

Monitorização de Animais em Espaço Agrícola
e Ambiente Aberto

Tiago Parreira Rico

Monitorização de Animais em Espaço Agrícola e Ambiente Aberto

PV – ESTGL 2026

Tiago Parreira Rico

janeiro, 2026



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Lamego

Monitorização de Animais em Espaço Agrícola e Ambiente Aberto

Tiago Parreira Rico

Trabalho Projeto

Mestrado em Tecnologias de Informação e Automação

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Professor Doutor José Paulo Lousado
Professor Doutor Hélder Viana (ESAV)

janeiro, 2026

Monitorização de Animais em Espaço Agrícola e Ambiente Aberto

Tiago Parreira Rico

Trabalho de Projeto

Mestrado em tecnologias de Informação e Automação

Trabalho efetuado sob orientação de:

Professor Doutor José Paulo Lousado

Professor Doutor Hélder Viana (ESAV)

Lamego, 2026

DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado a mim, pelo esforço e dedicação na escultura
da pessoa que sou hoje, e também a todas as pessoas e familiares
que contribuíram para minha formação ao longo destes
anos de estudo.*

RESUMO

Este projeto propõe o desenvolvimento de uma prova de conceito de um sistema de monitorização de animais em espaços agrícolas e áreas abertas, utilizando a tecnologia LoRaWAN. O objetivo é conceber uma solução de baixo custo, longo alcance e maior autonomia, capaz de fornecer dados em tempo real sobre a localização e o estado de saúde dos animais, nomeadamente a temperatura corporal.

O sistema integra sensores de temperatura, módulos GPS e comunicação LoRa, sendo os dados transmitidos para uma base de dados e visualizados numa interface responsiva, neste caso, o Node-RED. A aplicação permite também a configuração de cercas virtuais e o envio de alertas em caso de anomalias, tirando partido do conceito de cercas virtuais partilhadas.

Os resultados demonstram a viabilidade da solução proposta para ambientes remotos, com potencial para ser aplicada em larga escala na pecuária de precisão.

Palavras-chave: Internet das Coisas (IoT), Monitorização Animal, LoRaWAN, Cercas Virtuais/Geofencing, Node-RED, Localização GPS.

ABSTRACT

This project proposes the development of a proof-of-concept for an animal monitoring system in open agricultural spaces, using LoRaWAN technology. The objective is to design a low-cost, long-range and more autonomous solution capable of providing real-time data on the location and health status of animals, namely body temperature.

The system integrates temperature sensors, GPS modules, and LoRa communication, with the data being transmitted to a database and visualized in a responsive interface, in this case Node-RED. The application also allows the configuration of virtual fences and the sending of alerts in case of anomalies, taking advantage of the concept of shared virtual fences.

The results demonstrate the viability of the proposed solution for remote environments, with the potential to be applied on a large scale in precision livestock farming.

Keywords: Internet of Things (IoT), Animal Monitoring, LoRaWAN, Virtual Fencing/Geofencing, Node-RED, GPS Tracking.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao meu professor, Doutor Ricardo Gama, pela sugestão do projeto, e aos meus orientadores Doutor José Lousado e Doutor Hélder Viana, pelo apoio prestado durante toda a elaboração deste trabalho e pelos conhecimentos que me transmitiram.

Um agradecimento ao meu colega Paulo Castro que me acompanha desde o primeiro dia em que entrei na escola, também pela paciência, às prontas ajudas disponibilizadas na resolução de questões que foram aparecendo, e pelos apoios técnicos ao longo do projeto.

Queria agradecer aos meus amigos e todos aqueles que de forma indireta contribuíram durante todo esse percurso.

Por último, e não menos importante, queria agradecer aos meus pais e familiares pela compreensão, força, e encorajamento que em muitas situações fizeram-me levantar a cabeça e continuar a minha caminhada até ao fim.

ÍNDICE GERAL

Preâmbulo	1
Motivação	1
Objetivos	2
Organização do Projeto	3
1 REVISÃO DA LITERATURA	4
1.1 Conceitos e Fundamentos	4
1.2 Tecnologias e Modelos relevantes	4
1.2.1 LoRaWAN	4
1.2.2 Sigfox	8
1.2.3 LTE-M	8
1.2.4 NB-IoT	9
1.2.5 Redes Móveis (3G, 4G, 5G, ...)	9
1.2.6 Redes Mesh	11
1.2.7 UWB	11
1.2.8 Satélites de Baixa Órbita	12
1.2.9 TVWS	13
1.2.10 Geofencing	15
1.3 Análise de Soluções Existentes	16
1.4 Análise Comparativa	18
2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	19
2.1 Abordagem de desenvolvimento	19
2.2 Análise de requisitos	19
2.2.1 Requisitos Funcionais	19
2.2.2 Requisitos Não Funcionais	20
2.3 Fases do projeto	21
2.4 Ferramentas e Tecnologias	21
2.5 Gestão de Riscos	22

2.6	Cronograma	23
3	ARQUITETURA E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	24
3.1	Visão Geral da Solução.....	24
3.2	Especificação da Arquitetura	25
3.3	Hardware	26
3.3.1	Adafruit Ultimate GPS Logger Shield.....	26
3.3.2	TTGO LoRa32-OLED	27
3.3.3	DS18B20 Digital	28
3.4	Software.....	29
3.4.1	VS code.....	29
3.4.2	Arduino IDE	29
3.4.3	HiveMQ	29
3.4.4	Node-RED.....	30
3.4.5	SQLite.....	30
3.4.6	MongoDB vs SQLite	30
3.5	Desenvolvimento do Protótipo	31
3.5.1	Dispositivos.....	32
3.5.2	Desenvolvimento no Node-RED.....	38
3.5.3	Desenvolvimento no VS code	42
3.5.4	Base de Dados	48
3.5.5	Resultados Experimentais e Testes	50
3.5.6	Limitações	51
4	CONCLUSÃO	52
4.1	Conclusões.....	52
4.2	Contribuições do Trabalho	52
4.3	Trabalhos Futuros	53

ÍNDICE DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

IoT - Internet of Things

GPS - Global Positioning System

LoRaWAN - Long Range Wide Area Network

AI - Artificial Intelligence

LoRa - Long Range

ISM - Industrial Scientific and Medical

RSSI - Received Signal Strength Indicator

SRD - Short Range Devices

OWC - Ocupe Wall Street

Li-Fi - Light Fility

VLC - Visible Light Communication

MU-OFDMA - Multiple User-Orthogonal Frequency Division Multiple Access

MU-MIMO - Multiple User-Multiple Input, Multiple Output

BPSK - Binary Phase Shift Keying

LTE-M - Long Term Evolution for Machines

3GPP - 3rd Generation Partnership Project

NB-IoT - Narrowband IoT

ITU-R - International Telecommunication Union Radiocommunication Sector

eMBB - Enhanced Mobile Broadband

mMTC - Massive Machine Type Communications

URLLC - Ultra-Reliable Low Latency Communications

SNR - Signal to Noise

MAC - Media Access Control

LR-WPAN - Low-Rate Wireless Personal Area Networks

IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers

UWB - Ultra-Wideband

LEO - Low-Earth Orbit

MEO - Medium Earth Orbit

GEO - Geostationary Earth Orbit

ISL - InterSatellite Links

TVWS - Television White Spaces

VHF - Very High Frequency

UHF - Ultra High Frequency

TDT - Televisão Digital Terrestre

WSN - Wireless Sensor Networks

XP - Extreme Programming

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

VS Code - Visual Studio code

IDE - Integrated Development Environment

APIs - Application Programming Interfaces

SQL - Structured Query Language

MQL - MongoDB Query Language

TLS - Transport Layer Security

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I - Distribuição da Frequência de Banda por Região	6
Tabela II - Resumo dos Tipos de Comunicação	15
Tabela III - Análise de Dispositivos/Estudos.....	18
Tabela IV - Requisitos Funcionais.....	20
Tabela V - Requisitos não Funcionais	20
Tabela VI - Lista de Componentes	21
Tabela VII - Riscos a Considerar.....	22
Tabela VIII - Comparação entre MongoDB e SQLite.....	31
Tabela IX - Conexões	32
Tabela X - Operações da Aplicação.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Cronograma	23
Figura 2 - Adafruit Ultimate GPS Logger Shield	26
Figura 3 - TTGO LoRa32-OLED	27
Figura 4 - DS18B20 Digital	28
Figura 5 - GPS/2	32
Figura 6 - GPS/1	32
Figura 7 - Diagrama de Atividades/GPS	33
Figura 8 - Recetor	35
Figura 9 - Diagrama de Fluxo de dados/Recetor	36
Figura 10 - Exemplo dos dados enviados	38
Figura 11 - Fluxo de recolha de dados	38
Figura 12 - Fluxo do Sistema/Node-RED	39
Figura 13 - Interface Utilizador/Login	40
Figura 14 - Interface Utilizador/Criar User	40
Figura 15 - Interface Utilizador/Menu	41
Figura 16 - Interface Utilizador/Visualização	42
Figura 17 - Fluxo de Camadas	43
Figura 18 - Layout do Login/Criar Polígono	47
Figura 19 - Layout Admin/Criar Polígonos	47
Figura 20 - Layout do utilizador/Criar Polígono	47
Figura 21 - Layout Edit Admin/Criar Polígono	48
Figura 22 - Entity Relationship Diagram (EDR)	49
Figura 23 - Perda de Pacotes 1/2	50
Figura 24 - Perdas de Pacotes 2/2	50
Figura 26 - Erro na Posição do GPS	51
Figura 25 - Posição Correta do GPS	51

INTRODUÇÃO

Preâmbulo

A monitorização de animais em ambientes agrícolas e em áreas de pastagem por meio da *Internet of Things* (IoT) tem revolucionado a gestão pecuária. Sensores conectados a dispositivos IoT fazem a monitorização em tempo real da localização, saúde e comportamento animal, permitindo intervenções rápidas e melhorando a eficiência geral da operação [1]. A aquisição de dados como frequência cardíaca e temperatura corporal são acompanhados através de tecnologias como o *bolus CorTemp* (sensor ingerível) e outros *wearables* (ou tecnologias vestíveis), que transmitem dados para plataformas na nuvem [2], [3].

Além disso, a utilização de cercas virtuais e localização por via *Global Positioning System* (GPS) facilitam a manipulação de rebanhos em áreas amplas, reduzindo custos e promovendo uma maior segurança para os animais. Esta abordagem é especialmente útil na localização de animais dispersos ou na deteção de comportamentos fora do padrão, identificando alguma fuga do perímetro pré-definido. A capacidade de identificar o cio e acompanhar os ciclos de reprodução também faz com que aumente a produtividade e eficiência do setor, ao mesmo tempo em que melhora o bem-estar animal [2] [3], [4].

Com essas tecnologias, os produtores podem atuar preventivamente, identificando problemas de saúde antes que se tornem críticos, o que contribui para a sustentabilidade da pecuária moderna [1], [4].

Motivação

Nos dias de hoje, o ser humano demonstra uma tendência crescente de querer controlar tudo, então com o avanço das tecnologias, esse feito tem-se manifestado cada vez mais, quer no setor industrial, quer no setor empresarial [5]. Nesse contexto, investigar ou adotar soluções de monitorização animal é outra forma de ter ou tentar ter o controlo das coisas nas nossas mãos e com o avanço das tecnologias IoT, as quais podem ser moldadas por diversos fatores [6], [7], [8].

A eficiência e sustentabilidade, com desejo de otimizar a gestão pecuária, reduzindo custos e aumentando a produtividade, enquanto se adota práticas mais sustentáveis e alinhadas às exigências do mercado. Muitas vezes a falta de gestão faz com que se entre em caminhos que não são a melhor opção para o aumento da produtividade, resultando em perdas [8], [9], [10]. Com a utilização de cercas virtuais é possível delimitar áreas seguras para a pastagem, reduzindo o risco de fugas ou acidentes [4].

Aprofundando o conhecimento e otimizando sistemas, descobriu-se formas de integrar sensores e plataformas de dados em ambientes agrícolas, aumentando a eficiência de recolha e análise de informações, contribuindo para novos métodos que promovem tanto o bem-estar animal quanto a produtividade sustentável [2], [4].

Objetivos

O objetivo deste projeto é desenvolver uma prova de conceito de um sistema de monitorização, de baixo custo, neste caso baseado em dispositivos *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN), visando a supervisão contínua dos animais, podendo o utilizador ter ou não terrenos partilhados com outros utilizadores, sendo isso uma prática comum na região do Alto Douro, dando origem ao conceito de cercas virtuais partilhadas.

O projeto contempla a implementação e o teste de *geofencing* virtual para garantir que os animais permaneçam nas áreas de pastagem designadas.

Através da extração de dados é possível realizar parte de uma análise sobre o padrão e características dos animais, como foco na população de bovinos e caprinos, podendo, contudo, aplicar-se a outras espécies.

Através dos dados adquiridos pretende-se analisar a eficácia de sensores de saúde, como temperatura corporal e frequência cardíaca, para a deteção precoce de doenças, analisar padrões de comportamento dos animais, tempo a caminhar, de alimentação, entre outros, e por fim integrar e avaliar a possibilidade de aplicação de *Artificial Intelligence* (AI) para análise preditiva de dados, detetando padrões anómalos no comportamento do grupo de animais.

Organização do Projeto

O projeto está estruturado de forma que seja apresentado primeiro ao leitor o domínio do *framework*, os conceitos teóricos inerentes e as questões discutidas e, por fim, as soluções desenvolvidas.

Deste modo, no Capítulo 1, é bordada uma revisão de literatura que sustenta as bases tóricas do projeto para a sua adaptação à prática e campo de pesquisa em que atua, compreendendo-se as diversas abordagens concorrentes.

Após uma revisão de literatura sustentada, o Capítulo 2 apresenta a metodologia de desenvolvimento, análises de requisitos, fases do projeto, ferramentas e tecnologias, gestão de riscos e cronograma.

No Capítulo 3, é desenhada a arquitetura do sistema, dando ênfase numa visão geral da solução, apresentando-se as especificações, o *hardware* e o correspondente *firmware* de aquisição de dados, a criação de um protocolo de comunicação, o *software* de controlo e, por fim, o protótipo final e respetivos testes às suas limitações.

No seguimento da estrutura do projeto, o Capítulo 4 tem como objetivo a reflexão das conclusões do projeto em estudo, bem com as suas contribuições e potencial futuro.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Conceitos e Fundamentos

A IoT cresceu significativamente e tornou-se uma das tecnologias mais transformadoras das últimas décadas, sendo a sua principal característica ligar dispositivos e sistemas através da Internet para obter automação, análise avançada de dados e novos modelos de interação em diversas áreas [11], [12].

A Internet das Coisas começou como uma ideia focada na conexão de dispositivos básicos como sensores e máquinas simples, e à medida que a conectividade evolui (Wi-Fi, 4G e, mais recentemente, o 5G) e o poder de processamento aumenta, as suas aplicações expandiram-se para áreas como a saúde, os transportes e a agricultura [13], [14].

A integração com inteligência artificial permitiu que os dispositivos se tornassem mais “inteligentes”, capazes de tomar decisões autónomas e realizar análises preditivas em tempo real [12], [15].

Entre as inovações mais impactantes, a IoT revolucionou a gestão das cidades, tornando-as cidades digitais possibilitando o controlo do tráfego urbano, da energia e da iluminação, bem como na gestão de resíduos [13]. A agricultura de precisão com os sensores IoT monitorizam as condições climáticas e do solo, reduzem o desperdício e otimizam a produção agrícola [14].

Com o avanço das tecnologias, a IoT está a transformar os modelos de negócios ao oferecer novos serviços, melhorando a eficiência operacional e criando produtos conectados [11], [15].

1.2 Tecnologias e Modelos relevantes

1.2.1 LoRaWAN

A tecnologia *Long Range* (LoRa) é uma tecnologia de comunicação sem fios projetada para conectar milhares de dispositivos alimentados por bateria a longas distâncias, com um consumo de energia extremamente baixo. Esta tecnologia integra o

grupo de redes conhecidas como *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN), que se destacam pela capacidade de transmitir informações a grandes distâncias, mesmo em ambientes desafiadores [16].

Entre as redes LPWAN disponíveis no mercado, a LoRa, em conjunto com o protocolo LoRaWAN, têm vindo a ganhar destaque no mercado. Inicialmente desenvolvida em 2009 pela *startup* Cycleo, em Grenoble, França, a tecnologia de comunicação LoRa foi comprada pela empresa americana *Semtech* em 2012, que posteriormente, em 2015, fundou a LoRa *Alliance*, uma associação que reúne empresas do setor da tecnologia. O objetivo dessa aliança foi promover o desenvolvimento e a aplicação do protocolo aberto LoRaWAN, tornando-o uma referência em conectividade para dispositivos IoT e garantindo a interoperabilidade entre os seus produtos [17].

A rede LoRaWAN usa a banda de frequência *Industrial Scientific and Medical* (ISM) não licenciada. No caso da Europa, opera na banda de 867- LoRaWAN e usa a banda de frequência ISM 869 MHz, enquanto no Brasil a atuação é de 902-907,5 MHz e 915-928 MHz, conforme resolução 680 da Anatel. Graças a abrangência espectral, tende a ser mais resistente a interferências e a sua potência é muito menor do que outras tecnologias. Em alguns casos a sensibilidade de recepção é até abaixo do nível de ruído, significando que mesmo com a baixa intensidade do sinal recebido ou do inglês, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), os dispositivos LoRaWAN são capazes de receber e decodificar a mensagem [18], [19], [20].

As bandas ISM utilizadas pelo LoRaWAN variam de acordo com a região geográfica, em função das regulamentações locais de espectro. Historicamente, o LoRaWAN operou em diferentes faixas de frequência, incluindo a banda de 433 MHz, especialmente em alguns países europeus. Contudo, atualmente, as bandas mais amplamente adotadas são 868 MHz (EU868), correspondente à faixa regulamentada de 863 a 870 MHz, na Europa, e 915 MHz (US915), correspondente à faixa de 902 a 928 MHz, nas Américas.

Ressalta-se que a faixa de 433 MHz ainda é utilizada em determinadas regiões, entretanto a sua adoção é menos comum quando comparada às bandas de 868 MHz e 915 MHz. Isto deve-se principalmente a restrições regulatórias, limitações de desempenho como menor largura de banda disponível e maior suscetibilidade a interferências. Embora

a faixa de 433 MHz esteja incluída no espectro ISM em diversas regiões, a sua utilização não é universalmente permitida nem regulamentada para todas as aplicações.

