

JOSÉ SINÉZIO REBELLO DE FARIA

Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de Internet das Coisas

São Paulo

2023

JOSÉ SINÉZIO REBELLO DE FARIA

Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de Internet das Coisas

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

São Paulo

2023

JOSÉ SINÉZIO REBELLO DE FARIA

Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de Internet das Coisas

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Computação

Orientador:
Prof. Dr. Livre Docente
Carlos Eduardo Cugnasca

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de julho de 2023

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Faria, José Sinézio Rebello

Proposta de Sistema de Monitoramento de Árvores Utilizando Sensores Inerciais Dentro do Paradigma de Internet das Coisas / J. S. R. Faria -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

194 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Biomecânica das Árvores 2.Internet das coisas 3.Previsão de queda de Árvores I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

A toda a família,
aos amigos, aos
colegas, aos professores
e ao orientador que me
deram todo o apoio
desde sempre.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a Deus por me ajudar a superar as dificuldades encontradas, tanto nesta como nas outras etapas de minha vida. E também a dádiva da vida que proporciona o aprendizado desta minha alma, mostrando que nada dura para sempre, nem as dores, nem as alegrias e com o efeito da boa vontade, paciência e perseverança todas as dificuldades desaparecem e os obstáculos somem. Agradeço ao meu orientador o professor Carlos Cugnasca por toda ajuda, orientações e observações feitas relacionadas a pesquisa, proporcionando um bom direcionamento nas águas turbulentas do mestrado com chegada ao porto com segurança. Agradeço a todos da família, aos amigos, aos colegas, aos professores, bem como a todos os dirigentes e aos funcionários das instituições IPT e EPUSP, que tanto me ajudaram.

Agradeço pela bolsa de mestrado recebida, processo nº 2020/01673-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Peço desculpa por uma não citação nominal, já que seria uma coisa inviável pela quantidade de pessoas que tenho que agradecer, por ter participado desta minha etapa da vida.

“Não há problema que não possa ser solucionado pela paciência.”

Francisco Cândido Xavier

RESUMO

A presença de árvores nos centros urbanos proporciona uma série de benefícios para o bem-estar individual e comunitário. Por isso, torna-se importante a sua manutenção adequada nas cidades, pois caso contrário pode-se causar um número alto de rupturas ou queda destas, podendo gerar perdas humanas ou materiais. Com ferramentas para ações preventivas ou corretivas em relação aos impactos de ventos e tempestades em árvores e florestas urbanas, pode-se prevenir ou reduzir os danos dessas ocorrências. Neste sentido, esta pesquisa propôs um sistema de monitoramento de árvores, com foco na análise e previsão de risco de quedas de árvores em ambientes urbanos. A hipótese proposta busca obter a relação entre a velocidade do vento e as variáveis relacionadas com a ruptura de uma árvore. Utilizando a metodologia de prototipagem, concebeu-se e implementou-se um sistema para a comprovação das hipóteses levantadas. Uma modelagem matemática foi utilizada para prever o ponto de queda e ruptura da árvore, e os protótipos foram avaliados por meio de experimentos em laboratório e campo. Com a realização de experimentos de validação do processamento e do consumo de energia, utilizando estampa de tempo nos dados gerados, foram obtidos resultados que mostram a viabilidade de um sistema de monitoramento, destacando como um dos principais resultados o sistema de coleta de dados baseado na internet das coisas, com sensores instalados em árvores e o armazenamento de dados e a sua análise realizada na nuvem.

Palavras-chave: Biomecânica das árvores. Internet das coisas. Ação dos ventos. Sensor inercial. Anemômetro.

ABSTRACT

The presence of trees in urban centers provides a series of benefits for individual and community well-being. Therefore, it is important to maintain them properly in cities, otherwise it can cause a high number of ruptures or falls, which can lead to human or material losses. With tools for preventive or corrective actions in relation to the impacts of winds and storms on trees and urban forests, it is possible to prevent or reduce damage from these occurrences. In this sense, this research proposed a tree monitoring system, focusing on the analysis and prediction of the risk of tree falls in urban environments. The proposed hypothesis seeks to obtain the relationship between wind speed and the variables related to the rupture of a tree. Using the prototyping methodology, a system was designed and implemented to prove the hypotheses raised. A mathematical modeling was used to predict the point of fall and rupture of the tree, and the prototypes were evaluated through laboratory and field experiments. By carrying out experiments to validate the processing and energy consumption, using a time stamp on the generated data, results were obtained that show the viability of a monitoring system, highlighting as one of the main results the data collection system based on the internet of things, with sensors installed in trees and data storage and analysis performed in the cloud.

Keywords: Tree biomechanics. Internet of things. Wind action. Inertial sensor. Anemometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Benefícios das árvores.....	26
Figura 2 - Ocorrência de palavras-chaves para a revisão bibliográfica da literatura da Revisão 1	43
Figura 3 - Ocorrência de palavras-chave para a revisão bibliográfica da literatura da Revisão 2	49
Figura 4 - Ponto onde medir o diâmetro da árvore.....	69
Figura 5 - Ponto onde medir a altura da árvore.....	70
Figura 6 - Ponto onde aplicar a força do vento na copa.....	71
Figura 7 - Ponto onde medir a massa da copa da árvore	71
Figura 8 - Pontos onde instalar os acelerômetros na árvore.....	71
Figura 9 - Ponto onde medir a área da copa da árvore.....	73
Figura 10 - Ciclo de vida dos dados e etapas abordadas pela pesquisa	75
Figura 11 - Método de Engenharia - Prototipagem	76
Figura 12 - Diagrama da arquitetura do SMA.....	79
Figura 13 - Arquitetura para o SMA.....	80
Figura 14 - Diagrama do sistema que atende a modelagem matemática	81
Figura 15 - Sistema que atende a modelagem matemática	81
Figura 16 - Experimento de <i>pulling test</i>	83
Figura 17 - Procedimento dos experimentos de <i>pulling test</i> em campo	84
Figura 18 - Fluxograma do algoritmo de aquisição de dados do SMA	89
Figura 19 - Fluxograma do programa do primeiro experimento realizado em laboratório	91
Figura 20 - Fluxograma do programa do gateway do primeiro experimento realizado em laboratório	91
Figura 21 - Fluxograma do programa utilizado na nuvem do primeiro experimento realizado em laboratório.....	92
Figura 22 - Arquitetura do experimento em laboratório	94
Figura 23 - Confirmação do recebimento dos dados na plataforma TagoIO.....	95
Figura 24 - Confirmação do recebimento dos dados na plataforma Mosquitto da Eclipse Foundation.....	96
Figura 25 - Confirmação do recebimento dos dados na plataforma InterSCity	96

