

José Otávio Brochado Colombini

**MarmoNet: Um Sistema de Biotelemetria para  
Saguis do Gênero *Callithrix* em Parques Urbanos**

São Paulo, SP

2024



José Otávio Brochado Colombini

# **MarmoNet: Um Sistema de Biotelemetria para Saguis do Gênero *Callithrix* em Parques Urbanos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro.

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais (PCS)

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Carvalho Albertini

Coorientador: Dra. Erika Hingst-Zaher

São Paulo, SP

2024

*"The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds the most discoveries, is not "Eureka!"(I found it!) but 'That's funny...'" - Asimov, Isaac*

*"Sinto inveja de vocês que terão o prazer de aprender isso pela primeira vez" - Pait, Felipe  
(Aula de laboratório de Controle em 2020)*

# Agradecimentos

Para um jornada de sete anos e duas universidades não existe espaço em uma página para nomear todos que foram fundamentais para chegar até aqui. Uma aventura que começou com o apoio de meu pai, mãe, irmão, e tios. As partes fundamentais para que isso fosse possível.

Dentro da Universidade foi agraciado pelos mais diversos amigos e professores. Alguns desses que mudaram minha vida para sempre, em especial ao todo grupo Skyrats, onde comecei a de fato fazer engenharia e conceber projetos. Todo este conhecimento agora se encontra condensado, de maneira que talvez não faça jus ao que me ensinaram na correria do desenvolvimento destas paginas.

Por fim dedicar um agradecimento aos envolvidos nesse projeto, que justos consagram o fim da minha jornada como engenheiro. Obrigados aos pesquisadores e professores do Museu Biológico do Instituto Butantan e do CITI-USP.



# Resumo

Áreas verdes são fundamentais para a construção de cidades mais saudáveis, pois ajudam a mitigar efeitos climáticos e aumentam a qualidade de vida da população. No entanto a adição de fauna e flora deve ser feita de maneira adequada para que cada um cumpra seu papel ecológico em equilíbrio. O Projeto Saguis do Butantã busca estudar os casos de Saguis na Cidade Universitária da USP e do Parque da Ciência do Instituto Butantan. A MarmoNet é uma Rede de Sensores Sem Fio que foi especificamente projetada para ser adaptada aos saguis, auxiliando os biólogos a coletar dados de maior qualidade ou inacessíveis de outra forma. Entre os desafios solucionados estão a necessidade de garantir que o dispositivo não comprometa a qualidade de vida do animal (máximo de 15 g e coleiras com materiais ergonômicos), a dificuldade de recapturar os animais para coleta manual dos dados, o monitoramento contínuo por longos períodos. Para solucionar esta problemática a MarmoNet propõe uma rede *ad-hoc*, cuja os dados coletados dos animais serão transmitidos para estações base e estas por sua vez para os biólogos. A rede opera de maneira síncrona para economizar energia e também pode ser integrada com ferramentas de ciência cidadã.

**Palavras-chave:** Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Biotelemetria. Tecnologia de Conservação.



# Abstract

Green areas are essential for building healthier cities, as they help mitigate climate effects and improve the population's quality of life. However, the addition of fauna and flora must be carried out appropriately so that each one fulfills its ecological role in balance. The Saguis do Butantã Project aims to study marmosets in the University of São Paulo's main campus and Instituto Butantan. MarmoNet is a Wireless Sensor Network specifically designed to be adapted to marmosets, assisting biologists in collecting higher-quality or otherwise inaccessible data. The challenges addressed include ensuring that the device does not compromise the animal's quality of life (maximum weight of 15 g and ergonomic collar materials), the difficulty of recapturing animals for manual data collection, and the need for continuous monitoring over long periods. To tackle these issues, MarmoNet proposes an *ad hoc* network, in which data collected from the animals are transmitted to base stations, and the later make the data available to the biologist. This network operates synchronously to conserve energy and can also be integrated with citizen science tools.

**Keywords:** Wireless Sensors Network (WSN). Biotelemetry. Conservation Technology.



# Résumé

Les espaces verts sont essentiels à la construction de villes plus saines, car ils aident à atténuer les effets climatiques et améliorent la qualité de vie de la population. Cependant, l'ajout de faune et de flore doit être réalisé de manière appropriée afin que chaque organisme remplisse son rôle écologique en équilibre. Le Projet Saguís du Butantã vise à étudier les ouistitis sur le campus principal de l'Université de São Paulo et au Parc des Sciences de l'Institut Butantan. MarmoNet est un réseau de capteurs sans fil spécifiquement conçu pour être adapté aux ouistitis, aidant les biologistes à collecter des données de meilleure qualité ou autrement inaccessibles. Les défis abordés incluent la nécessité de garantir que le dispositif ne compromette pas la qualité de vie de l'animal (poids maximum de 15 g et matériaux ergonomiques pour les colliers), la difficulté de recapter les animaux pour une collecte manuelle des données, et le besoin de surveillance continue sur de longues périodes. Pour résoudre ces problèmes, MarmoNet propose un réseau interne *ad hoc*, dans lequel les données collectées sur les animaux sont transmises aux stations de base. Ce réseau fonctionne de manière synchrone pour économiser l'énergie et peut également être intégré à des outils de science participative, car il est compatible avec des dispositifs mobiles.

**Mots-clés** : Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF). Biotéléométrie. Technologies de Conservation.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Logo do projeto Saguis do Butantã, que objetiva estudar o comportamento dos saguis do Gênero <i>Callithrix</i> no Instituto Butantan na Cidade Universitária da USP. . . . .	23
Figura 2 – Representação de uma RSSF genérica, onde os Nodes monitoram uma área de estudo e enviam os dados para uma Estação Base (torre). Por fim, esses dados são transmitidos para a base de dados. . . . .	27
Figura 3 – Representação de uma estrutura genérica de um Node. . . . .	27
Figura 4 – Algumas das topologias mais comumente encontradas em RSSFs. . . . .	28
Figura 5 – Representação do erro de percepção do tempo entre dois sistemas. Onde o erro inicial é o <i>offset</i> e o aumento deste erro é uma consequência do <i>skew</i> . . . . .	30
Figura 6 – Modelo de comunicação para uma sincronização em comunicação bidirecional baseado no TPSN. . . . .	31
Figura 7 – Modelo de comunicação para uma sincronização em comunicação unidirecional . . . . .	32
Figura 8 – Algoritmo retirado de (CAMAL; AKSANLI, 2020) que explica a máquina de estados implementado para estudar chimpanzés . . . . .	36
Figura 9 – Exemplo de coleira usada para telemetria e rastreamento de cachorro do mato. . . . .	37
Figura 10 – Sagui Comum encontrado no Instituto Butantan . . . . .	39
Figura 11 – Saguis consumindo alimentos naturais (goma de árvore) e industrializados (sorvete no lixo). . . . .	40
Figura 12 – Mapa do área a ser estudada, que compreende a Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira da USP e o Instituto Butantan. . . . .	43
Figura 13 – Representação da MarmoNet, onde alguns animais de cada grupo serão equipados com ABIs e BSs serão espalhadas pela área de estudo para capturar os dados destes animais. Outros grupos também terão animais equipados, o que permitirá a identificação de uso de territórios e interação inter e intra grupos . . . . .	49
Figura 14 – Diagrama de interação entre dois Nodes. . . . .	51
Figura 15 – Diagrama de interação de uma BS com um Node. . . . .	51
Figura 16 – Máquina de Estados Finita que representa o comportamento de um Node na rede. . . . .	52
Figura 17 – Captura de imagens térmicas com um UAV de saguis no Campus da USP	54
Figura 18 – Mapa de calor da ocorrência de saguis no Campus da USP e do Instituto Butantan obtidos com base nos dados de Ciência Cidadã. . . . .	54

Figura 19 – ASM proposto pela MarmoNet para o Node da rede. . . . .	60
Figura 20 – ASM da BS, capturando o fluxo de ações proposto pela MarmoNet . . .	62
Figura 21 – Janela de comunicação, que se inicia em $T_{-1}$ com um tempo de acomodação em amarelo, para que elementos não sincronizados sejam identificados, permitindo que as BSs recuperem-nos. Os tempos $T_0$ e $T_1$ representam a janela esperada de comunicação (verde). Um segundo tempo de acomodação é adicionado ao final (até $T_2$ ), cumprindo o mesmo papel de permitir a sincronização de dispositivos. Em azul estão dois exemplos de ciclos de trabalhos possíveis, evidenciando o desvio do tempo de cada um deles com $T_e$ . . . . .	63
Figura 22 – Foto com o arranjo para a instalação da BS. A bateria 18650, uma Pulga e um <i>mockup</i> da PCB em fabricação. . . . .	64
Figura 23 – Design e esquemático da PCB para ser utilizada nas BSs. . . . .	65
Figura 24 – Comunicação para a realização do Algoritmo de Cristian . . . . .	66
Figura 25 – Estrutura de dados criada para o funcionamento da MarmoNet. . . . .	67
Figura 26 – Tamanho ideal de coleira medido nos animais do Zoológico de Guarulhos	70
Figura 27 – Medida da largura da coleira testado do Zoológico para a confecção com as medidas adequadas. . . . .	71
Figura 28 – Nós testados para desenvolver a coleira que prenderia o Node ao sagui.	72
Figura 29 – Primeira versão da coleira desenvolvida durante o Projeto. . . . .	72
Figura 30 – <i>Mockup</i> feito com uma moeda de 25 centavos, que mantêm o mesmo peso de uma Pulga com uma bateria CR2032 e o mesmo diâmetro, apesar de ser mais fino. . . . .	73
Figura 31 – Exemplos de coleiras permanente. . . . .	75
Figura 32 – Todas as coleiras de elo permanente feitas para teste. . . . .	76
Figura 33 – Peso dos novos modelos de coleira permanente. . . . .	77
Figura 35 – Teste de distancia com maior alcance. O a emissora se encontra sobre a mesa ao lado do computador e a receptora ao lado da maquina de café. Entre os dois dispositivos existe um corredor realizando uma curva e uma porta. . . . .	80
Figura 36 – Percepção da passagem do tempo de um cristal frente a um referencial aplicando a formulação explicada em 6.1.2 . . . . .	83
Figura 37 – Histograma da distribuição dos dados coletados na primeira metade e segunda metade do experimento, mostrando o ruído com um comportamento de uma curva normal ao longo de todo o experimento. . . . .	83
Figura 38 – Bancada de teste para medição do consumo de energia do algoritmo . . .	84
Figura 39 – Gráfico gerado do osciloscópio do Power Profiling Kit II da Nordic durante o teste de consumo de energia do <i>firmware</i> na Pulga . . . . .	85

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela dos protocolos de comunicação mais comumente encontrados na literatura de RSSF. . . . .	29
Tabela 2 – Elementos de interesse nos trabalhos encontrados na literatura. Cada referencia é marcada com ID, caso seja possível identificar qual animal interagiu com qual animal; a radio frequência utilizada; qual a maneira e se é possível obter a localização do animal; qual o tipo de ecologia alvo do trabalho; como é manejado o uso de energia do sistema; e como os dados são recuperados. . . . .	38
Tabela 3 – Tabela comparativa dos <i>hardwares</i> disponíveis para desenvolvimento, onde P se refere a pressão, H a umidade e T a temperatura. . . . .	56
Tabela 4 – Brutos coletados do experimento de teste dos cristais. . . . .	82
Tabela 5 – Dados com os resultados da estimativa de parâmetros do experimento realizado . . . . .	84
Tabela 6 – Tabela com os dados do teste de consumo energético do sistema. . . . .	85



# Lista de abreviaturas e siglas

RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
CT	<i>Conservation Technology</i>
MCU	Micro-controlador
BLE	Bluetooth Low Energy
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ABI	<i>Animal-Borne Instrument</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i>



# Lista de símbolos

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\zeta$	Letra grega minúscula zeta
$\in$	Pertence



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>ASPECTOS CONCEITUAIS E REVISÃO DO ESTADO DA ARTE</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Redes de Sensores Sem Fio</b>	<b>25</b>
2.1.1	Aplicações de RSSF com BLE	29
2.1.2	Sincronização	30
<b>2.2</b>	<b><i>Conservation Technology</i></b>	<b>32</b>
<b>2.3</b>	<b><i>Callithrix sp.</i></b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Requisitos</b>	<b>44</b>
3.1.1	Requisitos Funcionais	45
3.1.2	Requisitos não Funcionais	46
<b>3.2</b>	<b>Especificação e Resolução dos conflitos de Requisitos</b>	<b>47</b>
<b>3.3</b>	<b>Projeto da MarmoNet - Design Agnóstico de Plataforma</b>	<b>49</b>
<b>3.4</b>	<b>Trabalhos Correlatos</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DA REDE</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Hardware</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>Sistema de Comunicação</b>	<b>57</b>
4.2.1	Bluetooth Low Energy	57
<b>4.3</b>	<b>Node</b>	<b>58</b>
4.3.1	<i>Firmware</i>	58
<b>4.4</b>	<b>Base Station</b>	<b>61</b>
4.4.1	<i>Firmware</i>	62
4.4.2	Instalação Física	64
<b>4.5</b>	<b>Sincronização Base Station/Node</b>	<b>65</b>
<b>4.6</b>	<b>Estrutura de Dados</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DAS COLEIRAS</b>	<b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>Requisitos</b>	<b>69</b>
<b>5.2</b>	<b>Coleira com Elo Frágil</b>	<b>69</b>
<b>5.3</b>	<b>Coleira Permanente</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultados</b>	<b>79</b>
6.1.1	Teste de Distância	80

6.1.2	Teste de desvio dos cristais . . . . .	81
6.1.3	Teste de Consumo . . . . .	84
6.1.4	Teste de Funcionalidade . . . . .	86
<b>6.2</b>	<b>Contribuições . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>6.3</b>	<b>Perspectivas de Continuidade . . . . .</b>	<b>87</b>

<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>89</b>
------------------------------	-----------

## **ANEXOS 95**

	<b>ANEXO A – CASOS DE USO . . . . .</b>	<b>97</b>
A.1	UC 1 - Information Discharge . . . . .	97
A.2	UC 2 - Node Neighborhood . . . . .	99
A.3	UC 3 - Gathering Data . . . . .	102
A.4	UC 4 - Tracker . . . . .	103

# 1 Introdução

A integração de áreas verdes em espaços urbanos é considerada atualmente um fator essencial para a valorização e a melhoria desses ambientes. Essas áreas contribuem significativamente para a qualidade de vida dos habitantes, ajudando a reduzir fatores de estresse (MATA et al., 2020) e promovendo a formação de microclimas que atenuam o efeito de ilhas de calor e melhoram a qualidade do ar (WANG et al., 2022). Assim, a presença de áreas verdes não só se configura como uma estratégia contra mudanças climáticas, mas também contribui para a saúde e o bem-estar das populações urbanas.

Para uma implementação mais eficiente de áreas verdes, essas devem ser planejadas de forma a apoiar a conservação dos recursos naturais locais (fauna e flora). Isso implica a inclusão de elementos de florestas nativas, permitindo também a preservação do patrimônio natural e genético do bioma.

Contudo, a coexistência entre humanos e natureza pode ser desafiadora, uma vez que, se mal conduzida, pode originar novos problemas para a sociedade. A interação entre pessoas e a natureza é um fator de risco para zoonoses. Como exemplo, podemos citar a COVID-19, um vírus pandêmico cuja origem é atribuída a morcegos (ROTHAN; BYRAREDDY, 2020), e a raiva, vírus com taxa de letalidade próxima de 100% (Ministério da Saúde, 2024). Além disso, o salto de doenças de humanos para animais é uma questão relevante, como no caso do vírus herpes transmitido de humanos para outros primatas.

Desta forma, reintegrar a natureza às cidades é uma estratégia de planejamento urbano desejável, mas requer conhecimento detalhado dos biomas a serem integrados, de modo a estabelecer uma relação simbiótica entre esses ecossistemas e o ambiente urbano.

Um exemplo relevante é o caso do Parque da Ciência do Instituto Butantan e de outros parques urbanos no Brasil, onde se observa a presença de saguis do gênero *Callithrix*. Esse animal possui alta capacidade de adaptação e consome diversos tipos de recursos. Algumas espécies deste gênero têm se espalhado pelo Brasil, criando pressões e disputas territoriais com espécies nativas.

A presença destes animais em ambientes urbanos tem sido frequentemente relatada em contato com pessoas e consumindo recursos antrópicos (majoritariamente lixo ou fornecido diretamente pelas pessoas). Entretanto, há pouca informação de como esta interação influencia o papel ecológico, comportamento e área de vida destes animais.

Portanto, compreender o comportamento e o uso de recursos desses animais em florestas urbanas é fundamental para uma integração segura e eficaz de áreas verdes nas cidades e para desenvolver planos de manejo que evitem problemas para as comunidades

em contato com esses animais, contribuindo para a preservação de todo o ecossistema.

No campo do monitoramento da biodiversidade, tem crescido o uso de tecnologias, área denominada *Conservation Technology* (CT) (LAHOZ-MONFORT; MAGRATH, 2021). Essas tecnologias vêm sendo aplicadas de diferentes formas para diferentes tipos de animais e ecossistemas, e os resultados têm mostrado uma maior capacidade de modelar o comportamento animal devido a:

- **Precisão dos dados coletados:** esses equipamentos permitem uma coleta precisa de dados, que de outra forma seria impossível ou muito complexo de obter;
- **Coleta de dados em locais de difícil acesso:** os métodos mais tradicionais carecem da necessidade da presença de uma pessoa no ambiente para coletá-los, ou, em tecnologias já adotadas, como câmeras, é necessário que a pessoa desloque-se até o local para realizar a instalação do artefato.

O campo de CT é vasto e inclui diferentes tipos de tecnologias. Destacamos o uso de redes de sensores sem fio e sistemas acoplados a animais, conhecidos como *Animal-Borne Instruments* (ABI). Esse tipo de equipamento já viabilizou a compreensão do comportamento de hibernação dos esquilos-do-ártico, que se enterram no gelo (WILLIAMS et al., 2014), e do comportamento social das zebras, em um dos trabalhos pioneiros na área, a ZebraNet (JUANG et al., 2002), que implementou uma rede *ad-hoc* para estudar esses animais.

A área de ABI tem se tornado cada vez mais demandada no campo da biologia, pois os dados gerados possibilitam uma melhor compreensão da fauna e a elaboração de planos de manejo mais eficazes. Esses planos são fundamentais para a conservação da biodiversidade, considerando o cenário de crescente degradação ambiental.

Contudo, a área enfrenta desafios técnicos significativos. Muitos equipamentos são cuidadosamente projetados para cada estudo específico, considerando-se características do animal e do ambiente, dados desejados, recursos financeiros disponíveis, entre outros fatores. Essa extensa lista de requisitos e a falta de um mercado consumidor fora das instituições de pesquisa limitam o número de empresas atuantes na área e tornam os equipamentos bastante onerosos (exemplo: Mini 5G GPS da NorthStar por USD 1000 a unidade).

Este projeto de pesquisa em Engenharia visa o desenvolvimento da MarmoNet, um sistema de biotelemetria para monitorar saguis do gênero *Callithrix* no parque do Instituto Butantan. O foco é a criação de um sistema que complementa os dados adquiridos pelos biólogos em observação direta, *cameras traps* e iniciativas de Ciência Cidadã.

A MarmoNet é, portanto, uma parte do Projeto Saguis do Butantã (Figura 1), e sua contribuição será na complementação de dados gerados. O objetivo é assegurar que o projeto



Figura 1 – Logo do projeto Saguis do Butantã, que objetiva estudar o comportamento dos saguis do Gênero *Callithrix* no Instituto Butantan na Cidade Universitária da USP.

de pesquisa tenha dados confiáveis e livres de vieses (um problema comum em Ciência Cidadã) (CRETOIS et al., 2021), permitindo a criação de modelos de comportamento que auxiliem autoridades e gestores a tomar decisões informadas sobre o manejo desses animais e a conservação de áreas verdes urbanas.

O sistema é composto por 3 partes:

- **ABI:** parte do sistema acoplado aos animais, composto por:
  - **Node:** Um sistema eletrônico e um *firmware* para aquisição de dados;
  - **Coleira:** dispositivo para fixação da eletrônica ao animal, que também permitirá ainda que ele seja identificado por imagens;
- **Estação Base (BS):** equipamento que captura os dados dos animais ao passarem próximos, permitindo que sejam recuperados pelos biólogos sem a necessidade de recolher os ABIs. A BS ainda permite marcação georreferenciada dos eventos por ser fixada em locais previamente conhecidos;
- **App:** um software para *smartphone* usado para descarregar os dados das estações base e inseri-los em uma base de dados.

Este documento está organizado com os capítulos seguindo a seguinte estrutura:

- Capítulo 1: Introdução e motivação do projeto;
- Capítulo 2: Conceitos teóricos e o Estado da Arte encontrado na Literatura;
- Capítulo 3: Elicitação dos requisitos para o projeto e como a MarmoNet foi projetada para atender estes requisitos;
- Capítulo 4: Implementação do sistema e casos particulares para a execução do projeto desenhado. Também são apresentados as escolhas de *hardware*, protocolos de comunicação e modelo de sincronização;

- Capítulo 5: Desenvolvimento do protótipo da coleira que compõe o ABI, como seu fluxo de trabalho difere das demais partes, ela está alocada especificamente neste capítulo;
- Capítulo 6: Apresenta os resultados obtidos nos testes realizados e como isto supre as demandas do projeto. Também apresenta trabalho futuro para melhorar a MarmoNet e quais os requisitos ainda precisam ser atendidos;

## 2 Aspectos Conceituais e Revisão do Estado da Arte

O uso de tecnologia para a conservação da fauna é, essencialmente, uma área multidisciplinar. Para o desenvolvimento da MarmoNet, trabalhos nas áreas de biologia, ecologia, etologia, entre outras, foram necessários para embasar as tomadas de decisão.

O levantamento do Estado da Arte não era o foco deste trabalho; portanto, foi realizada uma busca *ad hoc* conforme surgiam demandas de conhecimento para problemas específicos. De maneira geral, os trabalhos de interesse puderam ser divididos em três categorias:

1. **Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) 2.1:** apresenta uma visão geral da área de RSSF, com alguns exemplos que serviram de base para a MarmoNet;;
2. ***Conservation Technology* (CT) 2.2:** apresenta o estado atual da área de CT, discute algumas problemáticas existentes e traz exemplos de aplicações de interesse;;
3. **Saguis do gênero *Callithrix* 2.3:** apresenta esses animais e suas características principais, permitindo que pessoas de fora das áreas de primatologia e etologia compreendam o objeto de estudo o suficiente para entender as decisões tomadas no projeto.