Na Europa, por exemplo, a faixa de 433 MHz é permitida para dispositivos de curto alcance além da faixa principal de 868 MHz, conforme recomendado pela CEPT Rec. 70-03 ¹ [21].

A tabela I apresenta as principais bandas de frequência utilizadas pelo LoRaWAN em várias partes do mundo conforme descrito em [21] e [22]:

Tabela I - Distribuição da Frequência de Banda por Região

Nota: Adaptado de [21], [22]

Região	Banda de Frequência (MHz)	Notas (conhecida como:)
Brasil	902 – 907.5 e 915 - 928	Banda US915
Europa	863 – 870	Banda EU868
EUA	902 – 928	Banda US915
China	470 – 510	Banda CN470
Austrália	915 – 928	Banda AU915
Índia	865 – 867	Banda IN865
Japão	920 – 928	Banda AS920
Coreia do Sul	920 – 923	Banda KR920
Sudeste Asiático	923 - 925	Banda AS923

* Na prática, AS923 possui variações regionais (AS923-1, AS923-2, etc.)

Existem três classes de dispositivos finais no LoRaWAN, classe A, classe B e classe C que diferem nos tempos das janelas de recepção [23]. A classe A é mais eficiente em termos de energia, pois os dispositivos abrem apenas a janelas de recepção após o envio de dados, a utilização desse modelo é ideal para aplicações de baixo consumo energético como por exemplo sensores de humidade ou contadores inteligentes de água e eletricidade, que enviam dados de tempos a tempos e permanecem a maior parte do tempo inativos. Já a classe B adiciona apenas janelas de recepção após as janelas de envio, essa configuração permite comunicações mais previsíveis e é especialmente útil na aplicação de sistemas de alerta em áreas remotas ou na aplicação de coleiras de monitorização de animais, onde se procura um equilíbrio entre a capacidade de resposta e a eficiência

¹ CEPT 70-03: é um documento técnico que defina faixas de frequência isentas de licença (*license-free*) para a utilização de equipamentos de curto alcance (SRD- *Short Range Devices*).

energética. Por fim a classe C que os dispositivos estejam continuamente em escuta, com a exceção de alguns momentos de transmissão, a utilização dessa classe é adequada para aplicações que necessitam de resposta em tempo real dispondo de uma alimentação continua, um exemplo dessa utilização são os sistemas de iluminação pública e válvulas controladas remotamente, embora utilizem muita energia, esses dispositivos permitem uma comunicação quase imediata, o que os torna perfeitos para situações onde o tempo de resposta é crítico.

Ao planejar a implantação de uma rede LoRaWAN, é fundamental verificar as regulamentações locais para garantir a conformidade com as frequências permitidas e otimizar o desempenho da rede.

As tecnologias de comunicação sem fios têm vindo a desempenhar um papel crucial na evolução das redes modernas, especialmente com a chegada do 5G/6G e as exigências crescentes da IoT. Por exemplo, as comunicações *Optical Wireless Communication* (OWC) que é uma comunicação ótica sem fios, permitindo conectar utilizando faixas de infravermelho, visível ou ultravioleta, através de recursos, como alta largura de banda, baixo custo e operação num espectro não regulado, a OWC pode ser, em alguns casos, uma alternativa a pensar e, noutras, complementar às tecnologias sem fio existentes. O *Light Fidelity* (Li-Fi) e o *Visible Light Communication* (VLC), complementam as tecnologias de radiofrequência, oferecendo soluções mais seguras e eficientes em ambientes que exigem uma alta densidade de dispositivos e de baixa latência [24], [25]. Com tudo, o Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) introduz inovações como a *Multiple User-Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (MU-OFDMA) e *Multiple User-Multiple Input, Multiple Output* (MU-MIMO), otimizando a eficiência em redes densas e economizando energia [26].

Para a IoT, as tecnologias como a Zigbee, LoRa, e NB-IoT oferecem soluções específicas de conectividade com baixo consumo de energia, cada uma adaptada a diferentes cenários de utilização, desde aplicações industriais até redes de sensores inteligentes [26].

Esses avanços destacam a convergência entre diferentes tecnologias de comunicação sem fios, impulsionando aplicações inovadoras como cidades inteligentes, internet tátil e holografia em redes futuras [24], [25], [26].

1.2.2 Sigfox

Em [27], estudado por [28], descrevem a SigFox sendo uma operadora de rede LPWAN que fornece soluções completas de conectividade IoT com base na sua tecnologia patenteada. A SigFox implementa as suas estações base usando dispositivos previamente configurados com software próprio, que são conectados a servidores *backend* usando uma rede baseada em IP, o equipamento final conecta-se a essas estações, por meio de *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) que é um esquema de modulação digital onde a fase de uma onda portadora é alterada para representar os bits de dados 0 e 1, a uma portadora ISM de banda ultra estreita (100 Hz) sub-GHZ, assim como a tecnologia LoRa, a SigFox usa bandas ISM não licenciadas, como 868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e 433 MHz na Ásia. Ao usar bandas de frequência ultra estreitas, a SigFox é capaz de utilizar eficientemente a largura de banda de frequência e atingir níveis de ruído extremamente baixos, resultando num consumo de energia extremamente baixo, garantindo uma alta sensibilidade do recetor e design de antena de baixo custo, mas com uma taxa de transmissão máxima de apenas 100 bps. Inicialmente suportava apenas comunicação de *uplink*, contudo, evoluiu para tecnologia bidirecional com assimetria de link significativa. A comunicação de *downlink*, ou seja, dados derivados de estações base para dispositivos finais, só pode ocorrer após uma comunicação de *uplink*, o número de mensagens por *uplink* é limitado a 140 mensagens por dia, o comprimento máximo de carga útil para cada mensagem de *uplink* é de 12 bytes, mas o número de mensagens no *downlink* é limitado a quatro por dia, o que significa que a confirmação de cada mensagem de *uplink* não é suportada.

Em [29] os autores demonstram a aplicação de um sistema baseado na rede SigFox na agricultura para fazer a monitorização de fatores ambientais. Neste artigo, eles descrevem a tecnologia SigFox e como esse tipo de comunicação pode ser integrado à agricultura de precisão, fazendo referência a outras tecnologias já utilizadas na área. Os autores concluem que as tecnologias SigFox e LPWAN representam o futuro da IoT.

1.2.3 LTE-M

A tecnologia *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) é uma tecnologia de rede de longo alcance e de baixo consumo de energia LPWAN, que permite a reutilização da base instalada LTE com cobertura estendida, foi desenvolvida pela *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) para oferecer suporte a dispositivos e serviços voltados

especificamente para aplicações IoT. Essa tecnologia oferece taxas de dados de 1 Mbps no 3GPP Versão 13, aumentando para 4 Mbps na Versão 14, aumentando a mobilidade e a capacidade de voz em toda a rede [30].

1.2.4 NB-IoT

Segundo [27], documentado por [30], a *Narrowband* IoT (NB-IoT) é também uma tecnologia de rádio implantada em redes móveis, particularmente adequada para cobertura interna, com baixo custo e bateria de longa duração, acertadamente para um grande número de dispositivos. A tecnologia NB-IoT limita a largura de banda a uma única banda estreita de 200 kHz, fornecendo uma velocidade máxima de *downlink* de 26 kbs no padrão 3GPP versão 13. A versão 14 aumentará para 127 kbps. Ambas as tecnologias LTE-M e NB-IoT operam em redes móveis e requerem cobertura de sinal adequada.

No trabalho [31], os autores apresentam um estudo relacionado à assistência médica, particularmente o desenvolvimento remoto de regiões rurais e a aplicação da IoT nessas regiões para a monitorização remota de saúde com base na tecnologia NB-IoT. É apresentado um sistema baseado em IoT para fazer a monitorização remota da saúde, no qual sensores vestíveis vitais transmitem dados e alertas para um sistema IoT. Os dados e alertas recolhidos são então enviados aos médicos com base num protocolo *push/pull* estratificado por risco usando a melhor combinação de redes móveis/NB-IoT. A validação clínica por meio da implantação no hospital onde o sistema foi testado e a localização remota da telemedicina demonstraram que o sistema baseado em NB-IoT pode ser uma alternativa de baixo custo, mas rica em recursos, e que agrega valor aos dispositivos para monitorização remota de pacientes.

1.2.5 Redes Móveis (3G, 4G, 5G, ...)

As comunicações moveis estão no processo de transformação de um sistema que, no início, transmitia para milhões de utilizadores apenas áudio para um sistema que podia suportar inúmeros dispositivos transmitindo dados e voz. A necessidade de uma maior conectividade por meio de redes sem fio e impulsionada pelo aumento no número de serviços moveis multimédia, tem conduzido a um aumento exponencial na transmissão de dados [32].

No estudo de [33], os casos de uso da rede 5G são caracterizados pela *International Telecommunication Union Radiocommunication* (ITU-R) em três categorias principais, a *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine Type Communications* (mMTC) e *Ultra-Reliable Low Latency Communications* (URLLC). Foi observado que o eMBB-URLLC mantém uma capacidade média superior a 800 Mbps a uma distância de 300 metros, enquanto o eMBB-mMTC apresenta um desempenho ligeiramente acima de 200 Mbps na mesma distância em relação ao gNb. Em termos de taxa de erro, o eMBB-URLLC demonstra um desempenho melhor, com erros menos frequentes, enquanto o eMBB-mMTC apresenta uma taxa de erro mais elevada numa *Signal to Noise* (SNR) de 2 dB. Quando o SNR é de -5 dB, as taxas de dados atingem aproximadamente 30 Mbps para o eMBB-mMTC e cerca de 230 Mbps para o eMBB-URLLC. Além disso, a eficiência espectral do eMBB-URLLC é inferior, ficando abaixo de 15 bps/Hz/célula, ao passo que, no caso do eMBB-mMTC, a eficiência espectral é relativamente maior, ultrapassando os 17 bps/Hz/célula.

Através dos estudos [34], [35] [36], podemos destacar possíveis utilizações da rede 5G permitindo identificar os principais requisitos necessários para a sua implementação. Para suportar requisitos de rede como baixa latência e conexões massivas, as redes 5G devem não apenas melhorar a eficiência das tecnologias anteriores, mas também ter uma arquitetura flexível e escalável para se adaptar aos diversos cenários atuais e futuros. A coordenação entre os vários requisitos de tráfego e mobilidade dos utilizadores entre estas redes deve ser gerida de forma a alcançar a taxa de transmissão e a continuidade da mobilidade.

No estudo de [37] os autores fazem uma análise de forma abrangente das oportunidades, desafios e tendências emergentes associadas à convergência entre a tecnologia 6G e a IoT. É discutido como o 6G pode revolucionar o ecossistema da *Internet of Things*, oferecendo velocidades significativamente maiores, latência ultrabaixa e maior confiabilidade. O 6G é apresentado como uma solução para suportar o aumento de dispositivos conectados, facilitando a comunicação entre diversos sensores, atuadores e outros dispositivos inteligentes, o que é essencial para o desenvolvimento de cidades inteligentes, automação industrial e outras aplicações emergentes. O artigo destaca a necessidade de desenvolver novas arquiteturas de rede, protocolos de comunicação e estratégias de gestão que sejam adequadas para a procura do 6G, principalmente quando é integrada à IoT, isso inclui abordagens para garantir a escalabilidade, segurança e

eficiência energética. Além das oportunidades, o estudo também ressalta os desafios que precisam ser superados para a implementação efetiva do 6G em ambientes IoT, como questões de segurança, privacidade e a necessidade de gestão dos recursos de rede para atender a requisitos variados de diferentes aplicações.

1.2.6 Redes Mesh

As redes mesh (ou redes em malha) são uma arquitetura de rede na qual cada dispositivo, ou nó, está interligado com vários outros nós, formando uma malha de conexões. Em vez de depender de um único ponto central para a comunicação, as redes mesh permitem que cada dispositivo possa comunicar com outros diretamente ou por meio de um ou mais dispositivos intermediários.

Um exemplo de tecnologia que suporta redes em topologia mesh é o ZigBee, um protocolo de comunicação sem fios bidirecional. De acordo com os padrões internacionais, o ZigBee baseia-se no padrão IEEE 802.15.4, que define as camadas física e de *Media Access Control* (MAC) para redes *Low-Rate Wireless Personal Area Networks* (LR-WPAN), estabelecido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Entre as suas principais características destacam-se o baixo consumo energético, a elevada capacidade de escalabilidade da rede, o suporte a topologias dinâmicas, mecanismos de segurança integrados, flexibilidade na frequência de operação e um alcance adequado a aplicações de curto e médio alcance [38]. O protocolo ZigBee é um conjunto de camadas superiores que aproveitam o padrão IEEE 802.15.4 para oferecer redes confiáveis, de baixo custo e baixo consumo de energia. O Zigbee é otimizado para redes em que os dispositivos operam com baterias por longos períodos, usa a camada MAC do IEEE 802.15.4 e oferece funções adicionais, como formação de rede, navegação e segurança, o protocolo funciona principalmente na faixa de 2,4 GHz, embora outras faixas como 868 MHz (Europa) e 915 MHz (América) também sejam suportadas [39].

1.2.7 UWB

De acordo com a pesquisa de [40] com base em [41] embora o *Global Position System* seja essencial para a navegação ao ar livre, a localização de um utilizador móvel a qualquer hora e em qualquer lugar ainda é uma tarefa complexa, especialmente em ambientes degradados e negados pelo GPS, como caminhos urbanos e ambientes internos. Nesse contexto, tecnologias alternativas de posicionamento têm sido amplamente

investigadas, destacando-se a *Ultra-Wideband* (UWB) devido à sua elevada precisão espacial e robustez em ambientes indoor.

A UWB é uma tecnologia de comunicação sem fio que utiliza uma faixa de largura de banda extremamente larga, normalmente superior a 500 MHz, para transmitir dados numa faixa de frequência bastante alta, usada para aplicações que exigem alta precisão e baixo consumo de energia. O protocolo UWB é amplamente utilizado em áreas como localização e monitorização, sensores, comunicação de alta taxa de dados e sistemas de radar.

O sistema UWB está configurado para trabalhar no modo de diferença de tempo de chegada, o que significa que o servidor/*gateway* local calcula a posição de uma etiqueta UWB implantada comparando os tempos de leitura de mensagens UWB recebidas de uma determinada etiqueta em diferentes pontos de ancoragem. O sistema está configurado para fornecer apenas posicionamento 2D (o posicionamento 3D não é muito confiável, pois as âncoras são implantadas numa única camada aproximadamente na mesma altura). Em termos de configuração do sinal RF UWB, a seguinte configuração é usada: canal UWB 2 (3774-4243,2 MHz), largura de banda de 500 MHz (resolução de temporização de 1,6 ns), taxa de dados de 110 kbps, comprimento de preâmbulo de 1024 bits, frequência de repetição de pulso de 64 MHz e potência de transmissão de 20 dBm. Além disso, configurações otimizadas baseadas em modelos de movimento e graus de liberdade de movimento são habilitadas para avaliações de casos de uso estáticos e móveis [42].

1.2.8 Satélites de Baixa Órbita

A *Starlink* é um exemplo de satélites de baixa órbita chamados de *Low-Earth Orbit* (LEO), por estarem mais próximos da Terra, entre 500 km a 1500 km, as estações de transmissão não precisam de muita potência e o atraso de ida e volta do sinal é muito menor, porém para estabelecer um sistema é necessário fazer uma cadeia com vários satélites de baixa órbita por causa da sua velocidade. O custo de lançamento de satélites LEO é menor se comparados com satélites *Medium Earth Orbit* (MEO) e *Geostationary Earth Orbit* (GEO) [43].

Para viabilizar o uso de satélites LEO, é essencial lançar constelações compostas por diversos satélites que orbitam o planeta, esses satélites, ao trabalharem em conjunto, funcionam como uma única rede integrada. A comunicação entre satélites LEO próximos é realizada por meio de *InterSatellite Links* (ISL) [44].

Os satélites LEO podem ser classificados em três tipos: pequenos, grandes e de banda larga. Os pequenos LEO funcionam abaixo de 1 GHz e são utilizados na maior parte das vezes em sistemas de mensagens de baixa velocidade, já os LEOs grandes funcionam entre 1 e 3 GHz, sendo que os sistemas como *Globalstar* e *Iridium* são exemplos dessa categoria, por fim, os LEOs de banda larga oferecem comunicação semelhante à das redes de fibra ótica, sendo o *Teledesic* o primeiro sistema LEO desse tipo [44].

De acordo com [44], o sistema *Iridium* consiste numa rede de 66 satélites em órbitas LEO a 750 km de altitude, com a principal característica de permitir a comunicação global via satélite, utilizando terminais portáteis para voz, dados, fax, *paging* e navegação, com uma taxa de transmissão de 2,4 a 4,8 kbps. A comunicação entre utilizadores pode passar por vários satélites antes de chegar ao destino, sem a necessidade de muitas estações terrestres. O *Globalstar* é outro sistema LEO similar ao *Iridium*, mas com a diferença de que a comunicação depende de satélites e estações terrestres, enquanto no *Iridium*, a retransmissão ocorre inteiramente no espaço. Este sistema utiliza 48 satélites em órbitas polares a 1.400 km de altitude. Por fim, o *Teledesic* é um sistema de satélites orientado para as comunicações de banda larga, oferecendo acesso à internet com características semelhantes às redes de fibra ótica, utilizando cerca de 288 satélites em 12 órbitas a 1.350 km de altitude e tendo como objetivo principal fornecer conectividade de internet global.