Figura 26 - Experimento de teste dos acelerômetros MPU 9250	98
Figura 27 - Mesa para experimento de movimento de inclinação	102
Figura 28 - Protótipo utilizado no experimento na média móvel.....	104
Figura 29 - Protótipo para converter o padrão do anemoscópio para o padrão do <i>data logger</i>	107
Figura 30 - Experimento de coleta de dados do acelerômetro triaxial, do anemômetro e do anemoscópio	108
Figura 31 - <i>Pulling Test</i>	109
Figura 32 - Experimentos em campo do SMA.....	110
Figura 33 - Tela de visualização dos dados recebidos na plataforma InterSCity	111
Figura 34 - Tela de visualização das tags na plataforma TagoIO	111
Figura 35 - Tela de visualização do painel de controle na plataforma TagoIO.....	111
Figura 36 - Dados sendo armazenados na plataforma TagoIO.....	111
Figura 37 - Protótipo desenvolvido para a análise do consumo do módulo do SMA instalado em árvores	113
Figura 38 - Mostra o módulo DS3231 e sua localização	118
Figura 39 - Formatação do horário, segundo a ISO 8601 no protocolo NTP	119
Figura 40 - Relação da taxa de bit x SF - resultado dado pela fórmula LoRa data rate	121
Figura 41 - Módulos utilizados no experimento de comunicação.....	123
Figura 42 - Dispositivos utilizados no experimento de comunicação	123
Figura 43 - Local de instalação dos dispositivos no campo e no automóvel	125
Figura 44 - Mapa obtido no Google com os pontos coletados no experimento de comunicação	125
Figura 45 - Configuração da mensagem de alerta do Tagolo para uma possível ruptura da árvore.....	127
Figura 46 - Mensagem de alerta de ruptura de árvore enviado para e-mail e SMS	128
Figura 47 - Configuração do recurso de análise do TagoIO com mensagem de alerta de dispositivo off-line	128
Figura 48 - Configuração do recurso de análise do TagoIO com mensagem de alerta de dispositivo <i>off-line</i>	128
Figura 49 - Resultado da análise com mensagem de alerta de dispositivo em off-line enviada para um e-mail e um SMS	129
Figura 50 - Diagrama do ESP32	163

Figura 51 - Pinagem do ESP32 da Heltec.....	164
Figura 52 - Representação da Segunda Lei de Newton.....	165
Figura 53 - Lei de Hooke.....	166
Figura 54 - Funcionamento da tecnologia MEMS no acelerômetro.....	166
Figura 55 - Interligação entre ESP32 e o MPU 9250	168
Figura 56 - Sinalização da marca de orientação dos eixos do acelerômetro	169
Figura 57 - Fluxograma da configuração de interrupção pela detecção de Movimento	171
Figura 58 - Interligação entre ESP32 e o DS 3231	172
Figura 59 - Interligação dos dispositivos no barramento I ² C	173
Figura 60 - Interligação dos dispositivos mestre e escravo no barramento SPI	175
Figura 61 - Interligação do mestre com o escravo, com destaque para o registrador de deslocamento	176
Figura 62 - <i>Data logger</i> DLG4000	176
Figura 63 - Acelerômetro SNS-ABS05	177
Figura 64 - Anemômetro e Anemoscópio AN-3C	178
Figura 65 - Transdutor de extensão de cabo - SP1-12	178
Figura 66 - Extensômetro KFC-20-C1-11.....	179
Figura 67 - Microcontrolador Arduino MEGA 2560.....	180
Figura 68 - Display LCD 16x2 com módulo I ² C	180
Figura 69 - Diagrama de comunicação do protocolo MQTT.....	182
Figura 70 - Diagrama de comunicação QoS = 0	183
Figura 71 - Diagrama de comunicação QoS = 1	183
Figura 72 - Diagrama de comunicação QoS = 2	184
Figura 73 - Protocolo HTTP.....	185
Figura 74 - Arquitetura LoRaWAN.....	188
Figura 75 - Classes de dispositivos LoRaWAN	189
Figura 76 - Plataforma Tago IO.....	192
Figura 77 - Plataforma Mosquitto	194

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de documentos publicados por ano e das respectivas citações - Revisão 1	37
Gráfico 2 - Número de documentos publicados por país - Revisão 1	38
Gráfico 3 - Número de documentos publicados por autor - Revisão 1	39
Gráfico 4 - Número de documentos publicados por instituição - Revisão 1	40
Gráfico 5 - Número de publicações por tipo de documento – Revisão 1.....	40
Gráfico 6 - Número de documentos publicados por área de estudo - Revisão 1	41
Gráfico 7 - Número de documentos publicados por fundação – Revisão 1.....	42
Gráfico 8 - Número de documentos publicados por ano e suas citações por ano - Revisão dois.....	44
Gráfico 9 - Número de documentos publicados por país - Revisão 2	45
Gráfico 10 - Número de documentos publicados por autor - Revisão 2	46
Gráfico 11 - Número de documentos publicados por instituição - Revisão 2	46
Gráfico 12 - Número de publicações por tipo de documento - Revisão 2	47
Gráfico 13 - Número de documentos publicados por área de estudo - Revisão 2	48
Gráfico 14 - Número de documentos publicados por fundação - Revisão 2	48
Gráfico 15A e B - Valores instantâneo e médio do acelerômetro 01 - eixo X.....	100
Gráfico 16A e B - Valores instantâneo e médio do acelerômetro 01 - eixo Y.....	100
Gráfico 17A e B - Valores instantâneo e médio do acelerômetro 01 - eixo Z.....	101
Gráfico 18 - Dispersão das amostras coletadas do eixo Y, no experimento de inclinação	102
Gráfico 19 - Mostra da dispersão das amostras a cada coleta com passo de 0,5', no experimento de inclinação.....	103
Gráfico 20 - Dos valores médios das amostras a cada passo de 0,5', no experimento de inclinação	103
Gráficos 21A, B e C - Amostras e média móvel dos eixos X, Y e Z	105
Gráficos 22A, B e C - Média móvel para 25, 35 e 45 amostras.....	105
Gráfico 23 - Consumo de corrente no Teste 01	114
Gráfico 24 - Médias de consumo de corrente dos testes	115
Gráfico 25 - Média da corrente consumida na transmissão LoRa.....	116
Gráfico 26 - Horas de duração das baterias.....	117

