho leiteiro pode contribuir significativamente para aumentar a quantidade de informações disponibilizadas para os algoritmos de IA, assim melhorar a identificação de estro e doenças. Durante o período de estro o animal fica agitado, elevando o batimento cardíaco. Neste trabalho, foi realizada a tentativa de obter a informação cardíaca do animal por meio de um sensor de mercado, utilizado para obter frequência cardíaca de humanos, não havendo sucesso devido à espessura do couro animal. Pode ser proposto um dispositivo IoT de monitoramento com tamanho reduzido, para utilizar este sensor na parte interna da orelha da vaca, onde o couro tem espessura menor. Ou ainda, em um projeto mais ambicioso, desenvolver um sensor de batimento cardíaco que seja adequado e eficaz em realizar leituras considerando as características biológicas do animal.

Após conversas com os pecuaristas e veterinários da Cooperativa Regional Agropecuária de Santa Rita do Sapucaí-MG, CooperRita, foi verificado que o processo de resfriamento da temperatura da vaca-leiteira antes do momento da ordenha, aumenta a produção leiteira. Este processo consiste em molhar os animais com água a cada ordenha, realizada de duas a três vezes ao dia. Esta prática vem sendo adotada por alguns produtores, o que aumenta a necessidade de robustez para o dispositivo de sensoriamento, como a vedação contra entrada de água.

O Brasil é um país que possui alta intensidade de luz solar e está em ampla expansão de uso desta energia através das placas fotovoltaicas. Ao longo das pesquisas foi identificado a disponibilidade de placas fotovoltaicas de tamanho reduzido e circuitos conversores possíveis de serem integrados ao dispositivo de sensoriamento, que está exposto à luz solar durante a maior parte do dia. Mesmo que a energia capturada não seja o suficiente para dispensar a necessidade de troca de baterias ou recargas manuais do dispositivo, esta abordagem possibilita um maior tempo de operação dos *End nodes*. Além disso, a energia solar é uma das formas de energia mais limpa e sustentável disponíveis. Outra forma de aumentar a autonomia da bateria do protótipo desenvolvido, seria desligar o display OLED, fazer *wake-up* a partir do dado de algum dos sensores, além de explorar todas as opções de *sleep* oferecidas pelo microcontrola-

dor, sendo elas: *Active mode*, *Modem Sleep mode*, *Light Sleep mode*, *Deep Sleep mode* e *Hibernation mode*.

A área da IA com suas técnicas e algoritmos de ML pode ser explorada amplamente na plataforma para aprimorar as detecções propostas, como emprego de análises temporais para identificar com maior precisão o comportamento do animal, realizando predições sobre o comportamento do rebanho. Mais testes podem ser realizados em fazendas de diferentes regiões, com diferentes climas para aumentar a quantidade de informação presente no banco de dados e melhorar consequentemente a eficiência dos modelos de ML treinados. O emprego de técnicas para lidar com o desbalanceamento do banco de dados também pode melhorar a eficiência do modelo. A implementação e comparação dos resultados entre os diversos modelos disponíveis na literatura, bem como a otimização hiper-paramétrica em cada um dos modelos avaliados, pode aumentar significativamente a eficiência da classificação. E ainda, o modelo pode ter sua eficiência melhorada se retreinado de forma periódica na medida em que a base de dados aumenta. Outra abordagem pertinente à pecuária, seria utilizar técnicas de CV para o monitoramento e identificação de comportamentos do rebanho.

Apesar da tecnologia LoRa ter se mostrado viável para a cobertura da comunicação de longas distâncias em áreas remotas, outras tecnologias de comunicação podem ser exploradas. Neste cenário, a tecnologia 5G e futuramente 6G merecem atenção especial, pois ambas possuem as características necessárias para se levar tecnologias e inovações para o campo, atingindo áreas remotas e mitigando os problemas enfrentados atualmente com a falta de cobertura pelas redes de telecomunicações tradicionais em ambientes rurais.

Por fim, os aspectos de segurança na transmissão dos dados como criptografia devem ser considerados em estudos futuros. Apesar de não se tratar de dados sensíveis ao negócio em si, o sistema de comunicação desenvolvido não implementa criptografia ou certificados de segurança, o que o torna susceptível a invasores mal-intencionados.