1.2.9 TVWS

O *Television White Spaces* (TVWS) refere-se a canais de televisão não utilizados, situados entre bandas de frequência utilizadas pela transmissão televisiva. Os *TV White Spaces* correspondem a porções do espectro de radiofrequência atribuídas à radiodifusão televisiva que não se encontram efetivamente utilizadas, sendo também designadas por espectro intercalado [45]. Estes espaços ocorrem principalmente nas bandas de *Very High Frequency* (VHF) e *Ultra High Frequency* (UHF). No contexto da radiodifusão televisiva analógica, a distância mínima de separação entre canais cofrequentes era, tipicamente, de cerca de 97 km na faixa VHF e de aproximadamente 240 km na faixa UHF. Por sua vez, com a introdução da Televisão Digital Terrestre (TDT), essas distâncias de separação variam consoante a região, situando-se em torno de 245 km na faixa VHF e 224 km na faixa UHF, de forma a garantir a mitigação de interferências entre transmissões adjacentes. Mais simplesmente, o espectro TVWS representa uma grande parte do

espectro UHF (300 MHz–3 GHz), ou seja, centenas de MHz, e em alguns países também inclui VHF, que está disponível em áreas geográficas específicas e que pode ser usado em redes partilhadas. O espectro pode ser utilizado por utilizadores primários, que são licenciados, ou por utilizadores secundários, que utilizam equipamentos não licenciados e podem partilhar o espectro com transmissores de televisão digital e outros utilizadores. A quantidade de espaço em branco terrestre disponível depende de diversos fatores, tais como as características geográficas, o nível de interferência potencial no serviço de transmissão televisiva, os objetivos de cobertura da televisão e o planeamento e a utilização dos canais televisivos associados [46].

O trabalho apresentado em[45], destaca a importância do TVWS, no qual os autores focam a sua pesquisa em áreas-chave de componentes de aplicação e domínios de aplicação, demonstraram que o TVWS apresenta excelente capacidade de penetração em edifícios e boas propriedades de propagação, o que por sua vez torna o segmento de TV uma plataforma inovadora com grande potencial numa ampla gama de aplicações importantes, sejam elas utilizadas em ambientes internos ou externos.

No estudo apresentado em [47], destaca-se a necessidade de uma base de dados geográfica que regista os espaços em branco de TVWS disponíveis em diferentes países. Tal necessidade deve-se ao facto de as frequências disponíveis variam entre países e até mesmo dentro das regiões de um mesmo país, que possuem políticas e regimes regulatórios distintos. Por essa razão, é crucial garantir que o espectro de frequências utilizado por forças de segurança, serviços de emergência e entidades comerciais esteja protegido contra interferências.

No trabalho descrito em [48], são apresentadas medições de campo externo em TVWS realizadas em Munique e Alemanha. As medições, realizadas em cenários rurais, suburbanos e urbanos, indicaram que o modelo proposto é eficaz para descrever a perda de sinal em distâncias de até alguns quilómetros, podendo ser aplicado no desenvolvimento de base de dados de geolocalização.

No documento publicado pela ANACOM [49], que é a entidade portuguesa responsável pela regulamentação e supervisão do setor das comunicações eletrónicas e dos serviços postais em Portugal, fazendo a gestão do espectro e a promoção do seu uso eficiente, o papel do TVWS destaca-se como uma tecnologia promissora para o acesso dinâmico e partilha ao espectro, enfatizando o impacto positivo na conectividade de banda

larga, especialmente em áreas rurais, promovendo a eficiência no uso do espectro. Menciona também alguns desafios técnicos, como a necessidade de modelos avançados de gestão de espectro e de garantir que os serviços críticos não sejam afetados por interferências, além disso, defende também o desenvolvimento de políticas que favorecem o uso eficiente dessa tecnologia em Portugal.

Tabela II - Resumo dos Tipos de Comunicação

Nota: Elaboração Própria

Tecnologia	Custo	Autonomia	Precisão	Cobertura
LoraWAN	Baixo	Alta	Baixa	Até 15km
Sigfox	Baixo	Muito Alta	Baixa	Até 50km
LTE-M	Médio	Média	Média	Redes móveis
NB-IoT	Médio	Alta	Média	Cidades
Redes Móveis	Alto	Baixa	Muito Alta	Cidade e redes móveis
Redes Mesh	Baixo	Média	Alta	100 metros por nó
UWB	Alto	Média	Muito Alta	Até 50 metros
Satélites	Muito Alto	Média	Média	Global
TVWS	Médio	Alta	Média	Até 50 kms (Áreas rurais)

1.2.10 Geofencing

O *Geofencing* trata-se de delimitar áreas geográficas virtuais (cercas virtuais) utilizando GPS, Wi-Fi ou outras tecnologias de localização. Quando um utilizador entra ou sai dessas zonas, dispara-se um evento que pode desencadear ações específicas como notificações ou recolha de dados.

Segundo [50], o conceito de *crowd geofencing*, em que trabalhadores voluntários criam cercas virtuais em ambientes urbanos para apoiar especialistas em campo (por exemplo, para monitorizar qualidade da água/ar).

No caso de [51], propõem uma metodologia com aplicações em psicologia comportamental fora do laboratório onde delimitam zonas (ex. casa, trabalho), e quando o participante entra ou sai, dispara um inquérito via app (*Samplify*).

No estudo de [52], utilizam o *geofencing* para mapear intervenções sobre saúde (tabagismo, consumo de álcool, HIV, etc.) e concluem que a *geofence* é uma tecnologia emergente, viável e aceitável, mas recomenda-se transparência nos critérios de delimitação geográfica e incorporação da perspetiva do utilizador, nomeadamente princípios éticos e de proteção de dados.

1.3 Análise de Soluções Existentes

Nos dias de hoje, já existem várias tecnologias e soluções utilizadas para a monitorização de animais em ambientes abertos, algumas dessas soluções incorporam diferentes tipos de sensores, inteligência artificial e dispositivos de comunicação, dependendo do seu contexto e meio em que estão inseridos.

No estudo realizado por [53], é possível concluir que a monitorização inteligente da vida selvagem, usando *machine learning* ajuda na preservação da biodiversidade. O referido estudo teve como objetivo desenvolver modelos de reconhecimento usando amostras limitadas de animais e tecnologias disponíveis em cenários de monitorização em ambientes de campo. Inspirados pela capacidade dos antropólogos de identificar rapidamente espécies ameaçadas, baseando-se numa única imagem. A evidência empírica encontrada neste estudo sugere que a incorporação profunda de conhecimento especializado pode melhorar significativamente a precisão dos algoritmos, mesmo com amostras limitadas. Existem diversos dispositivos que utilizam GPS's para a monitorização da vida selvagem, permitindo atualizações de localização em tempo real, auxiliando biólogos a obter dados cada vez mais precisos sobre o comportamento e padrões migratórios de diversas espécies. Esses dispositivos são inicialmente construídos com materiais de alta qualidade, resistentes a condições climáticas extremas, garantindo a sua funcionalidade em diversos ambientes, possuindo um sistema eficiente de gestão de energia, proporcionando uma monitorização contínua por longos períodos [54].

A investigação apresentada em [55], aborda o aproveitamento da tecnologia LoRaWAN para agricultura de precisão em estufas, o estudo aborda o uso de redes de sensores sem fio ou *Wireless Sensor Networks* (WSN) como solução sustentável para agricultura de precisão em estufas, otimizando o uso de recursos agrícolas e monitorização de parâmetros ambientais para aumentar a qualidade e a produtividade, visando a tecnologia LPWAN, especialmente LoRaWAN, que é destacada pela sua eficiência energética e baixo custo, apesar da baixa taxa de dados. O produto da MOKO SMART [56], discute as vantagens de utilizar a tecnologia LoRaWAN na monitorização do gado por GPS, destacando a sua eficiência e benefícios para a gestão pecuária, como a cobertura de longo alcance, permitindo a comunicação em áreas rurais extensas sem a necessidade de infraestrutura de rede, poupança de energia, resultando numa maior duração da bateria e reduzindo a necessidade de manutenção frequente. Apresenta elevada

eficiência económica em comparação com outras tecnologias de comunicação, devido à menor necessidade de infraestrutura dedicada e aos custos operacionais reduzidos. Adicionalmente, permite a integração simples de novos dispositivos na rede, facilitando a escalabilidade e a expansão das operações de localização conforme as necessidades do sistema.

Existem diversos localizadores GPS para animais, neste caso damos o exemplo do Findster [57], pensado especialmente para animais domésticos, cães e gatos, o sistema funciona com uma tecnologia própria chamada MAZE, permitindo a comunicação direta entre dois dispositivos, um preso na coleira do animal e o outro fica junto com o proprietário. Uma das vantagens deste sistema é que não necessita de ligação à rede móvel e não há necessidade de pagar planos anuais. Esse dispositivo só funciona se o utilizador iniciar a aplicação com o animal perto de si caso contrário não será possível estabelecer a ligação entre os dispositivos. Além da localização em tempo real, este dispositivo oferece o recurso de definir cercas virtuais que acionam alertas caso o animal ultrapassa ou saia das zonas predefinidas pelo utilizador. A funcionalidade do sistema pode chegar a cerca de 4.8km em ambientes abertos e 800 metros em zonas urbanas, pode durar até 12 horas com uso contínuo, cerca de 3 dias com passeios diários curtos e até 7 dias se usado só como monitor de atividade (sem monitorização GPS).

A empresa galega Innogando desenvolveu um dispositivo GPS (Rumi) [58], no propósito de fazer a monitorização em tempo real de bovinos, tanto em estábulos quanto em pastagens. Este sistema oferece aos produtores uma ferramenta para fazer a gestão de uma vacaria, no qual combina funcionalidades de geolocalização com sensores de atividade. Um dispositivo oferece funcionalidades adicionais para além da simples localização, ele deteta comportamentos como a alimentação, descanso, ruminação e tempo em movimento, ajudando o produtor a entender melhor a rotina de cada animal. Isso proporciona um maior controlo e reduz “surpresas”, pois, já que a própria aplicação possibilita a configuração de notificações para determinadas situações como por exemplo o cio, a aproximação da hora de parto ou qualquer outra mudança incomum no comportamento do animal. Uma grande vantagem deste dispositivo é a integração de um painel solar eliminando a preocupação com baterias e assegurando a sua funcionalidade em diferentes locais, além disso, é utilizada a tecnologia LoRaWAN para a comunicação, permitindo a sua utilização sem depender da cobertura de rede móvel [59].

1.4 Análise Comparativa

Cada abordagem apresenta vantagens específicas consoante o ambiente em que é aplicável e o objetivo a que se destina. Enquanto as tecnologias móveis de suporte à IA e a recurso a GPS (por exemplo LTE-M, NB-IoT, GNSS, entre outros) se destacam, na pesquisa e conservação da vida selvagem, a LoRaWAN surge como uma excelente alternativa em ambientes onde o consumo de energia, o custo e a necessidade de cobertura em áreas remotas são fatores essenciais.

A tabela III, apresenta uma breve comparação e análise de tecnologias e dispositivos, tecnologias de comunicação bem como as suas vantagens e limitações:

Tabela III - Análise de Dispositivos/Estudos

Nota: Elaboração Própria

Tecnologia/ Dispositivo	Tecnologia e Comunicação	Vantagens	Limitações
Monitorização da vida Selvagem	LTE-M/NB- IoT/GNSS(IRIDIUM, etc) Machine Learning com imagens	- Boa previsão com poucas amostras - Integra conhecimento especializado	- Exige conhecimento técnico especializado para implementação - Aplicação complexa em larga escala
Gm-tracking	GPS+ Sensores	- Monitorização em tempo real - Funciona em diversos ambientes - Boa autonomia	- Custo elevado - Dificil acesso para a instalação
Agricultura de precisão	WSN+ LoRaWAN (PLWAN)	- Baixo custo energético - Baixo custo - Cobertura eficiente em ambientes fechados	- Baixa taxa de transmissão de dados - Não ideal para a monitorização de movimento
MOKO SMART	GPS+ LoRaWAN	- Cobertura rural elevada - Baixo consumo e manutenção - Escalável	- Reque infraestrutura LoRaWAN local - Requer investimento inicial em infraestrutura LoRaWAN
Findster	Tecnologia MAZE (comunicação direta entre módulos)	- Não depende de rede móvel - Sem mensalidade - Cerca virtual e alertas	- Alcance limitado - Bateria com duração variável
Rumi	GPS+ LoRaWAN	- Autonomia devido a energia solar - Detecção de comportamentos - Aplicação com alertas inteligentes	- Custo por unidade pode ser um fator

2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

2.1 Abordagem de desenvolvimento

Sendo um projeto uma ação especial que tem início e fim determinados, tendo um objetivo claro a ser atingido dentro dos recursos que lhe são destinados, sejam eles humanos, financeiros ou materiais, deste modo, o projeto não deve ter uma duração indefinida nem recursos ilimitados, tanto a duração como os recursos devem ser planeados anteriormente para estabelecer uma linha de base a ser seguida [60].

Foi adotada uma abordagem ágil, tendo sido escolhida a metodologia *Extreme Programming* (XP). A escolha da metodologia XP justifica-se pela sua ênfase na entrega contínua, colaboração intensiva e flexibilidade para lidar com mudanças nos requisitos, visando a velocidade e simplicidade com ciclos de desenvolvimento curtos [61].

2.2 Análise de requisitos

Com todos os componentes operacionais, o sistema deve ser capaz de enviar dados pelo menos a cada 2 minutos, com a hora e coordenadas GPS do animal. Além disso o sistema deve ser capaz de identificar se o animal se encontra dentro de um determinado perímetro e, caso contrário, enviar um alerta ao utilizador a dizer que o animal saiu fora da área definida, esse pode ou não ter o seu terreno partilhado com outros utilizadores. O utilizador deve conseguir visualizar a rota do animal nas últimas 50 posições no mapa como também deve conseguir criar, editar e apagar os seus polígonos.

2.2.1 Requisitos Funcionais

Um requisito funcional define uma funcionalidade, seja ela uma entrada ou uma saída de um sistema de software ou do próprio componente. Para este projeto, os requisitos funcionais são os seguintes:

Tabela IV - Requisitos Funcionais

Nota: Elaboração Própria

Requisitos	Descrição
Monitorização em Tempo Real	O sistema deve realizar a monitorização ativa e constante dos animais
Cerca Virtual	Deve ser implementada uma cerca virtual
Alertas	O sistema deve enviar alertas caso ocorra alguma anomalia ou avanço para fora do perímetro definido
Registo de Dados Passados	Todos os dados devem ser guardados para que se possam fazer análises futuras
Interface de Utilizador	O sistema deve disponibilizar ao utilizador uma interface simples
Configuração de Parâmetros	Deve ser possível configurar parâmetros operacionais pelo utilizador
Partilhar Terrenos	O utilizador deve conseguir fazer a partilha dos seus terrenos com outros proprietários

2.2.2 Requisitos Não Funcionais

Os requisitos não funcionais são descritas as características. Os softwares ou aplicações devem ter uma série de aspetos de qualidade, como bom desempenho, precisão, confiabilidade, entre outros.

Neste caso foi necessário que o sistema tratasse dos seguintes requisitos não-funcionais:

Tabela V - Requisitos não Funcionais

Nota: Elaboração Própria

Requisitos	Descrição
Desempenho	Deve suportar a monitorização simultânea de, no mínimo, 2 dispositivos
Escalabilidade	O sistema deve ser projetado para lidar com um aumento substancial no número de utilizadores, mantendo o desempenho e a disponibilidade
Segurança	Os dados devem ser encriptados durante a transmissão e armazenamento Deve haver autenticação segura dos utilizadores
Usabilidade	A interface deve ser intuitiva e de fácil navegação, mesmo para utilizadores com pouca experiência técnica
Confiabilidade	O sistema deve ser testado para melhorar sua robustez, garantindo sua operação em situações de baixo sinal

2.3 Fases do projeto

Neste ponto são apresentadas as etapas sequenciais do desenvolvimento, descrevendo o ciclo de vida do projeto e a forma como este evolui desde o seu início até à sua conclusão.

O projeto começa com a ideia de fazer a monitorização de animais, em ambientes abertos, a qual foi necessário realizar uma pesquisa sobre os tipos de tecnologias que poderiam ser utilizadas e o que poderia ser melhorado. Feito isso, segue-se a parte em que é desenvolvido o protótipo, identificando tipos de componentes que se adequam ao meio em que vão ser inseridos e, por fim, a recolha e análise de dados, tendo-se efetuado o estudo e a comparação dos dados previstos com os dados obtidos.

2.4 Ferramentas e Tecnologias

Para a conceção deste projeto são utilizadas várias ferramentas, quer a nível de protocolos de comunicação, *software* e *hardware*, começando pelo protocolo de comunicação usando-se o protocolo LoRaWAN, pois essa tecnologia é a que mais se enquadra nos parâmetros, tendo um bom alcance e uma grande capacidade de autonomia. Como *software* iremos utilizar-se-á a plataforma Visual Studio Code integrado com a base de dados SQLite, relativamente à plataforma IoT, utiliza-se o HiveMQ para enviar pacotes entre os dispositivos. No que toca aos equipamentos e *hardware*, iram ser utilizados sensores de temperatura (DS18B20), microcontroladores (TTGO LoRa32-OLED) incorporados com antena, um sensor de GPS (*Adafruit Ultimate GPS Logger Shield*), uma bateria e por fim uma coleira para poder fixar todos esses componentes no animal que se pretende fazer a monitorização.

Tabela VI - Lista de Componentes

Nota: Elaboração Própria

Componentes	Quantidade
Microcontrolador (TTGO ESP32+LoRa+OLED)	3
Sensor de Temperatura (DS18B20)	1
Cabos Micro-USB	3
Modulo GPS (Adafruit Ultimate GPS +Logger Shield*)	2

* <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps-logger-shield/overview>

2.5 Gestão de Riscos

A gestão de riscos visa identificar, analisar e propor medidas preventivas ou corretivas para minimizar os impactos negativos no projeto, assim sendo, os principais riscos associados ao projeto serão:

Tabela VII - Riscos a Considerar

Nota: Elaboração Própria

Risco	Probabilidade	Impacto
Atrasos no cronograma	Alta	Significativo
Recursos humanos insuficientes	Razoável	Significativo
Falhas técnicas	Razoável	Significativo
Dificuldade de integração com o sistema	Baixa	Pouco prejudicial
Falhas de segurança e perda de dados	Razoável	Significativo
Excesso de custos	Razoável	Pouco prejudicial
Requisitos mal definidos	Alta	Significativo

Para cada risco identificado, é importante elaborar estratégias de mitigação para reduzir a probabilidade de ocorrência ou o impacto.

- Atrasos no cronograma: Verificar o cronograma regularmente e implementar *checkpoints*;
- Recursos humanos insuficientes: Garantir um plano reserva e recursos substitutos;
- Falhas técnicas: Realizar testes contínuos;
- Dificuldade de integração com o sistema: Definir padrões de integração e realizar testes prévios;
- Falhas de segurança e perda de dados: Implementar criptografia e *backups* regulares;
- Excesso de custos: Monitorizar o orçamento e aplicar revisões financeiras;
- Requisitos mal definidos: Realizar levantamento claro dos requisitos com os potenciais utilizadores do sistema.