Gráfico 27 - Estimativa do consumo do algoritmo para a aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore.....	130
Gráfico 28 – Valor da escala em relação a resolução	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de documentos e citações relacionadas com o tema nas fontes de publicações - Revisão 1	38
Tabela 2 - Número de conferências com maior número de citações relacionadas com o tema – Revisão 1	41
Tabela 3 - Número de documentos e citações relacionadas com o tema nas fontes de publicação - Revisão 2	45
Tabela 4 - Número de conferências com maior número de citações relacionadas com o tema nas fontes de publicação - Revisão 2.....	47
Tabela 5 - Número de bytes de carga útil e formato para a instrumentação dos dados nas mensagens	85
Tabela 6 - Número de amostragem por experimento	86
Tabela 7 - Dos valores do vetor unitário para os acelerômetros	97
Tabela 8 - Tolerância na leitura do MPU 9250	99
Tabela 9 - Formato dos dados no experimento de funcionamento do MPU 9250.....	99
Tabela 10 - Médias de consumo de corrente dos testes	115
Tabela 11 - Taxas de código para controle de erro na transmissão.....	120
Tabela 12 - Relação da taxa de bit x SF - resultado dado pela fórmula LoRa data rate (Rb).....	121
Tabela 13 - Características de modulação LoRa	122
Tabela 14 - Parâmetros LoRa utilizados no experimento de distância e potência ..	122
Tabela 15 - Pontos com a maior distância obtida nas várias direções no experimento de distância e potência.....	126
Tabela 16 - Consumo do CI MPU 9250	129
Tabela 17 - Consumo do CI ESP32	129
Tabela 18 - Consumo do CI LoRa.....	129
Tabela 19 - Escala e resolução do acelerômetro	170

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos benefícios das árvores.....	26
Quadro 2 - Plano de bolsa do PDlp.....	29
Quadro 3 - Atividades do PDlp.....	29
Quadro 4 - Descrição dos filtros utilizados na revisão bibliográfica da literatura do Revisão 1	36
Quadro 5 - Descrição dos filtros utilizados na revisão bibliográfica da Revisão 2.....	36
Quadro 6 - Mensagens de sinalização	86
Quadro 7 - Descrição dos dados do fluxograma	88
Quadro 8 - Descrição das rotinas ativas nos experimentos de consumo	114
Quadro 9 - Descrição das informações geradas na coleta dos dados no experimento de distância e potência.....	124
Quadro 10 - Trabalhos similares à proposta de pesquisa	133
Quadro 11 - Trabalhos onde o acelerômetro é o protagonista	136
Quadro 12 - Trabalhos com IoT	138
Quadro 13 - Pinagem da placa GY 9250 (MPU 9250)	168
Quadro 14 - Forma de concatenar os registros do GY 9250 (MPU 9250)	169
Quadro 15 - Fontes de Interrupção MPU 9250	171
Quadro 16 - Pinagem da placa DS 3231.....	172
Quadro 17 - Controle de dados no barramento I ² C	174
Quadro 18 - Modo de controle do barramento I ² C.....	174

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico Digital
BS	Estação Base
BW	<i>Bandwidth</i>
CI	Circuito Impresso
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CR	<i>Code Rate</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
D2D	Dispositivo para dispositivo
DAC	Conversor Digital Analógico
DB	Banco de Dados
DMP	<i>Digital Motion Processor</i>
EFITA	European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment
e-mail	<i>Electronic Mail</i>
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FEDSM	American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division
FSK	<i>Frequency-Shifting Keying</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPUs	<i>Graphics Processing Units</i>
GW	<i>Gateways</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IBM	International Business Machines
ICoICT	International Conference on Information and Communication Technology

INRAE	Centre INRAE Nouvelle-Aquitaine Bordeaux
IoT	Internet das Coisas
IOTSMS	International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	International Organization for Standardization
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
LEME	Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas
LInE	Laboratório de Infraestrutura em Energia
LMI	Laboratório de Micromanufatura
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low-power WAN</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
OASIS	Organization for the Advancement of Structured Information Standards
PDIp	Plano de Desenvolvimento Institucional em pesquisa
QoS	<i>Quality of Service</i>
QP	Questões de Pesquisa
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RTC	<i>Real-Time Clock</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SMA	Sistema de Monitoramento de Árvores
SMS	<i>Short Message Service</i>
SoC	<i>System-on-a-Chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>

TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USP	Universidade de São Paulo
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WoM	<i>Wake-on-Motion</i>
WSL	<i>Wald, Schnee und Landschaft</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

'	Minuto
"	Polegada
%	Porcentagem
°	Grau
°C	Grau Celsius
A	Ampere
Byte	8 bits
CO ₂	Gás carbônico
dB	Decibel
g	Aceleração da gravidade
Hz	Hertz
kg	Quilograma
kg/m	Quilograma por metro
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
km/h	Quilômetro por hora
km ²	Quilômetro quadrado
m/s	Metro por segundo
m/s ²	Metro por segundo ao quadrado
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
min	Minuto
mm	Milímetro
O ₂	Oxigênio
Pa	Pascal
rad/s	Radianos por segundo
s	Segundo
V	Volt
VAC	Tensão em corrente alternada
VCC	Tensão em corrente contínua
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	BENEFÍCIOS E IMPORTÂNCIA DAS ÁRVORES NO CENÁRIO URBANO	25
1.2	JUSTIFICATIVAS.....	28
1.2.1	Plano de desenvolvimento institucional em pesquisa (PDlp).....	28
1.2.2	Tecnologia da Internet das Coisas (IoT) no contexto da pesquisa.....	30
1.3	OBJETIVO	31
1.3.1	Objetivo geral	31
1.4	QUESTÕES DE PESQUISA (QP).....	32
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	32
2	REVISÃO DA LITERATURA	34
2.1	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA METODOLOGIA EMPREGADA PARA AS DUAS REVISÕES	34
2.2	ANÁLISE DA REVISÃO DA LITERATURA DA REVISÃO 1	36
2.3	ANÁLISE DA REVISÃO DA LITERATURA DA REVISÃO 2	43
2.4	TRABALHOS RELACIONADOS E SOLUÇÕES EXISTENTES.....	50
2.5	EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS NAS PESQUISAS	64
2.6	LACUNAS OBSERVADAS.....	66
2.7	PESQUISA DO TEMA AO REDOR DO MUNDO.....	66
2.7.1	Cenário mundial	67
2.7.2	Cenário brasileiro.....	67
2.8	MODELAGEM MATEMÁTICA DE ÁRVORES	68
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
3	MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1	METODOLOGIA:.....	74
3.2	GESTÃO DE DADOS.....	75
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
4	CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ÁRVORE (SMA)..	77
4.1	LEVANTAMENTO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS E NÃO FUNCIONAIS..	77
4.1.1	Requisitos funcionais	77