### 2.1 Redes de Sensores Sem Fio

O monitoramento de ambientes é uma atividade de interesse para diversos setores da sociedade. Entre as aplicações, destaca-se o acompanhamento da evolução de desgastes estruturais em infraestrutura urbana (ABNER; WONG; CHENG, 2022) para planejar pontos de manutenção preventiva e evitar acidentes e impactos ainda maiores nas cidades, acompanhar pacientes em hospitais e em suas casas para saber seu estado de saúde (JAMSHED et al., 2022), entre outros. A ampla variedade de situações e atividades que devem monitorar a evolução e o desenvolvimento do objeto de estudo é tão grande que se torna de interesse da engenharia melhorar as capacidades de realizar esse monitoramento.

Apesar de muitas destas atividades não serem essencialmente perigosas para o pessoal envolvido, o monitoramento de um ambiente geralmente envolve grandes esforços e custos para projetos. Acompanhar estruturas urbanas demanda uma organização de momentos de instalação de estruturas temporárias para que possam ser realizadas as atividades, tal complexidade reduz o número de expedições e aumenta os intervalos de

tempo entre cada amostragem. No caso de plantas industriais, a coleta de amostras paralisa equipamentos para que sejam devidamente analisados; para pacientes em acompanhamento remoto em seu domicílio, a coleta deve ser feita pelo próprio paciente, estando sujeita a interpretações equivocadas dos dados coletados, que podem resultar em tomadas de decisões sem respaldo técnico-científico para uma boa recuperação.

Portanto, o uso de sensores espalhados pelos ambientes de interesse, transmitindo os dados captados é uma abordagem que permite acompanhar a evolução destes objetos de estudos sem a necessidade de um grande esforço de trabalho de campo ou objeto a erro. Esta área é denominada Rede de Sensores Sem Fio (RSSF).

RSSFs são tipicamente aplicados em ambientes de difícil acesso ou que envolvem risco aos envolvidos, a partir disso podemos compreender duas demandas tradicionais da área: frequência de amostragem e tempo de vida útil do sistema (energeticamente e resistência a danos) (HEYDARISHAHREZA et al., 2020).

Estes sistemas devem monitorar áreas significativas que, em muitos casos, vão muito além da capacidade de monitoramento de um único sensor, demandando a integração de um conjunto de sensores para atender toda a área desejada. Além disso, é fundamental que o sistema seja escalável para facilitar a ampliação da abrangência de monitoramento de forma simples e econômica. (HEYDARISHAHREZA et al., 2020).

Considerando a capacidade de agregar uma quantidade crescente de sensores e a resiliência a falhas para aumentar a vida útil do sistema, as RSSFs são naturalmente redes *ad-hoc*. Redes *ad-hoc* não possuem uma estrutura definida e são caracterizadas pela capacidade de adaptação ao seu ambiente operacional.

Para garantir que todos estes requisitos inerentes ao domínio das RSSFs sejam atendidos, bem como demais requisitos específicos, é fundamental que o desenvolvimento de um sistema de RSSF seja planejado de maneira cuidadosa em todas as suas etapas. Esse planejamento deve abranger a escolha adequada dos componentes de hardware design do *firmware*, concepção do sistema de comunicação e definição da arquitetura da rede.

Uma RSSF é composta essencialmente por dois equipamentos: Nós internos (Nodes) e Estações Bases (BS). Os Nodes são os responsáveis pela captura dos dados do ambiente de estudo, enquanto as BSs cumprem o papel de agregar estes dados e dar vazão para onde devem ser entregues (HAMAMI; NASSEREDDINE, 2020), como visto na Figura 2. Conforme a arquitetura, esses papéis podem ser flexíveis, sendo desempenhados, ambos, por um único elemento da rede ou atribuídas funcionalidades específicas para cada elemento.

Os Nodes de uma rede possuem uma arquitetura genérica, definida conforme mostrado na Figura 3 (HAMAMI; NASSEREDDINE, 2020; HEYDARISHAHREZA et al., 2020):

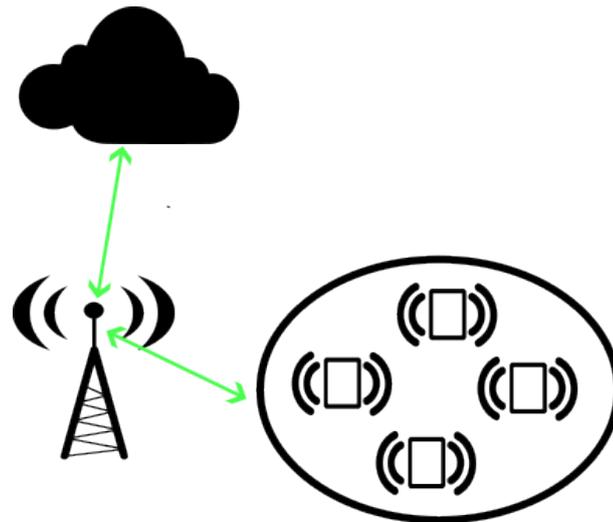


Figura 2 – Representação de uma RSSF genérica, onde os Nodes monitoram uma área de estudo e enviam os dados para uma Estação Base (torre). Por fim, esses dados são transmitidos para a base de dados.

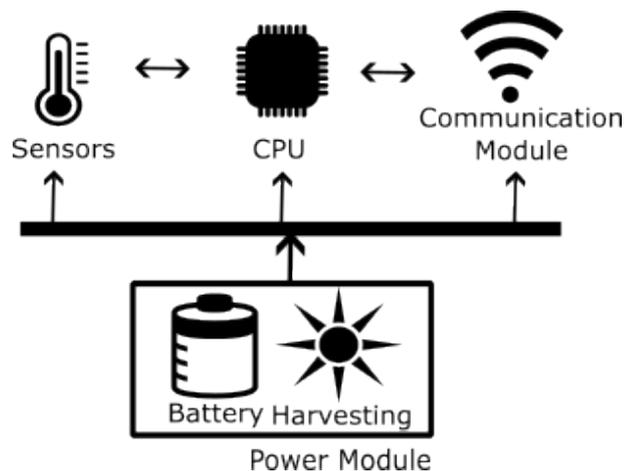


Figura 3 – Representação de uma estrutura genérica de um Node.

- **Unidade de processamento:** executa as operações do *firmware*, incluindo o processamento o inicial dos dados, roteamento e armazenamento;
- **Unidade de comunicação:** equipada com *transceivers*, é responsável pela camada física da comunicação da rede;
- **Unidade de sensoriamento:** integra os sensores e todo o sistema de aquisição de dados;
- **Unidade de energia:** responsável pelo armazenamento, geração e distribuição de energia no Node.

A rede composta por Nodes e BSs pode ser estruturada em diferentes topologias de acordo com as necessidades do sistema, permitindo, inclusive, redes com diferentes

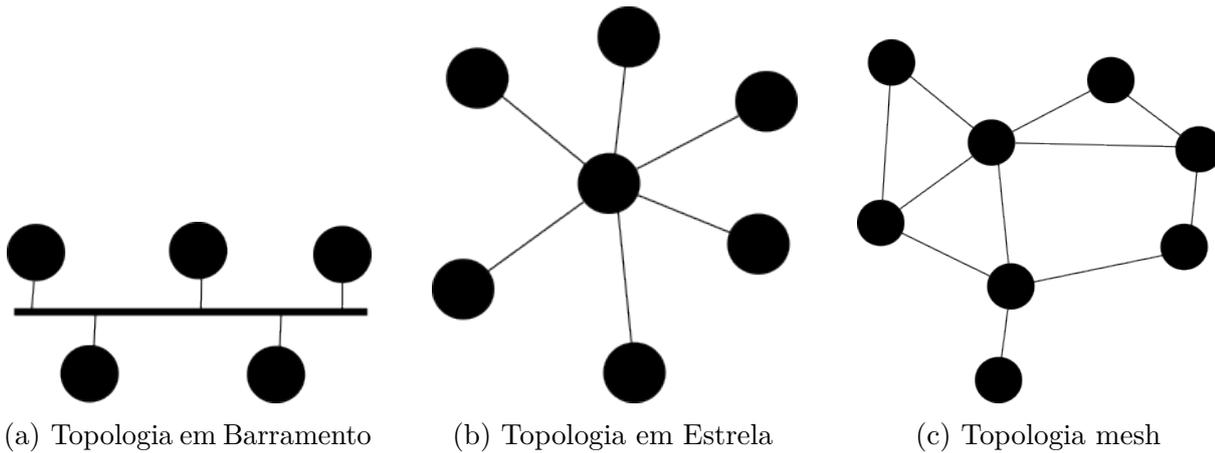


Figura 4 – Algumas das topologias mais comumente encontradas em RSSFs.

topologias em cada estágio (HEYDARISHAHREZA et al., 2020). Alguns exemplos de topologia incluem (Figura 4):

- **Barramento** (Figura 4a): a mensagem é transmitida para toda a rede conectada, sendo aceita apenas pelo nó destinatário;
- **Estrela** (Figura 4b): a comunicação é coordenada por um nó central que gerencia todas as interações com os nós periféricos;
- **Mesh** (Figura 4c): a estrutura da rede é formada a partir da conexão de todos os nós vizinhos, permitindo o uso de qualquer caminho disponível para a comunicação;

Também pode-se destacar também algumas topologias híbridas:

- **Árvore**: cada nó atua como um nó central de uma comunicação estrela com seus nós folhas, formando uma estrutura hierárquica em forma de árvore à medida que a comunicação avança na rede;
- **Estrela-Mesh**: os nós com menor capacidade energética não realizam roteamento, enviando os dados para um nó central, conforme sua posição atual na rede. Esses nós centrais, por sua vez, se conectam em uma estrutura mesh.

A implementação de RSSFs requer a seleção de uma tecnologia de comunicação adequada ao sistema a ser desenvolvido. Dentre as características que devem ser consideradas nesse processo, destacam-se, mas não se limitam a:

- **Consumo energético**: quantidade de energia necessária para realizar a comunicação;
- **Vazão**: velocidade com que os dados podem ser transmitidos;

- **Frequência** da portadora: frequência adotada para avaliação da ocorrência de possíveis interferências;
- **Alcance**: distância máxima em que a comunicação permanece estável;

essas diferentes características guiarão a escolha do tecnologia e protocolos de comunicação, os mais tradicionais encontrados na literatura estão na Tabela 1

Tabela 1 – Tabela dos protocolos de comunicação mais comumente encontrados na literatura de RSSF.

	ZigBee	Bluetooth	Bluetooth Low Energy (BLE)	WiFi	LoRa
Frequência	868 e 915 MHz ou 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 ou 5 GHz	868 MHz
Potência Consumida	60 mW	100 mW	10 mW	800 mW	10 mW
Alcance	Até 75 m	Até 100 m	Até 100 m	Até 250 m	15 km
Vazão de Dados	250 kbps	1 a 2 Mbps	1 a 2 Mbps	150 Mbps	0.3 bps a 50 kbps
Exemplo de Aplicações	<i>smart grid</i>	eletrônicos de consumo	<i>beacons</i>	residência inteligente	Agricultura

Fonte: Tabela extraída de (HEYDARISHAHREZA et al., 2020) e modificada pelos autores com base em (WOOLLEY, 2021) e (TALLA et al., 2017).

Embora os requisitos estejam interconectados, o formato do protocolo de comunicação possibilitando ajustes de alguns parâmetros. No protocolo de comunicação Bluetooth, por exemplo, a camada física pode ser configurada como 1M, 2M e Coded, que permitem ajustes: a mudança na codificação da portadora e alteram os parâmetros de vazão e alcance, sem modificar a frequência da portadora (WOOLLEY, 2021).

No caso da MarmoNet, foi adotado o protocolo BLE (mais detalhes 3). A escolha deste protocolo considerou os requisitos mencionados anteriormente e, adicionalmente, sua capacidade de integração com uma rede Bluetooth pré-existente, facilitando a aplicação de abordagens baseadas em Ciência Cidadã.

### 2.1.1 Aplicações de RSSF com BLE

(KIM; EVANS; IVERSEN, 2008) apresenta um sistema de irrigação inteligente, voltado para o uso otimizado da água. O sistema utiliza Bluetooth para a comunicação sem fio dos sensores no campo que enviam os dados de estado do solo (temperatura e umidade), requisitando ou não um irrigação.

(RAEVE et al., 2022) propõe uma maneira eficiente de detectar o movimento de trens para ligar e desligar o sistema (colocando os Nodes em *deep sleep*). O sistema detecta o movimento do trem a partir de um acelerômetro e comunica via BLE para os Nodes, acordando o sistema de monitoramento de trens.

(KUMARI et al., 2022) faz uso de uma rede de *beacons* BLE para localizar pessoas em áreas onde GPS não funcionam (mineração). Ao utilizar os *beacons* de forma unidirecional um dispositivo captura os IDs transmitidos e utilizando a potência do sinal recebido, que é proporcional à distância dos dispositivos, porém também é influenciado por obstáculos, umidade do ar, orientação das antenas e potência disponível no sistema.

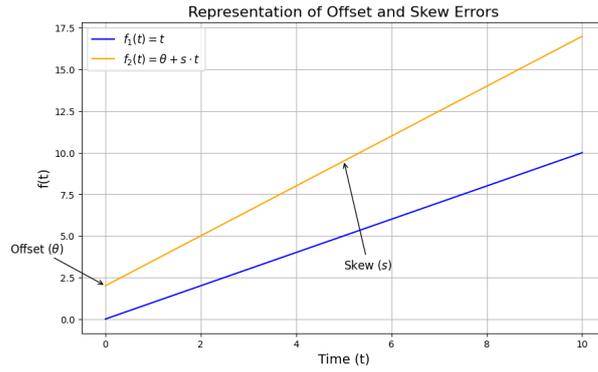


Figura 5 – Representação do erro de percepção do tempo entre dois sistemas. Onde o erro inicial é o *offset* e o aumento deste erro é uma consequência do *skew*

Para superar estes obstáculos para identificação da posição eles utilizam um algoritmo de *Machine Learning* sobre os dados capturados da RSSF de BLE para realizar a triangulação, funcionando como um GPS.

Como apresentado por (ABNER; WONG; CHENG, 2022) uma das formas de se otimizar o uso de energia (um dos requisitos mais fortes para RSSFs) é a hibernação do sistema. Se um sistema é capaz de entrar em hibernação e todos os Nodes acordarem de maneira sincronizada para a comunicação pode-se minimizar o consumo de energia.

Este tipo de rede que depende da sincronização dos sistema de comunicação são denominados sistemas *duty-cycled* (MORILLO et al., 2022), estes sistemas apresentam a vantagem do consumo de energia frente a outros sistemas, porém são criticamente sensíveis ao *clocks* internos dos Nodes. Devido a diferenças de fabricação e influências ambientais, os *clocks* dos sistemas desviam-se naturalmente de um equipamento para outro (WU; CHAUDHARI; SERPEDIN, 2011). Morillo apresenta uma abordagem para que redes de diferentes ciclos de trabalho consigam detectar e se comunicar (MORILLO et al., 2022), elucidando a grande desvantagem deste tipo de sistema, o uso intensivo de relógios.

### 2.1.2 Sincronização

O problema de sincronização é um problema bastante explorado pela literatura e pode ser definido como um problema de estimação de parâmetros (WU; CHAUDHARI; SERPEDIN, 2011). A passagem do tempo pode ser definida pela Equação 2.1, onde os parâmetros a serem estimados são  $\theta$  e  $s$ , onde primeiro é o erro de *offset* do sistema e o segundo o *skew*, o desvio da percepção da passagem do tempo e  $C$  a percepção do tempo no elemento  $i$ , representado na Figura 5.

$$C_i(t) = \theta + st \quad (2.1)$$

Um sistema de *clock* de circuitos eletrônicos mede a passagem do tempo com a

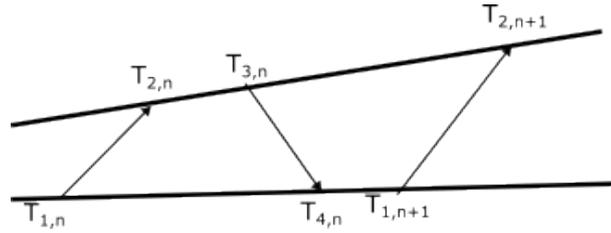


Figura 6 – Modelo de comunicação para uma sincronização em comunicação bidirecional baseado no TPSN.

detecção de ondas quadradas com período constante, identificando a passagem do tempo de acordo com os períodos da onda. Em um sistema ideal o erro da percepção do tempo é de até um período de *clock*. Esta percepção é então discreta definida conforme Equação 2.2, onde  $\mathcal{C}_i$  é a percepção do tempo discreta,  $\Theta$  o erro de *offset*,  $p$  o período do *clock* e  $k$  o instante de amostragem.

$$\mathcal{C}_i(k) = \Theta + pk \quad (2.2)$$

Se considerarmos um instante inicial  $t_0$  em que todos os sistemas estão sincronizados ( $\theta = 0$ ), apenas  $s$  deve ser estimado. Este parâmetro é então definido pela variação  $p$  de cada cristal, que pode ser afetado pela precisão mecânica do corte do cristal na manufatura, impurezas no cristal, falhas de encapsulamento, influências ambientais no circuito eletrônico, envelhecimento, etc. Os cristais disponíveis na indústria possuem períodos na casa de  $\mu s$  ou  $ns$ , permitindo que em aplicações que não sejam extremamente sensíveis ao tempo possam ser aproximadas a um modelo contínuo. Desta forma desejamos estimar os parâmetros  $\theta$  e  $s$  da Equação 2.1.

Em um modelo de comunicação bidirecional tem-se como exemplo o *timing-sync protocol for sensor networks* (TPSNs). Neste modelo o elemento A sincroniza o elemento B com uma sequência de troca mútuas de mensagens (WU; CHAUDHARI; SERPEDIN, 2011). Neste processo são realizadas  $k$  rodadas de trocas de mensagem que seguem o roteiro, também ilustrado na Figura 6:

1. A marca o T1 e envia uma mensagem para B;
2. B marca a recepção em T2;
3. B responde A marcando o tempo de envio T3, nesta mensagem B envia os valores de T2 e T3;
4. A marca o tempo de recepção T4;

após  $k$  iterações tem-se um sistema de equações sobredeterminado que deve ser solucionado para a estimação dos parâmetros.

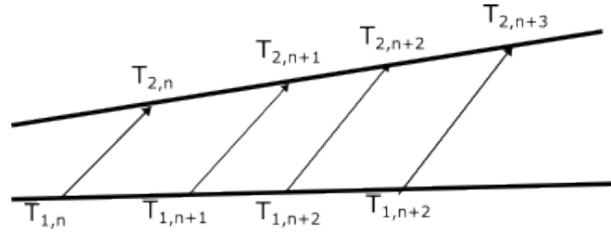


Figura 7 – Modelo de comunicação para uma sincronização em comunicação unidirecional

$$\mathbf{T}_1 + \tau \mathbf{1}_k = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_2 \\ \mathbf{T}_3 \end{bmatrix} + \frac{\theta}{s} \begin{bmatrix} -\mathbf{1}_{\frac{k}{2}} \\ \mathbf{1}_{\frac{k}{2}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A solução da estimação de parâmetros pelo sistema de Equações 2.3, onde  $\mathbf{T}_n$  o vetor coluna do tempo  $n$  das  $k$  iterações,  $\tau$  o atraso fixo da comunicação,  $\mathbf{1}_k$  é o vetor coluna de valores 1 com  $k$  dimensões,  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  são os valores de atraso variáveis da comunicação. Se desejarmos resolver apenas para  $\theta$  temos:

$$\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1 = \tau + \theta + \mathbf{X} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{T}_4 - \mathbf{T}_3 = \tau - \theta + \mathbf{Y} \quad (2.5)$$

No caso de comunicações unidirecionais o elemento A faz a transmissão de seu tempo  $T_1$  diversas vezes e o elemento B anota o tempo de recepção  $T_2$  para cada uma das  $k$  mensagens, conforme Figura 7. Então B estima os parâmetros a partir do sistema:

$$\mathbf{T}_2 = s(\mathbf{T}_1 + \tau + \mathbf{X}) + \theta \quad (2.6)$$

Um exemplo de sincronização unidirecional é apresentado por (ASGARIAN; NAJAFI, 2022), que marca o tempo de comunicação em um *advertising* BLE, reduzindo o *overhead* de comunicação e os tempos estáticos ao inserir a marcação de tempo nas últimas camadas do protocolo BLE

## 2.2 Conservation Technology

O uso de tecnologia na área de conservação é crescente e apresenta diversas etapas de implementação para diferentes tecnologias (LAHOZ-MONFORT; MAGRATH, 2021). Apesar de muitas tecnologias já serem padrões nos projetos de conservação e manejo, como cameras traps e microfones passivos (PAM) (ZWERTS et al., 2021), que permitem monitorar remotamente aéreas com câmeras instaladas; estações meteorológicas para compreender as mudanças de comportamento dos animais correlacionado aos efeitos ambientais; Uso de coleiras com VHF para localizar animais em campo, existe uma

demanda de um maior desenvolvimento de tecnologia para área que apenas aplicações, esta demanda tecnológica para os problemas emergentes de conservação denomina o campo da Tecnologia de Conservação (*Conservation Technology* (CT)) (LAHOZ-MONFORT; MAGRATH, 2021).

Por ser uma área muito ampla, ele abrange diversas etapas da engenharia. Partindo deste a definição de componentes específicos para a conservação para o desenvolvimento de equipamentos e sistemas que solucionam problemas de conservação, até os softwares que controlam estes equipamentos e o manejo de dados após aquisição.

O campo de CT pode ser dividido em três graus de maturidade (LAHOZ-MONFORT; MAGRATH, 2021):

- estabelecidos - tecnologias já sólidas neste campo, com aplicações já difundidas.
- Novidades - novas aplicações e/ou em fase de testes pela comunidade científica, buscando um maior entendimento do que pode ser feito.
- Emergentes: sistemas e inovações que são citados como potenciais soluções, porém ainda não foram colocadas a prova ou estão em estágios muito iniciais de desenvolvimento.

Para a CT uma grande gama de sensores podem ser aplicados para coletar dados de interesse, como elicitado em (LAHOZ-MONFORT; MAGRATH, 2021). Alguns sensores de interesse deste trabalho são:

- Câmeras térmicas;
- Câmeras RGB;
- Sensores de ambiente;
- Acelerômetros;
- GPS.

Estes sensores podem ser fixados em estações de controle, podem ser portáteis (sendo carregados por carros, pessoas, *unmanned aerial vehicles* (AUV), etc.) ou podem ser presos a animais (*Animal-Borne Instruments* (ABI)). Estes sensores podem ser agrupados em um sistema de monitoramento de larga escala utilizando tecnologias e arquiteturas de RSSFs. O uso de RSSFs em CT ainda é pioneiro e poucos estudos apresentaram resultados de trabalhos em campo com sucesso (LAHOZ-MONFORT; MAGRATH, 2021).