Com esta implementação da gestão de riscos, pretende-se minimizar os impactos negativos e assegurar que o projeto seja concluído de forma eficiente e dentro dos prazos estabelecidos.

2.6 Cronograma

A figura Figura 1 apresenta o planeamento detalhado do projeto, dividido em tarefas específicas e distribuído num calendário que abrange o período de novembro a junho, este planeamento visa garantir o desenvolvimento estruturado e eficiente das etapas necessárias para a conclusão bem-sucedida do projeto.

As atividades são cuidadosamente sequenciadas, começando pela leitura e pesquisa e pela organização das ideias, que é a base que sustenta conceitualmente o projeto. Segue-se o desenvolvimento do sistema para implementar as ideias propostas, as fases de implementação, testes e implementação propriamente que dita garantem a viabilidade e qualidade do sistema desenvolvido. Por fim, as atividades como manutenção, preparação da apresentação e redação irão solidificar os resultados e prepará-lo para a entrega final.

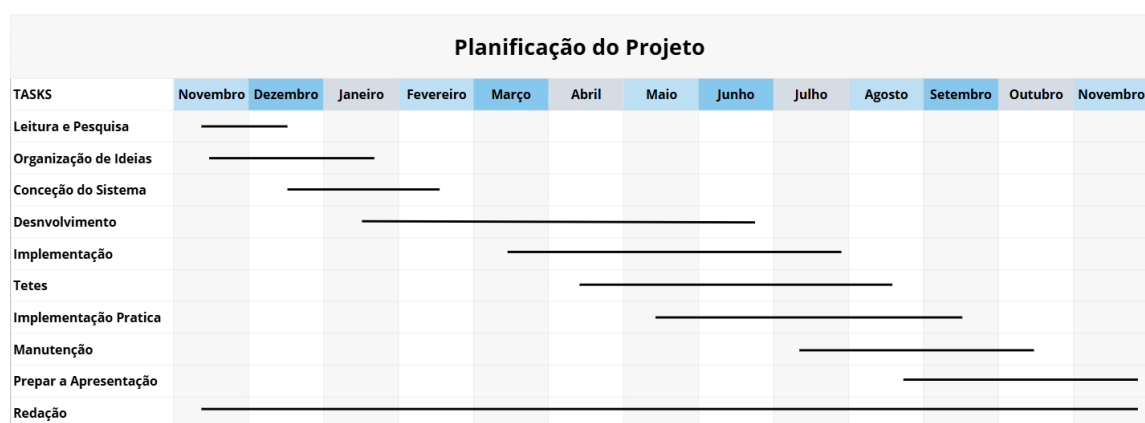


Figura 1- Cronograma

Nota: Elaboração Própria

3 ARQUITETURA E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

3.1 Visão Geral da Solução

O sistema desenvolvido integra diversos recursos tecnológicos, abrangendo desde sensores e componentes eletrônicos até diversos componentes de software interconectados.

O principal objetivo é realizar a monitorização dos animais em tempo real, permitindo acompanhar a sua localização, estado de saúde e comportamento. Para isso, são utilizados sensores, dispositivos IoT, comunicação remota e plataformas de software que fornecem informações relevantes e acessíveis ao utilizador.

Com base na pesquisa realizada e nos conhecimentos adquiridos, foi desenvolvido um código na interface Arduino, recorrendo às extensões do ESP32, que permitiu a integração do módulo *Adafruit Ultimate GPS Logger Shield* com o TTGO LoRa32-OLED para a recolha de dados de localização. Estes dados são posteriormente transmitidos para uma plataforma de *streaming* baseada em *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) referente ao HiveMQ. O Node-RED subscreve os tópicos MQTT correspondentes e processa as mensagens recebidas, procedendo à sua validação e normalização antes de as inserir numa base de dados SQLite. A base de dados é utilizada como repositório persistente de informação, permitindo o armazenamento histórico das coordenadas geográficas, marcas temporais e identificadores dos dispositivos. Esta abordagem possibilita a realização de consultas estruturadas sobre os dados armazenados, tais como o histórico de trajetos, a análise de padrões de mobilidade, a deteção de eventos fora de zonas predefinidas (cercas virtuais) e o suporte à geração de alertas. Adicionalmente, o uso do SQLite garante uma solução leve, de baixo custo e adequada a sistemas embebidos ou de pequena escala, sem necessidade de infraestrutura de bases de dados dedicada.

Através do Node-RED é possível visualizar em tempo real a localização dos animais que estão a ser monitorizados por GPS's, juntamente com outros parâmetros relevantes.

3.2 Especificação da Arquitetura

A arquitetura do sistema foi concebida de forma modular e escalável, de modo a garantir fiabilidade, eficiência energética e facilidade de manutenção. A solução combina dispositivos de hardware baseados em microcontroladores com sensores conectados, comunicação LoRaWAN, processamento local e integração com plataformas em nuvem para análise e visualização de dados.

A arquitetura está dividida em três camadas principais. A Camada de Dispositivos IoT, nesta camada estão incluídos os dispositivos físicos colocados nos animais. Cada nó IoT é composto por um microcontrolador TTGO LoRa32-OLED com capacidade de comunicação LoRaWAN, um sensor de temperatura DS18B20, um módulo GPS (*Adafruit Ultimate GPS Logger Shield*), responsável por obter coordenadas em tempo real, uma bateria recarregável que fornece autonomia para operação contínua e uma coleira adaptada para todos os componentes ficarem alojados. A Camada de Comunicação a transmissão de dados é feita por meio da rede LoRaWAN, garantindo a comunicação de baixo consumo e longo alcance. Cada dispositivo envia pacotes com ID do dispositivo, *timestamp*, coordenadas GPS, temperatura corporal e o estado de alarme (fora do perímetro ou temperatura anómala). O *gateway* LoRa recebe os pacotes e encaminha-os para a plataforma de *backend* via Wi-Fi. Por fim a Camada de Backend e Aplicação, na qual os dados recebidos são processados numa aplicação de *backend* desenvolvida em Node.js, com armazenamento na base de dados SQLite. O *backend* armazena e organiza os dados históricos, aplica validações e regras para a criação de alertas, disponibiliza uma API REST para a interface de utilizador. A lógica de *geofencing* é aplicada com base nas coordenadas GPS recebidas dos dispositivos IoT.

O sistema verifica se cada animal está dentro de uma área predefinida, representando o perímetro seguro, caso o animal ultrapasse esse limite, é enviado um alerta automático ao utilizador através da interface web, esta funcionalidade é configurável, permitindo ao utilizador definir manualmente o perímetro geográfico (cerca virtual) via interface.

As cercas virtuais partilhadas correspondem a zonas geográficas virtuais previamente definidas que podem ser associadas simultaneamente a múltiplos dispositivos ou utilizadores dentro do sistema. Ao contrário das cercas virtuais individuais, que são configuradas para um único ativo, as cercas virtuais partilhadas

permitem a reutilização de uma mesma delimitação espacial por vários nós da rede, promovendo uma gestão centralizada e consistente das áreas de interesse.

Neste contexto, as cercas virtuais são armazenadas na base de dados sob a forma de coordenadas geográficas (por exemplo, polígonos) e são aplicadas de forma transversal aos dados de localização recebidos. Sempre que um dispositivo entra ou sai de uma cerca virtual partilhada, o sistema deteta o evento através da comparação entre a posição atual e os limites definidos, desencadeando ações automáticas, como o registo do evento, a criação de um alerta ou a notificação de utilizadores.

3.3 Hardware

3.3.1 Adafruit Ultimate GPS Logger Shield

O *Adafruit Ultimate GPS Logger Shield* é um dispositivo compatível com Arduino que inclui um módulo GPS de alta qualidade, tornando-o ideal para registar dados de localização. Caracteriza-se por fornecer uma alta sensibilidade (-165 dBm) e tempos de correção rápidos, *slot* para cartão MicroSD para registar dados de GPS, alta taxa de atualização suportando até 10 Hz (10 atualizações de localização por segundo), baixo consumo de energia funcionando com apenas 20 mA ao usar o modo periódico e suporte de uma antena de *patch* integrada e um conector u.FL para uma antena ativa externa [62].

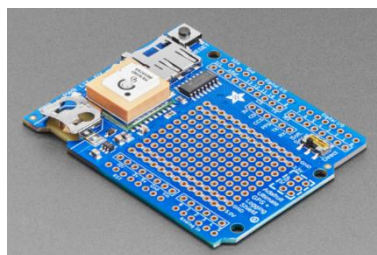


Figura 2 - *Adafruit Ultimate GPS Logger Shield*

Fonte: [62]

Especificações [62]:

- Satélites: 33 de rastreio, 99 de busca;
- Tamanho da antena de patch: 15 mm x 15 mm x 4 mm;
- Taxa de atualização: 1 a 10 Hz;

- Precisão de posição: < 3 metros;
- Precisão de velocidade: 0,1 metros/s;
- Partida quente/fria: 34 segundos;
- Sensibilidade de aquisição: -145 dBm;
- Sensibilidade de rastreamento: -165 dBm;
- Velocidade máxima: 515m/s;
- MTK3333 Corrente operacional: rastreamento de 29 mA, consumo de corrente de 35 mA durante a navegação;
- Saída: NMEA 0183, 9600 baud padrão;
- Suporta DGPS/WAAS/EGNOS;
- Até 210 canais PRN;
- Detecção e redução de interferência;
- Detecção e compensação de múltiplos caminhos.

3.3.2 TTGO LoRa32-OLED

O dispositivo em questão é um módulo baseado no ESP32, que integra o *chip* SX1276, conectividade Wi-Fi, LoRa e um display OLED incorporado. Opera nas bandas de frequência 868–915 MHz, apresentando elevada sensibilidade de recepção, superior a -148 dBm, e uma potência máxima de transmissão de +20 dBm, o que lhe confere uma elevada fiabilidade e capacidade de comunicação a longas distâncias. O módulo dispõe ainda de memória flash integrada de 4 MB, antena Wi-Fi incorporada e um display OLED de 0,96 polegadas, facilitando a visualização local de informações e o processo de depuração. É compatível com o ambiente de desenvolvimento Arduino, permitindo a rápida verificação de programas e o desenvolvimento eficiente de aplicações e produtos baseados em LoRa e IoT [63].

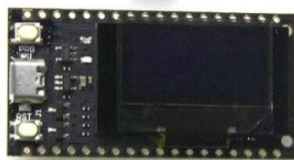


Figura 3 - TTGO LoRa32-OLED

Fonte : [63]

Especificações [63]:

- Tensão operacional: 3,3 V a 7 V;
- Faixa de temperatura operacional: -40°C a +90°C;
- Suporte para análise de protocolo de software Sniffer, modos Station, SoftAP e Wi-Fi Direct;
- Taxas de dados: 150 Mbps @ 11n HT40., 72 Mbps @ 11n HT20, 54 Mbps @ 11g, 11Mbps @ 11b;
- Potência de transmissão: 19,5 dBm a 11b, 16,5 dBm a 11g, 15,5 dBm a 11n;
- Sensibilidade do recetor de até -98 dBm;
- Taxa de transferência sustentada UDP de 135 Mbps.

3.3.3 DS18B20 Digital

Para o desenvolvimento do protótipo, foi usada a versão pré-cabeada e à prova d'água do sensor DS18B20. Útil para quando é necessário medir algo distante ou em condições húmidas. Por se tratar de um sensor digital, não ocorre degradação do sinal, mesmo em longas distâncias. O DS18B20 utiliza comunicação 1-Wire, permitindo precisão de $\pm 0,5$ °C na maior parte de seu intervalo de operação e até 12 bits de resolução no conversor integrado digital-para-analógico. O sensor é compatível com sistemas de 3,0 a 5,0 V, garantindo ampla versatilidade em projetos eletrônicos [64].



Figura 4 - DS18B20 Digital

Fonte : [64]

Especificações técnicas [64]:

- Faixa de temperatura utilizável: -55 a 125°C (-67°F a +257°F);
- Resolução selecionável de 9 a 12 bits;
- Utiliza interface 1-Wire - requer apenas um pino digital para comunicação;
- ID exclusivo de 64 bits gravado no chip;

- Vários sensores podem compartilhar um pino;
- $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ Precisão de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$;
- Sistema de alarme de limite de temperatura;
- O tempo de consulta é inferior a 750 ms;
- Utilizável com alimentação/dados de 3,0 V a 5,5 V.

Foram utilizados os componentes referidos, para o desenvolver do protótipo, dado o acesso aos mesmos e a utilização em projetos anteriores, satisfazendo as nossas necessidades, embora num futuro poder-se-á utilizar outros componentes mais eficiente e versáteis.

3.4 Software

O utilizador poderá visualizar e definir cercas virtuais (os seus polígonos) no mapa através da interface, com a possibilidade de as editar ou apagar.

3.4.1 VS code

O *Visual Studio Code* (VS Code) é um ambiente de desenvolvimento integrado IDE (*Integrated Development Environment*) leve e multiplataforma, desenvolvido pela Microsoft, no âmbito da tecnologia *Electron*, que combina JavaScript, HTML e CSS para criar aplicações desktop baseadas em tecnologias web, isso permite que o mesmo ambiente funcione de forma consistente em Windows, Linux e macOS [65], [66].

3.4.2 Arduino IDE

O Arduino IDE é um ambiente de desenvolvimento integrado de código aberto que utiliza uma linguagem baseada em *Wiring* (C/C++). Oferece uma interface simples e intuitiva, permitindo aos utilizadores escrever, compilar e enviar códigos diretamente para microcontroladores compatíveis, como o ESP32. Essa facilidade torna a plataforma especialmente adequada para projetos de prototipagem rápida e de desenvolvimento tendo uma vasta gama de compatibilidade com microcontroladores e sensores [67].

3.4.3 HiveMQ

O HiveMQ fornece uma plataforma de *streaming* de dados voltada para a IoT, construída com base no protocolo MQTT, através dele é possível criar um *backbone* de dados confiável, permitindo a integração de sensores, dispositivos e aplicações em tempo

real, levando à recolha, processamento e à distribuição eficiente de dados entre diferentes sistemas e serviços [68].

3.4.4 Node-RED

O Node-RED é uma ferramenta de programação visual baseada em fluxo, permitindo que qualquer pessoa crie aplicações que recolham, transformem e visualizem dados, projetada principalmente para conectar dispositivos de hardware, *Application Programming Interfaces* (APIs) e serviços online de forma simples e intuitiva.

Através do Node-RED, pode-se automatizar sistemas por meio da integração de sensores, atuadores, protocolos como MQTT, entre outros, possibilitando a criação de soluções completas de IoT, como a monitorização, controle e comunicação entre dispositivos em tempo real [69].

3.4.5 SQLite

O SQLite é um sistema de gestão de base de dados relacional simples, mas eficiente, que apresenta diversas características que o tornam útil em diversos projetos dos quais se destaca por não depender de servidor, funcionando com uma biblioteca incorporada no software, é leve, garante integridade e consistência de dados e a mesma base de dados pode ser utilizada noutros sistemas, suportando a maior parte da linguagem SQL tradicional. A base de dados é armazenada num único ficheiro com extensão (*.sqlite*) ou (*.db*), contendo as tabelas, índices e metadados [72], [73].

3.4.6 MongoDB vs SQLite

No início do projeto foi utilizado o MongoDB pela flexibilidade e facilidade de configuração, contudo, à medida que o sistema foi sendo desenvolvido, surgiram dificuldades na gestão das relações entre dados, já que o MongoDB não é uma base de dados relacional. Essa limitação dificultou a criação de ligações entre entidades e a execução de consultas mais complexas. Para resolver esses problemas, optou-se por migrar para o SQLite, que oferece suporte nativo a relações entre tabelas. Com isso, tornou-se possível organizar melhor os dados, garantir integridade referencial e simplificar o desenvolvimento.

Tabela VIII - Comparação entre MongoDB e SQLite

Fonte: [71], [72]

Critérios	MongoDB	SQLite
Modelo de Dados	Não relacional (orientado a documentos, formato BSON/JSON)	Relacional (baseado em tabelas com linhas e colunas)
Tipo de Base de Dados	NoSQL (Not Only SQL)	SQL (Structured Query Language)
Armazenamento	Dados armazenados em coleções e documentos dentro de um servidor	Dados armazenados num único ficheiro
Linguagem de Consulta	MongoDB Query Language (MQL), baseada em JSON	SQL padrão
Servidor	Requer servidor (mongodb) executando em segundo plano	Não requer servidor (embutido na aplicação)
Dependência de Rede	Necessita de conexão de rede (cliente-servidor)	Nenhuma (funciona offline)
Estrutura dos dados	Esquema flexível (documentos podem ter estruturas diferentes)	Esquema fixo (campos e tipos definidos)

3.5 Desenvolvimento do Protótipo

O protótipo está dividido em três componentes. A primeira é desenvolvida no arduino, inclui a lógica de programação dos dispositivos que vão recolher e enviar os dados para o servidor. A segunda é desenvolvida no Node-RED, considerando o “cérebro” do sistema, onde se faz toda parte de filtragem de dados, autenticação, criação de utilizador, visualização de dados e manutenção. A terceira é desenvolvida em python, onde se faz a criação e edição de polígonos.