4.1.2	Requisitos não funcionais.....	78
4.2	CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	79
4.2.1	Arquitetura para o SMA	79
4.2.2	Sistema para aquisição de dados para atender a modelagem matemática.....	80
4.3	TESTES EM ÁRVORES	82
4.4	PONTOS DA ESTRUTURA DO SMA, TESTADAS NOS EXPERIMENTOS REALIZADOS ENTRE O CAMPO E A NUVEM	85
4.4.1	Coleta de dados - formato das mensagens e amostragem	85
4.4.1.1	Carga útil e formato das mensagens	85
4.4.1.2	Amostragem.....	86
4.4.2	Sistema de sinalizações	86
4.4.3	Estrutura da comunicação dos dispositivos nos experimentos.....	87
4.4.4	Estrutura e análise dos dados na Nuvem	87
4.4.5	Sincronismo dos dados - <i>TimeStamp</i>	87
4.4.6	Distância e potência no envio de mensagem	88
4.4.7	Algoritmo de aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore	88
4.4.8	Definição do hardware básico para o SMA.....	89
4.5	PRINCIPAIS FLUXOGRAMAS DAS ROTINAS DO SMA	90
4.5.1	Fluxograma do módulo instalado na árvore.....	91
4.5.2	Fluxograma do gateway instalado no laboratório.....	91
4.5.3	Fluxograma na nuvem Tago IO.....	92
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	93
5.1	EXPERIMENTO EM LABORÁTORIO E CAMPO.....	93
5.1.1	Experimento em laboratório e prototipagem.....	93
5.1.1.1	Etapas do experimento	93
5.1.2	Experimento de validação das medições do MPU 9250	97
5.1.2.1	Verificação da calibração	97
5.1.2.2	Validação com leituras contínua	98
5.1.2.3	Leituras obtidas em movimento de inclinação	101
5.1.2.4	Média móvel na coleta de dados	104

5.1.3	Experimentos em campo para levantamento da característica da árvore	106
5.1.3.1	Experimento de coleta de dados do acelerômetro triaxial, anemômetro e anemoscópio	106
5.1.3.2	<i>Pulling test</i>	108
5.1.4	Experimentos para avaliar a comunicação do SMA	109
5.1.4.1	Experimento de conectividade do SMA com a nuvem	109
5.1.4.2	Experimentos de avaliação de consumo de energia do módulo do SMA instalado em uma árvore	112
5.1.4.3	Experimento de RTC com <i>TimeStamp</i>	117
5.1.4.4	Experimentos sobre a comunicação e a potência requerida ao envio de mensagem	119
5.1.4.5	Experimento de mensagens de sinalização e análise dos dados na nuvem	126
5.1.4.6	Experimento do algoritmo para a aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore	129
5.2	SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS	130
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
6	DISCUSSÕES	133
6.1	COMPARAÇÃO COM TRABALHOS SIMILARES	133
6.2	ANÁLISE DA ARQUITETURA PARA ATENDER A MODELAGEM MATEMÁTICA	134
6.3	ANÁLISE DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA O SMA	135
6.3.1	Validação das medições do módulo MPU 9250	135
6.3.2	Estruturas no paradigma da IoT	137
6.4	RESPOSTAS AS QUESTÕES DESTA PESQUISA	139
6.5	AVALIAÇÕES DECORRENTES DOS EXPERIMENTOS	141
6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	142
7	CONCLUSÕES	143
7.1	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	143
7.2	DIFICULDADES ENFRENTADAS	145
7.3	POTENCIAIS DA APLICAÇÃO	145
7.4	PESQUISAS FUTURAS	145
7.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	147

REFERÊNCIAS.....	148
APÊNDICE A – PROGRAMAS DESENVOLVIDOS.....	158
APÊNDICE B – MÓDULOS E DISPOSITIVOS UTILIZADOS.....	162
APÊNDICE C – PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO UTILIZADOS.....	181
APÊNDICE D – PLATAFORMAS PARA A COLOCAÇÃO DOS DADOS NA NUVEM	191

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma breve contextualização do cenário dos benefícios das árvores em cidades, a importância do seu monitoramento, bem como as justificativas, as motivações, os objetivos e a estrutura do presente trabalho.

1.1 BENEFÍCIOS E IMPORTÂNCIA DAS ÁRVORES NO CENÁRIO URBANO

Há uma série de vantagens na arborização de cidades, proporcionando uma ampla gama de benefícios para o bem-estar comunitário e individual. Segundo Buckeridge (2015), um benefício que a presença de árvores nas vias públicas gera na saúde da população em centros urbanos, é a diminuição em mais de 90% da incidência do sol, com consequente diminuição de luz e temperatura nos transeuntes que se exercitam ou caminham sob elas. Outros são a absorção do gás carbônico (CO₂), filtragem de material particulado (que pode causar doenças pulmonares) (NOWAK et al., 2014) e liberação de oxigênio (O₂), com melhoria da qualidade do ar (LIVESLEY; MCPHERSON; CALFAPIETRA, 2016).

O aquecimento global, associado ao crescimento de áreas urbanas, se tornará mais intenso nos próximos anos, gerando aumento da temperatura, e mudanças climáticas. A implementação de infraestrutura verde urbana, como árvores de rua, parques, telhados verdes e fachadas nas cidades, pode ajudar na redução de temperatura e oferecer diversos benefícios adicionais (NORTON et al., 2015).

Em estudo realizado por Nowak et al. (2014), a poluição atmosférica é removida pelas árvores, pela interceptação deste material nas superfícies das plantas, e também pela absorção dos gases poluentes pelas folhas, melhorando a qualidade do ar e da saúde da população humana. Além do benefício da melhoria da qualidade do ar, também ocorre a diminuição da poluição sonora (BRACK, 2002).

No cenário urbano são exacerbados os desafios ambientais, por exemplo, o escoamento de águas pluviais, com risco de inundação, e a ilha de calor urbano, com ondas de calor no verão. Em seu conjunto, as árvores e a floresta urbana

podem ser capazes de causar um impacto positivo nos ciclos de água, calor, carbono e poluição nas áreas urbanas (LIVESLEY; MCPHERSON; CALFAPIETRA, 2016), como mostrado na Figura 1 e no Quadro 1.

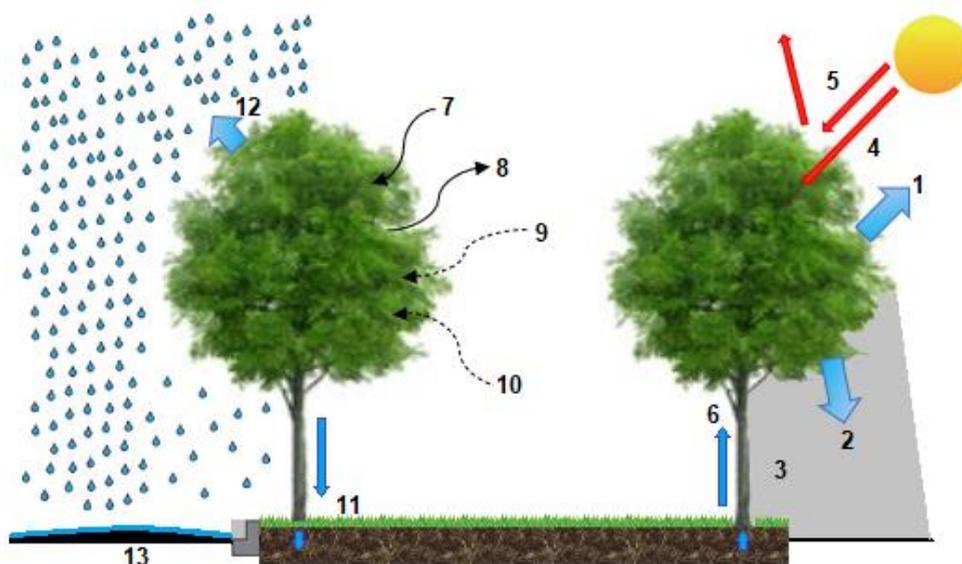


Figura 1 - Benefícios das árvores

Fonte: adaptado de Livesley, Mcpherson e Calfapietra (2016).