Algumas das tecnologias mais estabelecidas já foram citadas, porém existem algumas novidades que já estão sendo amplamente utilizadas, porém ainda restritas devido aos altos

custos envolvidos, como o uso de colares com GPS para monitorar indivíduos específicos, uso de UAVs câmeras térmicas noturnas para localizar animais, etc.

No campo dos emergentes destacamos especial interesse na aplicação de Internet das Coisas (IoT), que apesar de já possuir algumas iniciativas na área, ainda não está sendo adotado com consistência e demanda um grande investimento com um grande risco, devido às incertezas dos resultados.

O trabalho pioneiro na área foi a ZebraNet (JUANG et al., 2002), que desenvolveu uma rede *ad hoc* de sensores presos a zebras. Os sensores eram equipados com baterias e painéis solares para aumentar a autonomia do sistema, e a recuperação dos dados da rede era feita através de antenas portadas por humanos. Devido a incerteza de qual animal seria mais tolerante a presença humana a ZebraNet classificava os elementos da rede de acordo com sua proximidade com a borda, para que o dados fosse propagados pela rede e por fim recuperado.

Estudar a interação social dos animais é fundamental para entender suas estruturas sociais e comportamento, porém existem diversos obstáculos na identificação de interações intra e interespecies (DREWE et al., 2012). Por isso outros estudos, além de ZebraNet fizeram uso de *tags* de proximidade, tais *tags* são precisas para identificar quais pares interagiram, porém não o tempo de interação (DREWE et al., 2012; LEVIN et al., 2015). Enquanto observação direta dependem dos dois animais se encontrarem durante o tempo de observação da campanha e ambos serem reconhecidos pelo pessoal de campo.

(DREWE et al., 2012) estudou a interação entre várias espécies, visando compreender a transmissão de doenças de animais silvestres para o gado. Apesar da baixa precisão de identificar tempo de interações, a tecnologia de *tags* de proximidade é muito precisa na identificação de qual animal se encontra com qual animal. Permitindo saber qual animal tinha potencial de estar infectado. Para este estudo eles equiparam gados e texugos com as *tags*, além de estações base marcando onde os texugos comumente utilizam como latrina (local de potencial contaminação).

(LEVIN et al., 2015) utilizou a mesma abordagem de *tags* de proximidade para estudar o comportamento de aves. A configuração do experimento contou com aves marcadas e estações base perto dos poleiros para a recuperação dos dados e resincronização dos equipamentos, as estações base coletavam dados durante a noite, quando os pássaros estavam inativos, garantindo melhor conectividade. O estudo tentou contornar a dificuldade de detecção do tempo de encontros utilizando uma análise dos dados posterior à coleta e a identificação diádica dos *tags*. O estudo visava identificar as interações sociais destas aves e estimar a distância que elas permaneciam entre si durante voo, atividade de extrema dificuldade de acompanhar com observação direta.

(CRONK; PILLAY, 2019; CRONK; PILLAY, 2021) estudou a adaptação e área de

vida do mangusto amarelo frente à urbanização. Devido a degradação do ambiente muitas espécies são ameaçadas e faltam habitat para elas, necessitando adaptar-se para o novo ambiente. Porém a alta disponibilidade de alimentos de origem antrópica pode significar que estes animais agora tem mais que possuir grandes territórios para sobreviver, porém o contato com pessoas e consumo de alimentos industrializados pode ser perigoso para a saúde deles. O experimento equipou os mangustos com colares com GPS e utilizou o conhecimento prévio de rotina destes animais para que o sistema apenas colhesse dados em momentos de potencial interesse para a pesquisa, aumentando o tempo de vida útil do sistema.

(FARDELL et al., 2021) estudou a influência ecológica e uso de espaços urbanos por gatos felinos. De maneira similar a (CRONK; PILLAY, 2021) eles usaram GPS para detectar quais áreas eram ocupadas pelos felinos e compreender a ecologia urbana.

(WALLACE et al., 2022) estudou o comportamento de pequenos roedores em uma região controlada, para validar seu modelo de comportamento ele utilizou um arranjo de diversas antenas espalhadas pelo campo, que detectavam a passagem dos animais perto de cada antena, estimando as distâncias e por conseguinte a sua posição, tal equipamento é denominado sistema de radiotelemetria automático (ARTS, do inglês *automated radiotelemetry system*), sua desvantagem comparada aos equipamentos de *tags* de proximidade de (LEVIN et al., 2015) é a distância que o sistema pode estabelecer comunicação, de apenas até 30 cm para ART.

Enquanto *tags* de proximidade detectam com precisão qual elemento passou perto de qual elemento com uma grande precisão, as ARTS tomam vantagem de utilizarem grandes antenas como fonte de rádio para estimar a posição e inferir a interação dos animais a partir da posição estimada, tal qual um GPS.

O trabalho (CAMAL; AKSANLI, 2020) apresenta um design de redes *ad-hoc* com baixo consumo de energia para estudar o comportamento de primatas. Camal utiliza uma rede mesh totalmente conectada com BLE para acompanhar interações sociais de chimpanzés utilizando *tags* de proximidade, a escolha desta abordagem é devido a complexas relações sociais destes primatas e suas dinâmicas, o que não seria permitido com GPS, devido a alta demanda de energia e a dificuldade de inferir qual animal está próximo de qual animal, devido a erros de estimação. Para tanto, o projeto utilizou uma rede de WPAN, devido ao baixo consumo de energia e sua capacidade de identificar com alta precisão as relações diádicas.

Para atingir esse objetivo, Camal utilizou BLE em modo *advertising*, permitindo um *broadcast* em que todos os nodes nas redondezas se reconheçam. O algoritmo, presente na Figura 8, funciona de maneira relativamente simples, onde a cada 10 segundos todos os elementos tentam trocar seu ID com seus vizinhos nas redondezas.

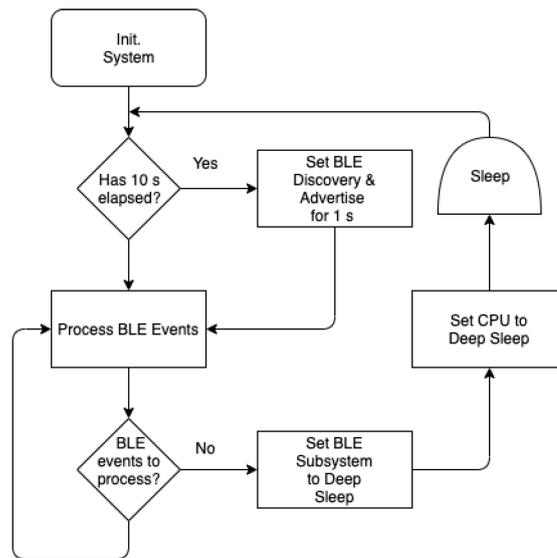


Figura 8 – Algoritmo retirado de (CAMAL; AKSANLI, 2020) que explica a máquina de estados implementado para estudar chimpanzés

Para otimizar o consumo de energia eles decidiram utilizar o modo *deep sleep* (hibernação) entre cada ciclo de trabalho. Tal tomada de decisão melhorou o consumo em aproximadamente 90% do sistema, sendo estimado um aumento de 6 dias de atividade para 78 dias.

Em ambiente de simulação Camal conseguiu também avaliar a diferença do consumo de energia com hibernação cada vez maiores e a quantidade de dados que seriam perdidos para o cenário de estudo dele, um santuário de chimpanzés. Atingindo um crescimento de tempo de vida do sistema quase linear em relação ao tempo de hibernação. Apesar de uma perda de vazão de dados no formato de um logaritmo.

A Tabela 2 levanta algumas características que cada trabalho citado apresenta que são de interesse para o presente estudo. Apesar da grande similaridade entre o trabalho de Camal e o apresentado neste documento, Camal não soluciona o problema da recuperação dos dados e nem a capacidade de alterar a configuração do sistema durante o experimento. O cenário apresentado por Camal também é diferente, tratando-se de animais em um santuário com área de vida extremamente limitada, portanto a quantidade de dados de proximidade gerada é significativamente maior que animais livres.

A MarmoNet visa desenvolver uma rede interna com comportamento similar ao trabalho de Camal, porém com algumas capacidades mais refinadas e implementável em um cenário próximo ao de (CRONK; PILLAY, 2021), de compreender a área de vida e uso de recursos espaços temporais. Para tal usaremos estações base como componentes de borda desta rede que funcionaram como as estações base em (LEVIN et al., 2015) recuperando os dados e sincronizando os nós internos da rede, porém também marcando pontos georreferenciados como as latrinas em (DREWE et al., 2012).



Figura 9 – Exemplo de coleira usada para telemetria e rastreamento de cachorro do mato.

Quanto à forma de prender equipamentos aos animais, pouco foi encontrado na literatura, ainda mais considerando pequenos animais. A maioria dos equipamentos utilizados são provenientes da indústria, não contando com métodos de implementação e pouca documentação. Alguns equipamentos para rastreamento de cachorro do mato foram analisados como base (Figura 9), porém eram muito pesados e grandes demais para os *Callithrix*. Um estudo feito sobre formas de prender equipamentos em animais apresentou uma proposta de prender equipamentos em micos utilizando fitas ao longo de todo o corpo e uma caixa impressa em 3D para proteger a eletrônica (MARUCCI, 2017), porém o equipamento proposto possui mais que o dobro do peso permitido para os este estudo, além do formato ter sido recusado pelos biólogos por ser potencialmente prejudicial ao comportamento dos *Callithrix sp.*

Tabela 2 – Elementos de interesse nos trabalhos encontrados na literatura. Cada referencia é marcada com ID, caso seja possível identificar qual animal interagiu com qual animal; a radio frequência utilizada; qual a maneira e se é possível obter a localização do animal; qual o tipo de ecologia alvo do trabalho; como é manejado o uso de energia do sistema; e como os dados são recuperados.

	Proximidade	Frequência	Forma de Localização	Ecologia	Economia de Energia	Recuperação dos Dados
(DREWE et al., 2012)	Sim	UHF	BS georreferenciada	Rural e interação intra especies	Não especificado	recaptura com biologgers
(LEVIN et al., 2015)	Sim	UHF	Nenhuma	Interação social em aves	Síncrono com hibernação	Download dos dados por uma BS
(CRONK; PILLAY, 2019)	Não	Não concerne	GPS	Ecologia urbana e uso espacial	hibernação	recaptura com biologgers
(FARDELL et al., 2021)	Não	Não concerne	GPS	Ecologia urbana e uso espacial	Nenhuma (troca de bateria)	recuperação do biologgers em animais domésticos
(WALLACE et al., 2022)	Não	VHF	Antenas (BS) georreferenciadas	Foco em material não em ecologia	Nenhuma	Dados gerados nas BS
(CAMAL; AKSANLI, 2020)	Sim	2.4 GHz	IMU	Interação social de animais em santuário	síncrono com hibernação	recaptura com biollogger

Fonte: Produzido pelos autores.



Figura 10 – Sagui Comum encontrado no Instituto Butantan

## 2.3 *Callithrix sp.*

Os saguis do gênero *Callithrix* (Figura 10) são primatas brasileiros amplamente distribuídos em biomas como Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica (MALUKIEWICZ et al., 2020). Pertencem ao grupo dos Primatas do Novo Mundo, que inclui espécies encontradas do México à Argentina, caracterizando-se por serem arbóreos, diurnos e possuírem cauda (DUNN; CRISTÓBAL-AZKARATE, 2016). Mais especificamente, fazem parte da família *Callitrichidae*, composta por pequenos primatas que variam de 100 g a 700 g, como os micos e saguis. Esses animais possuem dedos especializados para escalada e uma morfologia corporal adaptada para deslocamentos rápidos e saltos horizontais (DUNN; CRISTÓBAL-AZKARATE, 2016). Vivem em grupos familiares e os jovens, ao atingir a fase adulta, frequentemente migram para outros grupos (SCHIEL; SOUTO, 2017). Nos estudos sobre a cognição dos *Callitrichidae*, especialmente do gênero *Callithrix*, têm avançado significativamente nas últimas décadas (SCHIEL; SOUTO, 2017). Já se comprovou sua capacidade dos saguis de aprenderem a usar ferramentas para obtenção de alimentos (YAMAZAKI et al., 2011) e mico leões dourados aprenderam espontaneamente a utilizar ferramentas, como antenas de telemetria, como ferramentas (STOINSKI; BECK, 2001). Os *Callithrix* também possuem uma reportório de diversas formas de vocalização (SCHIEL; SOUTO, 2017) e a habilidade de atribuir "nomes" uns aos outros, habilidade identificada somente em humanos, golfinhos e elefantes (OREN et al., 2024). Esses primatas também demonstram uma compreensão sofisticada do ambiente, incluindo a percepção de oclusão de objetos e a predição de sua localização futura (SCHIEL; SOUTO, 2017).

O gênero *Callithrix*, em especial o *Callithrix Jacchus* e o *C. Penicillata*, apresenta uma dieta onívora diversificada, que inclui frutas, goma de árvores, ovos de pássaros e, em áreas urbanas, alimentos industrializados, como os encontrados no lixo ou oferecidos por humanos (Figura 11) (SCHIEL; SOUTO, 2017). Isso lhes confere uma grande plasticidade, se adaptando muito bem a diversos ambientes. Estes animais também possuem uma alta



Figura 11 – Saguis consumindo alimentos naturais (goma de árvore) e industrializados (sorvete no lixo).

capacidade de reprodução, atingindo a maturidade sexual com 1 ano de vida e tendo, ao menos, 2 épocas reprodutivas por ano.

Os saguis formam grupos de até sete indivíduos que se movimentam e agem de forma coesa, esta característica facilita o monitoramento do grupo, por permitir que apenas uma parte dele já representa a presença do grupo. Estes animais possuem também frequente interação entre grupos para disputar territórios ou para reprodução.

O gênero *Callithrix* é endêmico do Brasil e enfrenta graves ameaças devido à degradação de seu habitat natural, estando incluído entre as 25 espécies de primatas mais ameaçadas do mundo (MALUKIEWICZ et al., 2020). A preservação de espécies pode ser justificada por diversos fatores, entre eles a necessidade de manter ecossistemas saudáveis, essenciais para a sustentabilidade da biosfera. Os *Callithrix* desempenham papéis ecológicos únicos, distintos dos primatas do Velho Mundo, contribuindo para a manutenção de nichos específicos, algumas espécies demonstram notável capacidade de adaptação, o que lhes permitiu se dispersar para áreas originalmente ocupadas por outras espécies do mesmo gênero. (MALUKIEWICZ et al., 2020). Apesar dessas adversidades, esse fenômeno tem intensificado a competição por recursos já escassos, aumentando o risco de extinção para espécies menos adaptáveis. Além da pressão ambiental, o patrimônio genético das espécies de *Callithrix* está ameaçado pela hibridização entre elas, o que representa mais um fator de risco para a conservação (MALUKIEWICZ et al., 2020).

A escassez de estudo deste gênero é um risco, devido a falta de noções sobre seu

---

material genético, comportamento e cognição, representando uma limitação significativa, especialmente para a indústria da saúde. Esses primatas são reconhecidos pela comunidade científica como excelentes biomodelos para o estudo de doenças humanas, devido à sua proximidade filogenética com os humanos e a sua história de vida acelerada (MALUKIEWICZ *et al.*, 2020). A compreensão do modelo biológico dos saguis pode fornecer informações valiosas sobre processos fisiológicos humanos, como a gestação (MALUKIEWICZ *et al.*, 2020). Além disso, os testes de medicamentos contra diversas viroses presentes em sua virosfera, compartilhada com os seres humanos, constituem um campo promissor para futuras pesquisas. A virosfera dos saguis também é relevante para a saúde pública, especialmente no contexto da integração da natureza nas cidades.





A CS permite que muitos dados sejam coletados ao engajar a comunidade local. Assim muitas pessoas, com diferentes níveis de interesse e conhecimento contribuem para a compreensão do comportamento destes animais trazendo diversos dados de ocorrência e comportamento. As bioblitz são eventos de busca coletiva desses animais com o intuito de gerar ainda mais dados, cobrindo as lacunas existentes.

A CS baseia-se fortemente na contribuição de uma comunidade, gerando muitos dados, porém estes dados são, no geral, oportunistas. Isto quer dizer que eles são ocorrências que aconteceram em momentos não esperados diante de alguém da comunidade. Estes dados, portanto, são enviesados pela ocorrência simultânea da rotina das pessoas e dos animais, pois não seguem nenhum padrão de busca utilizando modelos tradicionais de transecto para que os dados tenham uma distribuição estatística significativa.

O uso de bioblitz por parte da CS é uma técnica que permite tentar mitigar o viés estatístico. Este evento consiste em utilizar da parcela mais engajada da comunidade para fazer uma varredura mais completa e mais profunda da fauna e flora local, muito similar ao processo da DO, porém mais relaxado nos procedimentos de identificação e acompanhamento dos animais.

Neste contexto os equipamentos de biotelemetria cumprem um papel de gerar dados de alta confiança, sem a dificuldade de manter contato direto com o animal, porém a um alto custo material e com baixa densidade de dados. Os dados da biotelemetria devem ser utilizados para corrigir e completar os dados obtidos pelos outros métodos, enriquecendo o modelo ecológico.

O sistema a ser elaborado é um sistema de monitoramento de fauna urbana para pequenos mamíferos, que ficará preso ao animal, *Animal-Borne Instruments* (ABI), a fim de compreender os dados de comportamento deles. Pelo fato destes animais estarem em ambiente urbano, ambiente não natural, pouco se foi estudado e compreendido da sua área de vida e utilização de recursos, portanto o estudo conduzido visa entender como estes animais alteram suas dinâmicas sociais e de uso de recursos espaço temporal em florestas urbanas.

### 3.1 Requisitos

Visando ajudar a responder as perguntas envolvidas no projeto Saguis do Butantan foi realizado uma série de entrevistas com os biólogos envolvidos no projeto a fim de elaborar os casos de uso que capturassem o comportamento desejado e as características não funcionais esperadas.

Os biólogos desejam compreender como estes animais estão interagindo intra e entre grupos, portanto, os ABIs devem ser capazes de se comunicarem entre si e identificarem

qual animal está em contato com qual animal. Também é desejado saber onde e quando estes animais estão, para entender o uso dos recursos espaço-temporais, compreendendo locais e momentos de maior atividade destes animais. Por serem animais arborícolas, a compreensão do uso espacial envolve a compreensão de qual estrato arbóreo está sendo utilizado.

Para satisfazer a primeira demanda, a tecnologia mais utilizada pela comunidade científica são as *tags* de proximidade, enquanto para a segunda usam-se GPS e IMUs, porém no caso específico do estrato arbóreo, ele pode ser inferido pelo uso de barômetros para medir a altitude em que o animal se encontra.

Porém este sistema possui altos requisitos de tempo de operação, para conseguir dados suficientes para que o experimento seja estatisticamente significativo e requisito de peso para que não afete a vida do animal.

O objetivo de compreender estes dois fatores é compreender como os fatores antrópicos influenciam a ecologia da fauna urbana e entender qual o papel ecológico que estes animais exóticos para a cidade de São Paulo estão tendo.

A MarmoNet deve ser projetada para animais um mamífero de pequeno porte, arborícola e inteligente. É proposto que o sistema seja feito para ser instalado nos animais sem a necessidade de recapturas, devido a tentativas frustradas no passado pelo grupo de pesquisa. Desta forma o projeto da MarmoNet seria uma RSSFs composta por duas partes principais, um Node nos animais, responsável por capturar os dados de interesse dos pesquisadores, e um BS capaz de recuperar os dados, visto que não será possível recuperar o Node com os dados salvos na memória.

Após esta breve introdução à problemática que a MarmoNet está inserida, serão explorados mais a fundo os requisitos funcionais e não funcionais e por fim a especificação do sistema, onde apresentaremos os requisitos prioritários e como contornar as demandas que não poderiam ser totalmente satisfeitas devido aos conflitos de requisitos.

### 3.1.1 Requisitos Funcionais

Para descrever este sistema foram elaborados dois casos de uso, seguindo o modelo proposto por (COCKBURN, 2000; COLOMBINI; SIQUEIRA, 2021). Cada caso de uso visa capturar as duas principais atividades do sistema:

1. Upload dos dados do Node para uma BS;
2. A detecção de vizinhança dos Nodes;
3. Coleta de dados de Sensores;
4. Node de rastreamento;

os casos de uso se encontram no Anexo A. Porém serão brevemente descritos conforme a sequência de ações a seguir:

O caso de uso de *upload* de dados consiste na sequência de ações que serão tomadas pelo sistema para que os dados sejam salvos nas BSs, permitindo a recuperação deles pelos biólogos.

A detecção de Nodos vizinhos é como o sistema de *tags* de proximidade (RFIDs) irá funcionar, essencialmente baseado em um TDMA (*Time Division Multiple Access*), porém em um segundo momento os dados fluem de um Node a outro, baseado em rankings pela probabilidade de enviar o dado a uma BS (baseado na ZebraNet).

A coleta de dados dos sensores consiste somente no escalonamento da leitura dos sensores. Ele foi colocado separado da detecção de vizinhança por duas principais razões: a coleta de dados de sensores ocorre em um escopo apenas interno do Node e ao separarmos as duas atividades podemos fazer um sistema orientado a eventos com ciclos de trabalhos diferentes para estas duas atividades.

O Node de rastreamento consiste em um Node específico para a reconstrução da trajetória dos saguis. A princípio era desejado que fosse possível identificar os territórios diretamente, seja por GPS ou IMUs, portanto alguns indivíduos seriam equipados com Nodos que seriam responsáveis somente por estimação de trajetórias, não realizando nenhuma outra tarefa, devido a alta demanda de energia.

Desta forma seria possível responder às perguntas de momentos e locais de atividade mais intensa, uso de recursos espaciais e interação entre e intra grupos. Como consequência poderia-se inferir como os fatores urbanos afetam a vida destes animais.

### 3.1.2 Requisitos não Funcionais

O elemento central da MarmoNet são os ABIs, o uso deste tipo de equipamento é regulado pelo comitê de ética e é estabelecido pela comunidade científica, que para que o equipamento possa ser instalado no animais sem prejudicar sua qualidade de vida ele não deve pesar mais de 5% do peso do animal (LEVIN et al., 2015). Para o caso dos saguis das espécies *C. Jacchus* e *C. Penicillata*, que pesam no máximo 350g, é esperado que um adulto consiga carregar um ABI de peso aproximado de 15 g (suporte, eletrônica e bateria).

Também foi definido pelos biólogos deste projeto que o ABI deve ter um suporte tal que ele não deve afetar a amamentação nem o transporte dos filhotes, limitando as possibilidades de design. Não podendo utilizar mochilas ou amarrações que afetem ou cubram significativamente as costas e o ventre.

A fim de obter uma quantidade significativa de dados, os biólogos desejavam que o

equipamento tivesse um tempo de vida útil de pelo menos 6 meses a 1 ano.