3.5.1 Dispositivos

A programação dos microcontroladores foi desenvolvida no IDE do arduino, tendo a função de recolher dados a cada 5 segundos após o GPS fixar, esses dados são enviados para um recetor e mostrados no display OLED como mostram as figuras. Como cada dispositivo é programado individualmente, então é lhe atribuído um ID para o identificarmos, então no display OLED é apresentado o id de cada dispositivo, o número de satélites que está a apanhar, a latitude, longitude, temperatura (caso tenha algum sensor ligado), data e hora. É de salientar que existe um pequeno interruptor que está inserido no módulo GPS destacado a vermelho na figura 6, deve estar configurado para o software serial, caso isso não aconteça o sistema não faz a leitura das coordenadas. Segue-se o esquema de ligações:

Tabela IX - Conexões

Nota: Elaboração Própria

esp32	Módulo GPS
GND	GND
5V	5V
0	RX
22	TX

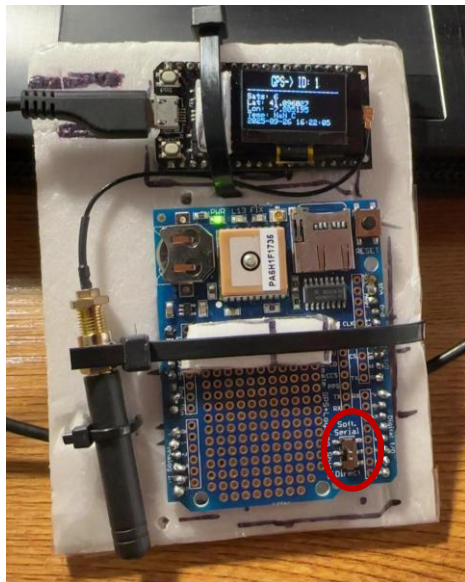


Figura 6 - GPS/1

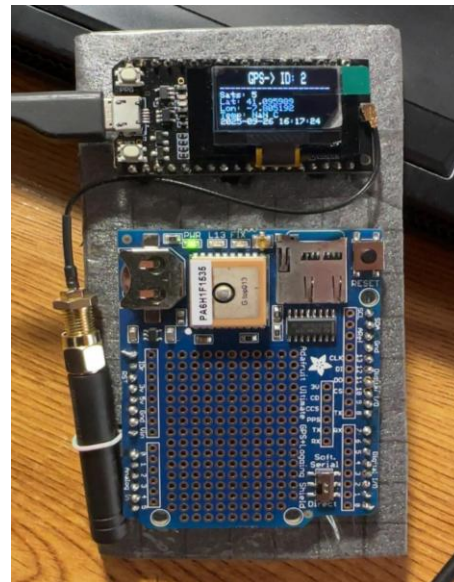


Figura 5 - GPS/2

Segue em seguida na figura 7 uma representação do diagrama de atividades do sistema:

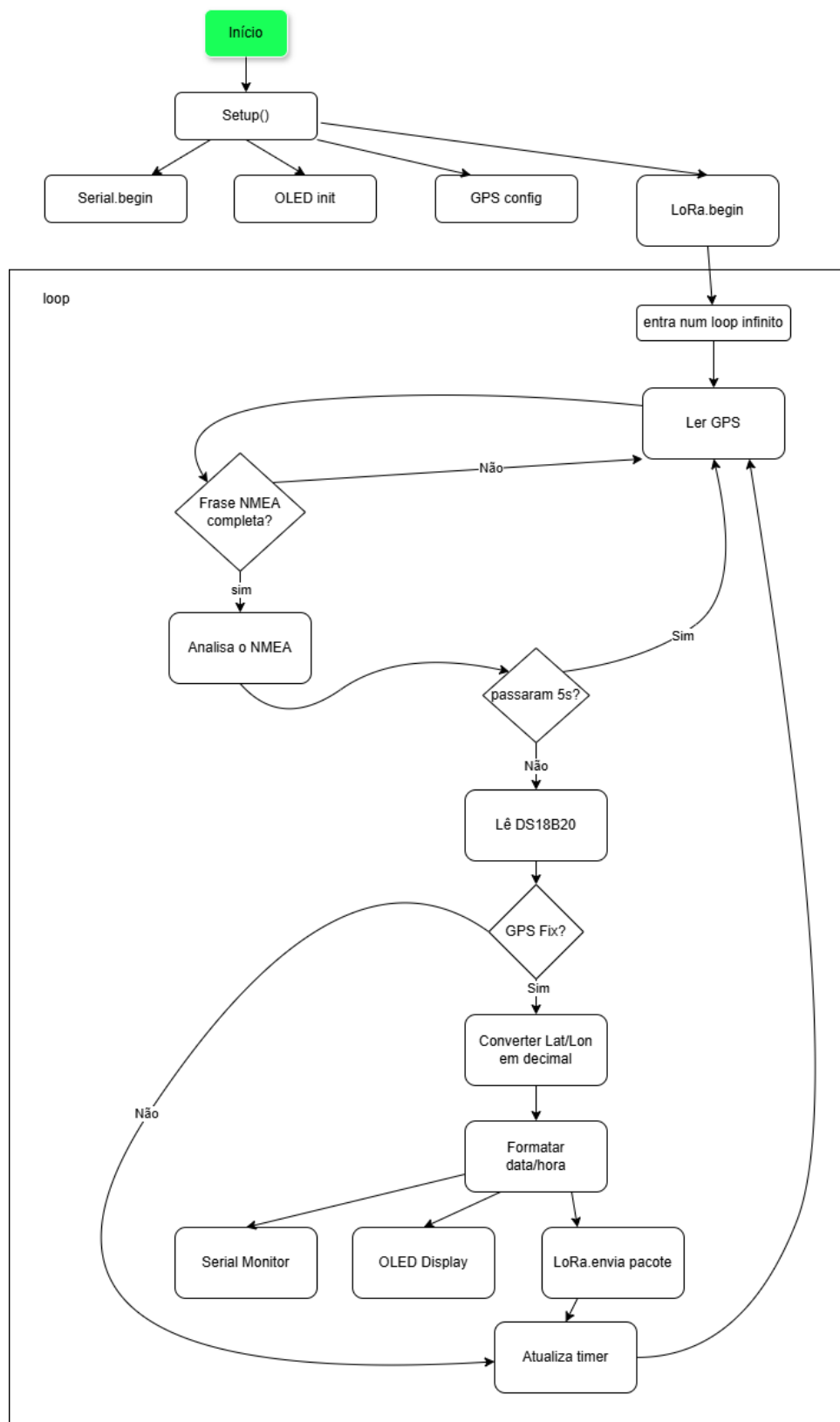


Figura 7 - Diagrama de Atividades/GPS

O fluxograma apresentado descreve o funcionamento lógico do sistema desenvolvido para aquisição, processamento e transmissão de dados de geolocalização e temperatura. O sistema integra um módulo GPS, um sensor de temperatura DS18B20, um display OLED e um módulo de comunicação LoRa.

Inicialmente, ao ligar o dispositivo, o programa executa a comando de inicialização (*setup()*), que ocorre apenas uma vez. Nessa etapa, são inicializados a comunicação serial para fins de depuração, o display OLED para visualização local das informações, o módulo GPS e o módulo LoRa responsável pela transmissão dos dados.

Após a fase de inicialização, o sistema entra num (*loop()*), caracterizando o funcionamento permanente do dispositivo. Nesse laço, o primeiro passo consiste na leitura dos dados provenientes do módulo GPS. O sistema verifica se a frase NMEA veio completa, caso contrário, a leitura do GPS continua até que uma frase válida esteja disponível.

Quando a frase NMEA completa é identificada, os dados são analisados para extração das informações relevantes, como latitude, longitude, data, hora e status do sinal GPS. Em seguida, o sistema verifica se já transcorreu o intervalo de tempo definido (5 segundos) desde a última transmissão. Caso o intervalo ainda não tenha sido atingido, realiza-se a leitura do sensor de temperatura DS18B20.

Posteriormente, é verificado se o módulo GPS possui um posicionamento válido (GPS *Fix*). Caso o *fix* não esteja disponível, o sistema retorna ao início do ciclo de leitura. Quando o *fix* é confirmado, as coordenadas geográficas são convertidas do formato NMEA para o formato de graus decimais, e os dados de data e hora são formatados para uma apresentação legível.

Os dados processados são então enviados simultaneamente para três saídas distintas: o monitor serial, para fins de depuração e supervisão do sistema, o display OLED, para visualização local das informações e o módulo LoRa, que realiza a transmissão dos dados para um sistema remoto.

Por fim, o temporizador interno é atualizado, permitindo o controle do intervalo entre as transmissões, e o sistema retorna ao ponto inicial do *loop*, reiniciando o processo de forma contínua e automatizada.

Após a implementação dos dispositivos responsáveis pela recolha de dados, foi desenvolvido um microcontrolador “recetor” que recebe as informações via LoRa, apresenta-as num display OLED (mostrando ID, Latitude, Longitude e Temperatura) figura 8 e, de seguida, envia por Wi-Fi esses mesmos dados para um broker MQTT (HiveMQ Cloud) através de uma ligação segura TLS/SSL (porta 8883, com certificado CA).

O sistema mantém a conexão Wi-Fi e MQTT ativa, realizando reconexões automáticas sempre que alguma falha ocorre, garantindo assim a continuidade da comunicação.

No código foram desenvolvidas várias funções principais:

- `setup()` → Responsável pela inicialização de todos os módulos: Wi-Fi, OLED, MQTT e LoRa.
- `loop()` → Executa continuamente a receção de dados via LoRa, o envio dos mesmos para o broker MQTT e a atualização do display OLED.
- `mostrarNoOLED()` → Função dedicada à exibição dos dados recebidos no ecrã OLED.
- `callback()` → Trata eventuais mensagens recebidas do broker MQTT.
- `reconnect()` → Assegura a reconexão automática ao broker MQTT caso a ligação seja perdida.

Este dispositivo não requer ligações com outros componentes.

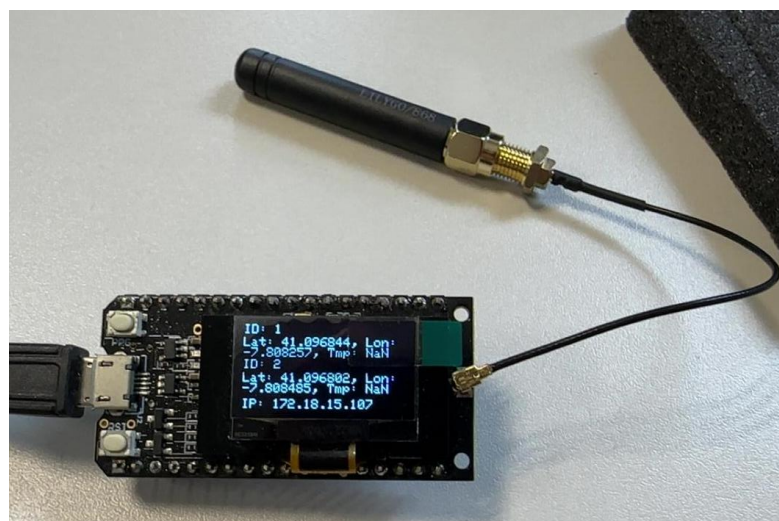


Figura 8 - Recetor

Na figura 9 apresenta-se uma representação do diagrama defluxo de dados do sistema:

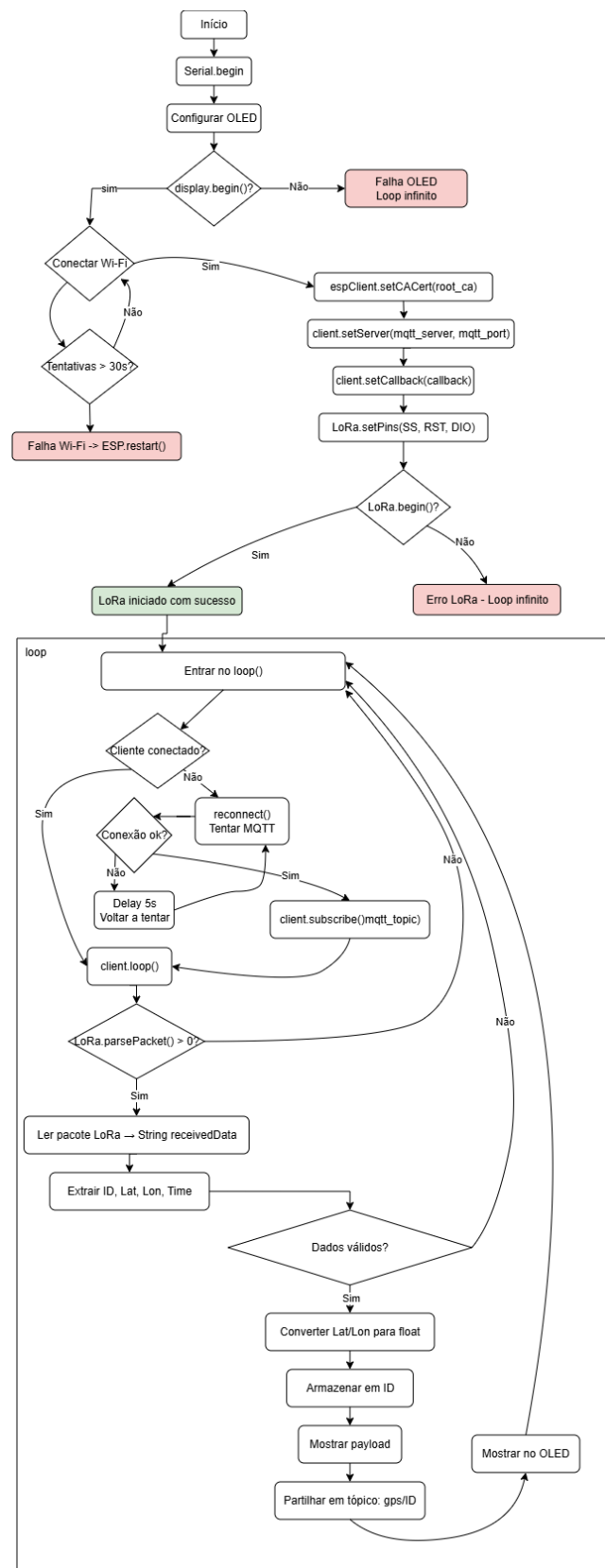


Figura 9 - Diagrama de Fluxo de dados/Recetor

O funcionamento do sistema inicia-se mal seja ligado, e logo depois é estabelecida a comunicação serial para fins de depuração. Em seguida, realiza-se a configuração do display OLED. Caso a inicialização do display falhe, o sistema entra num *loop*, caracterizando uma falha crítica de hardware e impedindo a continuidade da execução.

Após a confirmação do funcionamento do display, o sistema tenta estabelecer conexão com uma rede Wi-Fi. Caso a conexão não seja bem-sucedida, são realizadas tentativas sucessivas; se o número de tentativas ultrapassar o limite definido (30 tentativas), o sistema executa uma reinicialização automática do microcontrolador (ESP.restart), garantindo maior robustez operacional.

Uma vez conectado à rede Wi-Fi, o sistema configura os parâmetros de segurança *Transport Layer Security* (TLS), definindo o certificado de autoridade, e estabelece a conexão com o servidor MQTT, configurando o endereço, a porta de comunicação e a função de *callback* para o tratamento das mensagens recebidas. Na sequência, são definidos os pinos de controle do módulo LoRa, e o sistema tenta inicializar o módulo. Caso a inicialização do LoRa falhe, o sistema entra outra vez num *loop*; caso contrário, a inicialização é considerada bem-sucedida e o programa segue para o ponto principal de execução.

Após as conexões serem todas validadas entramos no (*loop()*) principal, o sistema verifica continuamente o estado da conexão com o broker MQTT. Caso o cliente não esteja conectado, é executada uma rotina de reconexão. Se a tentativa de conexão falhar, o sistema aguarda um intervalo de 5 segundos antes de tentar novamente. Quando a conexão é estabelecida com sucesso, o sistema realiza a inscrição no tópico MQTT previamente definido.

Durante a execução do *loop*, a função de manutenção do cliente MQTT é constantemente chamada para garantir a troca de mensagens com o broker. Paralelamente, o sistema verifica a receção de pacotes via LoRa. Quando um pacote válido é detetado, os dados recebidos são lidos e armazenados numa variável do tipo *string*.

Os dados extraídos do pacote LoRa incluem o identificador do dispositivo, latitude, longitude e *timestamp*. Após a extração, o sistema verifica a validade das informações recebidas. Caso os dados sejam considerados inválidos, o sistema retorna ao início do *loop* principal. Quando os dados são válidos, as coordenadas geográficas são convertidas

para o formato de ponto flutuante, e as informações são organizadas e armazenadas de acordo com o identificador do dispositivo.

Em suma, o payload formatado é exibido no display OLED para visualização local e publicado num tópico MQTT específico, estruturado no formato gps/ID, permitindo a identificação individual de cada dispositivo remoto. Após essas etapas, o sistema retorna ao início do *loop* principal, mantendo a operação contínua e automatizada.

3.5.2 Desenvolvimento no Node-RED

No Node-RED foram criados tópicos MQTT (gps/1 e gps/2) que recebem dados de dispositivos de geolocalização, cada mensagem contém dados no formato da figura 10:

```
ID:1, Lat:41.0967, Lon:-7.8078, Time:2025-09-24 15:30:00, Tmp:23.4
```

Figura 10 - Exemplo dos dados enviados

O broker utilizado é o HiveMQ *Cloud*, configurado no modo MQTTS (porta 8883) para garantir ligação segura (TLS), assim, os sensores publicam as suas leituras e o Node-RED subscreve aos tópicos para recolher os dados.

Cada mensagem recebida é enviada para um nó *Function*, como mostra a figura 11, que de seguida aplica uma expressão regular (regex) para extrair:

- ID → identificação do dispositivo;
- Lat → latitude;
- Lon → longitude;
- Time → data/hora(time);
- Tem → Temperatura (ou “NaN” se não houver valor)

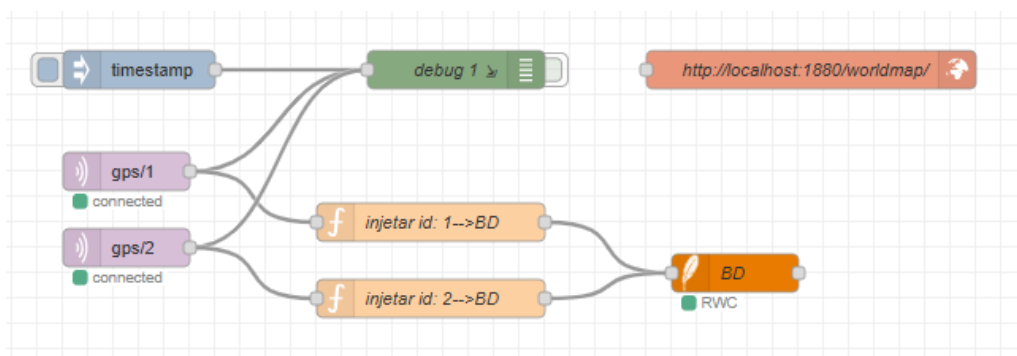


Figura 11 - Fluxo de recolha de dados

Se a mensagem não respeitar o formato esperado, retorna um erro de "Formato inválido", isso garante que os dados são padronizados antes de serem guardados na base de dados. Ambos os dados são processados e enviados para a mesma base de dados, neste caso para a tabela positions.