Benefícios das árvores	
1	Faz resfriamento por transpiração
2	Faz resfriamento da superfície e microclima local
3	Gera conforto térmico para o pedestre
4	Intercepta e absorve a radiação do Sol
5	Reflete a radiação do Sol
6	Absorve água e nutrientes do solo
7	Absorve CO ₂
8	Libera O ₂
9	Faz captação de partículas
10	Faz captação de particulados de poluição
11	Promove a infiltração das chuvas no local
12	Intercepta e evapora a água da chuva
13	Reduz o escoamento superficial da água

Quadro 1 - Descrição dos benefícios das árvores

Fonte: adaptado de Livesley, Mcpherson e Calfapietra (2016).

A floresta urbana e o plantio de árvores tem um papel importante na estratégia de infraestrutura verde, pois árvores saudáveis podem interceptar e promover a infiltração das chuvas no local onde caem, reduzindo o escoamento de águas pluviais e o carregamento de poluentes para o corpo d'água (XIAO; MCPHERSON, 2016).

A liberação de vapor de água pela evapotranspiração das árvores colabora para a umidade do ar, a formação de nuvens e o equilíbrio do calor urbano, atenuando os efeitos das ilhas de calor. Uma árvore de porte grande pode transpirar em média 400 litros de água por dia (BUCKERIDGE, 2015; BALLINAS; BARRADAS, 2016).

A cidade de São Paulo, SP contava com cerca de 650 mil árvores plantadas nas ruas em 2014 (IPT, 2017a), e outras tantas nos parques municipais, propriedades particulares e parques estaduais. A responsabilidade da manutenção destas é dividida entre a iniciativa privada, o município e o estado, mas a sua remoção é restrita aos órgãos públicos. Segundo Buckeridge (2015) nos primeiros anos da década de 2010, a cidade de São Paulo apresentava arborização desigual em suas diversas regiões, com valores entre 0,06 a 1,95 árvores por habitante, tendo como estimativa 0,6 árvores por habitante na cidade de São Paulo. Teria que haver um planejamento de arborização que uniformizasse esta distribuição e elevasse este número o mais perto de uma árvore por habitante na cidade.

A manutenção inadequada das árvores urbanas pode levar à injúria em várias partes: (i) raízes dobradas e enoveladas quando plantadas em solo compactado, cova rasa ou barreira física; (ii) remoção de parte das raízes; (si) poda inadequada nas diversas partes das árvores, retirando a sua estabilidade; (iv) colo soterrado, acelerando o processo de biodeterioração; e (v) dendrocirurgia quando não feita corretamente, levando ao apodrecimento de partes da árvore. Essas injúrias, somadas à velocidade dos ventos, são um dos principais fatores que leva à ruptura das árvores. Esta possui um impacto grande nos cidadãos de grandes cidades, no que diz respeito aos danos físicos e materiais relacionados às quedas destas (BRAZOLIN, 2009).

As quedas de árvores podem também gerar prejuízos às florestas. Em áreas rurais de reflorestamento, a queda destas pode ocorrer por falta de uma boa ancoragem em suas raízes e ventos fortes (DANQUECHIN DORVAL; MEREDIEU; DANJON, 2016). Um exemplo é o abeto norueguês, espécie florestal muito importante do norte da Europa e uma das mais suscetíveis à queda, que com o aumento dos eventos climáticos, fica sujeita a danos causados por tempestades de ventos (KRISĀNS et al., 2020).

Na área urbana, a queda ou ruptura de árvores por eventos climáticos extremos, causada por ventos pode gerar perdas econômicas e ambientais diretas

ou indiretas, podendo chegar até à paralização de parte da infraestrutura, como edifícios, ruas, dutos subterrâneos e linhas aéreas de energia e comunicação. Torna-se essencial avaliar a interrupção nos diferentes tipos de infraestrutura por queda de árvores, para tornar as comunidades mais resilientes, com a previsão, resposta e recuperação destas (HOU; CHEN, 2020). As árvores são importantes para a qualidade e paisagem ambiental nas áreas urbanas, no entanto, a ruptura delas pode expor vidas e propriedades a riscos (LEE; JIM, 2018).

Segundo a Escala de Beaufort de ventos, que é uma padronização importante da velocidade dos ventos, os galhos de árvores se quebram a partir de ventos de 55 km/h (CPTEC, 2019). A cidade de São Paulo, por exemplo, já apresentou rajadas de vento da ordem de 101 km/h (IGA, 2017), quase o dobro desta velocidade de ruptura.

Na tentativa de estimar que a ação da força dos ventos leve à ruptura de uma árvore, é importante medir o impacto da força destes no caule e/ou copa das árvores. Para isto, é importante o uso de instrumentação que relacione a velocidade do vento com o deslocamento da árvore, similar aos estudos realizados no Japão com a espécie de árvores coníferas (KOIZUMI et al., 2010).

1.2 JUSTIFICATIVAS

Esta seção justifica o porquê uma pesquisa nesta área do conhecimento é necessária e como ela irá ajudar na manutenção de árvores em cidades inteligentes.

1.2.1 Plano de desenvolvimento institucional em pesquisa (PDIp)

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito de uma das linhas de pesquisa do projeto denominado “Plano de Desenvolvimento Institucional na Área de Transformação Digital: Manufatura Avançada e Cidades Inteligentes e Sustentáveis”, coordenado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT),

apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto número 2017/50348-2. Trata-se da linha de pesquisa de “Sensoriamento Inercial Autônomo”, que conta também com a colaboração de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP).

A bolsa de mestrado associada ao presente trabalho foi prevista na proposta PDIp-IPT submetida à FAPESP, processo 2020/01673-2, proposta intitulada “Proposta de um Sistema de Monitoramento de Árvores, utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de Internet das Coisas”, cujas atividades se encontram apresentadas no Quadro 2. Já o Quadro 3 destaca as atividades do PDIp-IPT, sendo que o presente trabalho está associado à Atividade 7.

Bolsa	Descrição
M1	Monitoramento de perdas em rede de abastecimento de água
M2	Sensores inerciais aplicados à predição de desastres ambientais
M3	Monitoramento de estabilidade estrutural de árvores
M4	Projeto de Encapsulamento de sensores inerciais usando tecnologia LTCC
M5	Ferramenta Big Data para análise de dados gerados por sensor MEMS
D1	Concepção, projeto detalhado e simulação de sensor inercial MEMS
D2	Micro fabricação e caracterização de processos para sensores inerciais
D3	Integração de MEMS e módulo autônomo de processamento e controle
PD1	Micro fabricação e caracterização de sensor inercial MEMS

Quadro 2 - Plano de bolsa do PDIp

Fonte: adaptado de IPT (2018).