Era também desejável que o sistema possuísse um elo frágil no ABI, permitindo que os Nodes caíssem após um tempo. Isto permitiria a recuperação da eletrônica e também reduziria os riscos de acidentes envolvendo os ABIs (por exemplo, enforcamento em um galho).

## 3.2 Especificação e Resolução dos conflitos de Requisitos

A partir dos requisitos elicitados foi elaborada uma lista de funcionalidade e requisitos não funcionais desejados e classificados conforme a relevância para o projeto, e definindo as prioridades entre os requisitos conflitantes e como seriam relaxados ou abandonados os requisitos menos prioritários.

Com esta revisão e resolução de conflitos de requisitos o sistema foi especificado e posteriormente projetado.

A lista de requisitos não funcionais é:

1. Tempo de duração da bateria do sistema: desejado 6 meses;
2. Resistência à umidade e impacto (ambiente que ele estará inserido);
3. Peso máximo de 18 a 15g (5% de 350g, peso estimado de um C. Jacchus).

A lista de requisitos funcionais e as perguntas que elas desejam responder são apresentadas abaixo conforme sua prioridade, que será posteriormente justificada:

1. Quais animais interagem entre si (interação entre grupo principalmente)
  - a) Devido a influência humana, os *Callithrix*, animais territorialistas, coexistem com outros bandos em algumas regiões simultaneamente?
2. Determinar área ocupada:
  - a) Quais os recursos estão disponíveis para cada bando?
  - b) Rastrear as bordas dos territórios e como ela está definida;
3. Determinar a altura que estão
  - a) Determinar o estrato arbóreo para entender sua proximidade com seres humanos e quais a principais fontes de recursos consumida (antrópica ou natural);
4. Trajetória estimada;
  - a) Qual sua rotina de uso do território?

5. Momentos de atividades;

a) Seu comportamento em florestas urbanas é o esperado para animais na natureza?

6. Locais de atividade;

a) Entender a dinâmica de uso territorial;

Os requisitos não funcionais foram definidos como preponderantes sobre todos os requisitos funcionais. Portanto, a classificação dos requisitos funcionais vai definir quais serão atendidos. Como este estudo tira proveito do uso de diversas fontes de dados (DO e CS) além da biotelemetria, o sistema deve ser desenhado para suprir os dados que não podem ser adquiridos pelos demais estudos.

Com essas premissas em mente sabemos que os métodos clássicos de estudo de comportamento e área de vida permitem estimar o territórios dos bandos, porém é muito difícil identificar os animais e endereçar quais animais estão interagindo entre si. Portanto, a funcionalidade principal do sistema é o funcionamento como uma tag de proximidade (LEVIN et al., 2015).

Apesar dos métodos tradicionais de DO e da grande disponibilidade de dados gerados pela CS permitirem gerar modelos de área de vida eles possuem erros estatísticos, seja pela complexidade de seguir os animais durante as campanhas para DO ou o viés dos dados da CS, portanto se a biotelemetria permitir gerar dados que possam enriquecer este modelo é altamente desejado. Ao enriquecer o modelo de área de vida a biotelemetria pode permitir a identificação de sobreposição de territórios, que mostrará potenciais locais de interação intra grupos e potencial influência do ambiente antrópico sobre o uso do território. Dado o uso excessivo de energia de acelerômetros e GPSs foi utilizado BSs posicionadas e georreferenciadas para a identificação de onde os animais estão passando (DREWE et al., 2012).

Uma das questões mais importantes da pesquisa em questão é compreender como estes animais estão interagindo com as pessoas, porém não se sabe qual a intensidade dessas interações nem a frequência. Desta forma quer se medir quanto tempo estes animais estão em potencial interação com ambientes humanos ao medir qual estrato arbóreo estão utilizando.

Os três últimos requisitos funcionais foram abandonados por serem conflitantes com os requisitos não funcionais. Para todos seria necessário o uso de IMUs ou GPS, dois sensores que demandam muita energia, e no caso do GPS um aumento do peso do sistema. Apesar da possibilidade de se criar nós específicos para apenas coletar os dados de movimento, foi preferido um maior número de animais monitorados como tags de proximidade, pois os dados de uso territorial podem ser inferidos pelos outros métodos de aquisição de dados do projeto.

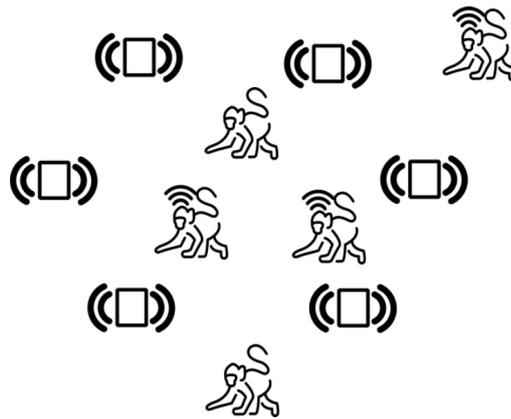


Figura 13 – Representação da MarmoNet, onde alguns animais de cada grupo serão equipados com ABIs e BSs serão espalhadas pela área de estudo para capturar os dados destes animais. Outros grupos também terão animais equipados, o que permitirá a identificação de uso de territórios e interação inter e intra grupos

Além dos requisitos classificados acima, o sistema possui uma característica que induz a uma série de funcionalidades que devem ser adicionadas. Não é esperado que haja recapturas dos animais para troca de baterias e download dos dados. O sistema, portanto, deve possuir sorvedouros de dados que capturam os dados que fluem pela rede, esta funcionalidade está associada às BSs.

Com todas estas informações podemos desenhar um sistema de RSSF cuja esperamos nós internos compostos por ABIs que capturam dados de interação e ambientais (pressão atmosférica principalmente) e uma borda da rede que recupera esses dados, conforme Figura 13. Este sistema será denominado MarmoNet.

### 3.3 Projeto da MarmoNet - Design Agnóstico de Plataforma

Após a discussão dos requisitos e especificações podemos analisar a estrutura comportamental do sistema, que atenda os requisitos demandados, antes de definirmos a plataforma.

Esta abordagem mais genérica permitiu que os requisitos fossem ainda melhores elicitados durante o desenvolvimento ao apresentarmos potenciais designs aos biólogos. Além de dar um vislumbre das características mais importantes buscadas nas plataformas para o desenvolvimento e implementação do sistema.

A MarmoNet será composta principalmente por três tipos de dispositivos:

- **Node:** eletrônica do ABI instalado no animal, principal responsável pela captura de dados;
- **BS:** equipamento fixo capaz de recuperar os dados, sincronizar e configurar os Nodes;

- **Agregador de dados:** dispositivo responsável pela agregação dos dados recuperados pelas BSs, para tratamento posterior, e referência de tempo para sincronização do sistema.

Estes dispositivos existem rotinas internas focadas na coleta de dados dos sensores e nas interações entre os elementos da rede, que, por sua vez, atendem os requisitos de interação entre animais e a passagem de dados na rede.

O segundo tipo de rotina é a de maior interesse para o design do projeto. Das interações entre dispositivos possuímos:

- Node/Node;
- Node/FS;
- Node/BS;
- BS/BS;
- BS/Agregador;

O primeiro tipo de interação pode ser identificada na Figura 14. Ao descrever a interação Node/Node resolvemos o problema de interação entre animais, definindo a passagem de um ID entre cada animal. O projeto inicialmente contava com a capacidade de transmissão de dados na interação Node/Node, como ocorre na ZebraNet, para aumentar as chances de recuperação dos dados, porém tal funcionalidade acrescenta a complexidade da gestão dos dados repetidos em toda a rede e aumenta significativamente o uso de energia, ao aumentar a quantidade de dados transmitidos na rede. Porém, como os *Callithrix* são animais que andam em grupos coesos, pode-se assumir que a presença de um indivíduo indica a presença de todo o grupo, desta forma, podemos simplificar a interação Node/Node, eliminando a necessidade de propagar dados por toda a rede. Pois a BS que recuperar o dado de um indivíduo do bando irá recuperar dos demais.

A interação Node/Node é caracterizada como uma interação de muitos para muitos, pois desejamos identificar todos os envolvidos nas interações. Portanto as comunicações são feitas em *broadcast*, permitindo este modelo de comunicação e também com um menor consumo de energia, por reduzir a necessidade de cabeçalhos.

A interação Node/BS, Figura 15, é a interação que permite recuperar os dados da rede sem a necessidade de capturar os animais e manter a rede sincronizada. Um dos requisitos mais fortes do sistema é o consumo de bateria, portanto a rede será síncrona, mantendo a rede em estado de hibernação entre cada rotina, como consequência o sistema é sensível as diferenças dos *clocks* de cada elemento da rede. Desta forma as BS são as

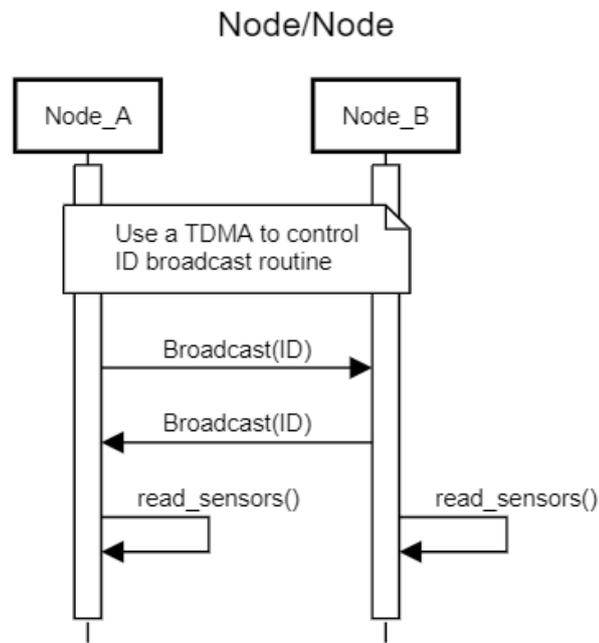


Figura 14 – Diagrama de interação entre dois Nodes.

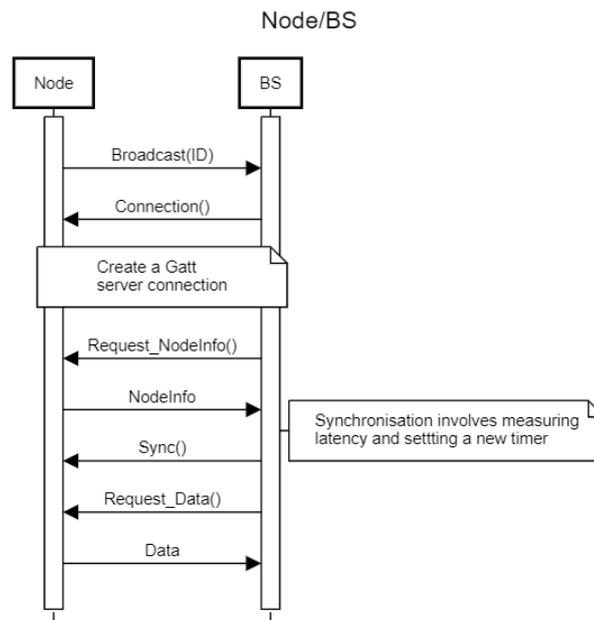


Figura 15 – Diagrama de interação de uma BS com um Node.

responsáveis por corrigir os erros de evolução do *clock* dos Nodes, para o bom funcionamento do sistema, mais informações na 2.1.

Como apresentado, a rede possui um comportamento síncrono, porém os *clocks* podem desviar o suficiente para que um Node nunca acorde ao mesmo tempo que uma BS e outro Node, inviabilizando o funcionamento da rede. Como não podemos garantir que os Nodes serão sincronizados, isso acontece somente se o animal se aproximar de uma BS, um modo de recuperação (*Fail Safe*) (FS) foi adicionado ao Node. A Figura 16 captura a Máquina de Estados que representa o comportamento do Node. Neste modo seu ID é

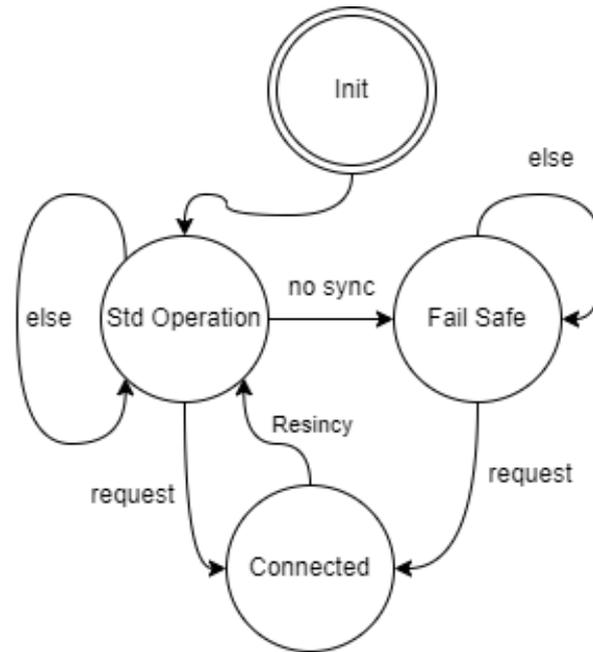


Figura 16 – Máquina de Estados Finita que representa o comportamento de um Node na rede.

alterado indicando que o sistema está em FS, permitindo que outros Nodes identifiquem o Node afetado.

Foi também projetado uma interação Node/FS, permitindo que um Node em operação sincronize um Node em FS para reinseri-lo na rede. Porém ela não foi implementada devido a falta de tempo para implementação de um modelo de sincronização que garanta que um Node é suficientemente sincronizado com a rede para reativar o Node em FS, pois é esperado uma ponderação de quando foi realizada a última sincronização do Node com uma BS e as características já conhecidas deste Node, para avaliar a qualidade do tempo marcado.

As BSs serão espalhadas pelo espaço a ser estudado e sua presença pode criar uma rede de comunicação entre elas, criando uma rede *mesh*, esta rede permite que os dados possam ser encaminhados de uma BS para o Agregador sem a necessidade de estar no alcance do mesmo. Esta rede de BS também aumenta a garantia que as BSs envolvidas estão sincronizadas com o sistema com maior facilidade. Apesar de projetado esta funcionalidade não foi implementada por indisponibilidade de recursos (módulo LoRa apresentado na Seção 4.1) e tempo de desenvolvimento.

Para que as BS possam sincronizar os Nodes elas devem estar sincronizadas entre si. Para resolver este problema existirá um dispositivo que será eleito como a referência de tempo. Este elemento será o Agregador. O Agregador possui função dupla de agregar os dados das BS e de ditar qual o tempo de referência para todos os dispositivos. Tendo um comportamento similar ao definido entre a BS e o Node em 15, porém neste caso o Agregador, operado pelo usuário cumpre o papel da BS.

O Agregador, diferente dos demais dispositivos, é operado pelo biólogo, permitindo, sendo todos seus comandos dependentes de uma iniciativa do pesquisador. Essencialmente deseja-se que o sistema seja completamente independente de intervenção humana, porém não houve tempo para a implementação na MarmoNet.

Para RSSFs um dos fatores que deve-se manter atenção é a segurança dos dados, evitando ataques a rede que podem corromper a integridade dos dados e até desativar a rede. Para esta versão da MarmoNet o sistema de segurança é uma palavra de passe, fixada em dois bytes, para identificar quais elementos são autenticados, além da verificação dos endereços MAC para conexões. Apesar da existência das potenciais falhas de segurança, elas estão fora do escopo da proposta da MarmoNet.

## 3.4 Trabalhos Correlatos

Para que a implementação do sistema em desenvolvimento possa ser bem sucedida algumas tarefas foram realizadas. Estas tarefas não estão essencialmente ligadas à engenharia nem ao design do projeto. Entretanto elas são necessárias para contornar algumas consequências do design escolhido.

Para que as BSs possam recuperar os dados dos animais elas devem ser posicionadas de forma a encontrar os animais eventualmente, sendo desejado uma vez ao dia. Para que isso seja possível deve-se entender onde estes animais estão e com que frequência eles passam em cada região.

Além disso, também é necessário entender quantos animais existem e quais serão monitorados. Os *Callithrix* nunca foram estudados na Cidade Universitária e no instituto Butantan, levando a uma escassez de informações.

A fim de atacar estes problemas foram realizadas atividades de campo para encontrar estes animais e identificar os grupos, iniciando também uma estimativa de seus territórios. Estas atividades ocorreram no parque do Instituto Butantan, que foi dividido nas áreas de interesse de interesse.

A princípio foram realizadas diversas expedições para DO nos horários que os saguis deveriam apresentar maior atividade (7h00 às 9h ou das 16h às 18h00). Estas expedições percorreram as trilhas marcadas no mapa procurando sinais de presença dos animais (principalmente a raspagem em árvores), tentando escutar seus chamados, sendo o mais marcante o *phoe-call*, característico pela sua função de um membro buscar os outros membros do grupo, e o animal ele mesmo.

Por serem animais arborícolas existe uma dificuldade na localização destes animais na natureza, além da dificuldade de manter eles no campo de visão, porém estes animais respondem a *playback* do *phoe-call*, permitindo os pesquisadores de se “comunicarem” com



Figura 17 – Captura de imagens térmicas com um UAV de saguis no Campus da USP

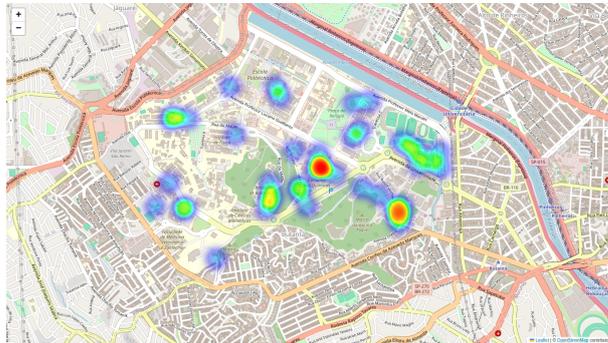


Figura 18 – Mapa de calor da ocorrência de saguis no Campus da USP e do Instituto Butantan obtidos com base nos dados de Ciência Cidadã.

os animais, chamando-os com os *playbacks*, aumentando as chances de localizar os animais.

Um dos pontos que os saguis frequentam que é de alto interesse é o sítio de dormida, pois se localizado, possuímos chances altas de posicionar BSs que irão entrar em contato com os animais. Para identificar estes locais os animais foram seguidos durante o final da tarde, no horário que eles costumam se recolher (perto das 17h30).

Depois de localizados potenciais regiões que seriam o sítio de dormida, foram utilizados UAVs equipados com câmeras térmicas durante a noite para a identificação destes sítios a partir da assinatura de calor dos animais. Como apresentado na Figura 17, onde encontramos um grupo na copa de uma árvore ao lado da Casa Japonesa da USP.

Outra tecnologia utilizada foram cameras *traps*, câmeras que ao detectarem movimento gravar pequenos vídeos. As câmeras conseguiram identificar alguns eventos de presença destes animais, principalmente na realização de raspagens em árvores suspeitas de serem alvos deles.

Os dados preliminares de CS também estão sendo usados para identificar onde estes animais frequentam. Ao somarmos todos estes dados foi possível gerar o mapa de calor da Figura 18, que será usado como guia para o posicionamento das BSs na implementação do sistema.

## 4 Implementação Da Rede

No Capítulo 3 apresentamos o problema a ser resolvido e os requisitos envolvidos. Após uma análise dos requisitos apresentamos uma proposta de projeto, visando atender os requisitos funcionais do sistema e atender, em nível de design, os requisitos não funcionais.

Neste Capítulo abordaremos o processo de implementação, solucionando alguns dos demais problemas não funcionais que não foram abordados no design e procurando maneiras viáveis de fazer a implementação do sistema, considerando os recursos disponíveis.

Discutiremos o processo de escolha de *hardware* e suas consequências, protocolos de comunicação, desenvolvimento de algoritmos e processos para a implementação propriamente dita do sistema.

### 4.1 Hardware

Para o desenvolvimento da MarmoNet a escolha do hardware estava intrinsecamente associada às tecnologias de comunicação e sensores disponíveis em cada plataforma, além da disponibilidade dos equipamentos para uma implementação do sistema.

Existiam duas plataformas disponíveis que poderiam ser utilizadas para o projeto:

- Texas Instrument CC2650STK SensorTag;
- Caninos Loucos Pulga;

O CC2650STK é uma plataforma de desenvolvimento proprietário baseado em um ARM Cortex M3 enquanto a Pulga V3 possui um ARM Cortex M4F, ademais os dois sistemas apresentam designs semelhantes, sendo construídos para monitorar ambientes com baixo consumo de energia e comunicação de curto alcance.

No âmbito da comunicação ambos os sistemas são compatíveis com IEEE 802.15.4, Bluetooth, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee e 6LoWPAN. Permitindo uma conectividade de baixíssimo custo energético, apesar do baixo alcance, satisfazendo as necessidades de conectividade e permitindo que o sistema opere como um RFID.

Para o monitoramento ambos os sistemas possuem barômetro, termômetro, higrômetro, acelerômetro, giroscópio, magnetômetro e um sensor de luz. Porém o CC2650STK também está equipado com microfone e um segundo sensor de temperatura, voltando para a captação da temperatura das superfícies que ele está em contato. Dado os requisitos de dados a serem monitorados, ambos os sistemas são satisfatórios.

Porém a Pulga V3 possui um design modular, composta pela Pulga Core, e sistemas complementares acoplados em pilha, permitindo a adição de GPS, sistemas de comunicação de longo alcance (LoRa), módulos para bateria e outros componentes personalizados, enquanto o CC2650STK é um sistema independente, fornecido pela Texas Instruments.

O sistemas que melhor satisfaz os parâmetros dos requisitos propostos é a Pulga V3, pois possui um consumo similar ao do CC2650STK, porém com um poder computacional maior e mais memória disponível no SoC principal. Os sensores apresentam comportamento similar, porém a Pulga possui também componentes mais novos, o que permitia um melhor desempenho. A Pulga V3 também é mais leve que o CC2650STK, possuem respectivamente 4g e 5g, e possui um formato menor e mais adequado, respectivamente círculo de raio de 25mm e um retângulo de 3 cm x 4 cm, facilitando a instalação do ABI. A Tabela 3 apresenta uma comparação do SoC principal de ambos os sistemas.

Tabela 3 – Tabela comparativa dos *hardwares* disponíveis para desenvolvimento, onde P se refere a pressão, H a umidade e T a temperatura.