Com os dados guardados na base de dados corretamente, já os podemos consultar de forma a ter algo mais dinâmico e interativo.

O Node-RED é o cérebro do programa funcionando de acordo com a figura 12, no qual temos um fluxo completo do sistema desenvolvido:

- Login e criação de utilizadores (com bcrypt e SQLite);
- Controlo de sessões com timeout automático (logout após 5 minutos);
- Visualização de terrenos no mapa;
- Monitorização de animais com rotas e alertas por e-mail quando saem fora do terreno do proprietário;
- *Dropdown* dinâmico para seleccionar o animal;
- Envio automático de e-mails e logs de alerta para a base e dados.

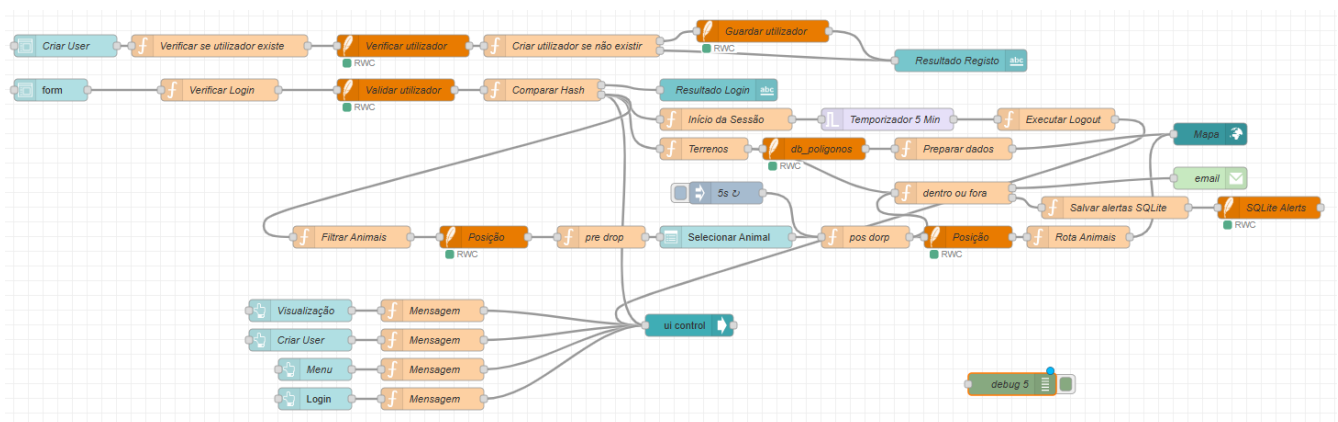


Figura 12 - Fluxo do Sistema/Node-RED

Após a execução do programa, tudo começa na aba de Login, o portal (*ui_form*) de entrada do sistema, ali, o utilizador digita o seu nome de utilizador e *password*, uma vez enviado o formulário para um nó (*function*), o sistema verificava se aquele utilizador existe na base de dados SQLite, garantindo a autenticação básica dos utilizadores.

Se o utilizador não for encontrado, uma mensagem de erro aparece: “Utilizador não encontrado!”. Mas, se existir, a password é comparada de forma segura usando *hashing bcrypt*. Caso a password esteja correta, o sistema regista o utilizador como válido

e conectado e então inicializa todas as variáveis importantes: polígonos do mapa, marcadores e *dropdown* de animais. Logo de seguida, o utilizador é transportado para a aba Menu, no qual pode ter várias opções de controle.

Se for válido → muda para a aba Menu.

Se não for válido → mantém no Login e mostra uma mensagem de erro.

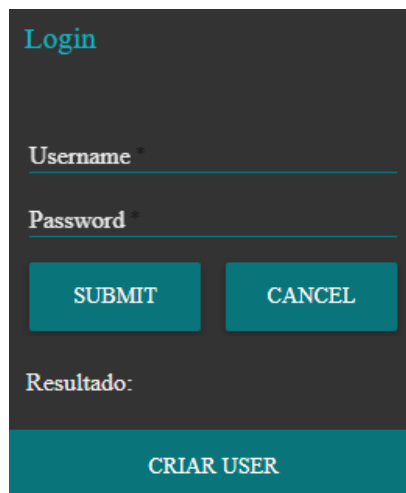
A screenshot of a login form with a dark gray background. At the top left, the word "Login" is written in teal. Below it are two input fields: "Username *" and "Password *", both with teal borders. Under the password field are two teal buttons labeled "SUBMIT" and "CANCEL" in white. Below these buttons is the text "Resultado:" in white. At the bottom of the form is a wide teal button labeled "CRIAR USER" in white.

Figura 13 - Interface Utilizador/Login

Caso o utilizador ainda não se tenha registado, pode o fazer através do botão que tem no (*ui_form*) do login no qual abre um novo (*ui_form*) para criar utilizador onde faz a sua validação e o insere na base de dados. Caso o *username* já exista é apresentado ao utilizador uma mensagem de erro, tendo de escolher outro nome para se poder registar.

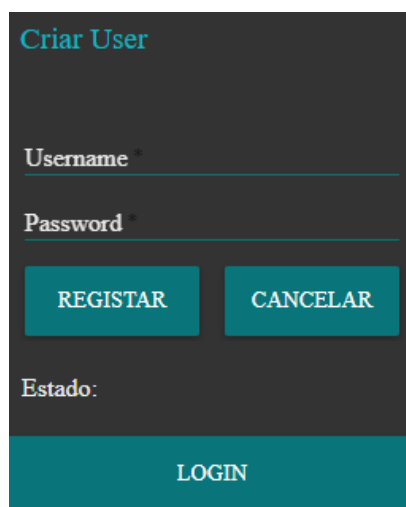
A screenshot of a "Criar User" form with a dark gray background. At the top left, the words "Criar User" are written in teal. Below it are two input fields: "Username *" and "Password *", both with teal borders. Under the password field are two teal buttons labeled "REGISTAR" and "CANCELAR" in white. Below these buttons is the text "Estado:" in white. At the bottom of the form is a wide teal button labeled "LOGIN" in white.

Figura 14 - Interface Utilizador/Criar User

Após a validação do login, é iniciado um temporizador de sessão, onde um *trigger* conta o tempo definido (neste caso 5 minutos). Em paralelo, um nó *function + inject* atualizam a cada 1 segundo a visualização do tempo restante no *dashboard* (mostrando, “Sessão expira em 04:59...”).

Se o tempo acabar → o *trigger* envia mensagem de "logout" e redireciona o utilizador de volta para a aba Login automaticamente, isso garante-nos segurança encerrando sessões inativas.

Os botões no Menu (*ui_button*) mudam entre abas (*ui_ui_control*), o que torna a navegação do sistema mais intuitiva e controlada dentro do Node-RED, podendo ser adaptado para melhorias futuras.

Exemplo:

Logout → envia { tab: "login" }.

Visualização → envia { tab: "visualização" }.

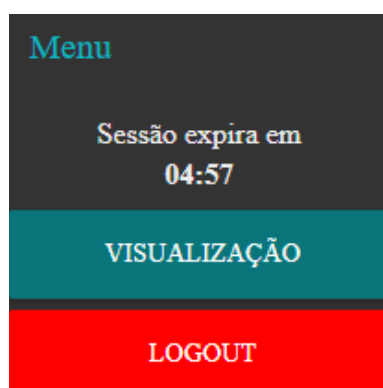


Figura 15 - Interface Utilizador/Menu

Para os polígonos, o sistema consulta a base de dados, procurando todos os terrenos associados ao utilizador, cada polígono é preparado e desenhado no mapa, com preenchimento semi-transparente para melhor visualização, mostrando não só os terrenos, mas também os movimentos dos animais dentro deles.

Quando o utilizador selecionar um animal específico no *dropdown*, o sistema traça a sua rota no mapa, conectando os pontos de latitude e longitude e marcando o ponto mais recente com um ícone distinto sendo atualizado a cada nova receção de dados.

O sistema também faz a monitorização caso algum animal saia dos limites do polígono do utilizador, quando isso acontece, um alerta é enviado por e-mail e registado

na base de dados SQLite, se o animal permanecer fora por mais de cinco minutos, novos alertas serão enviados, garantindo que nada passe despercebido.

Assim, cada utilizador pode gerir os seus terrenos, fazer a monitorização dos seus animais e ter a tranquilidade de que tudo está sob controlo.

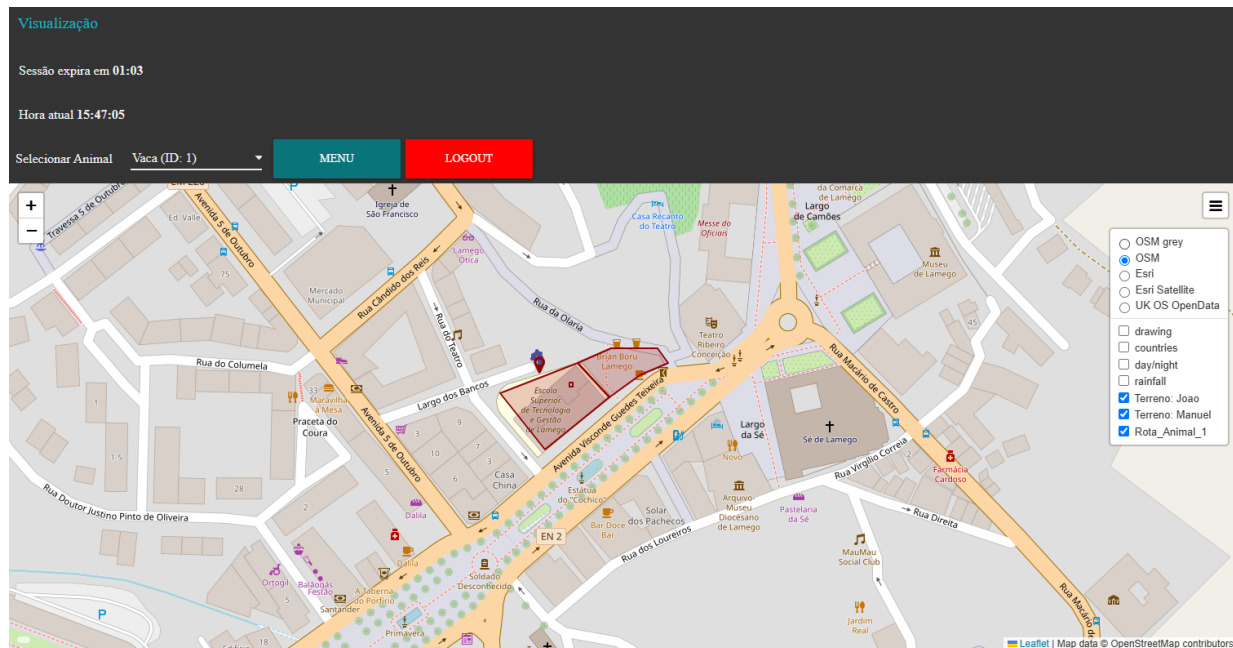


Figura 16 - Interface Utilizador/Visualização

3.5.3 Desenvolvimento no VS code

Por fim temos a aplicação desenvolvida em python no vs code consiste numa arquitetura cliente-servidor, composta por três camadas principais: *frontend*, *backend* e base de dados SQLite, esta separação de responsabilidades garante modularidade, escalabilidade e facilidade de manutenção.

A camada cliente, executada no navegador do utilizador, é responsável pela interação com o mapa e pelos elementos de interface. É implementada em HTML5, CSS e JavaScript, recorrendo às bibliotecas *Leaflet* e *Leaflet.Draw* para manipulação de elementos geográficos. O *frontend* comunica com o servidor através de pedidos HTTP assíncronos (AJAX) utilizando o método *fetch()*, trocando dados no formato JSON.

A camada servidor, desenvolvida em *Flask*, gere a autenticação dos utilizadores, a autorização de acesso e todas as operações de criação, leitura, atualização e eliminação (CRUD) dos polígonos. Esta camada expõe um conjunto de *endpoints RESTful*,

permitindo que o *frontend* interaja de forma estruturada e segura com a base de dados, o servidor também é responsável pela gestão de sessões de utilizador

Por fim, a camada de dados utiliza uma base de dados SQLite, escolhida pela sua leveza e simplicidade de integração, nela são armazenadas as informações dos utilizadores, as credenciais criptografadas e as entidades geográficas (polígonos) em formato GeoJSON. Esta estrutura permite a recuperação e manipulação eficiente das geometrias no servidor. A comunicação entre as camadas segue o fluxo apresentado na figura 17:

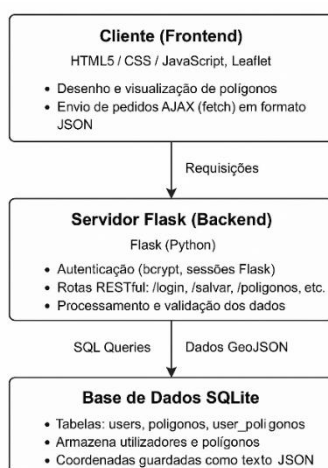


Figura 17 - Fluxo de Camadas

Esta arquitetura apresenta uma separação clara entre a lógica de aplicação e a interface de utilizador, suportando a futura integração com outras bases de dados ou serviços geográficos externos, como APIs GIS ou servidores WMS/WFS.

Na implementação do *backend* (Flask e SQLite), o *backend* foi desenvolvido com o *framework* Flask, uma biblioteca leve e flexível em Python, adequada para aplicações web de pequena e média escala. O código é estruturado de forma modular, permitindo a fácil extensão de novas funcionalidades e a manutenção do princípio *separation of concerns*.

No geral, a aplicação inicia com a criação de um objeto Flask, ao qual são associadas às rotas principais. Uma chave secreta é definida (`app.secret_key`) para garantir a segurança das sessões.

Foi implementada uma função `get_db_connection()` que cria e retorna uma ligação à base de dados SQLite, configurada com `row_factory` para permitir acesso aos campos por nome.

De forma automática, na primeira execução, a função *criar_tabelas()* cria as três tabelas principais caso não existam:

- *users*: guarda o identificador, o nome de utilizador e a palavra-passe encriptada;
- *poligonos*: armazena o nome, as coordenadas em formato JSON e o utilizador proprietário;
- *user_poligonos*: tabela de associação que permite relacionar utilizadores e polígonos (para eventual partilha futura).

A autenticação é gerida através das rotas */login (GET e POST)* e */logout*, quando o utilizador submete as credenciais, o servidor lê os dados enviados no corpo da requisição em formato JSON e faz a consulta na base de dados pelo nome de utilizador e por fim compara a palavra-passe fornecida com o *hash* armazenado, utilizando a biblioteca *bcrypt*. Em caso de sucesso, o servidor armazena o identificador e o nome do utilizador na sessão (*session["user_id"]*, *session["user_nome"]*), permitindo o controlo de acesso nas restantes rotas.

A segurança é reforçada pela utilização de *hashes* salteados gerados por *bcrypt.gensalt()*, tornando impraticável a recuperação das palavras-passe originais mesmo em caso de acesso indevido à base de dados.

O *backend* disponibiliza uma API interna, implementando as seguintes operações:

Tabela X - Operações da Aplicação

Nota: Elaboração Própria

Método	Rota	Descrição
GET	/	Página principal (verifica sessão)
POST	/login	Termina a sessão
GET	/logout	Regista novo polígono
POST	/salvar	Lista todos os polígonos existentes
PUT	/editar_poligonos<id>	Atualiza nome e coordenadas
DELETE	/apagar_poligonos<id>	Remove polígono existente

Cada rota inclui validações de sessão e permissões, apenas o proprietário do polígono ou o utilizador “Admin” pode editar ou eliminar as entidades, as coordenadas dos polígonos são recebidas e armazenadas em formato GeoJSON, permitindo interoperabilidade com sistemas GIS e a camada de persistência é simples e eficiente:

cada operação utiliza ligações diretas à base SQLite, com *commits* explícitos após cada modificação e o formato JSON é convertido para texto com *json.dumps()* e restaurado com *json.loads()*.

O sistema diferencia dois perfis de utilizador, o utilizador comum pode criar, visualizar, editar e eliminar apenas os seus próprios polígonos, já o administrador (Admin), possui acesso total, podendo editar ou remover qualquer polígono da base de dados. Esta lógica é aplicada diretamente nas rotas de edição e remoção, verificando o campo *session["user_nome"]* antes de executar as operações.

Na implementação do *frontend* (Leaflet e JavaScript), a camada de apresentação foi desenvolvida em HTML5, CSS3 e JavaScript, com forte integração das bibliotecas *Leaflet* e *Leaflet.Draw* para o tratamento de dados geoespaciais. O objetivo foi oferecer ao utilizador uma interface intuitiva que permita interagir com o mapa, desenhar polígonos e gerir as suas geometrias de forma direta.

O *frontend* é composto por duas páginas principais:

- *login.html* – apresenta campos para o nome de utilizador e palavra-passe, enviando os dados via *fetch()* para o *endpoint /login*.

Caso o servidor confirme o *login*, o utilizador é redirecionado para a página principal.

- *index4.html* – contém o mapa interativo e os controlos de manipulação de polígonos.

Incluindo botões para salvar polígonos, e *links* para *logout*, além de campos para nomear as figuras desenhadas.

O mapa é criado através da função *L.map()*, centrado numa localização de referência (Portugal). As camadas de fundo são fornecidas pelo serviço OpenStreetMap, com atribuição automática de créditos.

Foram criados três grupos de camadas:

- *meusPoligonos*: contém os polígonos do utilizador autenticado;
- *outrosPoligonos*: agrega os polígonos de outros utilizadores, apenas para visualização;
- *editGroup*: grupo temporário para edição, utilizado quando o utilizador tem permissões administrativas.

Os controlos de desenho são configurados com *Leaflet.Draw*, permitindo apenas a criação de polígonos. Outros tipos de forma (linhas, círculos ou marcadores) foram desativados para simplificar a interação.

Quando o utilizador desenha um novo polígono, o evento *L.Draw.Event.CREATED* é capturado. O script extrai as coordenadas em formato [longitude, latitude], converte-as para o formato GeoJSON e armazena-as temporariamente numa variável *currentPolygon*.