Número	Atividades
1	Desenvolvimento de processos em Sala Limpa
2	Projeto e Fabricação de sensor inercial MEMS
3	Desenvolvimento de nós sensores (RFID ou Wireless)
4	Integração de sensores com módulo de processamento e transmissão
5	Desenvolvimento plataforma coleta e análise de dados
6	Desenvolvimento dispositivo para coleta e gerenciamento energia
7	Protótipo I - sensor para monitorar estabilidade de árvores
8	Protótipo II - sensor para monitorar encostas
9	Protótipo III - sensor para perdas em rede de abastecimento de água
10	Publicações e artigos

Quadro 3 - Atividades do PDIp

Fonte: adaptado de IPT (2018).

As pesquisas visam a validação dos sensores inerciais com tecnologia *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS), com a obtenção de dados de sincronismo da frequência do deslocamento, deformação, aceleração e vibração do tronco, bem como a inclinação da raiz em relação a direção e velocidade do vento atuante nas árvores. Estes dados, combinados com a elaboração de modelos estruturais científicos embasados na mecânica das estruturas (biomecânica da árvore), permitem construir ferramentas de análise, calibração e validação na análise de risco de queda de árvore, sendo feitas estas análises de modo empírico pela ausência de modelo matemático confiável de comportamento das árvores. Dessa forma, espera-se poder ajustar esses modelos estruturais para a realização de experimentos para se obter a relação do coeficiente de arrasto com a velocidade do vento, mecanismos de ruptura de galhos, dos troncos e da raiz. A partir desses modelos estruturais e experimentos realizados, existe a possibilidade de se iniciar estudos sobre o sistema radicular de árvores em ambiente urbano, que pode ser relacionado ao solo, às características de canteiro e distribuição das suas raízes de sustentação. O conjunto de todas estas informações permitirá, posteriormente, a utilização de modelos de aprendizado de máquina para chegar à conclusão sobre o risco de queda das árvores.

O presente projeto de pesquisa se insere na linha de pesquisa em arborização urbana e análise de risco de queda de árvores do Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis (LAMM) do IPT, e contou com o apoio de diversos laboratórios desse instituto. O Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas (LEME) e o Laboratório de Infraestrutura em Energia (LIInE) forneceram a infraestrutura de instrumentação e coleta de dados para validação dos modelos concebidos. Já o Laboratório de Micromanufatura (LMI) é responsável pelo desenvolvimento e fabricação de circuitos integrados para sensores inerciais com tecnologia MEMS.

1.2.2 Tecnologia da Internet das Coisas (IoT) no contexto da pesquisa

A tecnologia IoT pode ser uma boa aliada no monitoramento e análise das condições de risco para árvores em ambiente urbano, e é apresentada e discutida

em vários artigos. Nos parágrafos seguintes são apresentados alguns destes artigos, com exemplos.

O monitoramento de árvores com a IoT pode auxiliar na análise e previsão do risco de queda de árvores em um ambiente urbano, pois possibilita a coleta dos dados *online*, guardando-os em uma base para análise (CARVALHO JUNIOR; HARIKI; GOLDMAN, 2018).

Uma pesquisa piloto realizada na cidade de Moscou, utilizando IoT, para o monitoramento de umas áreas arborizadas, levantou dados do clima, qualidade do ar e regularização das águas locais, que propiciaram um melhor entendimento do processo da árvore. Como resultado, obtiveram-se alguns benefícios de ecossistema de serviço, como a diminuição do calor externo, o sequestro do carbono e a remoção de material particulado (MATASOV et al., 2020).

Em seu artigo, Nitoslawski et al. (2019) revelam o foco nas novas tecnologias utilizando IoT em projetos de florestas urbanas, com monitoramento por sensores, dados abertos e engajamentos do cidadão.

O rápido crescimento da tecnologia IoT tem possibilitado o monitoramento em tempo real, com baixo custo e identificação única, para pessoas, animais, vegetais e objetos (GUBBI et al., 2013; VALENTINI et al., 2019).

1.3 OBJETIVO

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais e específicos desta pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é propor um Sistema de Monitoramento de Árvores (SMA) para análise e previsão de risco de quedas destas em ambientes urbanos.

1.4 QUESTÕES DE PESQUISA (QP)

As questões propostas desta pesquisa são:

QP1: Como as tecnologias para monitorar árvores e florestas evoluiu ao longo do tempo, com base nos artigos levantados na revisão da literatura?

QP2: Quais são as principais técnicas usadas na análise e conservação da saúde das árvores e florestas urbanas, no que diz respeito ao risco de queda?

QP3: Como a tecnologia de Internet das Coisas pode beneficiar ou ajudar no monitoramento das árvores e florestas urbanas?

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta sete capítulos, a relação de referências consultadas e quatro apêndices:

O Capítulo 1 apresenta a introdução contendo o contexto e motivações, justificativas e objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, o levantamento do estado da arte das tecnologias e conceitos, bem como as revisões bibliométricas.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e os métodos utilizados na pesquisa, bem com a gestão de dados gerados.

O Capítulo 4 apresenta a concepção do SMA, destacando os requisitos funcionais e não funcionais, a concepção da arquitetura do sistema, a modelagem matemática empregada e os procedimentos de testes.

O Capítulo 5 apresenta os experimentos e resultados obtidos, a partir de testes dos protótipos em laboratório e em campo.

O Capítulo 6 discute-se os resultados obtidos.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho, o potencial de sua aplicação, dificuldades enfrentadas e sugestões para trabalhos futuros.

As Referências as obras consultadas e citadas no trabalho.

Os Apêndices apresentam detalhes dos programas desenvolvidos, dos

módulos e dispositivos utilizados, dos protocolos de comunicação utilizados, e das plataformas para a colocação dos dados na nuvem utilizados nos experimentos da pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo desta revisão é levantar, por meio de ferramenta bibliométrica em repositório da produção mundial acadêmica, o estado da arte sobre o tema de pesquisa, que inclui documentos obtidos em periódicos, congressos, livros e outros materiais.

Esta revisão foi dividida em duas etapas: (i) Revisão 1 da literatura de sistemas de monitoramento e análise relacionado a árvore, que possui artigos da ação dos ventos sobre as árvores, com pouco conteúdo em IoT, e (ii) Revisão 2 da literatura de sistemas de IoT, envolvendo artigos com sistemas em IoT para cidades inteligentes, por exemplo, para controle de iluminação, saneamento entre outros, sendo que as estruturas destes sistemas podem inspirar sistemas de monitoramento de árvores. Portanto, estas duas revisões se complementam para atingir o objetivo da pesquisa.