	Pulga	Ti CC2650STK
MCU	ARM Cortex-M4 F	ARM Cortex-M3
Clock	64 MHz	48 MHz
Flash Programável	1024 kB	8 kB
Cache	256 kB	20 kB
Timers	5 x 32 bit timers e 3 RTC	8 x 16 bit timer ou 4 x 32 bit
Desempenho	64 CoreMark/mA	48,5 CoreMark/mA
Consumo Máxima do SoC	6,5 mA	3,1 mA
Consumo em hibernação	1,85 $\mu A$ , com retenção de RAM	1 $\mu A$
Sensor de pressão	BME280	BMP280
Sensor de umidade e temperatura	BME280	HDC100
Consumo dos sensores combinados (1 Hz)	3,6 $\mu A$	3,74 $\mu A$
Consumo em hibernação combinados	0,1 $\mu A$	0,3 $\mu A$
Resolução (P, H, T)	0,2 Pa, $\pm 3\%$ , $\pm 0, 5^\circ C$	0,1 Pa, $\pm 3\%$ , $\pm 0, 2^\circ C$

Fonte: Produzido pelos autores baseado nas especificações das placas.

Para além dos requisitos propostos, a utilização da Pulga nos permite integrar o projeto a uma plataforma *open hardware* e manufaturada na Escola Politécnica. Sendo assim possuímos a liberdade de em futuras interações desenhar um hardware mais adequado para monitoramento de fauna, além de contar com o conhecimento disponível no CITI-USP em IoT.

A pulga utiliza um cristal de 32 kHz para controlar o *clock* interno. Este componente possui um erro de  $\pm 20$  ppm, o que implica um pior cenário esperado de 40 ppm. Um erro dessa magnitude implica em um desvio de 1 segundo a cada 7 horas, dado que será relevante na definição do comportamento do sistema.

Desta forma os Nodes e a BSs foram implementadas em Pulgas. Enquanto o Agregador está sendo desenvolvido para aparelho celular, permitindo que o biólogo possa recuperar os dados durante trabalho de campo.

## 4.2 Sistema de Comunicação

O Nodes estão inseridos em um ambiente de florestas urbanas de uma região originalmente de mata atlântica, portanto são ambientes de alta umidade relativa e alta densidade de árvores, tais elementos grandes obstáculos para sistemas de comunicação, desta forma. Apesar destes obstáculos a comunicação precisa ser realizada na maior distância possível, pois não se pode ter certeza de onde os saguis estarão, mas apenas uma estimativa baseada em conhecimento prévio dos trabalhos de campo, portanto, um maior alcance significa uma maior chance de o sistema se conectar.

Considerando as características ambientais e a necessidade de encontrar o animal em grandes ambientes tradicionalmente se utilizam comunicações VHF, permitindo um maior alcance a uma mesma potência, como apresentado pela equação de perda de caminho no espaço livre, Equação 4.1, onde  $L$  é a perda,  $d$  a distância e  $\lambda$  o comprimento de onda (PROAKIS; SALEHI, 2001), porém reduzindo a vazão de dados.

$$L = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (4.1)$$

Apesar da área de monitoramento de fauna possuir especial interesse no uso de VHF a MarmoNet não faz uso desta faixa de frequência, pois a adição deste sistema a pulga, apesar de possível com o módulo LoRa, aumentaria significativamente o peso do sistema e o uso energético. Desta forma o sistema está limitado ao uso dos sistemas de comunicação já existentes no SoC principal, todos baseados em 2,4 GHz (UHF).

Dentre os protocolos de comunicação presentes (Capítulo 4.1) e suas características (Capítulo 2.1) optamos pelo uso do BLE. Apesar de suas características de rede serem muito similares às do ZigBee, a vantagem de se utilizar um sistema de comunicação baseado em Bluetooth é a possibilidade do uso dos aparelhos móveis de cientistas cidadãos para criar uma rede de BSs móveis.

### 4.2.1 Bluetooth Low Energy

O BLE possui 3 topologias (Bluetooth SIG, 2024):

- *broadcast*: um elemento da rede emite os dados sem uma conexão explícita;
- Ponto-a-Ponto: um elemento central se conecta a um elemento periférico e existe uma comunicação direta entre eles;

- *mesh*: cada elemento da rede se conecta aos seus vizinhos, criando uma comunicação muitos para muitos.

A topologia escolhida para os elementos centrais da rede foi a de *broadcast*, devido ao seu baixo custo energético. O *broadcast* do BLE faz uso de uma emissão de pacotes de comunicação com até 32 bytes de *payload* em operação normal, porém em operação estendida até 256 bytes. Para que ele seja compatível com uma comunicação muitos para muitos foi utilizado um TDMA baseado no sincronismo do sistema.

Para a comunicação entre Nodes e BSs a topologia mais adequada é a Ponto-a-Ponto, onde a BS se comporta como um nó central e o Node um periférico. A comunicação é então estabelecida em um modelo cliente-servidor pelo protocolo GATT, o cliente que requisita dados e envia comando para o servidor, o nó periférico. Porém o servidor também pode enviar notificações para o cliente, como uma forma de transmissão de dados sem requisição. A implementação do GATT permite transmissões de dados de 23 a 527 bytes, permitindo a transmissão de múltiplos ciclos de trabalho por pacote.

A implementação *mesh* seria de interesse caso não fosse assumida a hipótese simplificadora de que os *Callithrix* andam em grupos coesos (Capítulo 2.3). Com esta hipótese podemos eliminar a necessidade da propagação dos dados na rede, como descrito no Capítulo 3.3.

## 4.3 Node

O Node representa os elementos internos da MarmoNet, sendo o algoritmo e a eletrônica presos ao animal, enquanto o dispositivo contendo a coleira, o ABI. O Node neste caso será composto pelo hardware e *firmware*. Desta forma neste capítulo será explorada a implementação dos algoritmos apresentados em 3.3 e as consequências de cada tomada de decisão.

### 4.3.1 Firmware

No 3 foi apresentado um design em alto nível do comportamento do sistema, focando nas características que o sistema como um todo terá. Portanto nesta seção detalharemos melhor o design do projeto e como foi implementado.

O Node ele possui essencialmente 4 estados (Capítulo 3.3). *Init*, onde o sistema se configura se prepara para a operação; Operação Padrão (*Std Operation*), momento em que são coletados os dados, sejam eles de sensores ou de proximidade; *Fail Safe*, em caso de perda de sincronia com o sistema ele altera seu modo de comportamento, permitindo que seja encontrado mais facilmente por outro elementos da rede, podendo, ao menos marcar

que ele saiu da rede; e *Connected*, momento em que uma BS se conectou ao Node e agora ele responde às demandas da BS para passagem de dados e sincronização.

Ao final das atividades de cada estado o sistema entra em hibernação pelo período configurado. Para o estado Operação Padrão este tempo depende do momento do dia, sendo inicialmente configurado para hibernações mais longas no período noturno, desta forma podemos economizar energia hibernando por mais tempo em momento que os animais não estão ativos e fazendo amostragens nos momentos de maior interesse. Já o *Fail Safe* ele emite pequenas quantidades de sinais em intervalos bem mais curtos, permitindo que sejam mais facilmente encontrados.

Já no estado *Connected* o tempo de hibernação é configurado pela ressincronização, sendo marcado o tempo faltante para o próximo ciclo de trabalho estimado pela BS. O mesmo vale para o *Init*, pois neste momento o Node ainda não está configurado para entender o comportamento da rede, maiores detalhes sobre a sincronização no Capítulo 4.5.

Considerando a natureza de um ciclo de trabalho foi decidido a utilização de uma arquitetura orientada a eventos. A princípio apenas eventos de natureza temporal são analisados, considerando uma contagem do cristal no chip. Portanto as transições de estados ocorrem de acordo com a emissão do sinal do temporizador. Porém, etapas mais avançadas podem considerar irradiação solar como um fator de atividade ou não do sistema.

Uma versão inicial do trabalho pode ser bastante correlacionada com o trabalho de Camal (CAMAL; AKSANLI, 2020), porém seu trabalho não está completo quanto a aquisição de dados nem a capacidade de lidar com ambientes menos controlados, considerando que seu trabalho considera apenas animais em um santuário. Além disso, seu trabalho também não considera os problemas de sincronização inerentes aos sistemas eletrônicos.

Para solucionar estas lacunas a MarmoNet, que busca a solução para animais silvestres, propõe o seguinte ASM na Figura 19

No ASM podemos confirmar a existência de um estado de configuração, aguardando a conexão de um BS para preparar os ciclos de trabalho, uma vez configurado o sistema entra em hibernação até o próximo ciclo de trabalho.

Uma vez que o tempo de hibernação termina, o sistema verifica o estado atual e lança as rotinas de coleta de dados e *advertising*. Enquanto o *advertising* é feito o sistema verifica as demandas de conexão de BSs. Caso haja uma conexão é então realizada a rotina descrita no diagrama de interação no 3.3. Caso não haja demanda de conexão o Node verifica se já está a muito tempo sem ser ressincronizado a rede, em caso positivo ele configura para o estado de *Fail Safe*, se não continua em operação normal, fechando o ciclo de trabalho.

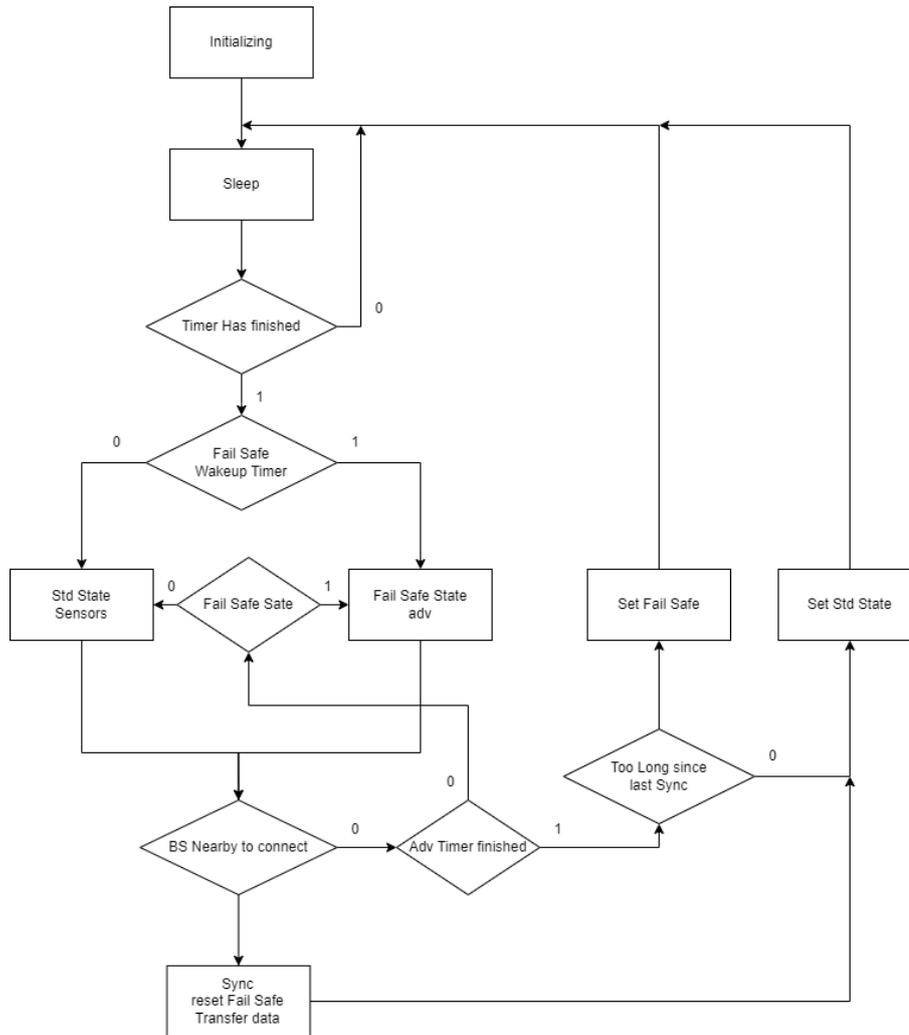


Figura 19 – ASM proposto pela MarmoNet para o Node da rede.

Toda vez que nos referirmos a um ciclo de trabalho estamos referindo ao conjunto de ações e tomadas de decisões entre um estado de *sleep* e outro.

Por simplicidade da compreensão do sistema, não é apresentado o tempo variável de hibernação, porém pode-se inferir que a definição da duração das hibernações está relacionada à definição de intervalo de trabalho do modo de Operação Padrão. No caso da implementação prevista, é previsto 12h com ciclos de trabalho regulares e 12h de inatividade do sistema.

Uma vez que o Node opera normalmente, ele ativará os sensores para a coleta de dados e os desativará, o mesmo vale para o rádio BLE. Isto é particularmente possível pois o BMX260 permite um modo de operação de baixo consumo que mantém o CI desativado e apenas o reativa para coletar algumas amostras e desativar o sensor, sem a necessidade de um período de *warm up*.

Uma vez que os dados são coletados é necessário fazer os envios para as BSs e também permitir a sincronização. Para que estas atividades sejam feitas o Node possui os

seguintes pontos de conexão GATT:

- Latência: recebe um pedido e responde com um byte, para possibilitar estimar a latência utilizando o Algoritmo de Cristian (CRISTIAN, 1989);
- Status: responde com as informações do Node (*NodeInfo* no Capítulo 4.6);
- Dados: faz o envio dos dados coletados durante o experimento;
- Sensores: permite com que os sensores sejam ligados ou desligados durante o experimento, tal funcionalidade foi adicionada, apesar de não ter sido elicitada.

O ponto de acesso para configuração dos sensores permite uma modificação das atividades do ciclo de trabalho durante o experimento. Ele faz isso ao definir uma máscara que marca os bits dos sensores a serem lidos. Neste experimento os sensores ativados são: barômetro, termômetro, higrômetro (alocados no CI BMX260) e proximidade (a partir do BLE). Enquanto o BMX260 permite que ele seja completamente ou parcialmente desativado, quando a detecção de proximidade é desativada, o Node para de realizar a detecção dos Nodes próximos, ou seja, não realiza mais uma escuta com o rádio, realizando apenas *advertising* na espera de se conectar a outra BS.

Já o ponto de acesso para recuperação de dados envia a estrutura de dados de evento. Nela consta todos os dados de sensores e quando foram coletados. Apesar do BLE permitir uma transferência de até 527 bytes por pacote, houveram dificuldades na implementação desta funcionalidade no RIoTOS, realizando envios de apenas 1 evento por solicitação, porém a BS realiza um sequência de solicitações, compatível com os valores de status enviados.

A distância de comunicação era um parâmetro importante para o projeto. Apesar das limitações do sistema foi possível atingir até 15 metros de conexão modificando o RIoTOS para permitir que o *buffer* de potência de comunicação do SoC fosse incrementado para seu valor máximo. Mais detalhes serão apresentados na 6.1.1

A implementação do Node no animal, está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento da coleira, portanto isto será abordado no Capítulo 5. Que está separado desta seção pela complexidade adicional para o desenvolvimento, sendo não correlacionado ao escopo da eletrônica nem ao *firmware*.

## 4.4 Base Station

A Base Station (BS) é o elemento que delimita o espaço de coleta de dados dos Nodes. Suas funções já foram diversas vezes apresentadas ao longo deste documento,

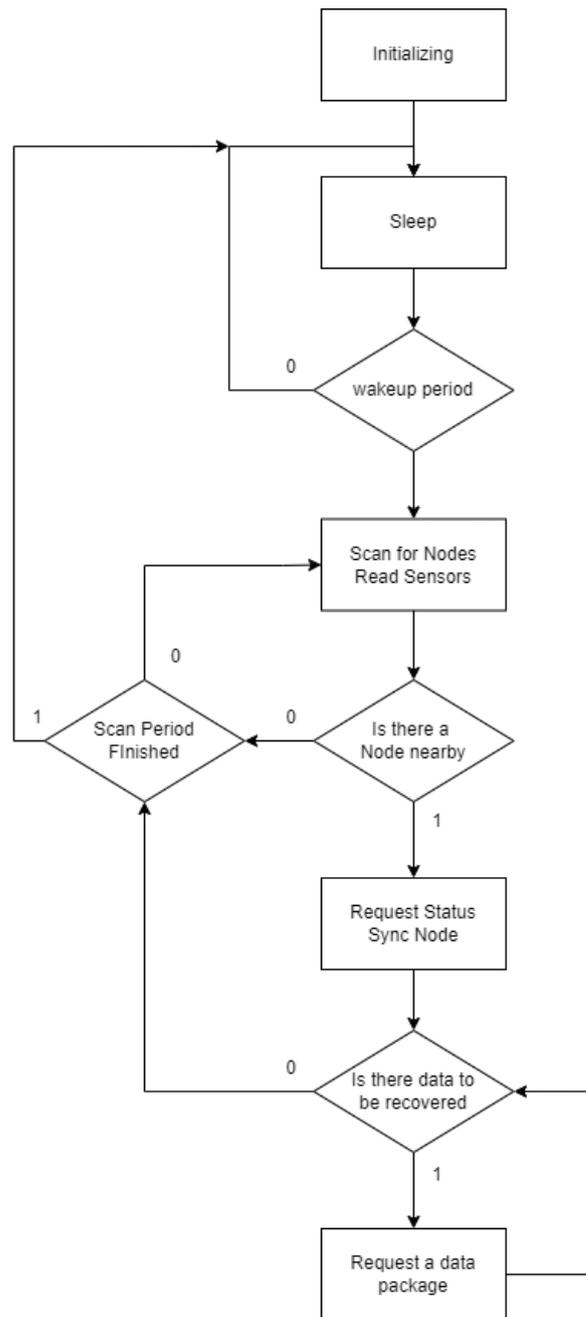


Figura 20 – ASM da BS, capturando o fluxo de ações proposto pela MarmoNet

restando apenas uma especificação mais detalhada do processo de implementação e dos algoritmos convenientes para este componente.

#### 4.4.1 Firmware

O *firmware* da BS foi elaborado sem considerar critérios energéticos, e sua principal característica é dar o suporte para os Nodes. Seu ASM, apresentado na Figura 20, apresenta alguns comportamentos similares ao comportamento do Node, porém existem nuances na implementação que devem ser consideradas para que seja possível o bom funcionamento do sistema.



Figura 21 – Janela de comunicação, que se inicia em  $T_{-1}$  com um tempo de acomodação em amarelo, para que elementos não sincronizados sejam identificados, permitindo que as BSs recuperem-nos. Os tempos  $T_0$  e  $T_1$  representam a janela esperada de comunicação (verde). Um segundo tempo de acomodação é adicionado ao final (até  $T_2$ ), cumprindo o mesmo papel de permitir a sincronização de dispositivos. Em azul estão dois exemplos de ciclos de trabalhos possíveis, evidenciando o desvio do tempo de cada um deles com  $T_e$ .

A BS apresenta uma etapa inicial de inicialização, aguardando o agregador definir seus ciclos de trabalho e características de funcionamento. Entrando em hibernação até o primeiro ciclo de trabalho começar. Em um ciclo de trabalho a BS não realiza *advertising*, apenas procura os Nodes nas redondezas, anotando as passagens e conectando-se aos Nodes para realizar a sincronização e a coleta de dados.

Uma vez coletado os dados e sincronizado o Node, a BS volta a busca de possíveis Nodes nas redondezas. É interessante ressaltar que, a princípio, não é esperado que muitos Nodes estejam perto de uma BS ao mesmo tempo, devido às suas características territorialistas e de grupos familiares coesos. Como consequência destas duas características, em primeiro momento podemos negligenciar, por simplicidade, a necessidade de detectar quantos elementos estão nas redondezas e configurar para que todos sejam conectados, sincronizados e tenham os dados coletados.

O fator de complexidade que seria adicionado caso deseja-se manter um sistema que se comunica com diversos elementos ao mesmo tempo é gerenciar o sistema operacional de uma maneira a não ocasionar nenhum pânico no sistema operacional. Este erro leva a perda total dos dados no dispositivo e sua dessincronização do sistema.

O comportamento da BS para sincronizar os sistemas deve considerar que os Nodes irão desviar os períodos ideais de ciclos de trabalho. Portanto o formato de definição de tempo de hibernação tem que ser diferente, apesar de apresentar o mesmo período. Permitindo abranger janelas de operação que comecem antes do período ideal e se fechem depois, buscando Nodes com maiores desvios, como ilustrado na Figura 21.

Como a intenção é coletar a altura que os animais estão, utiliza-se os dados dos barômetros para inferir a altura. Para que isso seja possível, as BSs também coletaram dados de pressão atmosférica, com o intuito de gerar o referencial que permitirá inferir a altura dos animais.

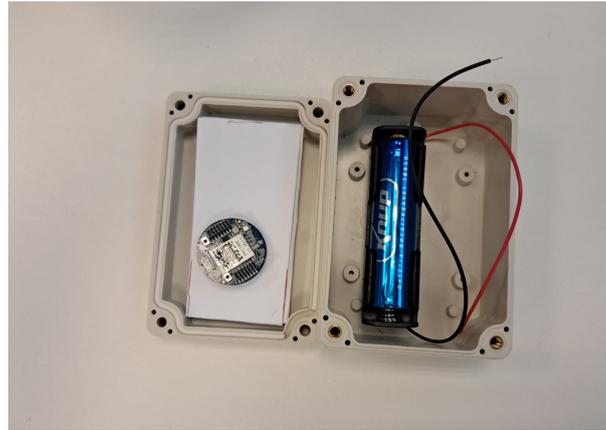


Figura 22 – Foto com o arranjo para a instalação da BS. A bateria 18650, uma Pulga e um *mockup* da PCB em fabricação.

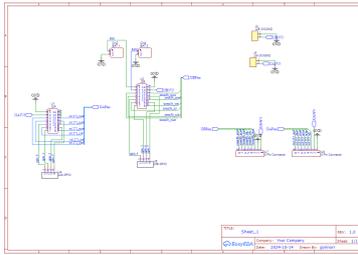
Além das interações com os Nodes, as BSs também irão interagir com o Agregador. Para que isso aconteça, as BSs também serão dotadas de pontos de conexão GATT similares aos dos Nodes, permitindo que os dados sejam recuperados e as BSs sincronizadas. Para efeitos de implementação, os pontos de conexão são os mesmos, porém com rotinas internas implementadas de maneira diferente.

#### 4.4.2 Instalação Física

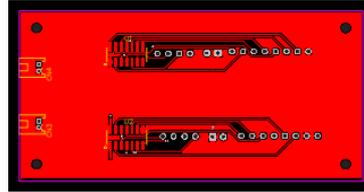
Uma vez validado o sistema eletrônico e os requisitos funcionais, o sistema foi preparado para ser instalado no ambiente de estudo. A instalação será feita considerando os locais que os animais frequentam para certificarmos que coletaremos os dados das coleiras, mas também nos locais que não possuímos dados para verificar se eles frequentam estas áreas, esta tomada de decisão é baseada no mapa de calor já obtido nos estudos preliminares conduzidos pelo grupo de pesquisa (3.4).

O ambiente da floresta urbana do Parque da Ciência do Instituto Butantan é caracterizado pela agressividade à eletrônica: exposição ao sol, chuva, alta umidade e possíveis impactos físicos. Para permitir que o sistema seja resiliente a estes ambientes foi decidido utilizar caixas plásticas com vedação para tornar ele resiliente a água, um exemplo está na Figura 22 (FARIA, 2023).