As operações principais são realizadas através de requisições assíncronas (AJAX) utilizando o método *fetch()*:

- Salvar: envia POST /salvar com { nome, coordenadas }.
- Editar: envia PUT /editar_poligono/{id} após a alteração de vértices.
- Apagar: envia DELETE /apagar_poligono/{id} quando o utilizador confirma a eliminação.
- Carregar: solicita GET /poligonos para obter todos os polígonos e desenhá-los no mapa.
- Cada resposta JSON é processada pelo JavaScript, que atualiza dinamicamente o mapa e exibe mensagens de estado com *alert()*.

Os polígonos são diferenciados por cor, de acordo com o tipo de utilizador:

- Verde: polígonos do próprio utilizador;
- Laranja: polígonos editáveis pelo administrador;
- Cinzento: polígonos pertencentes a outros utilizadores (modo apenas leitura).

Cada polígono contém um *popup* informativo com o nome e o dono, e, quando aplicável, um botão “Apagar” que invoca a função *apagarPoligono(id)*.

O evento *L.Draw.Event.EDITED* permite que os polígonos sejam modificados graficamente. Ao concluir a edição, o script recolhe as novas coordenadas e envia um pedido *PUT* ao servidor.

A interface foi desenhada com simplicidade e clareza, priorizando a experiência do utilizador. O mapa ocupa a totalidade da área útil da página (*height: 600px; width: 100%;*), e os controlos são intuitivos e minimalistas.

A escolha do *Leaflet* deve-se à sua leveza, código aberto e grande compatibilidade com browsers modernos, além da facilidade de integração com APIs externas.

O *frontend* proporciona uma interação direta com os dados geográficos, abstraindo a complexidade da comunicação com o servidor. O uso de tecnologias web puras (sem dependência de *frameworks* pesadas) torna o sistema rápido, compatível e de fácil manutenção.

A combinação de *Leaflet*, *Leaflet.Draw* e *Flask* resulta numa aplicação geográfica interativa capaz de gerir entidades espaciais de forma colaborativa e controlada, integrando a simplicidade de um ambiente web com funcionalidades típicas de um sistema de informação geográfica básico.

Ao iniciar a aplicação, o utilizador depara-se com o seguinte layout:

Login

Username	Password	Entrar
---------------------------------------	---	---------------------------------------

Figura 18 - Layout do Login/Criar Polígono

Após o início de sessão bem sucedido, é apresentado ao utilizador um layout equivalente ao da figura 20, onde mostra o seu polígono contornado a verde e os restantes a cinzento, no caso de ser o administrador, é apresentado um layout equivalente ao da figura 19 com os contornos de todos os polígonos a cor de laranja, podendo ele editar ou apagar qualquer um dos polígonos existentes como mostra na figura 21.

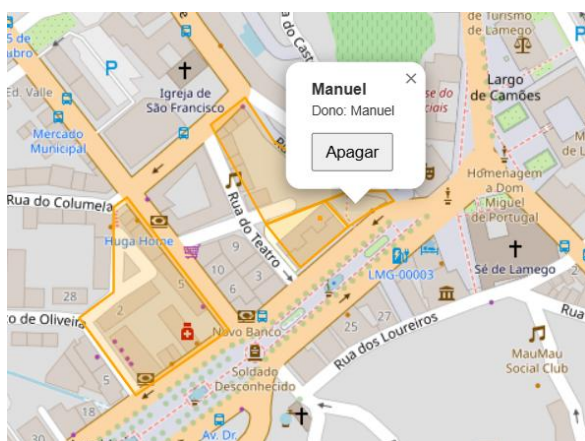


Figura 19 - Layout Admin/Criar Polígonos

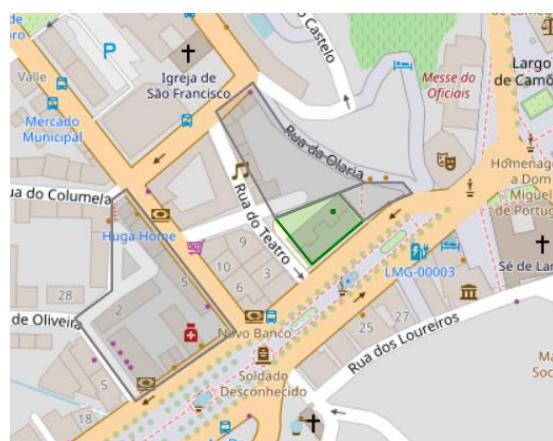


Figura 20 - Layout do utilizador/Criar Polígono

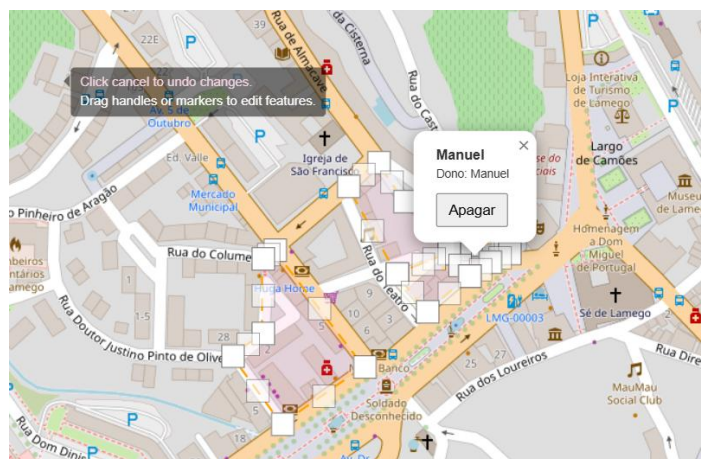


Figura 21 - Layout Edit Admin/Criar Polígono

3.5.4 Base de Dados

A base de dados foi desenvolvida em SQLite e tem como finalidade dar suporte a um sistema de monitorização de animais, gestão de áreas geográficas e emissão de alertas. A estrutura foi projetada de forma a garantir simplicidade, integridade referencial e eficiência na consulta de dados, contemplando sete tabelas principais: *alerts*, *animais*, *poligonos*, *positions*, *user_poligonos*, *users* e *sqlite_sequence* (esta última é integrada automaticamente pelo SQLite).

O modelo de dados segue um paradigma relacional, com utilização de chaves primárias autoincrementadas e chaves estrangeiras para manter a coerência entre entidades. A opção por SQLite justifica-se pela leveza, portabilidade e facilidade de integração com aplicações móveis ou embarcadas, geralmente utilizadas em sistemas de controlo e monitorização ambiental.

Tabela *users*: A tabela *users* armazena as informações dos utilizadores do sistema, incluindo username, password e email. Esta tabela constitui a base da gestão de permissões e da associação de utilizadores aos restantes elementos do sistema.

Tabela *animais*: A tabela *animais* representa cada animal monitorizado. Armazena características essenciais como nome e espécie, além de uma chave estrangeira *user_id*, que permite associar cada animal ao utilizador responsável. Esta relação possibilita a gestão individualizada dos animais por diferentes utilizadores.

Tabela *positions*: Esta tabela é responsável por registar as posições geográficas dos animais ao longo do tempo. Contém coordenadas de latitude e longitude, além de um

O modelo apresenta um bom nível de normalização, evitando redundâncias e garantindo integridade. A separação entre posições, alertas e animais promove escalabilidade, permitindo armazenar grandes volumes de dados temporais sem comprometer a estrutura das entidades principais.

A inclusão da tabela `user_poligonos` aumenta a flexibilidade do sistema, tornando-o adequado para cenários colaborativos ou multiutilizador. A ausência de índices secundários pode impactar o desempenho em bases de dados extensas; contudo, dado que o sistema utiliza SQLite e contém um volume moderado de dados, essa escolha pode ter sido feita para simplificar a implementação inicial.

3.5.5 Resultados Experimentais e Testes

Ao longo do projeto, foram conduzidos testes com o objetivo de analisar a confiabilidade do GPS, verificar a ocorrência de perda de pacotes e avaliar a intensidade e estabilidade do sinal. Nas figuras 23 e 24, observa-se que, a certa altura, houve perda de sinal sendo que o GPS 2 não transmitiu o seu pacote de dados durante algum tempo, podendo ser falta de estabilidade na comunicação de rede.

	id	animal_id	latitude	longitude	timestamp
	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
1224	1318	1	41.097038	-7.808513	14/11/2025, 15:08:43
1225	1319	2	41.097061	-7.80843	14/11/2025, 15:08:44
1226	1320	1	41.097038	-7.808506	14/11/2025, 15:08:48
1227	1321	1	41.097038	-7.808505	14/11/2025, 15:08:53
1228	1322	2	41.097061	-7.808427	14/11/2025, 15:08:54
1229	1323	1	41.097038	-7.808503	14/11/2025, 15:08:58
1230	1324	1	41.097031	-7.808501	14/11/2025, 15:09:03
1231	1325	2	41.097061	-7.808423	14/11/2025, 15:09:04
1232	1326	1	41.097031	-7.808498	14/11/2025, 15:09:08
1233	1327	1	41.097031	-7.808497	14/11/2025, 15:09:13
1234	1328	2	41.097046	-7.80845	14/11/2025, 15:09:14
1235	1329	1	41.097038	-7.808498	14/11/2025, 15:09:18
1236	1330	1	41.097038	-7.808505	14/11/2025, 15:09:23
1237	1331	2	41.097038	-7.808448	14/11/2025, 15:09:24
1238	1332	1	41.097046	-7.808508	14/11/2025, 15:09:28
1239	1333	1	41.097046	-7.808513	14/11/2025, 15:09:33
1240	1334	2	41.097038	-7.808441	14/11/2025, 15:09:34
1241	1335	1	41.097054	-7.808517	14/11/2025, 15:09:38
1242	1336	1	41.097061	-7.80852	14/11/2025, 15:09:43
1243	1337	2	41.097031	-7.80845	14/11/2025, 15:09:44
1244	1338	1	41.097061	-7.808524	14/11/2025, 15:09:48
1245	1339	1	41.097069	-7.808528	14/11/2025, 15:09:53
1246	1340	2	41.097046	-7.808461	14/11/2025, 15:09:54
1247	1341	1	41.097069	-7.808532	14/11/2025, 15:09:58
1248	1342	1	41.097069	-7.808539	14/11/2025, 15:10:03

Figura 23 - Perda de Pacotes 1/2

	id	animal_id	latitude	longitude	timestamp
	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
1250	1344	1	41.097069	-7.80854	14/11/2025, 15:10:08
1251	1345	1	41.09708	-7.808539	14/11/2025, 15:10:13
1252	1346	2	41.097046	-7.808482	14/11/2025, 15:10:14
1253	1347	1	41.09708	-7.808539	14/11/2025, 15:10:18
1254	1348	1	41.097004	-7.808357	14/11/2025, 15:21:44
1255	1349	1	41.096996	-7.808363	14/11/2025, 15:21:49
1256	1350	1	41.096996	-7.808372	14/11/2025, 15:21:54
1257	1351	1	41.096989	-7.808373	14/11/2025, 15:21:59
1258	1352	1	41.096981	-7.808382	14/11/2025, 15:22:04
1259	1353	1	41.096981	-7.80839	14/11/2025, 15:22:09
1260	1354	1	41.096973	-7.808391	14/11/2025, 15:22:14
1261	1355	1	41.096981	-7.808388	14/11/2025, 15:22:19
1262	1356	1	41.096989	-7.808383	14/11/2025, 15:22:24
1263	1357	1	41.096989	-7.808378	14/11/2025, 15:22:29
1264	1358	1	41.096996	-7.808372	14/11/2025, 15:22:34
1265	1359	1	41.096996	-7.808368	14/11/2025, 15:22:39
1266	1360	1	41.096996	-7.808355	14/11/2025, 15:22:52
1267	1361	1	41.096996	-7.808343	14/11/2025, 15:22:52
1268	1362	1	41.096996	-7.808335	14/11/2025, 15:22:54
1269	1363	1	41.096996	-7.808335	14/11/2025, 15:22:59
1270	1364	1	41.096996	-7.808342	14/11/2025, 15:23:04
1271	1365	1	41.096996	-7.808349	14/11/2025, 15:23:09
1272	1366	1	41.096989	-7.808362	14/11/2025, 15:23:19
1273	1367	1	41.096966	-7.80837	14/11/2025, 15:23:24
1274	1368	1	41.096947	-7.808367	14/11/2025, 15:23:29

Figura 24 - Perdas de Pacotes 2/2

Já nas Figuras 25 e 26, observa-se novamente que o sinal do GPS 2 apresentou instabilidade, apesar de ambos os dispositivos estarem posicionados lado a lado. Essa discrepância indica que a perda de pacotes não está relacionada à posição ou proximidade física dos equipamentos, sugerindo que fatores internos do GPS, interferências temporárias ou instabilidade na comunicação podem ter causado a falha.

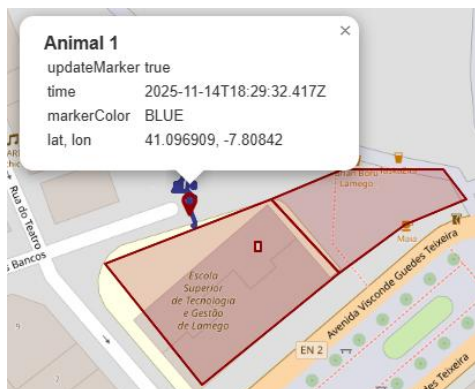


Figura 26 - Posição Correta do GPS

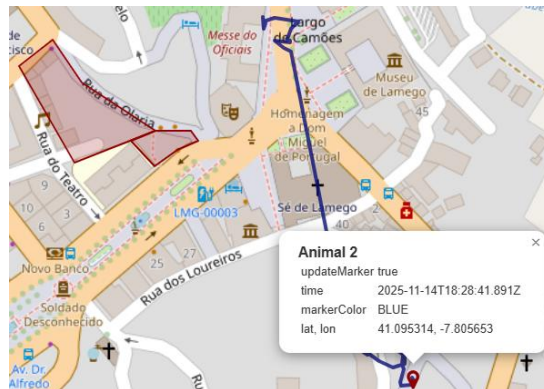


Figura 25 - Erro na Posição do GPS

3.5.6 Limitações

Durante a execução do projeto, foram identificadas algumas limitações que, embora não comprometam a validação da prova de conceito, evidenciam oportunidades a melhorar para futuras versões do sistema. A primeira diz respeito à autonomia da bateria, que se mostrou limitada, principalmente quando o dispositivo opera em modo de transmissão contínua. Essa restrição pode reduzir o tempo de funcionamento em campo e exigir estratégias de otimização energética.

Outra limitação observada está relacionada à sensibilidade do módulo GPS, cuja precisão diminui em regiões de relevo acidentado ou cobertas por densa vegetação, o que pode impactar a qualidade dos dados de localização, fornecendo dados irreais. Além disso, verificou-se a ausência de redundância nos canais de comunicação, fato que pode ocasionar perdas temporárias de dados em áreas sem cobertura LoRaWAN.

Por fim, constatou-se que a interface desenvolvida em Node-RED é adequada para fins de prototipagem e testes, porém apresenta limitações quanto à escalabilidade e robustez necessárias em ambientes produtivos. Apesar dessas restrições, o sistema atendeu plenamente aos objetivos da prova de conceito, demonstrando o seu potencial de aplicação e servindo como base para futuras melhorias.

4 CONCLUSÃO

4.1 Conclusões

O projeto permitiu desenvolver uma prova de conceito funcional de um sistema de monitorização de animais em espaços agrícolas abertos, baseado em tecnologia LoRaWAN e integrado numa plataforma de gestão em Node-RED.

O sistema cumpre os principais objetivos propostos, demonstrando:

- Baixo custo e alta autonomia energética em relação a soluções comerciais;
- Fiabilidade de comunicação em distâncias superiores a 2 km;
- Interface web funcional para visualização de localização e alertas de cerca virtual;
- Arquitetura modular e escalável, facilitando futuras expansões.

Confirmou-se que a tecnologia LoRaWAN constitui uma solução robusta e viável para a implementação de sistemas de pecuária de precisão. Os resultados obtidos demonstram a sua elevada eficiência na monitorização de parâmetros relevantes, aliada a uma excelente relação custo/benefício, baixos consumos energéticos e ampla cobertura de comunicação. Estas características tornam a LoRaWAN particularmente adequada para a monitorização contínua em áreas rurais e remotas, onde outras tecnologias apresentam limitações técnicas ou económicas. Assim, este estudo evidencia o potencial da LoRaWAN como uma ferramenta estratégica para a modernização da atividade pecuária, contribuindo para uma gestão mais eficiente, sustentável e baseada em dados.

4.2 Contribuições do Trabalho

O presente projeto contribui de forma significativa para o avanço das soluções de monitorização de animais em espaços agrícolas abertos, ao propor e validar uma prova de conceito baseada em tecnologias de comunicação LoRaWAN e plataformas de integração IoT. As principais contribuições podem ser agrupadas em várias vertentes:

Contribuição tecnológica - Foi desenvolvida uma arquitetura modular que combina sensores de temperatura, módulos GPS e comunicação LoRaWAN, demonstrando a viabilidade do sistema. A implementação de um protocolo de comunicação estável, aliado à integração com Node-RED e HiveMQ, permitiu a transmissão fiável de dados em tempo real e a criação de uma base sólida para futuras aplicações comerciais de pecuária inteligente.

Contribuição prática - A solução proposta foi testada com sucesso em ambiente real, comprovando o alcance e fiabilidade da rede LoRaWAN em zonas de baixa densidade de cobertura. O sistema permite a criação de cercas virtuais dinâmicas, alertas automáticos e registo histórico de dados, funcionalidades essenciais para melhorar a gestão pecuária e reduzir perdas associadas a fugas ou doenças nos animais.

Contribuição científica e social - Do ponto de vista científico, o projeto reforça o potencial das *Low Power Wide Area Networks* para a transformação digital do setor agropecuário, contribuindo com dados e análises que podem servir de base para estudos futuros em agricultura e pecuária de precisão. Em termos sociais e económicos, a proposta oferece uma alternativa acessível para pequenos e médios produtores, promovendo a sustentabilidade, a eficiência energética e o bem-estar animal através do uso de tecnologia aberta e replicável.

Contribuição para o conhecimento - Este projeto constitui um recurso didático e técnico que pode servir como base para outros projetos académicos e de investigação na área da IoT aplicada ao ambiente agrícola.

A documentação do sistema, código-fonte, esquemas de *hardware* e fluxos Node-RED permitem a reprodutibilidade da solução, favorecendo a continuidade de estudos em instituições de ensino ou em contextos empresariais.