Estas revisões seguem uma metodologia bibliométrica, ou um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos utilizados para medir e analisar a quantidade e qualidade das várias formas de publicações científicas, como artigos, livros entre outras. Os indicadores bibliométricos tendem a aumentar sua importância na medida em que mais trabalhos científicos são publicados, lidos e citados. Eles ajudam os pesquisadores e organizações, pois com frequência são utilizados em decisões de financiamentos, promoções e até nomeações de pesquisadores (VALÉRIE; PIERRE, 2010). Para o levantamento e análise dos documentos publicados, foi utilizada a base de dados Scopus e o software VOSviewer (VOSVIEWER, 2020).

Com metodologia semelhante em biometria há a pesquisa de Sánchez (2018) sobre o bem-estar dos empreendedores e Silva (2020) em produtos florestais não madeireiros no Brasil.

2.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA METODOLOGIA EMPREGADA PARA AS DUAS REVISÕES

Nesta seção são descritas as etapas da metodologia para o levantamento dos artigos relevantes que estão relacionados ao projeto desta pesquisa.

a) **Seleção de palavras**

No sentido de levantar documentos relevantes ao tema de pesquisa, foram selecionadas palavras-chaves que foram utilizadas nos repositórios das produções mundiais acadêmicas, nos campos título, resumos e palavras-chaves, selecionando o maior número de documentos publicados.

b) **Seleção da base de dados e estratégia de pesquisa**

Em ambas as pesquisas foi utilizada a base de dados Scopus, que é uma das maiores em citações e resumos disponível para a comunidade científica, tendo uma estrutura com conselho consultivo e de seleção de conteúdo independente. Ela garante que dados de alta qualidade sejam indexados por meio de seleção rigorosa de conteúdo e de sua reavaliação, com uma ampla cobertura global e regional de revistas científicas, livros e conferências. O Scopus oferece um perfil amplo de instituições e autores, através de ferramentas avançadas. Com registros melhorados por metadados de artigos científicos, tem-se o uso destes em análises bibliométricas de larga escala para avaliação de pesquisa (BAAS et al., 2020).

c) **Definição do protocolo de pesquisa e critérios de exclusão na base de dados**

Dentro da base de dados selecionada, em ambas as pesquisas de revisão bibliográfica foram utilizados filtros para obtenção do conjunto de artigos relevantes, conforme apresentado no Quadro 4 e no Quadro 5. Esse levantamento foi realizado no ano de 2020, e período de estabelecido foi de uma década: de 2010 a 2020.

d) **Avaliação dos selecionados**

Pela leitura e análise dos títulos e resumos dos documentos selecionados na base de dados, foram levantados os documentos que são relevantes ao tema do projeto de pesquisa.

e) **Análise quantitativa e identificação**

Pela análise quantitativa são identificados os principais artigos, eventos, periódicos da evolução da utilização da IoT no monitoramento de árvores e florestas, bem como outros sistemas em cidades inteligentes que podem ser adaptados para as árvores.

f) **Agrupamento e visualização dos dados**

Utilizando os metadados levantados nas etapas anteriores, pode-se fazer o agrupamento e visualização destes dados, com a identificação de palavras-chave e seus *clusters*, utilizando o software VOSviewer (VOSVIEWER, 2020).

Revisão bibliográfica da literatura da Revisão 1	
Descrição do filtro	Filtro aplicado
Documentos pesquisados	Título do artigo, resumo, palavras-chave
Palavras-chaves	árvore, floresta, vento, derrubada pelo vento, tempestades de vento, arrasto, IoT, acelerômetro e anemômetro
Idioma	Inglês
Área de estudo	Ciências Agrárias e Biológicas, Ciência Ambiental, Ciências da Terra e Planetárias, Engenharia, Bioquímica, Genética e Biologia Molecular, Ciência da Computação, Ciência de materiais, Física e Astronomia, Engenharia Química, Multidisciplinar, Química e Ciências da Decisão
Limite de anos	2010 a 2020

Quadro 4 - Descrição dos filtros utilizados na revisão bibliográfica da literatura do Revisão 1
Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Revisão bibliográfica da literatura da Revisão 2	
Descrição do filtro	Filtro aplicado
Documentos pesquisados	Título do artigo, resumo, palavras-chave
Palavras-chaves	Cidade Inteligente, IoT, Internet das Coisas, LoRaWAN, Arduino, Raspberry, Sigfox, <i>design</i> aberto e vento
Idioma	Inglês
Área de estudo	Ciência da Computação, Engenharia, Matemática, Ciências da Decisão, Física e Astronomia, Ciência Ambiental
Limite de anos	2010 a 2020

Quadro 5 - Descrição dos filtros utilizados na revisão bibliográfica da Revisão 2
Fonte: autor com base em Scopus (2020).

2.2 ANÁLISE DA REVISÃO DA LITERATURA DA REVISÃO 1

Neste estudo bibliométrico para o levantamento da literatura do tema central realizou-se a busca inicial na base de dados, utilizando-se na pesquisa as palavras-chaves selecionadas, com os termos em inglês. Esta busca selecionou 1.031 documentos. No refinamento da pesquisa aplicaram-se vários filtros, começando

com o de idioma, na qual foi selecionado o idioma inglês, sendo encontrados 966 documentos, o que mostra a predominância deste idioma. Com o filtro de área de estudos, foram encontrados 850 documentos, sendo a data do mais antigo o ano de 1950. Com o filtro de anos sendo limitado de 2010 a 2020, foram encontrados 440 documentos, mostrando que quase 50% destes pertencem a este período. Por fim a exclusão de artigos não relevantes, com análise e leitura do título e resumos dos documentos, foram encontrados 313.

Os documentos selecionados no período pesquisado mostram uma evolução das publicações nas áreas consideradas, tendo uma oscilação negativa entre os anos de 2012 a 2015. A partir deste ponto tem-se a inversão desta tendência, mantendo o crescimento até o final deste período, com dois pontos de destaque, entre 2015 e 2016, quando o número de publicações aumentou 60%, e entre 2019 e 2020, quando aumentou 16%. Nota-se que o gráfico com número de citações por ano tende a seguir o número de publicações por ano entre os anos de 2010 a 2017 tendo, neste período, a média de 22 citações por documento (Gráfico 1).