Referências Bibliográficas

[1] D. Van Fleet, "What is agribusiness? a visual description," *Amity Journal of Agribusiness*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2016.

[2] Cepea/CNA. (2023, Ago.) PIB do Agronegócio Brasileiro. [Online]. Available: https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx

[3] M. da Agricultura e Pecuária. (2023, Ago.) Agropecuária brasileira em números. [Online]. Available: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-04-2022.pdf

[4] C. da Agricultura e Pecuária do Brasil. (2023, Ago.) Panorama do agro. [Online]. Available: https://www.cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro#:~:text=O%20segundo%20lugar%20no%20ranking,%24%2067%2C2%20bilh%C3%B5es

[5] M. da Agricultura e Pecuária. (2023, Ago.) Mapa do leite. [Online]. Available: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/portal-do-leite/mapa-do-leite/

[6] U. DESA *et al.*, "World population prospects 2022: Summary of results," *United Nations publication. Sales No. E*, vol. 22, 2022.

[7] M. Xu, J. M. David, S. H. Kim *et al.*, "The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges," *International journal of financial research*, vol. 9, no. 2, pp. 90–95, 2018.

[8] S. M. Noble, M. Mende, D. Grewal, and A. Parasuraman, "The fifth industrial revolution: How harmonious human–machine collaboration is triggering a retail and service [r]evolution," *Journal of Retailing*, vol. 98, no. 2, pp. 199–208, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022435922000288

[9] A. Zilberman and L. Ice, "Why computer occupations are behind strong stem employment growth in the 2019–29 decade," *Computer*, vol. 4, no. 5,164.6, pp.

11–5, 2021.

[10] I. Lee and K. Lee, "The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises," *Business Horizons*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, 2015. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681315000373

[11] P. D. P. Adi, V. Sihombing, V. M. M. Siregar, G. J. Yanris, F. A. Sianturi, W. Purba, S. P. Tamba, J. Simatupang, R. Arifuddin, Subairi, and D. A. Prasetya, "A performance evaluation of zigbee mesh communication on the internet of things (iot)," in *2021 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT)*, 2021, pp. 7–13.

[12] T. Chi and M. Chen, "A frequency hopping method for spatial rfid/wifi/bluetooth scheduling in agricultural iot," *Wireless Networks*, vol. 25, pp. 805–817, 2019.

[13] M. E. Yuksel and H. Fidan, "Energy-aware system design for batteryless lpwan devices in iot applications," *Ad Hoc Networks*, vol. 122, p. 102625, 2021. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870521001517

[14] R. Akhter and S. A. Sofi, "Precision agriculture using iot data analytics and machine learning," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 8, Part B, pp. 5602–5618, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157821001282

[15] T. Ayoub Shaikh, T. Rasool, and F. Rasheed Lone, "Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 198, p. 107119, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922004367

[16] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E.-H. M. Aggoune, "Internet-of-things (iot)-based smart agriculture: Toward making the fields talk," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129 551–129 583, 2019.

[17] U. Nations. (2023, Ago.) World urbanization prospects 2018. [Online]. Available: https://population.un.org/wup/country-profiles/

[18] N. Ahmed, D. De, and I. Hussain, "Internet of things (iot) for smart precision agriculture and farming in rural areas," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 4890–4899, 2018.

[19] T. e. I. Ministério da Ciência. (2023, Ago.) Plano nacional de internet das coisas.

[20] A. D. Boursianis, M. S. Papadopoulou, P. Diamantoulakis, A. Liopa-

Tsakalidi, P. Barouchas, G. Salahas, G. Karagiannidis, S. Wan, and S. K. Goudos, "Internet of things (iot) and agricultural unmanned aerial vehicles (uavs) in smart farming: A comprehensive review," *Internet of Things*, vol. 18, p. 100187, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660520300238

[21] J. Fürst, K. Chen, H.-S. Kim, and P. Bonnet, "Evaluating bluetooth low energy for iot," in *2018 IEEE Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Networks and Systems (CPSBench)*, 2018, pp. 1–6.