4.3 Trabalhos Futuros

Com base nas limitações identificadas e nos resultados obtidos durante a execução do projeto, foram definidas algumas recomendações que visam a evolução do protótipo para um produto mais robusto e adequado a aplicações reais.

Em primeiro lugar, recomenda-se a integração de algoritmos de inteligência artificial, por meio da aplicação de modelos simples de *machine learning*, como regressão ou *clustering*, com o objetivo de detetar padrões anómalos de comportamento relacionados ao movimento, temperatura e localização dos animais. Essa abordagem pode aprimorar significativamente a capacidade de análise e diagnóstico do sistema.

Outra recomendação importante refere-se à otimização energética. A implementação de modos de “*sleep*” no microcontrolador, bem como a utilização de

estratégias de transmissão baseadas em eventos, pode aumentar de forma considerável a autonomia da bateria e reduzir o consumo energético global do dispositivo.

Sugere-se também a recolha e validação de dados em campo, abrangendo diferentes espécies e ambientes agrícolas, de modo a verificar a fiabilidade do sistema em condições reais de operação.

Algo a acrescentar, passaria pela elaboração de uma declaração de consentimento para com os utilizadores, caso algum deles queira fazer a partilha com outro.

Além disso, propõe-se o desenvolvimento de uma aplicação web ou móvel dedicada, migrando a atual interface desenvolvida em Node-RED para uma plataforma mais escalável, como React ou Flutter. Essa aplicação deve incluir mecanismos de autenticação e *dashboards* dinâmicos, capazes de proporcionar uma experiência de monitorização mais completa e intuitiva.

Outra possibilidade de melhoria envolve a adoção de fontes de energia renováveis, como pequenos painéis solares ou colares com recarga solar, que podem reduzir a dependência de substituição de baterias e tornar o sistema mais sustentável.

Por fim, recomenda-se o reforço da robustez mecânica do dispositivo, tornando-o resistente à água, poeira e impactos, de forma a garantir maior durabilidade e confiabilidade em ambientes externos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

- [1] “Embrapa: Internet das Coisas efetiva modelo de Pecuária 4.0.” Accessed: Nov. 17, 2024. [Online]. Available: <https://agevolution.canalrural.com.br/embrapa-internet-das-coisas-efetiva-modelo-de-pecuaria-4-0/>
- [2] Aliger, “IoT na pecuária: qual a importância para o sucesso do setor?” Accessed: Nov. 17, 2024. [Online]. Available: <https://aliger.com.br/iot-na-pecuaria-qual-a-importancia-para-o-sucesso-do-setor/>
- [3] R. Ribeiro dos Santos, P. Olã Bressan, F. de Oliveira de Araújo, and F. Villa Alves, “Uso de Sensores na Pecuária,” 2014. Accessed: Nov. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1010805/1/usosensoresnapecuariasantosetal.pdf>
- [4] “Como a IoT tem revolucionado a produção animal na pecuária | Blog da Superbid.” Accessed: Nov. 17, 2024. [Online]. Available: <https://blog.superbid.net/como-a-iot-tem-revolucionado-a-producao-animal-na-pecuaria/>
- [5] M. S. Ahmad and A. U. Zaman, “IoT-Based Smart Agriculture Monitoring System with Double-Tier Data Storage Facility,” pp. 99–109, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-3607-6_8.
- [6] A. F. Ali, “Empowering Somali Farmers through IoT: A Pathway to Sustainable Agriculture and Economic Growth.” Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/375423795_Empowering_Somali_Farmers_through_IoT_A_Pathway_to_Sustainable_Agriculture_and_Economic_Growth
- [7] L. Schulthess, F. Longchamp, C. Vogt, and M. Magno, “A Lora-Based and Maintenance-Free Cattle Monitoring System for Alpine Pastures and Remote Locations,” *11th International Workshop on Energy Harvesting & Energy-Neutral Sensing Systems (ENSys’ 23)*, November 12, 2023, Istanbul, Turkiye, vol. 1, no. 23, Jun. 2024, doi: 10.1145/3628353.3628549.
- [8] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [9] I. Akhigbe, K. Munir, O. Akinade, L. Akanbi, and L. O. Oyedele, “IoT Technologies for Livestock Management: A Review of Present Status, Opportunities, and Future Trends,” *Big Data and Cognitive Computing 2021, Vol. 5, Page 10*, vol. 5, no. 1, p. 10, Feb. 2021, doi: 10.3390/BDCC5010010.
- [10] J. A. Small, A. D. Kennedy, and S. H. Kahane, “Core body temperature monitoring with passive transponder boluses in beef heifers,” *Can J Anim Sci*, vol. 88, no. 2, pp. 225–235, 2008, doi: 10.4141/CJAS07023.

- [11] ABINC, “IoT em 2024: novas tendências apontam para uma revolução conectada.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://abinc.org.br/iot-em-2024-novas-tendencias-apontam-para-uma-revolucao-conectada/>
- [12] Allconecta-TELECOM, “IoT: O que é e o que esperar em 2024.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://allconecta.com/blog/iot-o-que-%C3%A9-e-o-que-esperar-em-2024>
- [13] 3Energia, “Tendências Futuras na IoT: O Que Esperar na Revolução Conectada - 3E Energia.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://3eenergia.com/industria-4-0/tendencias-futuras-na-iot-o-que-esperar-na-revolucao-conectada/>
- [14] Inforchannel, “IoT em 2024 traz tendências que apontam para uma revolução conectada - Inforchannel.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://inforchannel.com.br/2023/11/29/iot-em-2024-novas-tendencias-apontam-para-uma-revolucao-conectada-terminar/>
- [15] Portal MKT Digital, “A Internet das Coisas IoT: Uma Revolução Tecnológica Transformando o Mundo Conectado.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://portalmktdigital.com.br/a-internet-das-coisas-iot-uma-revolucao-le/>
- [16] Vagner Bom Jesus, “Uma visão geral sobre a técnica de LoRa e LoRaWAN.” Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: <https://vagnerbomjesus.medium.com/uma-vis%C3%A3o-geral-sobre-a-t%C3%A9cnica-de-lora-e-lorawan-b0cd4504ff11>
- [17] A. R. Facina, “Desenvolvimento de protótipo de rastreamento bovino usando a tecnologia de comunicação LoRa.” Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1239581>
- [18] I. Drotar, B. Lukacs, and M. Kuczmann, “Lorawan network performance test,” *acta.sze.hu*, vol. 13, no. 4, pp. 268–280, Aug. 2020, doi: 10.14513/actatechjaur.v13.n4.547.
- [19] A. Lavric and V. Popa, “A LoRaWAN: Long Range Wide Area Networks study,” *2017 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2017 - Proceedings*, vol. 2017-January, pp. 417–420, Nov. 2017, doi: 10.1109/SIELMEN.2017.8123360.
- [20] Anatel, “Anatel - Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>
- [21] The Things Network, “Frequency Plans by Country.” Accessed: Dec. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>
- [22] Alfacom, “Faixas de operação da comunicação LoRaWAN.” Accessed: Dec. 17, 2024. [Online]. Available: <https://alfacom.net/2023/10/09/lorawan-faixas-de-operacao/>
- [23] E. D. Ayele, C. Hakkenberg, J. P. Meijers, K. Zhang, N. Meratnia, and P. J. M. Havinga, “Performance analysis of LoRa radio for an indoor IoT applications,” *Internet of Things*

for the Global Community, *IoTGC 2017 - Proceedings*, Aug. 2017, doi: 10.1109/IOTGC.2017.8008973.

- [24] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, Moh. K. Hasan, and Y. M. Jang, “The Role of Optical Wireless Communication Technologies in 5G/6G and IoT Solutions: Prospects, Directions, and Challenges,” *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 4367, vol. 9, no. 20, p. 4367, Oct. 2019, doi: 10.3390/APP9204367.
- [25] E. Mozaffariahrar, F. Theoleyre, and M. Menth, “A survey of Wi-Fi 6: Technologies, advances, and challenges,” *mdpi.com*, vol. 14, p. 293, Oct. 2022, doi: 10.3390/fi14100293.
- [26] M. Sikimic, M. Amovic, V. Vujovic, B. Suknovic, and D. Manjak, “An Overview of Wireless Technologies for IoT Network,” *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2020 - Proceedings*, Mar. 2020, doi: 10.1109/INFOTEH48170.2020.9066337.
- [27] J. P. Lousado and S. Antunes, “Monitoring and Support for Elderly People Using LoRa Communication Technologies: IoT Concepts and Applications,” *Future Internet* 2020, Vol. 12, Page 206, vol. 12, no. 11, p. 206, Nov. 2020, doi: 10.3390/FI12110206.
- [28] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.ICTE.2017.12.005.
- [29] F. Pitu and N. C. Gaitan, “Surveillance of SigFox technology integrated with environmental monitoring,” *2020 15th International Conference on Development and Application Systems, DAS 2020 - Proceedings*, pp. 69–72, May 2020, doi: 10.1109/DAS49615.2020.9108957.
- [30] telenor IoT, “LTE-M vs NB-IoT – a guide and in depth comparison.” Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <https://iot.telenor.com/iot-insights/lte-m-vs-nb-iot-guide-differences/>
- [31] R. K. Pathinarupothi, P. Durga, and E. S. Rangan, “IoT-based smart edge for global health: Remote monitoring with severity detection and alerts transmission,” *IEEE Internet Things J*, vol. 6, no. 2, pp. 2449–2462, Apr. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2870068.
- [32] N. Al-Falahy and O. Y. Alani, “Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities,” *IT Prof*, vol. 19, no. 1, pp. 12–20, Jan. 2017, doi: 10.1109/MITP.2017.9.
- [33] E. C. Chukwu, U. S. Abdullahi, G. Koyunlu, J. Sanusi, G. Sani, and I. A. Gangfada, “Performance Evaluation of Multiplexed 5G-New Radio Network Services of Different Usage Scenarios,” Coimbatore, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Jul. 2020, pp. 335–342. doi: 10.1109/ICCES48766.2020.9138021.
- [34] S. Sharma and B. Singh, “5G networks: The next gen evolution,” in *2016 International Conference on Signal Processing and Communication, ICSC 2016*, Noida, India: Institute

of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2016, pp. 55–60. doi: 10.1109/ICSPCOM.2016.7980547.

- [35] M. A. Spirito, “On the accuracy of cellular mobile station location estimation,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 50, no. 3, pp. 674–685, May 2001, doi: 10.1109/25.933304.
- [36] A. Gupta and R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [37] D. C. Nguyen *et al.*, “6G Internet of Things: A Comprehensive Survey,” *IEEE Internet Things J*, vol. 9, no. 1, pp. 359–383, Jan. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3103320.
- [38] Z. Yuping, Y. Xiaoling, and L. Chen, “Research of the Emergency Communication System in Coal Mine Based on ZigBee Technology,” in *Proceedings - 2015 7th International Conference on Advanced Communication and Networking, ACN 2015*, Kota Kinabalu, Malaysia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2016, pp. 60–63. doi: 10.1109/ACN.2015.20.
- [39] “CSA-IOT - Connectivity Standards Alliance.” Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <https://csa-iot.org/>
- [40] M. Uradzinski, H. Guo, X. Liu, and M. Yu, “Advanced Indoor Positioning Using Zigbee Wireless Technology,” *Wirel Pers Commun*, vol. 97, no. 4, pp. 6509–6518, Dec. 2017, doi: 10.1007/S11277-017-4852-5/TABLES/1.
- [41] H. Guo, M. Uradzinski, H. Yin, and M. Yu, “Indoor positioning based on foot-mounted IMU,” *bibliotekanauki.pl* H Guo, M Uradziński, H Yin, M Yu *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 2015•bibliotekanauki.pl*, vol. 63, no. 3, pp. 629–634, Sep. 2015, doi: 10.1515/BPASTS-2015-0074.
- [42] A. Schjørring, A. L. Cretu-Sircu, I. Rodriguez, P. Cederholm, G. Berardinelli, and P. Mogensen, “Performance Evaluation of a UWB Positioning System Applied to Static and Mobile Use Cases in Industrial Scenarios,” *Electronics 2022, Vol. 11, Page 3294*, vol. 11, no. 20, p. 3294, Oct. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11203294.
- [43] A. Tanenbaum, N. Feamster, and D. Wetherall, “Rede De Computadores,” in *Satélites terrestres de órbita baixa*, 6th ed., Pearson, Ed., Porto Alegre: Bookman, 2021, ch. 2.8.3, pp. 116–116. Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://archive.org/details/tanenbaum-rede-de-computadores-6a/page/116/mode/2up>
- [44] B. A. Forouzan, “WANs sem Fio: Redes de Telefonia Celular e Via Satélite,” in *Comunicação de Dados e Redes de Computadores*, AMGH., Porto Alegre, 2010, pp. 478–486. Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/36859068/Comunica%C3%A7%C3%A3o_de_Dados_e_Red es_de_Computadores_Forouzan?sm=b](https://www.academia.edu/36859068/Comunica%C3%A7%C3%A3o_de_Dados_e_Red_es_de_Computadores_Forouzan?sm=b)
- [45] W. Zhang, J. Yang, Z. Guanglin, L. Yang, and C. K. Yeo, “TV white space and its applications in future wireless networks and communications: A survey,” *IET*

Communications, vol. 12, no. 20, pp. 2521–2532, Dec. 2018, doi: 10.1049/IET-COM.2018.5009;WGROU:STRING:PUBLICATION.

- [46] K. H. Anabi, R. Nordin, and N. F. Abdullah, “Database-Assisted Television White Space Technology: Challenges, Trends and Future Research Directions,” *ieeexplore.ieee.org*, pp. 8162–8183, Sep. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2623244.
- [47] M. Mueck and D. Nogu  t, “TV White Space standardization and regulation in Europe,” in *2011 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems Technology, Wireless VITAE 2011*, Chennai, India: IEEE, Jul. 2011, pp. 1–5. doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2011.5940837.
- [48] R. Dionisio, P. Marques, and J. Rodriguez, “Experimental Assessment of a Propagation Model for TV White Spaces,” *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, vol. 146, pp. 284–290, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-18802-7_38.
- [49] Dsa, “Dynamic Spectrum Alliance Limited.” [Online]. Available: <http://www.dynamicspectrumalliance.org>
- [50] S. Konomi and T. Sasao, “Crowd geofencing,” *ACM International Conference Proceeding Series*, vol. 24-25-May-2016, pp. 14–17, May 2016, doi: 10.1145/2962735.2962744;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION.
- [51] Y. Shevchenko and U. D. Reips, “Geofencing in location-based behavioral research: Methodology, challenges, and implementation,” *Behav Res Methods*, vol. 56, no. 7, pp. 6411–6439, Oct. 2024, doi: 10.3758/S13428-023-02213-2/TABLES/22.
- [52] K. Tobin, O. Heidari, C. Volpi, S. Sodder, and D. Duncan, “Use of geofencing interventions in population health research: a scoping review,” *BMJ Open*, vol. 13, no. 8, p. e069374, Aug. 2023, doi: 10.1136/BMJOPEN-2022-069374.
- [53] C. Mou, A. Liang, C. Hu, F. Meng, B. Han, and F. Xu, “Monitoring Endangered and Rare Wildlife in the Field: A Foundation Deep Learning Model Integrating Human Knowledge for Incremental Recognition with Few Data and Low Cost,” *Animals 2023, Vol. 13, Page 3168*, vol. 13, no. 20, p. 3168, Oct. 2023, doi: 10.3390/ANI13203168.
- [54] “Animal Migration, Spatial Distribution, Animal Tracker - GLOBAI.” Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.gm-tracking.com/>
- [55] R. K. Singh, M. Aernouts, M. De Meyer, M. Weyn, and R. Berkvens, “Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses,” *Sensors 2020, Vol. 20, Page 1827*, vol. 20, no. 7, p. 1827, Mar. 2020, doi: 10.3390/S20071827.
- [56] MOKO SMART, “Por que escolher LoRaWAN para rastreamento de gado por GPS.” Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.mokosmart.com/pt/why-choose-lorawan-for-gps-livestock-tracking/>

- [57] Findster, “GPS Pet Tracker for Dogs and Cats - Free of Monthly Fees.” Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://getfindster.com/>
- [58] Inogando, “Collar GPS para Vacas Rumi - Detecção Celos 🐄.” Accessed: Jun. 04, 2025. [Online]. Available: https://innogando.com/gps-para-vacas/?utm_source=chatgpt.com
- [59] Campo Galego, “Llega Rumi, el dispositivo GPS para monitorizar en tiempo real vacas y novillas tanto en el establo como en la pradera.” Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.campogalego.es/llega-rumi-el-dispositivo-gps-para-monitorizar-en-tiempo-real-vacas-y-novillas-tanto-en-el-establo-como-en-la-pradera/>
- [60] “Captando o valor do gerenciamento de projetos | PMI.” Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.pmi.org/learning/library/pt-2015-pulse-captando-valor-gerenciamento-projetos-13486>
- [61] D. Azevedo, “Tipos de Metodologias Ágil,” Lamego, Portugal, 2023.
- [62] “Adafruit Ultimate GPS Logger Shield - Includes GPS Module : ID 1272 : Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits.” Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1272>
- [63] “The ESP32 Oled Lora TTGO LoRa32 board and connecting it to TTN – Primal Cortex’s Weblog.” Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://primalcortex.wordpress.com/2017/11/24/the-esp32-oled-lora-ttgo-lora32-board-and-connecting-it-to-ttn/>
- [64] “Waterproof 1-Wire DS18B20 Digital temperature sensor : ID 381 : Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits.” Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/381>
- [65] “Visual Studio Code - Code Editing. Redefined.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://code.visualstudio.com/>
- [66] “Introduction | Electron.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.electronjs.org/docs/latest>
- [67] “Arduino - Home.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>
- [68] “HiveMQ – The Industrial AI Platform.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.hivemq.com/>
- [69] “Low-code programming for event-driven applications : Node-RED.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://nodered.org/>
- [70] “Documentação do MongoDB - Página inicial.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.mongodb.com/pt-br/docs/>
- [71] “MongoDB: The World’s Leading Modern Database | MongoDB.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.mongodb.com/>

- [72] “About SQLite.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.sqlite.org/about.html>
- [73] “SQLite Home Page.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.sqlite.org/>

ANEXOS

Anexo I - Código Dispositivo GPS

Anexo II - Código Dispositivo Recetor

Anexo III - Código Node-RED

Anexo IV - Código App Flask

Anexo V – Base de Datos SQLite