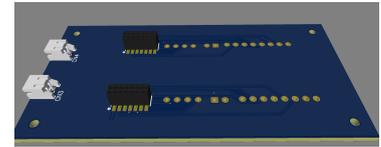
A caixa possui espaço para duas baterias 18650 e a bateria e a Pulga com antena virada para a tampa, visando uma melhor capacidade de conexão. Para melhorar o design da caixa ainda foi projetado uma PCB que permite *hot swapping* das baterias, conectando uma a entrada de bateria e outra a entrada de *harvesting*. Isso permite trocar a bateria sem a necessidade de resincronizar ou mesmo de perder os dados por desligamento do sistema. A PCB ainda permite a adição futuras de sensores externos por externalizar os pinos da Pulga. O design da PCB pode ser visto na Figura 23. A PCB possui 4 furos nos cantos para a inserção de espaçadores que serão fixados na tampa, permitindo então a



(a) Projeto da PCB da BS. Aqui apresenta a distribuição dos pinos e das alimentações.



(b) Esquemático da PCB, permitindo visualizar a montagem do sistema.



(c) Modelo em 3D que permite visualizar o sistema completo depois da montagem.

Figura 23 – Design e esquemático da PCB para ser utilizada nas BSs.

eletrônica ser fixada a caixa.

## 4.5 Sincronização Base Station/Node

O processo de sincronização é um processo de estimação de parâmetros, e para que isso seja feito é necessário a troca de múltiplas mensagens (2.1.2). Porém, esse uso intensivo do rádio para comunicação demandaria uma quantidade proibitiva de energia.

Visando contornar o problema energético, enquanto ainda podemos sincronizar satisfatoriamente os sistemas, foi realizada uma abordagem baseada em um contador de ciclos de trabalho realizado eventos aliado e um contador para o para o próximo ciclo de trabalho. O segundo é diretamente controlado pelo RTC do circuito para emitir o sinal que inicia um ciclo de trabalho, acordando o circuito, efetivamente computando a passagem do tempo. Como consequência pode-se estimar o momento que os eventos ocorreram reconstruindo a partir do evento que estão relacionados.

O modelo apresentado acima é uma solução para o problema do *offset* do tempo. Porém existe ainda o problema de desvio dos *clocks*, o *skew*. Para a identificação do *skew* é realmente necessário a troca de múltiplas mensagens para a identificação, tal processo é proibitivo durante a realização do experimento, como citado acima.

De fato, é possível calcular o *offset* diretamente realizando apenas uma troca de mensagem (KULAKLI; ERCIYES, 2008), porém é necessário manter um *timestamp*, o que necessita de 64 bits no RiotOS. Porém ao utilizar a decomposição para marcar qual ciclo de trabalho foi realizado, permite utilizar apenas uma variável de 16 bits, suficiente para todo o experimento.

Apesar de anteriormente termos comentado que o uso de memória não é um dos elementos mais críticos deste trabalho, armazenar múltiplas variáveis de 64 bits pode reduzir significativamente a capacidade de armazenamento total do sistema. Porém a contrapartida de utilizar o contador de eventos é a necessidade de manter um sistema pré

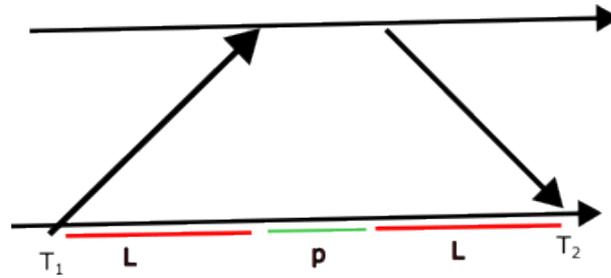


Figura 24 – Comunicação para a realização do Algoritmo de Cristian

definido de intervalo de tempo entre cada evento. Dificultando a capacidade de adicionar amostragens de dados dinamicamente conforme a percepção do sistema.

Portanto, o sistema de sincronização irá definir o valor a ser colocado no RTC, em contagem regressiva para o próximo ciclo de trabalho. Desta forma a BS enviará apenas o valor do seu contador.

Para estimar o erro de *offset* o atraso fixo de comunicação acaba por ser irrelevante (WU; CHAUDHARI; SERPEDIN, 2011), pois a troca de marcações temporais acaba por eliminar estes atrasos naturalmente das equações. Porém nossa implementação é sensível a todos os atrasos, justamente por não realizar trocas de tempo.

Após realizar diversos testes de comunicação, detectamos que Bluetooth possui uma variação muito pequena na latência, permitindo considerá-la apenas como um atraso constante. Logo, para identificar a latência utilizamos o Algoritmo de Cristian (CRISTIAN; FETZER, 1994), que identifica a latência com um erro máximo de COLOCAR AQUI. Este algoritmo detecta a latência ao realizar um envio e uma recepção de mensagem, como ilustrado na Figura 24. A Partir das marcações temporais na BS podemos detectar a latência utilizando a Equação 4.2, onde  $T_1$  é o tempo de envio no referencial do sistema que envia e  $T_2$  o tempo de recepção do referencial do mesmo sistema,  $RTT$  é o *round trip time*, o tempo total de comunicação,  $L$  é a latência e  $p$  o tempo de processamento. Se minimizarmos o tempo de processamento podemos aproximar a latência à  $\frac{RTT}{2}$ .

$$L \leq \frac{RTT}{2} \quad (4.2)$$

$$RTT = 2L + p = T_2 - T_1 \quad (4.3)$$

$$(4.4)$$

Uma vez em posse da latência o sistema pode ser sincronizado, enviando o contador para o próximo ciclo de trabalho corrigido pela latência da comunicação.

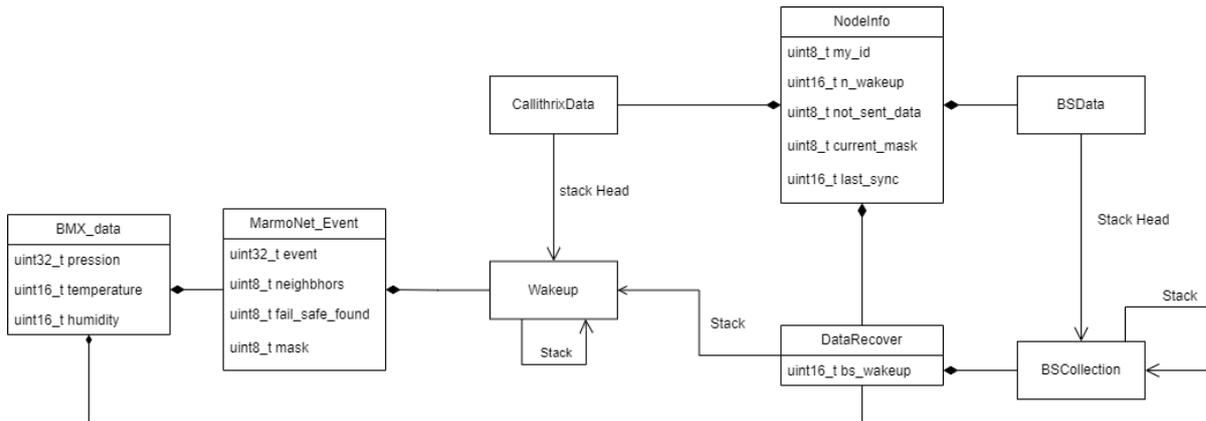


Figura 25 – Estrutura de dados criada para o funcionamento da MarmoNet.

## 4.6 Estrutura de Dados

A estrutura de dados criada para a MarmoNet não é otimizada para o uso de memória, pois memória não é um problema prioritário para a Pulga, que possui memória suficiente para milhares de ciclos de trabalho sem a necessidade de transferir dados. Portanto a atual estrutura, na Figura 25 é focada na facilidade de implementação e recuperação de dados.

Esta estrutura de dados foi criada baseado no resultado da compilação do Protobuf (Google, 2024), que foi utilizado para representar a primeira versão da estrutura de dados a ser utilizada. Porém como os resultados gerados eram compatíveis apenas com Cpp eles foram utilizados como inspiração para os *structs* implementados em C.

Os dados são organizados de tal forma que os sensores possuem sua própria estrutura de dados, acoplados entre si, isto ocorre pois a configuração do sistema permite selecionar os sensores que podem ser utilizados no experimento e modificar quais partes do código serão compiladas. Os dados dos sensores, junto com os dados de proximidade, compõem um Evento da rede. Um evento é marcado pelas informações que compõem uma vez que o sistema acorda. O último, sua vez, é representado pela classe "Wakeup", que cria uma pilha de para organizar os dados.

Os dados de *wakeup* compõem, juntamente com as informações que identificam o Node e armazenam seus *status* na base de dados do *Callithrix*. De forma similar é organizada os dados no lado da BS.

Na BS a grande diferença está na composição da coleção de dados. A coleção de dados é organizada em uma pilha. Ela também contém a pilha de *wakeups* recuperados de cada *callithrix* que conectado, marcando momento da recuperação do dado e os dados dos sensores que a BS também é responsável por coletar.

Como dito anteriormente, esta estrutura de dados não esta otimizada para reduzir o uso de memória por não ser um requisito prioritário, porém apresentamos aqui uma

forma de otimizar este uso de dados. Para reduzir o uso de memória podemos abandonar a utilização da estrutura de dados fixa criada pelo *struct* e criar um vetor de bytes de um tamanho grande o suficiente, este vetor será um *buffer* circular.

A criação deste vetor em formato de bytes unitários permite anotar todos os dados compondo-os usando quando índices do vetor forem necessários. Para que os dados possam fazer sentido é necessário que a última máscara tenha posição conhecida, pois a partir dela é possível computar quantos bytes compõem este evento e quais suas finalidades. Por fim, conhecendo os bytes usados no evento é possível localizar a próxima máscara e prosseguir até percorrer todos os dados.

A abordagem do *circular buffer* possui as seguintes particularidades que a tornam muito interessante para o sistema:

- Permite redução do uso de memória, pois sensores não utilizados não ocuparam o espaço do *struct*;
- Não existe perda de memória por alinhamento de memória, como ocorre com o *struct*;
- Dificulta a criação de *memory leak*;
- Permite saber se algum dado foi sobrescrito (e perdido) pelo *overflow*;
- Permite pré-alocar a memória para o experimento, não ocorrendo o risco de conflitos no gerenciamento de memória.;

## 5 Desenvolvimento das Coleiras

A coleira para a instalação dos Nodes nos animais foi desenvolvida de maneira artesanal, porém a falta de literatura na área sobre formas de prender equipamentos de biotelemetria em animais foi um obstáculo. Portanto os trabalhos explicitados aqui foram exploratórios, esperando gerar dados para desenvolvimento mais robustos em futuras iterações do projeto e para outros projetos.

O desenvolvimento seguiu duas etapas, com abordagens distintas, resultados de testes em campos.

- Teste de coleira com elo frágil e biodegradável para autoremoção do sistema ao longo do tempo;
- Coleira de caráter permanentes;

Recomenda-se estudos futuros avançarem no desenvolvimento de designs de coleiras adaptadas a animais com materiais mais robustos porém degradáveis para autoremoção dos sistemas com o passar do tempo. Porém este estudo não possuía tempo, nem recursos suficientes para o desenvolvimento de coleiras mais sofisticadas e para exploração de novos designs, visto que o foco do trabalho está na área de eletrônica e computação.

### 5.1 Requisitos

Os requisitos elicitados para a coleira e suas características principais devem ser:

- Peso mínimo possível: o sistema todo deve pesar até 15g, sendo quanto menor a coleira mais baterias;
- Resistentes ao ambiente pela duração do experimento;
- Marcadores visuais: permitir identificar os indivíduos visualmente, mesmo quando não for detectado nenhuma conexão dos Nodes;
- Não ser danoso aos indivíduos: uso de materiais que não causarão feridas e alergias e um design que afetará o mínimo possível seu comportamento e não causará acidentes;

### 5.2 Coleira com Elo Frágil

A primeira versão da coleira foi pensada para possuir uma elo frágil, para que ela soltasse após um tempo preso ao animal. Esta abordagem foi inicialmente escolhida



Figura 26 – Tamanho ideal de coleira medido nos animais do Zoológico de Guarulhos

devido ao experimento ser conduzido em um parque com acesso público, acreditando que o público poderia não compreender o uso das coleiras e associar a maus tratos, além do risco de enforcamento de animais em espaços públicos, devido a acidentes.

Para o desenvolvimento deste protótipo decidiu-se utilizar materiais de baixa abrasividade e biodegradáveis. Sendo escolhido o uso de couro sintético como material principal da coleira com um feixe de barbante ou linha. O Node ficando envolvido em um termo retrátil e colado ao couro e um linha de nylon com contas coloridas para identificação seria presa na coleira.

Antes do desenvolvimento do protótipo, devido a escassez de dados na literatura sobre coleiras, foi realizado um teste de medidas em animais com o auxílio do zoológico de Guarulhos, conjuntamente com uma análise de estudos de morfologia dos animais (CASTELEYN *et al.*, 2012). Uma primeira coleta de medidas foi realizada, reportando um perímetro de 10 cm da coleira para que pudesse ser bem presa ao pescoço dos animais, o que condiz com a literatura, conforme Figura 26.

Outro dado de interesse coletado pelo zoológico foi a medição da largura da coleira, como se vê na FIGURA X, a largura original do couro 2 cm é muito larga para o animal, decidindo-se pelo uso da metade da largura, 1cm. Como evidenciado na FIGURA X a composição de 10cm de comprimento com 1 cm de largura é ajustada confortavelmente ao pescoço do animal.



(a) Coleira com 2 cm de largura.



(b) Coleira com 1 cm de largura.

Figura 27 – Medida da largura da coleira testado do Zoológico para a confecção com as medidas adequadas.

Para o desenvolvimento do fecho com elo frágil inicialmente foram testados 3 nós em pessoas, visando identificar as características de:

- simplicidade de instalação: facilidade de fechar o nó no pescoço do animal sem machucá-lo e de maneira rápida para ser realizado no tempo da anestesia, sem necessidade de altas doses;
- durabilidade: capacidade de resistir a estresses sem a perda de fixação.

Os nós testados foram ([Animated Knots by Grog, 2024](#)):

- *Adjustable Grip Hitch* (Figura 28a);
- *Midshipman's Hitch* (Figura 28b).

O teste conduzido em humanos (Figura 29a) demonstrou que o nó *Adjustable Grip Hitch* é o mais adaptado ao experimento, pois o nó pode ser preparado antes do experimento e na hora da instalação ele será apenas ajustado ao pescoço do animal. Além disto, o protótipo inicial contava com um peso menor que 1 g (Figura 29b), sendo um primeiro design viável para teste.

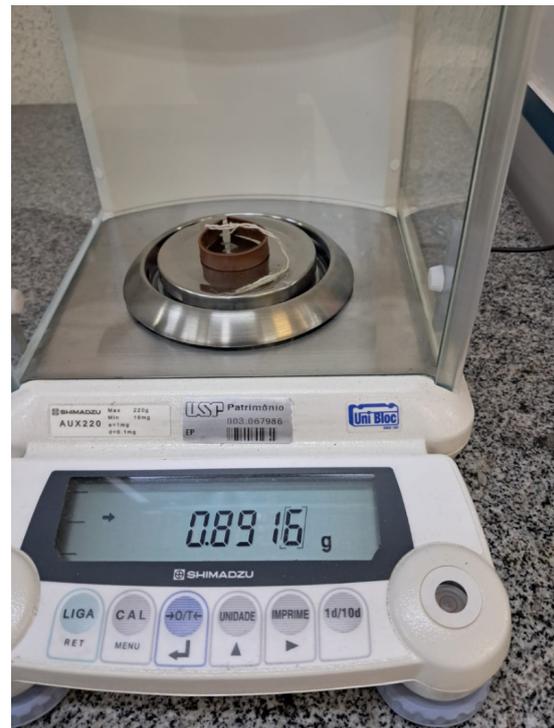
Durante o teste em humanos foram realizadas algumas tentativas de rompimento do nó, como resultado observou-se que o couro era mais facilmente rasgado que o barbante

(a) *Adjustable Grip Hitch*(b) *Midshipman's Hitch*

Figura 28 – Nós testados para desenvolver a coleira que prenderia o Node ao sagui.



(a) Coleira em teste humano



(b) Coleira versão 0

Figura 29 – Primeira versão da coleira desenvolvida durante o Projeto.

e o nó desfeitos. Portanto o link frágil do barbante seria decomposto ao longo do tempo, até que ele fosse mais frágil que o couro para ser desfeito. Para contornar o problema da fragilidade do couro perante o elo frágil foi decidido usar uma camada dupla de couro.

Uma vez em posse dos dados mínimos para o teste em campo foi desenvolvido dois protótipos, denominados (1) e (2):

1. Protótipo com fio preso com linha, mais fina, porém mais resistente. Com o *mockup* do Node (em peso e formato) preso na parte interna da fita dupla de couro.
2. Protótipo com barbante, conforme os testes realizados em humanos, com o *mockup* do Node preso na parte externa da coleira de couro.

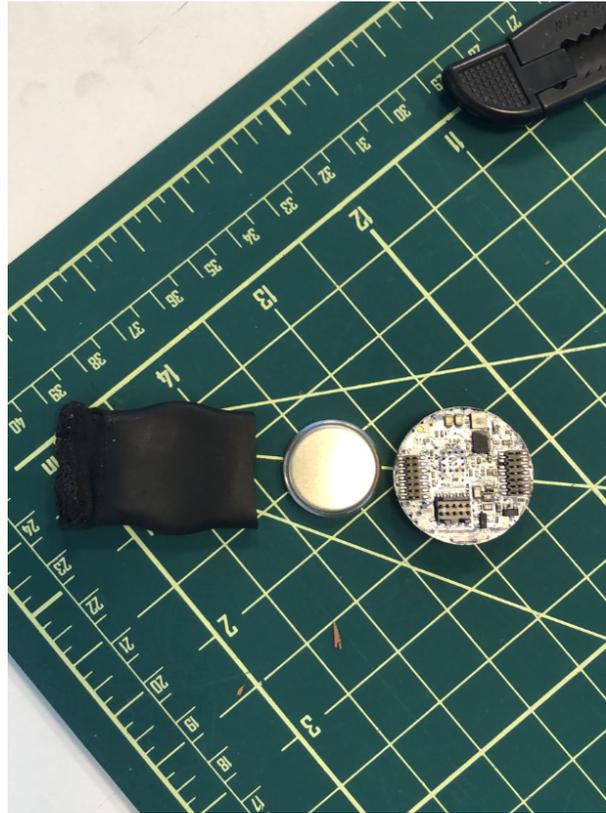


Figura 30 – *Mockup* feito com uma moeda de 25 centavos, que mantêm o mesmo peso de uma Pulga com uma bateria CR2032 e o mesmo diâmetro, apesar de ser mais fino.

O *mockup* instalado, presente na Figura 30, foi desenvolvido para ter dimensões semelhantes e o mesmo peso da pulga com a bateria. Sua concepção foi realizada utilizando apenas uma moeda de 25 centavos. Apesar da espessura ser menor, o peso da moeda é o mesmo da combinação de pulga e bateria. Sendo o peso um fator mais significativo para o projeto, optou-se por manter o peso o mais semelhante possível em detrimento das dimensões.

O protótipo (2) foi abandonado devido aos receios dos biólogos e médicos veterinários com a linha, por ela ser muito fina existiria a possibilidade de machucar o pescoço do animal. Outro ponto negativo do design (2) foi a rigidez da coleira, como o Node foi inserido entre as duas camadas de couro criou-se uma superfície significativa da coleira sem flexibilidade para que se acomodasse ao pescoço do animal de maneira correta.

O protótipo (1) foi instalado em um dos animais do zoológico. A simplicidade de instalação foi um ponto positivo observado pelos médicos veterinários, mostrando não haver a necessidade de anestésicos intravenosos, esperando apenas o uso de anestésicos inalatórios. Porém o link frágil foi rompido no mesmo dia pelos animais, um tempo muito menor que o esperado, devido a durabilidade de 2 a 3 semanas nas mãos humanas, sofrendo estresses diários.

As hipóteses levantadas sobre este fracasso foram:

- Como o barbante passa por um furo fino no couro, houve um desgaste no material que não foi-se atentado na manufatura desta versão;
- O barbante já estava avariado previamente devido ao mau armazenamento do material e sua idade;
- O número de fios utilizados no barbante do teste foi de 2 enquanto neste protótipo foi de apenas um;

Como resultado do fracasso da coleira de elo frágil, decidiu-se utilizar uma coleira permanente. Deixando para estudos posteriores um melhor desenvolvimento de coleiras mais adequadas.

### 5.3 Coleira Permanente

A coleira permanente foi baseada em coleiras já utilizadas em outros animais. Como muitos dos trabalhos não apresentam metodologia de desenvolvimento e maneiras de prender a coleira, estes dados foram recolhidos de maneira informal de pesquisadores parceiros.

A mudança para o uso de coleiras permanentes traz como prejuízo: a perda capacidade de recuperar os Nodes sem a necessidade de recaptura, o risco de acidentes; possibilidade de machucar o animal em caso de mudanças de seu tamanho. Porém traz como benefício a capacidade de identificar permanentemente os animais e a perda do risco de o experimento acabar precocemente devido ao rompimento do elo antes do previsto.

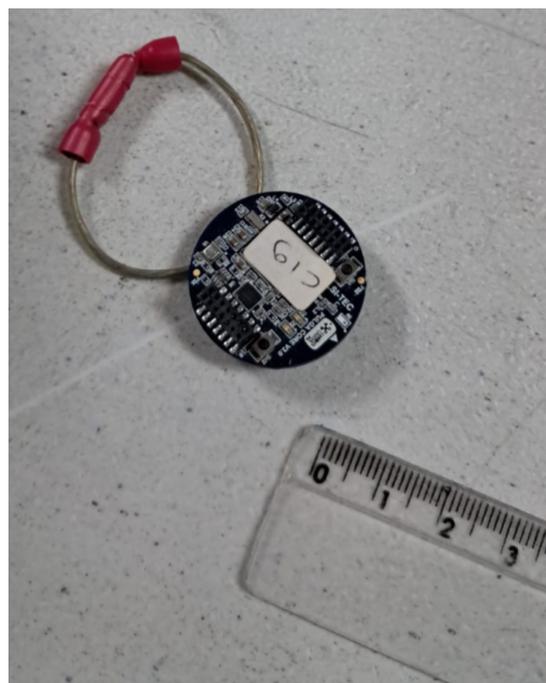
Inspirado na coleira de papagaio (Figura 31a) usamos um cabo de varal de aço revestido em plástico, similar ao da foto. O aço permite uma grande resistência a intempéries e as tentativas de remoção do sistema pelos saguis, o plástico de revestimento permite que os saguis não se machuquem, em princípio, com os cabos de aços.