[22] A. Zohourian, S. Dadkhah, E. C. P. Neto, H. Mahdikhani, P. K. Danso, H. Molyneaux, and A. A. Ghorbani, "Iot zigbee device security: A comprehensive review," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100791, 2023. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660523001142

[23] W. C. Tan and M. S. Sidhu, "Review of rfid and iot integration in supply chain management," *Operations Research Perspectives*, vol. 9, p. 100229, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214716022000070

[24] A. Zourmand, A. L. Kun Hing, C. Wai Hung, and M. AbdulRehman, "Internet of things (iot) using lora technology," in *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 2019, pp. 324–330.

[25] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128608001254

[26] C. Alcaraz, J. Lopez, R. Roman, and H.-H. Chen, "Selecting key management schemes for wsn applications," *Computers Security*, vol. 31, no. 8, pp. 956–966, 2012. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404812001034

[27] K. M. Modieginyane, B. B. Letswamotse, R. Malekian, and A. M. Abu-Mahfouz, "Software defined wireless sensor networks application opportunities for efficient network management: A survey," *Computers Electrical Engineering*, vol. 66, pp. 274–287, 2018. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790617304159

[28] M. Iqbal, A. Y. M. Abdullah, and F. Shabnam, "An application based comparative study of lpwan technologies for iot environment," in *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, 2020, pp. 1857–1860.

[29] J. Rubio-Aparicio, F. Cerdan-Cartagena, J. Suardiaz-Muro, and J. Ybarra-

Moreno, “Design and implementation of a mixed iot lpwan network architecture,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, 2019. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/675

[30] L. Alliance. (2023, Out.) Lorawan standardization organization. [Online]. Available: https://lora-alliance.org/

[31] L. D. Portal. (2023, Out.) Lorawan network fundamentals. [Online]. Available: https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/

[32] M. Qaraqe, S. Althunibat, O. S. Badarneh, and R. Mesleh, “Performance analysis of chirp spread spectrum system under mobility scenario,” *Physical Communication*, vol. 43, p. 101233, 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490720303104

[33] C. Goursaud and J.-M. Gorce, “Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges,” *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, Oct. 2015. [Online]. Available: https://hal.science/hal-01231221

[34] H. Mroue, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Mona-Cruz, and G. Rouyer, “Analytical and simulation study for lora modulation,” in *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2018, pp. 655–659.

[35] Semtech. (2023, Out.) Wireless and sensing products. [Online]. Available: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE

[36] J. de Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. L. Aquino, “Lorawan — a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities,” in *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, 2017, pp. 1–6.

[37] S. A. A. Hakeem, S. M. A. El-Kader, and H. Kim, “A key management protocol based on the hash chain key generation for securing lorawan networks,” *Sensors*, vol. 21, no. 17, 2021. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/17/5838

[38] M. Alam, R. H. Nielsen, and N. R. Prasad, “The evolution of m2m into iot,” in *2013 First International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2013, pp. 112–115.

[39] B. Mishra and A. Kertesz, “The use of mqtt in m2m and iot systems: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201 071–201 086, 2020.

[40] T. Yokotani and Y. Sasaki, “Comparison with http and mqtt on required network

resources for iot," in *2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, 2016, pp. 1–6.

[41] M. B. Yassein, M. Q. Shatnawi, S. Aljwarneh, and R. Al-Hatmi, "Internet of things: Survey and open issues of mqtt protocol," in *2017 International Conference on Engineering MIS (ICEMIS)*, 2017, pp. 1–6.

[42] O. standard. (2023, Out.) Mqtt: The standard for iot messaging. [Online]. Available: https://mqtt.org/

[43] A. Rosenfeld, "Computer vision," ser. Advances in Computers, M. C. Yovits, Ed. Elsevier, 1988, vol. 27, pp. 265–308. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065245808602612

[44] C. González García, D. Meana-Llorián, B. C. Pelayo G-Bustelo, J. M. Cueva Lovelle, and N. Garcia-Fernandez, "Midgar: Detection of people through computer vision in the internet of things scenarios to improve the security in smart cities, smart towns, and smart homes," *Future Generation Computer Systems*, vol. 76, pp. 301–313, 2017. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X16308652

[45] T. Meng, X. Jing, Z. Yan, and W. Pedrycz, "A survey on machine learning for data fusion," *Information Fusion*, vol. 57, pp. 115–129, 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253519303902

[46] J. M. Helm, A. M. Swiergosz, H. S. Haeberle, J. M. Karnuta, J. L. Schaffer, V. E. Krebs, A. I. Spitzer, and P. N. Ramkumar, "Machine learning and artificial intelligence: definitions, applications, and future directions," *Current reviews in musculoskeletal medicine*, vol. 13, pp. 69–76, 2020.

[47] E. Adi, A. Anwar, Z. Baig, and S. Zeadally, "Machine learning and data analytics for the iot," *Neural computing and applications*, vol. 32, pp. 16 205–16 233, 2020.

[48] H. Khayyam, B. Javadi, M. Jalili, and R. N. Jazar, "Artificial intelligence and internet of things for autonomous vehicles," *Nonlinear Approaches in Engineering Applications: Automotive Applications of Engineering Problems*, pp. 39–68, 2020.

[49] G. DataAt. (2024, May.) Introdução ao machine learning. [Online]. Available: https://dataat.github.io/introducao-ao-machine-learning/index.html

[50] M. C. Monard and J. A. Baranauskas, "Conceitos sobre aprendizado de máquina," *Sistemas inteligentes-Fundamentos e aplicações*, vol. 1, no. 1, p. 32,

2003.

[51] W. J. de Alvarenga Júnior, "Métodos de otimização hiperparamétrica: um estudo comparativo utilizando árvores de decisão e florestas aleatórias na classificação binária," 2018.

[52] K. G. Liakos, P. Busato, D. Moshou, S. Pearson, and D. Bochtis, "Machine learning in agriculture: A review," *Sensors*, vol. 18, no. 8, 2018. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2674

[53] S. Gupta, S. Tanwar, and N. Gupta, "A systematic review on internet of things (iot): Applications challenges," in *2022 10th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, 2022, pp. 1–7.

[54] K. Ashton *et al.*, "That 'internet of things' thing," *RFID journal*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.

[55] P. P. Jayaraman, A. R. M. Forkan, A. Morshed, P. D. Haghighi, and Y.-B. Kang, "Healthcare 4.0: A review of frontiers in digital health," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 10, no. 2, p. e1350, 2020.

[56] E. Manavalan and K. Jayakrishna, "A review of internet of things (iot) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements," *Computers Industrial Engineering*, vol. 127, pp. 925–953, 2019.

[57] Y. Song, F. R. Yu, L. Zhou, X. Yang, and Z. He, "Applications of the internet of things (iot) in smart logistics: A comprehensive survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 6, pp. 4250–4274, 2021.

[58] V. Grimblatt, "Iot for agribusiness: An overview," in *2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits Systems (LASCAS)*, 2020, pp. 1–4.

[59] A. S. Syed, D. Sierra-Sosa, A. Kumar, and A. Elmaghraby, "Iot in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 2, pp. 429–475, 2021.

[60] S. M. Sajjad, S. H. Bouk, and M. Yousaf, "Neighbor node trust based intrusion detection system for wsn," *Procedia Computer Science*, vol. 63, pp. 183–188, 2015. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915024667

[61] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, and M. N. Hindia, "An overview of internet of things (iot) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3758–3773, 2018.

[62] D. Dutta, D. Natta, S. Mandal, and N. Ghosh, "Moonitor: An iot based multi-sensory intelligent device for cattle activity monitoring," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 333, p. 113271, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424721007342

[63] P. Sasankar, M. S. Pande, M. P. Singh, and M. A. Wanjari, "Estrus detection system in dairy cows' using machine learning and iot," in *2023 11th International Conference on Emerging Trends in Engineering Technology - Signal and Information Processing (ICETET - SIP)*, 2023, pp. 1–5.

[64] G. K. R, P. V. S, R. K. B. S, and M. R. T, "Exploring the potential of machine learning for early cattle disease diagnosis," in *2023 5th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2023, pp. 853–857.

[65] D. Murugan, A. Garg, and D. Singh, "Development of an adaptive approach for precision agriculture monitoring with drone and satellite data," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 12, pp. 5322–5328, 2017.

[66] J. D. Rudd, G. T. Roberson, and J. J. Classen, "Application of satellite, unmanned aircraft system, and ground-based sensor data for precision agriculture: A review," in *2017 ASABE Annual International Meeting*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017, p. 1.