O fecho, para que também seja permanente, foi realizado utilizando luvas de emenda pré - isoladas. O material metálico promove uma resistência significativa a estresses físicos, reduzindo a chance de queda. O design da coleira permanente também seguiu as medidas de comprimento da coleira de elo frágil, seu protótipo ao lado de uma pulga está presente na Figura 31b

Outros materiais também foram testados para o design da coleira. Protótipos com correntes utilizadas como pulseiras e colares em humanos, que já são desenhadas para serem pouco agressivas à pele do usuário. Também foram feitos protótipos com correntes de bolinhas, porém foi descartada devido a dificuldade de colocar os marcadores visuais.



(a) Papagaio com coleira permanente



(b) Coleira permanente baseado na do Papagaio

Figura 31 – Exemplos de coleiras permanente.

A coleira de couro também foi aprimorado para ter um elo permanente. Entre as duas faixas de couro foi adicionado um termo retrátil que permitiu passar uma abraçadeira por dentro, isto permite que o elo seja permanente e ajustável na hora do ser colocado no animal. O uso da braçadeira é perigoso, porém o uso foi reportado por outros pesquisadores da área aconselhando a adição de uma cola/resina na junta da abraçadeira para que ela não possa mover mais que o ajustado, todos os modelos estão na Figura 32.

As coleiras de base metálica possuem peso muito maior, sendo a de corrente aproximadamente 5 g e a de cabo 2,5 g, conforme Figura 33. Além da penalidade do peso elas também possuem relativa complexidade de instalação, com dificuldade de ajuste de tamanho e necessidade de equipamentos como alicates na instalação no animal.

Durante a instalação a impossibilidade de ajustar o tamanho adequado nos animais levou ao descarte da coleira de cabo de aço, sendo instalada somente as coleiras de corrente e de couro com braçadeira. Ambas ainda estão em teste no Zoológico de Guarulhos, porém foram reportados que inicialmente os animais apresentaram menor incomodo com a de couro que com a de correntes, a Figura 34a apresente o animal com a coleira de couro e a Figura 34b o animal com a de corrente.



Figura 32 – Todas as coleiras de elo permanente feitas para teste.

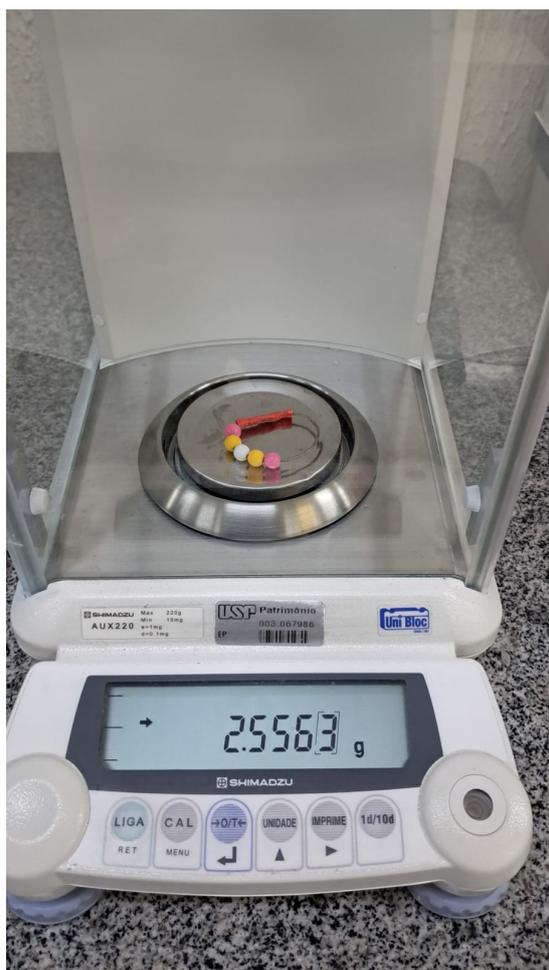


Figura 33 – Peso dos novos modelos de coleira permanente.



(a) Animal com a coleira de couro com abraçadeira.



(b) Animal com a coleira de corrente.



## 6 Conclusão e Trabalhos Futuros

A MarmoNet é uma proposta de sistema de biotelemetria para saguis do gênero *Callithrix*, primatas de pequeno porte tipicamente brasileiros, que habitam em parques urbanos.

Dentre os desafios envolvidos estão: a necessidade de ser um sistema que não comprometa a qualidade de vida do animal, portanto o sistema não poderia pesar mais de 5% do seu peso, que possui massa de aproximadamente 300 a 350 g, permitindo que o *Animal-Borne Instrument* tenha massa máxima de 15 g. Para resolver este problema foi realizado testes em animais no Zoológico de Guarulhos para compreender a influência dos diferentes designs de coleiras e materiais.

Outra problemática abordada foi a dificuldade de recapturar esses animais, que por serem consideravelmente inteligentes possuem uma baixa taxa de recaptura. Para resolver esse problema a MarmoNet propôs uma rede de estações bases que recuperam os dados que estão nos animais sempre que entram no alcance da comunicação, durante a execução do experimento.

O objetivo final da MarmoNet é dar suporte a coleta de dados para modelagem de área de vida e uso de recursos espaços-temporais pelos *Callithrix* em florestas urbanas. Portanto os dados de interesse são as interações intra e inter grupos, qual estrato arbóreo está em uso (refletindo a interação com seres humanos ou não) e o uso territorial.

A interação de grupos foi realizada utilizando o *broadcast* de um identificador, como *tags* RFID, para que todos os elementos da rede possam se identificar foi escalonado um TDMA nesta comunicação. Já os dados de estrato arbóreo são inferidos pela altura que o animal esta, que por sua vez é identificado pelo uso de barômetros.

Como o sistema deve ser muito leve ele não pode carregar muitas baterias nem sensores grandes ou que consomem muita energia. Portanto não são utilizados IMUs e nem GPSs, desta forma, a identificação de uso de território é inferida com o uso da passagem de ID com a estações bases. Estas são estrategicamente posicionadas e georreferenciadas, permitindo identificar qual animal, quando, e onde ele foi encontrado pela estação base.

### 6.1 Resultados

Os resultados são representados pelos testes, que ilustram as capacidade do sistema em atender os requisitos funcionais e não funcionais definidos pelos biólogos.



Figura 35 – Teste de distancia com maior alcance. O a emissora se encontra sobre a mesa ao lado do computador e a receptora ao lado da maquina de café. Entre os dois dispositivos existe um corredor realizando uma curva e uma porta.

### 6.1.1 Teste de Distância

Um primeiro teste de campo foi realizado para compreender as limitações do sistema em um cenário de uso. Portanto duas pulgas foram levadas para o meio da floresta do Instituto Butantan, uma em modo *advertising* e uma em modo *scanner*. Sempre que a segunda identifica um pacote da primeira ela alteraria o estado de um led, permitindo reconhecimento visual do trabalho.

Os testes foram realizados considerando, cenários com visada direta, árvores no caminho, dentro de arbustos e diferentes orientações do chips. Os resultados relevantes foram:

- Alcance máximo de aproximadamente 10 metros com visada direta
- Árvores reduziu para 4 a 5 metros
- Dentro de arbustos a comunicação era de dezenas de centímetros.

A fim de compreender melhor a capacidade de comunicação do sistema, foi explorada a modificação da potência do sinal de saída do SoC. Ele permite um aumento da potência do sinal de saída de 0 para 8 dbm a um custo de 10 mA de acréscimo. Porém o RiotOS não permitia uma modificação direta, sendo necessário uma modificação no próprio OS para alterar a potência do sinal.

O CITI é um laboratório de IoT, onde a Pulga é projetada e fabricada, portanto existem diversos experimentos utilizando BLE dentro do laboratório, criando um ambiente com alta densidade de interferência. Mesmo neste cenário o alcance foi quase que dobrado, ainda considerando a presença de obstáculos durante o processo, conforme visto nas Figura 35.

### 6.1.2 Teste de desvio dos cristais

Uma vez que os equipamentos são sincronizados a necessidade de uma próxima sincronização é definida pela desvio dos cristais (*skew*). Uma vez estimado o *skew* podemos definir janelas de operação que são tolerantes a um tempo de operação tal que estimamos haver ao menos uma conexão, de maneira que as operações dos rádio estarão dentro das janelas de comunicação.

O sistema foi projetado sobre uma plataforma que utiliza cristais com erro de  $\pm 20ppm$ , se tomarmos o pior cenário para os cristais como referencial de pior cenário esperado teremos um desvio de aproximadamente um segundo a cada sete horas de operação. Porém devemos lembrar que outros efeitos podem modificar o *clock* dos sistemas, como umidade e temperatura, porém a complexidade para esta estimativa tornaria impossível para o tempo existente de projeto.

Para validar o comportamento do sistema e a necessidade e capacidade de adicionar uma correção do *skew* nos sistemas foi realizado um teste de medição de passagem de tempo entre 3 Pulgas. O *firmware* para este teste consiste em um elemento como referencial central e um como periférico. Uma vez que a conexão é estabelecida o periférico notifica seu contador de *clock* para o central, que anota que o *clock* recebido o próprio, como apresentado pelos sistemas de comunicação unidirecional em (WU; CHAUDHARI; SERPEDIN, 2011), Equação 6.1. Este arranjo de teste permite teste 2 a 2, desta forma o elemento central foi utilizado o mesmo para os dois testes, criando um referencial igual para os dois resultados.

$$T_{2,k} = s(T_{1,k} + \tau + X) + \theta \quad (6.1)$$

No modelo unidirecional  $T_{2,k}$  é o tempo em (2) (equipamento a ser sincronizado) recebe a mensagem de (1) (equipamento referencia), enquanto  $s$  é o *skew*,  $T_{1,k}$  o tempo em (1) quando (1) envia a mensagem,  $\tau$  é o atraso fixo da comunicação,  $X$  é o atraso variável e  $\theta$  e o *offset*. Esta Equação diz que o equipamento (2) percebe a mensagem de (1) com um atraso ( $\tau + X$ ) dilatado (ou contraído) no pelo seu fator de desvio da percepção do tempo. O *offset* não é afetado diretamente pelo *skew* por já ser o erro de inicialização. A diferença de passagem do tempo é determinada pelo valor de  $sT_{1,k}$ , que evidencia a diferença da passagem de tempo entre os dois elementos.

Se considerarmos que a referência, equipamento (1), possui uma noção perfeita do tempo, podemos assumir que a Equação 6.1 é uma função definida por  $t$  e  $T_{1,k} = t$ . Nosso sistema é naturalmente discreto, se aplicarmos uma subtração da amostragem do em  $k$  por  $k - 1$  e negligenciarmos o atraso variável do sistema de comunicação, obtemos Equação 6.2. Ela apresenta a função que define que um intervalo de tempo no nó a ser sincronizado e é a passagem de tempo dilatada na referencia, evidenciando que os efeitos constantes não afetam o resultado.

$$\Delta T_{2,k} = s\Delta t \quad (6.2)$$

Apesar de nosso experimento termos os papeis invertidos na comunicação e a Equação 6.1 ser mais propriamente escrita como a Equação 6.3 o efeito de realizar a diferença dos instantes de amostragem se mantém.

$$T_{1,k} = \frac{T_{2,k} - \theta}{s} - (\tau + X) \quad (6.3)$$

Apesar de mais de um chip ter sido submetido a este experimento, manteremos apenas um neste documento por simplicidade do leitor. O experimento foi conduzido por horas, coletando dados a intervalos regulares de 20 segundos marcados pelo nó a ser identificado. Desta forma obtemos a Tabela de dados que possui um formato como a Tabela 4, os dados também foram tratado para ignorar pacotes perdidos que gerariam intervalos com o dobro do tamanho esperado, desviando o modelo, apesar de não serem representativos de variações reais de tempo. A coluna  $f[k]$  é o tempo marcado no nó a ser identificado (2), enquanto  $t$  é o tempo marcado pelo nó referencia (1). Ao realizarmos a subtração dos valores de  $f[k] - f[k-1]$  obtemos a diferença de tempo entre cada mensagem é enviada. Aplicando uma regressão linear (WU; CHAUDHARI; SERPEDIN, 2011) nosso modelo obtém o *skew* médio entre duas amostragens. O gráfico da Figura 36 evidencia como a curva é quase paralela ao eixo X. Os resultados dos dados podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 4 – Brutos coletados do experimento de teste dos cristais.

$f[t]$	$t$
10134	10093
30347	30105
50556	50116
70803	70124
91012	90132

Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 37 apresenta uma distribuição dos dados da primeira metade do experimento e da segunda metade sobrepostos em um histograma. Ele evidencia que o comportamento de uma curva normal para o atraso da comunicação. Nosso tratamento é um filtro passa altas, que tem por benefício a eliminação dos erros constantes, porém amplifica a sensibilidade para o ruído do atraso variável.

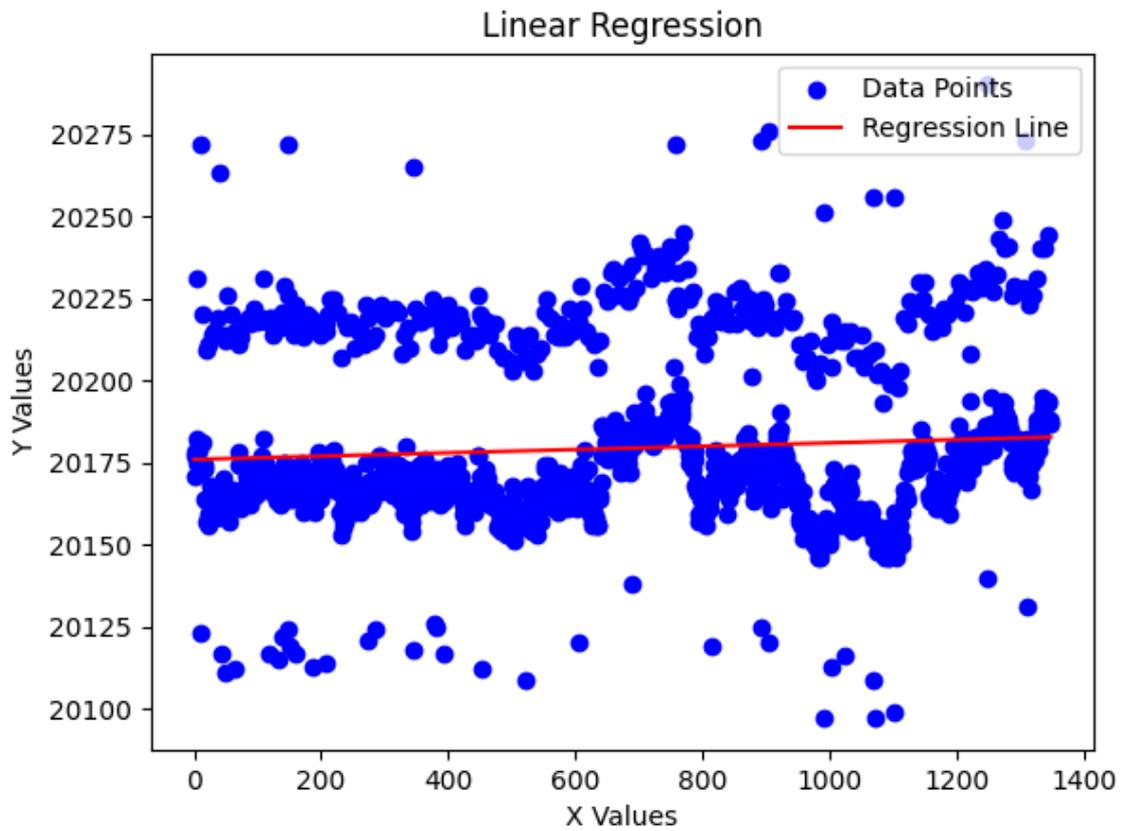


Figura 36 – Percepção da passagem do tempo de um cristal frente a um referencial aplicando a formulação explicada em 6.1.2

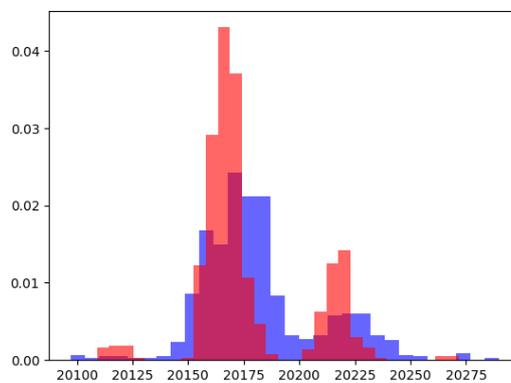


Figura 37 – Histograma da distribuição dos dados coletados na primeira metade e segunda metade do experimento, mostrando o ruído com um comportamento de uma curva normal ao longo de todo o experimento.

Tabela 5 – Dados com os resultados da estimativa de parâmetros do experimento realizado

Tempo médio entre cada amostra	20084,0518819ms
Tempo máximo entre amostras	20290ms
Tempo mínimo entre amostras	20097ms
Tempo do Experimento	7 h 37 m
<i>skew</i> por 20s	0.005017381 $\frac{ms}{20s}$
<i>skewppm</i>	0,2508ppm

Fonte: Produzido pelos autores.

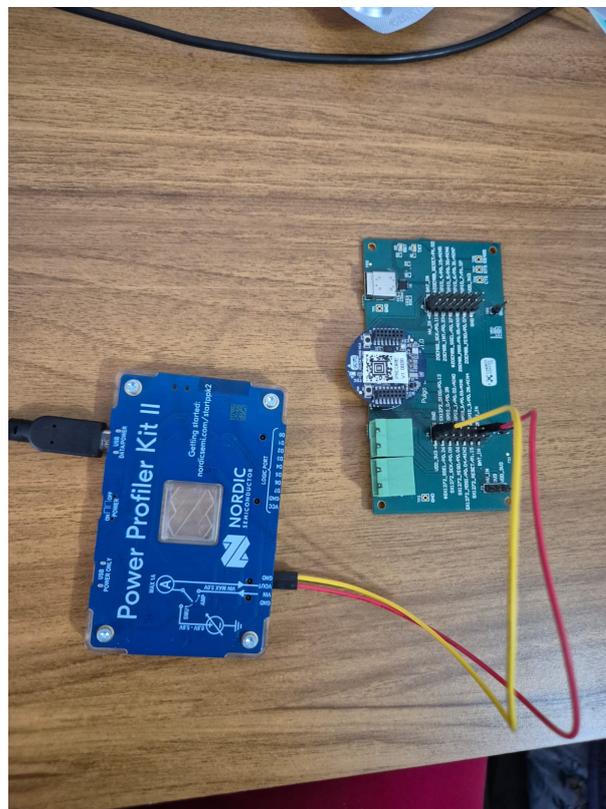


Figura 38 – Bancada de teste para medição do consumo de energia do algoritmo

### 6.1.3 Teste de Consumo

O teste de consumo energético foi realizado utilizando o Power Profiling kit II da Nordic. Este equipamento permite medir o consumo de energia do sistema conectado e alimentado por ele. A Figura 38 apresenta a montagem do sistema para ser testado.

Para o teste foi utilizado um *firmware* cuja o *duty cycle* é de 50% com período de 32 segundos, considerando uma rede com 2 elementos, logo metade do tempo de trabalho era utilizado para *advertising* e metade para *scanning*, sendo ambos 8 segundos cada.

O resultado na Figura 39 apresenta uma clara separação de 3 estágios diferentes. O

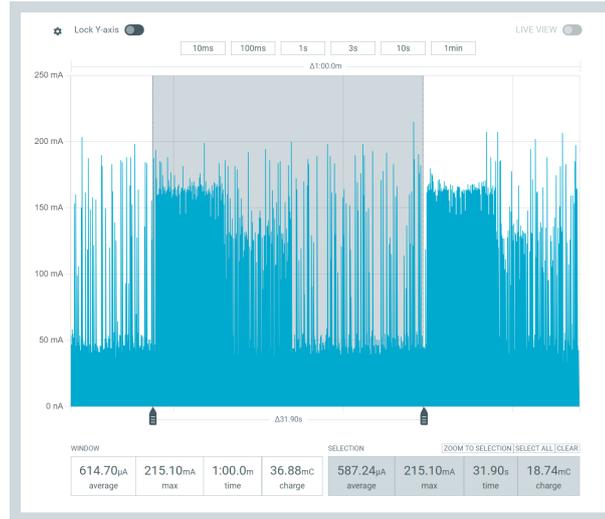


Figura 39 – Gráfico gerado do osciloscópio do Power Profiling Kit II da Nordic durante o teste de consumo de energia do *firmware* na Pulga

estágio 2 e 3, de consumos mais intensivos são os momentos de utilização do BLE, sendo o 2 o momento de *advertising* e o 3 de *scanning*. Apesar da corrente especificada para envio de dados no *datasheet* ser maior, podemos verificar um maior consumo de energia no *scanning*, pois ele deve manter o rádio ligado por muito mais tempo. A Tabela 6 apresenta os resultados de maneira a serem comparadas.

Tabela 6 – Tabela com os dados do teste de consumo energético do sistema.

	Corrente média	Corrente máx.	Tempo	Carga
Parte 1	138,08µA	208,22mA	15,53s	2,14mC
Parte 2	234,14µA	212,04mA	8,030s	1,88mC
Parte 1	2,01mA	195,24mA	8,032s	16,11mC

Fonte: Produzido pelos autores.

O primeiro estágio é homogêneo com um consumo elevado, o que não era esperado. Pois entre dois ciclos de trabalho era desejado que o sistema estivesse em hibernação, o que não ocorre, apesar de ser esperado que o RiotOS colocasse o sistema em baixo consumo de energia quando não existisse nenhuma *thread* a ser processada.

O consumo de energia da janela de 1 minuto era de 36,88 mC (aproximadamente dois ciclos de trabalho). Nesta operação uma bateria CR2032 de 245 mAh (882000 mC) teria uma vida útil de aproximadamente 17 dias. Bastante distante do desejado 6 meses.

Se extrapolarmos para a condição de 10 segundos de trabalho, sendo 1 segundo em modo de *advertising* e 9 em *scanning*, com período de 10 minutos. Obtemos um consumo médio de 0,02 mAh, permitindo a mesma bateria durar 60 dias. Caso duas baterias sejam alocadas podemos alcançar 4 meses, um tempo razoável para uma primeira versão do

experimento.

#### 6.1.4 Teste de Funcionalidade

Para validar todas as funcionalidades implementadas foi realizado um teste de bancada com dois Nodes e uma BS conectada ao computador. Os Nodes foram inicializados em momentos distintos de maneira que eles não se comunicavam entre si.

A BS funcionava de acordo com comandos enviados pelo computador para permitir testar as funcionalidades individualmente. A primeira vez que foi requisitado os dados, nenhum dado de proximidade foi produzido. Após iniciar a rotina de sincronização e ambos os Nodes começarem a comunicar entre si, foi possível recuperar dados de proximidade entre si.

De maneira similar foram testados os processos de *Fail Safe* e configuração dos sensores ativos.

## 6.2 Contribuições

A MarmoNet apresenta duas principais soluções: uma de interesse acadêmico e outra de interesse de mercado.

Na área de desenvolvimento de tecnologias para conservação o uso de RSSFs ainda é emergente (LAHOZ-MONFORT; MAGRATH, 2021) e poucos trabalhos tem explorado as vantagens deste campo. Muito se deve a necessidade de desenvolver equipamentos que sejam adaptados, tanto aos dados desejados pelo estudo, quanto aos animais e ambiente.

Desta forma a MarmoNet é o primeiro trabalho encontrado na literatura de uma RSSF para saguis do gênero *Callithrix*. E também, até o conhecimento dos autores, o único que visa integrar a rede de sensores a projetos de Ciência Cidadã. O trabalho que mais se aproxima da MarmoNet foi o (CAMAL; AKSANLI, 2020), porém não são tratados os casos necessários para uma verdadeira implementação do sistema, não realizando validações, limitando-se a simulações desenhadas pelos próprio autores.

Apesar da ZebraNet (JUANG et al., 2002) apresentar um trabalho bem amplo e completo ele foi desenvolvido para animais de ordens de grandeza maiores que os saguis, permitindo o uso de equipamentos maiores e portanto, baterias maiores, fontes de *harvesting* com mais facilidade e são animais de relativa simplicidade de serem encontrados e recapturados. Porém a ZebraNet, diferente da MarmoNet, não tira proveito de conhecimentos prévios de movimentação para a instalação de BSs fixas para a coleta de dados, limitando-se somente a estações móveis portadas durante o trabalho de campo, parte também prevista na MarmoNet pelo uso de aparelhos celulares.

Já do ponto de vista de mercado a MarmoNet oferece a possibilidade de expandir o uso de biotelemetria. Os equipamentos encontrados no mercado possuem custos elevados, como o NorthStar Mini 5g GPS com preço de mais de \$1000 e uma anualidade de \$200 para a utilização do sistema de satélite (informações obtidas em conversas por e-mail com a empresa). Já a MarmoNet foi implementada em uma placa de custo aproximado de \$40 e disponibiliza o *firmware* de maneira *open source*, permitindo que seja adaptado para outros placas que também são compatíveis com o OS utilizado.

## 6.3 Perspectivas de Continuidade

O Projeto da MarmoNet apresenta um comportamento satisfatório perante os requisitos, porém muito ainda pode ser melhorado. Para próximos trabalhos apontamos:

1. Utilização de outro RTOS, como Zephyr ou FreeRTOS;
  - O RiotOS apresenta uma série de dificuldades no gerenciamento de recursos: como a não hibernação do sistema, diversas fontes de *kernal panic* durante o manejo das *threads* do Bluetooth, o que demandou tempo de desenvolvimento para estabilizar o sistema
  - O RiotOS apresenta implementações não completas em sua estrutura. Apesar de existir uma função documentada para a mudança da potencia do sinal de comunicação, ela não era funcional e tivemos que realizar mudanças nos *drivers*.
  - O RiotOS possui uma documentação curta e pobre quando comparada aos outros dois RTOS citados, a falta de documentação dificulta a curva de aprendizagem e muito deste projeto só foi possível devido ao uso de IAs para a busca de funcionalidades e geração de códigos exemplos.
  - Foram testa a possibilidade de implementar 6LowPAN na rede, porém a falta de documentação e o aparente não funcionamento levaram ao abandono da abordagem de maneira prematura.
  - Portanto escolher um OS que solucione estes problemas, e outros, pode acrescentar significativamente as chances de sucesso de projetos futuros.
2. Design de placa mais otimizada baseada na Pulga:
  - A Pulga, apesar de já pequena, possui componentes não utilizados no sistema, que drenam corrente de fuga, acrescentam peso e area. Portanto criar novos designs eliminando estes componentes e adicionando outros de interesse para outros projetos de biotelemetria;
  - Designs de PCBs flexíveis é também uma possibilidade de interesse, que permite a inserção do sistema eletrônico no interior da coleira;

- Permitir a adição de antenas externas a PCB ou adicionar antes mais potentes na PCB, para melhorar o alcance das comunicações.
3. Adicionar correção do *skew* ao sistema de sincronização com uma baixo custo energético;
    - Permitiria o sistema de utilizar sobreviver mais tempo se sincronizações, diminuindo a sensibilidade as posições das BSs.
  4. Capacidade sincronização entre Nodes considerando a ultima vez que ambos foram sincronizados e uma avaliação dos seus desvios;
    - Além do mesmo benefício citado no elemento acima, também adiciona a capacidade de um Node retornar ao estado de operação normal após um *Fail Safe*, sem a necessidade de passar perto de uma BS.
  5. Adição de LoRa nas BSs e criação de uma rede mesh:
    - Eliminaría a atual necessidade do biólogo percorrer o campo com o aparelho celular para realizar a sincronização e a coleta dos dados e tornaria o sistema mais autônomo
  6. Adição de formas de *harvesting* de energia nos ABIs, permitindo que a bateria dure mais tempo;
  7. Modificação dinâmica do tempo do período de cada ciclo de trabalho para otimizar a coleta de dados considerando: dados de sensores e interações detectadas
  8. Utilizar este trabalho como base para desenvolvimento de outros projetos de biotele-metria
    - O código fonte foi pensando para ser modular o suficiente e reconfigurável, utilizando meta programação e parâmetros a serem definidos em tempo de compilação para que ele possa ser utilizado de maneiras diversas.

# Referências

ABNER, M.; WONG, P. K.-Y.; CHENG, J. C. Battery lifespan enhancement strategies for edge computing-enabled wireless Bluetooth mesh sensor network for structural health monitoring. *Automation in Construction*, v. 140, p. 104355, ago. 2022. ISSN 09265805. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092658052200228X>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.

Animated Knots by Grog. *Animated Knots by Grog: Learn how to tie knots with step-by-step animations*. 2024. Acessado em: 8 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.animatedknots.com/>>. Citado na página 71.

ASGARIAN, F.; NAJAFI, K. BlueSync: Time Synchronization in Bluetooth Low Energy With Energy-Efficient Calculations. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 9, n. 11, p. 8633–8645, jun. 2022. ISSN 2327-4662. Conference Name: IEEE Internet of Things Journal. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9555832>>. Citado na página 32.

Bluetooth SIG. *Topology Options*. 2024. Accessed: 2024-12-07. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/topology-options/>>. Citado na página 57.

CAMAL, L.; AKSANLI, B. Building an Energy-Efficient Ad-Hoc Network for Wildlife Observation. *Electronics*, v. 9, n. 6, p. 984, jun. 2020. ISSN 2079-9292. Number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/984>>. Citado 6 vezes nas páginas 11, 35, 36, 38, 59 e 86.

CASTELEYN, C. et al. Anatomical description and morphometry of the skeleton of the common marmoset (*Callithrix jacchus*). *Laboratory animals*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 46, n. 2, p. 152–163, 2012. Citado na página 70.

COCKBURN, A. *Writing Effective Use Cases*. 1st. ed. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2000. ISBN 0201702258. Citado na página 45.

COLOMBINI, J. O. B.; SIQUEIRA, F. L. Uma proposta de sintaxe concreta para caso de uso. In: SBC. *Anais Estendidos do XVII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*. [S.l.], 2021. p. 45–48. Citado na página 45.

CRETOIS, B. et al. Identifying and correcting spatial bias in opportunistic citizen science data for wild ungulates in Norway. *Ecology and Evolution*, v. 11, n. 21, p. 15191–15204, 2021. ISSN 2045-7758. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ece3.8200>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ece3.8200>>. Citado na página 23.

CRISTIAN, F. Probabilistic clock synchronization. *Distributed computing*, Springer, v. 3, p. 146–158, 1989. Citado na página 61.

CRISTIAN, F.; FETZER, C. Probabilistic internal clock synchronization. In: *Proceedings of IEEE 13th Symposium on Reliable Distributed Systems*. [s.n.], 1994. p. 22–31. Disponível

em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/336912/?arnumber=336912>>. Citado na página 66.

CRONK, N. E.; PILLAY, N. Flexible Use of Urban Resources by the Yellow Mongoose *Cynictis penicillata*. *Animals*, v. 9, n. 7, p. 447, jul. 2019. ISSN 2076-2615. Number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-2615/9/7/447>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 38.

CRONK, N. E.; PILLAY, N. Home range and use of residential gardens by yellow mongoose *Cynictis penicillata* in an urban environment. *Urban Ecosystems*, v. 24, n. 1, p. 127–139, fev. 2021. ISSN 1573-1642. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11252-020-01022-1>>. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 36.

DREWE, J. A. et al. Performance of Proximity Loggers in Recording Intra- and Inter-Species Interactions: A Laboratory and Field-Based Validation Study. *PLOS ONE*, v. 7, n. 6, p. e39068, jun. 2012. ISSN 1932-6203. Publisher: Public Library of Science. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0039068>>. Citado 4 vezes nas páginas 34, 36, 38 e 48.

DUNN, J.; CRISTÓBAL-AZKARATE, J. New world monkeys. *Nature Education Knowledge*, v. 7, n. 6, p. 1, 2016. Citado na página 39.

FARDELL, L. L. et al. Habitat use by wandering pet cats (*Felis catus*) in a patchy urban environment. *Journal of Urban Ecology*, v. 7, n. 1, p. juab019, jan. 2021. ISSN 2058-5543. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jue/juab019>>. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 38.

FARIA, J. S. R. d. *Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de internet das coisas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2023. Citado na página 64.

Google. *Protocol Buffers (Protobuf)*. 2024. <<https://github.com/protocolbuffers/protobuf>>. Accessed: 2024-12-07. Disponível em: <<https://github.com/protocolbuffers/protobuf>>. Citado na página 67.

HAMAMI, L.; NASSEREDDINE, B. Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 179, p. 105782, 2020. Citado na página 26.

HEYDARISHAHREZA, N. et al. Wireless Sensor Networks Fundamentals: A Review. In: *2020 11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2020. p. 0001–0007. ISBN 978-1-72818-416-6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9284873/>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 28 e 29.

JAMSHED, M. A. et al. Challenges, applications, and future of wireless sensors in internet of things: A review. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 22, n. 6, p. 5482–5494, 2022. Citado na página 25.

JUANG, P. et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebranet. In: *Proceedings of the 10th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 96–107. Citado 3 vezes nas páginas 22, 34 e 86.

- KIM, Y.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, IEEE, v. 57, n. 7, p. 1379–1387, 2008. Citado na página 29.
- KULAKLI, A. B.; ERCIYES, K. Time synchronization algorithms based on timing-sync protocol in wireless sensor networks. In: IEEE. *2008 23rd International Symposium on Computer and Information Sciences*. [S.l.], 2008. p. 1–5. Citado na página 65.
- KUMARI, S. et al. A machine learning centered approach for uncovering excavators' last known location using bluetooth and underground wsn. *Wireless Communications And Mobile Computing*, Wiley Online Library, v. 2022, n. 1, p. 9160031, 2022. Citado na página 29.
- LAHOZ-MONFORT, J. J.; MAGRATH, M. J. L. A Comprehensive Overview of Technologies for Species and Habitat Monitoring and Conservation. *BioScience*, v. 71, n. 10, p. 1038–1062, out. 2021. ISSN 0006-3568. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/biosci/biab073>>. Citado 4 vezes nas páginas 22, 32, 33 e 86.
- LEVIN, I. I. et al. Performance of Encounternet Tags: Field Tests of Miniaturized Proximity Loggers for Use on Small Birds. *PLOS ONE*, v. 10, n. 9, p. e0137242, set. 2015. ISSN 1932-6203. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0137242>>. Citado 6 vezes nas páginas 34, 35, 36, 38, 46 e 48.
- MALUKIEWICZ, J. et al. An Introduction to the *Callithrix* Genus and Overview of Recent Advances in Marmoset Research. *ILAR Journal*, v. 61, n. 2-3, p. 110–138, dez. 2020. ISSN 1084-2020, 1930-6180. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ilarjournal/article/61/2-3/110/6474502>>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.
- MARUCCI, S. S. Testes de efetividade e fixação de nova tecnologia de rastreamento animal. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2017. Citado na página 37.
- MATA, L. et al. Bringing nature back into cities. *People and Nature*, v. 2, n. 2, p. 350–368, 2020. ISSN 2575-8314. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pan3.10088>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pan3.10088>>. Citado na página 21.
- Ministério da Saúde. *Raiva - Saúde de A a Z*. 2024. [Online; acessado em 9 de dezembro de 2024]. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/r/raiva>>. Citado na página 21.
- MORILLO, R. et al. More the Merrier: Neighbor Discovery on Duty-Cycled Mobile Devices in Group Settings. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 21, n. 7, p. 4754–4768, jul. 2022. ISSN 1558-2248. Conference Name: IEEE Transactions on Wireless Communications. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9650738>>. Citado na página 30.
- OREN, G. et al. Vocal labeling of others by nonhuman primates. *Science*, v. 385, n. 6712, p. 996–1003, ago. 2024. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adp3757>>. Citado na página 39.
- PROAKIS, J.; SALEHI, M. Digital communications. mcgraw-hill, new york. 2001. Citado na página 57.

- RAEVE, N. D. et al. Ble-based power efficient wsn for industrial iot train integrity monitoring. In: IEEE. *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. [S.l.], 2022. p. 1–6. Citado na página 29.
- ROTHAN, H. A.; BYRAREDDY, S. N. The epidemiology and pathogenesis of coronavirus disease (COVID-19) outbreak. *Journal of Autoimmunity*, v. 109, p. 102433, maio 2020. ISSN 08968411. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0896841120300469>>. Citado na página 21.
- SCHIEL, N.; SOUTO, A. The common marmoset: An overview of its natural history, ecology and behavior. *Developmental Neurobiology*, v. 77, n. 3, p. 244–262, mar. 2017. ISSN 1932-8451, 1932-846X. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dneu.22458>>. Citado na página 39.
- STOINSKI, T. S.; BECK, B. B. Spontaneous tool use in captive, free-ranging golden lion tamarins (*leontopithecus rosalia rosalia*). *Primates*, Springer, v. 42, p. 319–326, 2001. Citado na página 39.
- TALLA, V. et al. Lora backscatter: Enabling the vision of ubiquitous connectivity. *Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies*, ACM New York, NY, USA, v. 1, n. 3, p. 1–24, 2017. Citado na página 29.
- WALLACE, G. et al. An automated radiotelemetry system (ARTS) for monitoring small mammals. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 13, n. 5, p. 976–986, 2022. ISSN 2041-210X. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/2041-210X.13794>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/2041-210X.13794>>. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 38.
- WANG, C. et al. Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 74, p. 127635, ago. 2022. ISSN 16188667. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866722001789>>. Citado na página 21.
- WILLIAMS, C. T. et al. Phenology of hibernation and reproduction in ground squirrels: integration of environmental cues with endogenous programming. *Journal of Zoology*, v. 292, n. 2, p. 112–124, fev. 2014. ISSN 0952-8369, 1469-7998. Disponível em: <<https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jzo.12103>>. Citado na página 22.
- WOOLLEY, M. Bluetooth core specification version 5.0 feature enhancements. *Bluetooth SIG*, 2021. Citado na página 29.
- WU, Y.-C.; CHAUDHARI, Q.; SERPEDIN, E. Clock Synchronization of Wireless Sensor Networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 28, n. 1, p. 124–138, jan. 2011. ISSN 1558-0792. Conference Name: IEEE Signal Processing Magazine. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5670639/?arnumber=5670639>>. Citado 5 vezes nas páginas 30, 31, 66, 81 e 82.
- YAMAZAKI, Y. et al. Tool-use learning by common marmosets (*callithrix jacchus*). *Experimental brain research*, Springer, v. 213, p. 63–71, 2011. Citado na página 39.

ZWERTS, J. A. et al. Methods for wildlife monitoring in tropical forests: Comparing human observations, camera traps, and passive acoustic sensors. *Conservation Science and Practice*, v. 3, n. 12, p. e568, 2021. ISSN 2578-4854. [\\_eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/csp2.568](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/csp2.568). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/csp2.568>. Citado na página 32.



# Anexos



# ANEXO A – Casos de Uso

## A.1 UC 1 - Information Discharge

Attribute	Details
<b>Goal in Context</b>	The marmoset, carrying a node, will push the information to a base station.
<b>Scope &amp; Level</b>	<b>System Scope:</b> Recover information from marmoset nodes. <b>Objective:</b> Capture the data saved on the node and make it available to researchers.
<b>Preconditions</b>	The marmoset carries a node with sufficient stored data. The base station (BS) is operational and within range for communication.
<b>Success End Condition</b>	All the memory in the node is cleared after being copied to the base station.
<b>Failed End Condition</b>	Data remains in the node's memory without being transferred.
<b>Primary Actor</b>	The Node
<b>Secondary Actors</b>	Marmoset, Base Station (BS)
<b>Trigger</b>	The marmoset gets close to the BS and stays long enough for both systems to recognize each other.
<b>Main Flow</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. The Node sends an alert signal to its surroundings.</li> <li>2. The Base Station (BS) stores the Node's identifier.</li> <li>3. A handshake occurs between the Node and the BS.</li> <li>4. The Node sends compressed data to the best available BS connection.</li> <li>5. The BS verifies data integrity.</li> <li>6. The BS acknowledges the integrity of the data to the Node.</li> <li>7. The Node clears its memory.</li> </ol>

Attribute	Details
<b>Extensions</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Step 1a, 3a:</b> One of the systems fails to recognize the handshake/alert. <b>Outcome:</b> End Flow.</li><li>• <b>Step 5a:</b> Data integrity is not verified.<ol style="list-style-type: none"><li>1. The BS sends another handshake request to upload the data again.</li><li>2. <b>Return to Step 3.</b></li></ol></li><li>• <b>Step 6a:</b> The Node does not receive the integrity acknowledgment. <b>Outcome:</b> End Flow.</li><li>• <b>Any Step:</b> If the marmoset moves too far from the BS, disrupting communication. <b>Outcome:</b> End Flow.</li></ul>

## A.2 UC 2 - Node Neighborhood

<b>Attribute</b>	<b>Details</b>
<b>Goal in Context</b>	The Node will check if there is any Node nearby.
<b>Scope &amp; Level</b>	<b>System Scope:</b> The Node will check which Node is nearby and catalog all the information possible.
<b>Preconditions</b>	The Nodes are synchronized.
<b>Success End Condition</b>	All the nearby Nodes know their neighborhood and the data they carry.
<b>Failed End Condition</b>	None specified.
<b>Primary Actor</b>	The Node.
<b>Secondary Actors</b>	All neighboring Nodes.
<b>Trigger</b>	The timer that syncs the search is triggered.

Attribute	Details
<b>Main Flow</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. The Node activates the listening state.</li> <li>2. While (Listening Time):</li> <li>3. The Node listens for a predefined time.</li> <li>4. The Node, in its preallocated time slot, sends an alert.</li> <li>5. End Listening.</li> <li>6. The Node creates a table with all the neighbors.</li> <li>7. The Nodes share the Base Station (BS) data transfer ticket.</li> <li>8. The Nodes clean all data already backed up to the BS.</li> <li>9. The Nodes reach a consensus on data transfer.</li> <li>10. The Nodes transfer data to the elected Node.</li> <li>11. The elected Node stores the data from other Nodes and verifies its integrity.</li> <li>12. The elected Node acknowledges the transfer.</li> <li>13. The Nodes resynchronize their timer.</li> <li>14. End Flow.</li> </ol>

Attribute	Details
Extensions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>From Step 3 to End:</b> If the marmoset moves too far from the others: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The network assumes the Node has no data to transfer.</li> <li>2. Return to the flow at the point it was interrupted.</li> </ol> </li> <li>• <b>Step 5a:</b> There are no neighbors: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The Node marks the table as empty.</li> <li>2. End Flow.</li> </ol> </li> <li>• <b>Step 3a:</b> The Nodes are not synchronized: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. End Flow (Node Lost).</li> </ol> </li> <li>• <b>Step 3b:</b> The Node listens to a data transfer: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The Node marks the data origin as a neighbor but does not store the data.</li> <li>2. The Node continues listening until resynchronized.</li> <li>3. End Flow.</li> </ol> </li> <li>• <b>Step 13a:</b> The data is corrupted: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The elected Node requests another transfer.</li> <li>2. Return to Step 11.</li> </ol> </li> </ul>

### A.3 UC 3 - Gathering Data

Attribute	Details
Goal in Context	To know where the marmosets are to understand how they use resources.
Scope & Level	<b>System Scope:</b> Log data of marmoset behavior. <b>Objective:</b> Capture the information saved on the node and make it available to researchers.
Preconditions	The node and sensors are operational.
Success End Condition	The system saves all the data necessary to determine the arboreal stratum used by the marmoset.
Failed End Condition	No data is saved.
Primary Actor	The Node.
Secondary Actors	None.
Trigger	Data timer or activity sensor.
Main Flow	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. The Node triggers the BMX280 sensor.</li> <li>2. The Node stores all the significant data.</li> <li>3. End Flow.</li> </ol>
Extensions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Step 1a:</b> The BMX280 returns an error (sensor is not available anymore): <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The Node logs that the sensor is out of service.</li> <li>2. End Flow.</li> </ol> </li> </ul>
Variations	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Step 1a:</b> Instead of BMX280, activate the BMI160 sensor.</li> </ul>

## A.4 UC 4 - Tracker

Attribute	Details
<b>Goal in Context</b>	The Node will track the path made by a single marmoset, capturing its distinct behavior.
<b>Scope &amp; Level</b>	<b>System Scope:</b> Catalog specific area usage of marmosets. <b>Objective:</b> Deploy a tracker with a short lifespan to reconstruct trajectories by calling the IMU with a defined frequency.
<b>Preconditions</b>	The tracker and IMU sensors are operational.
<b>Success End Condition</b>	All the data necessary to reconstruct a path is available.
<b>Failed End Condition</b>	Significant error in the tracker data.
<b>Primary Actor</b>	The Node.
<b>Secondary Actors</b>	Marmoset, Base Station (BS).
<b>Trigger</b>	Any significant activity detected.
<b>Description: Main Flow</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. The tracker detects significant movement.</li> <li>2. When memory is full or the send timer is triggered:</li> <li>3. Activate LoRa alert.</li> <li>4. The Base Station (BS) acknowledges the LoRa signal and stores the tracker name.</li> <li>5. The tracker sends data to the best BS connection.</li> <li>6. The BS acknowledges data integrity.</li> <li>7. The tracker clears its memory.</li> <li>8. End Flow.</li> </ol>
<b>Extensions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Step 4a:</b> The BS does not respond (out of range): <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Set the send timer to a predefined value (X).</li> <li>2. End Flow.</li> </ol> </li> </ul>