[67] S. S. Ramaprasad, B. S. Sunil Kumar, S. Lebaka, P. R. Prasad, K. N. Sunil Kumar, and G. N. Manohar, "Intelligent crop monitoring and protection system in agricultural fields using iot," in *2019 4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication Technology (RTEICT)*, 2019, pp. 1527–1531.

[68] J. Xu, B. Gu, and G. Tian, "Review of agricultural iot technology," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 6, pp. 10–22, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589721722000010

[69] S. DEBDAS, A. BEHERA, A. BANDYOPADHYAY, S. KARMAKAR, and A. SUBHADARSHINI, "An iot solution for cattle health monitoring and tracking," in *2022 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)*, 2022, pp. 513–518.

[70] S. Benaissa, F. Tuyttens, D. Plets, J. Trogh, L. Martens, L. Vandaele, W. Joseph, and B. Sonck, "Calving and estrus detection in dairy cattle using a combination of indoor localization and accelerometer sensors," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 168, p. 105153, 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919315261

[71] J. Wang, Z. He, G. Zheng, S. Gao, and K. Zhao, "Development and validation of an ensemble classifier for real-time recognition of cow behavior patterns from accelerometer data and location data," *PloS one*, vol. 13, no. 9, p. e0203546, 2018.

[72] D.-N. Tran, T. N. Nguyen, P. C. P. Khanh, and D.-T. Tran, "An iot-based design using accelerometers in animal behavior recognition systems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 18, pp. 17 515–17 528, 2022.

[73] P. Chen, "Dairy cow health monitoring system based on nb-iot communication," in *2019 International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)*, 2019, pp. 393–396.

[74] Y. P. Pratama, D. Kurnia Basuki, S. Sukaridhoto, A. A. Yusuf, H. Yulianus, F. Faruq, and F. B. Putra, "Designing of a smart collar for dairy cow behavior monitoring with application monitoring in microservices and internet of things-based systems," in *2019 International Electronics Symposium (IES)*, 2019, pp. 527–533.

[75] M. Bovo, S. Benni, A. Barbaresi, E. Santolini, M. Agrusti, D. Torreggiani, and P. Tassinari, "A smart monitoring system for a future smarter dairy farming," in *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 2020, pp. 165–169.

[76] M. Taneja, N. Jalodia, P. Malone, J. Byabazaire, A. Davy, and C. Olariu, "Connected cows: Utilizing fog and cloud analytics toward data-driven decisions for smart dairy farming," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 32–37, 2019.

[77] G. P. Piedade, S. B. Mafra, D. M. de Oliveira, and M. R. da Cruz, "Design, deployment, and validation of a low-cost iot platform based on lora for precision dairy farming," *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicacões e Processamento de Sinais.*, 2023.

[78] A. A. A. Mohd Redzuan, F. A. Saparudin, N. S. Mohd Shah, M. M. A. Noor Azeb, and M. K. A. Shamsuddin, "Wireless ammonia sensor system for distributed wireless monitoring platform using heltec wifi lora 32 (v2)," *Progress in Engineering Application and Technology*, vol. 2, no. 1, p. 502–513, Jun. 2021. [Online]. Available: https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/910

[79] F. Margret Sharmila, P. Suryaganesh, M. Abishek, and U. Benny, "Iot based smart window using sensor dht11," in *2019 5th International Conference on Advanced Computing Communication Systems (ICACCS)*, 2019, pp. 782–784.

[80] F. J. Hiung and I. M. Sahat, "Development of wrist monitoring device to measure wrist range of motion," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 788, no. 1, p. 012033, apr 2020. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012033

[81] K. B. Saçan and G. Ertaş, "Performance assessment of max30100 spo2/heartrate sensor," in *2017 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, 2017, pp. 1–4.

[82] C. Liu *et al.*, "Electronics–a first course for printed circuit board design," in *2022 ASEE Annual Conference & Exposition*, 2022.

[83] C. Coward, *A Beginner's Guide to 3D Modeling: A Guide to Autodesk Fusion 360*. No Starch Press, 2019.

[84] L. Varghese, G. Deepak, and A. Santhanavijayan, "An iot analytics approach for weather forecasting using raspberry pi 3 model b+," in *2019 Fifteenth International Conference on Information Processing (ICINPRO)*, 2019, pp. 1–5.

[85] G. M. Simoni and G. Scaramella, "Monitoramento de veículos alternativos: desenvolvimento de um protótipo com tecnologia lorawan," B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

[86] Radioenge. (2023, Jan.) Soluções inteligentes em segurança, smart city e iot. [Online]. Available: https://www.radioenge.com.br/

[87] N. Blenn and F. Kuipers, "Lorawan in the wild: Measurements from the things network," 2017.

[88] T. T. Stack. (2023, Jan.) Console. [Online]. Available: https://www.thethingsindustries.com/docs/the-things-stack/interact/console/

[89] F. Pezoa, J. L. Reutter, F. Suarez, M. Ugarte, and D. Vrgoč, "Foundations of json schema," ser. WWW '16. Republic and Canton of Geneva, CHE: International World Wide Web Conferences Steering Committee, 2016, p. 263–273. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/2872427.2883029

[90] T. T. Stack. (2023, Out.) Mqtt server. [Online]. Available: https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/mqtt/

[91] W. Khan, T. Kumar, C. Zhang, K. Raj, A. M. Roy, and B. Luo, "Sql and nosql database software architecture performance analysis and assessmentsmdash;a systematic literature review," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 7, no. 2, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2504-2289/7/2/97

[92] F. spaceships with your mind. (2024, Mar.) When to choose nosql over sql? [Online]. Available: https://starship-knowledge.com/

when-to-choose-nosql-over-sql

[93] M. M. Patil, A. Hanni, C. H. Tejeshwar, and P. Patil, "A qualitative analysis of the performance of mongodb vs mysql database based on insertion and retriewal operations using a web/android application to explore load balancing — sharding in mongodb and its advantages," in *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 2017, pp. 325–330.

[94] A. K. Samanta and N. Chaki, "Performance monitoring of mongodb on varied cluster configuration: An experimental approach," in *2021 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*, 2021, pp. 525–530.

[95] L. Vokorokos, M. Uchnár, and A. Baláž, "Mongodb scheme analysis," in *2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, 2017, pp. 000 067–000 070.

[96] Y. A. Ahmad, T. Surya Gunawan, H. Mansor, B. A. Hamida, A. Fikri Hishamudin, and F. Arifin, "On the evaluation of dht22 temperature sensor for iot application," in *2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 2021, pp. 131–134.

[97] Y. Liu, Y. Wang, and J. Zhang, "New machine learning algorithm: Random forest," in *Information Computing and Applications*, B. Liu, M. Ma, and J. Chang, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 246–252.

[98] M. D. Science. (2024, Mar.) Machine learning – introduction to random forest. [Online]. Available: https://datahacker.rs/012-machine-learning-introduction-to-random-forest/

[99] P. S. Foundation. (2023, Out.) pickle - python object serialization. [Online]. Available: https://docs.python.org/3/library/pickle.html

[100] M. Lekić and G. Gardašević, "Iot sensor integration to node-red platform," in *2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 2018, pp. 1–5.

[101] A. Djordjevic, R. Biljie, V. Likar-Smiljanic, and T. Sarkar, "Wideband frequency-domain characterization of fr-4 and time-domain causality," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 4, pp. 662–667, 2001.

[102] D. He and H. Itozaki, "Making printed circuit boards (pcbs) using an lpkf plotter," *Circuit World*, vol. 32, no. 3, pp. 40–43, 2006.

[103] G. Dhore, R. Jagtap, S. Bhakad, P. Yadav, M. Sutar, and M. S. Sawrate, "Exploring 3d printing using cura: A slicing software," *Int. J*, vol. 5, pp. 212–222, 2021.

[104] F. Galembeck, T. A. Burgo, D. S. SILVA, and L. P. Santos, "Materials from renewable resources: new properties and functions," *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 91, 2019.

[105] L. L. Parente. (2023, Jan.) Lmic-node. [Online]. Available: https://github.com/lnlp/LMIC-node

[106] Adafruit. (2023, Jan.) Adafruit industries. [Online]. Available: https://www.arduinolibraries.info/authors/adafruit

[107] SparkFun. (2023, Jan.) Sparkfun electronics. [Online]. Available: https://github.com/orgs/sparkfun/repositories

[108] I. Plauska, A. Liutkevičius, and A. Janavičiūtė, "Performance evaluation of c/c++, micropython, rust and tinygo programming languages on esp32 microcontroller," *Electronics*, vol. 12, no. 1, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2079-9292/12/1/143

[109] Espressif. (2023, Jan.) Official iot development framework. [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/products/sdks/esp-idf

[110] O. E. Amestica, P. Melin, C. Duran-Faundez, and G. Lagos, "An experimental comparison of arduino ide compatible platforms for digital control and data acquisition applications," in *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2019, pp. 1–6.

[111] P. Labs. (2023, Jan.) Platformio ide. [Online]. Available: https://platformio.org/platformio-ide

[112] Microsoft. (2023, Jan.) Visual studio code. [Online]. Available: https://code.visualstudio.com/

[113] D. Kjendal, "Lora-alliance regional parameters overview," *Journal of ICT Standardization*, vol. 9, no. 1, p. 35–46, Apr. 2021. [Online]. Available: https://journals.riverpublishers.com/index.php/JICTS/article/view/7019

[114] Radioenge. (2023, Jan.) Lorawan gateway. [Online]. Available: https://www.radioenge.com.br/wp-content/uploads/2021/08/Manual_LoRaWAN_Gateway_jul_2023.pdf

[115] M. R. Villarim, J. Vitor Holanda de Luna, D. de Farias Medeiros, R. Imaculada Soares Pereira, C. P. de Souza, O. Baiocchi, and F. C. da Cunha Martins,

"An evaluation of lora communication range in urban and forest areas: A case study in brazil and portugal," in *2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 2019, pp. 0827–0832.

[116] RadioengeGw. (2023, Jan.) Configuração e cadastro de gateway na ttn v3. [Online]. Available: https://forum.radioenge.com.br/t/configuracao-e-cadastro-de-gateway-na-ttn-v3/228

[117] Radioenge. (2023, Jan.) Cadastro de dispositivo (end device) na ttn v3. [Online]. Available: https://forum.radioenge.com.br/t/cadastro-de-dispositivo-end-device-na-ttn-v3/182

[118] M. Z. Ahmad, A. R. Adenan, M. S. Rohmad, and Y. M. Yussoff, "Performance analysis of secure mqtt communication protocol," in *2023 19th IEEE International Colloquium on Signal Processing Its Applications (CSPA)*, 2023, pp. 225–229.

[119] Node-RED. (2023, Mar.) A mongodb node for node-red without limitations. [Online]. Available: https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-mongodb4

[120] NodeRED. (2023, Mar.) A node-red node to save data in a mongodb database. [Online]. Available: https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-mongodb-aleph

[121] V. Gantner, P. Mijić, K. Kuterovac, D. Solić, and R. Gantner, "Temperature-humidity index values and their significance on the daily production of dairy cattle," *Mljekarstvo: časopis za unaprjeđenje proizvodnje i prerade mlijeka*, vol. 61, no. 1, pp. 56–63, 2011.

[122] nuscience. (2023, Out.) Fighting heat stress pays back. [Online]. Available: https://www.nuscience.eu/nl-be/landingspaginas/Fighting-heat-stress-pays-back/

[123] C. Goutte and E. Gaussier, "A probabilistic interpretation of precision, recall and f-score, with implication for evaluation," in *European conference on information retrieval*. Springer, 2005, pp. 345–359.

[124] B. Lindemann, B. Maschler, N. Sahlab, and M. Weyrich, "A survey on anomaly detection for technical systems using lstm networks," *Computers in Industry*, vol. 131, p. 103498, 2021. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361521001056

[125] O. Aydin and S. Guldamlasioglu, "Using lstm networks to predict engine condi-

tion on large scale data processing framework," in *2017 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, 2017, pp. 281–285.

[126] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue, and J.-C. Prévotet, "Internet of mobile things: Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1561–1581, 2019.

[127] TowerCoverage.com. (2024, May.) Radio mobile online / en ligne. [Online]. Available: https://www.ve2dbe.com/rmonline_s.asp