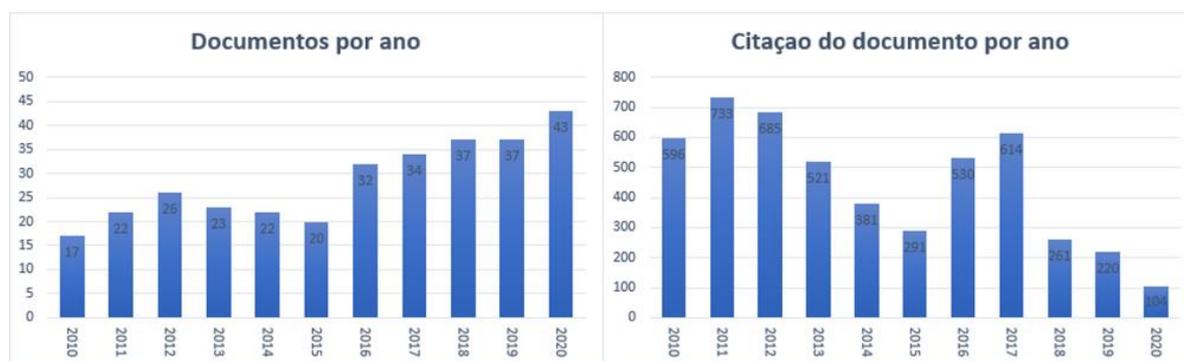


Gráfico 1 - Número de documentos publicados por ano e das respectivas citações - Revisão 1

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Nota-se que na análise do gráfico das publicações referente ao tema por país, os Estados Unidos seguem isolado, com 88 publicações, sendo quase três vezes o número de publicações com relação à segunda posição, que é a Alemanha com 32.

Da terceira à décima posição, aparecem em sequência, França, República Tcheca, Canadá, Eslováquia, Japão, Suíça, China e Finlândia. Neste levantamento, se somar todos os valores destas dez posições, constata-se que 30% são dos Estados Unidos.

O Brasil vem na décima terceira posição com 11 publicações, bem à frente de outros países da América Latina, como Panamá com quatro, e Argentina, México e Peru com um documento cada (Gráfico 2).

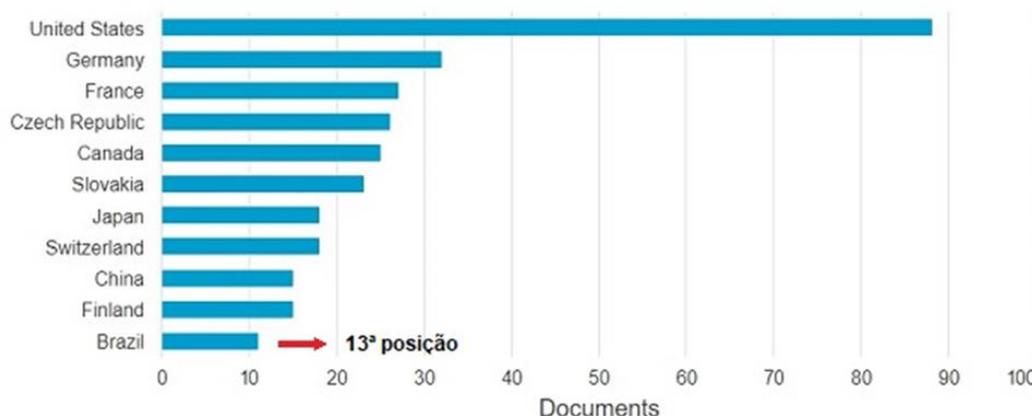


Gráfico 2 - Número de documentos publicados por país - Revisão 1

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Na Tabela 1 é possível observar que nas fontes, a que concentra boa parte dos documentos publicados é *Forest Ecology And Management*, com 34 publicações e 891 citações, quase 10% do total. Este periódico publica artigos que associam ecologia florestal ao gerenciamento de recursos florestais. Em seguida tem-se *Agricultural and Forest Meteorology*, com 24 publicações e 463 citações, que cobre pesquisa que relaciona a meteorologia com os campos das ciências vegetais, animais e do solo, ecologia e biogeoquímica. Tem-se ainda, entre a terceira à quinta posição, os periódicos *Forests*, *Boundary Layer Meteorology* e *Canadian Journal Of Forest Research*. Somando-se os documentos destes cinco periódicos tem-se 95, que representa 30% das publicações. Foram 145 o total de fontes desta pesquisa, destacando-se esses cinco periódicos.

Fonte	Documentos	Citações
<i>Forest Ecology And Management</i>	34	891
<i>Agricultural and Forest Meteorology</i>	24	463
<i>Forests</i>	18	116
<i>Boundary Layer Meteorology</i>	11	179
<i>Canadian Journal Of Forest Research</i>	8	65

Tabela 1 - Número de documentos e citações relacionadas com o tema nas fontes de publicações - Revisão 1

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Também foram analisados os autores que mais documentos publicaram no período, com itens relacionados ao tema pesquisado. O autor com maior número de publicações foi Jean Claude Ruel, tendo dez documentos nesta pesquisa, com afiliação a Universidade Laval do Canadá, seguido de Ebba Dellwik com oito publicações da Universidade Técnica da Dinamarca. Ao se somar os documentos

dos dez autores com melhores posições tem-se 64, que correspondem a 20% dos documentos selecionados (Gráfico 3).

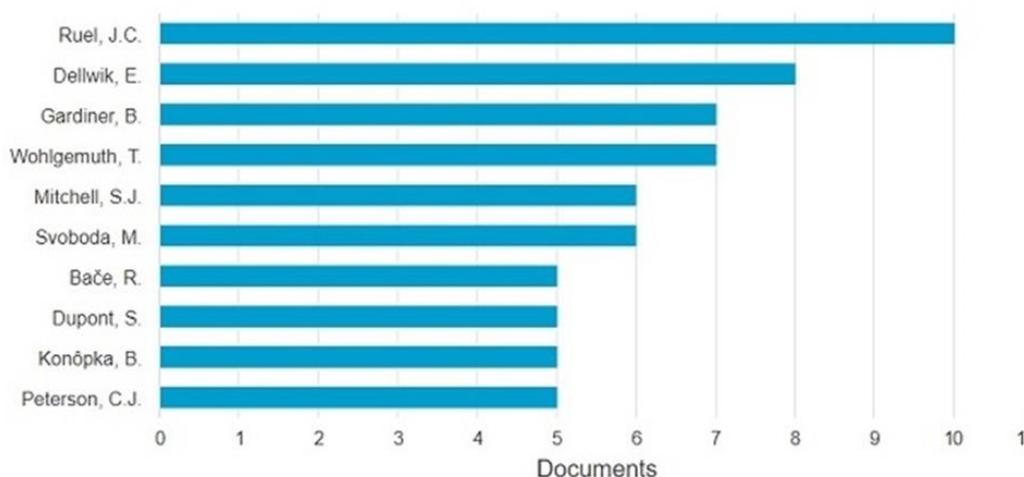


Gráfico 3 - Número de documentos publicados por autor - Revisão 1

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

As dez instituições que publicaram mais itens relacionados ao assunto da pesquisa estão apresentadas no Gráfico 4. Ao se somar as publicações destas instituições tem-se 107 documentos, sendo 34% destes selecionados. Observa-se, que a participação de instituições da Europa é predominante, totalizando sete, como a Czech University of Life Sciences Prague, o Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), o Centre INRAE Nouvelle-Aquitaine Bordeaux (INRAE), entre outras, seguidas da participação de instituições dos Estados Unidos, Canadá e Japão.

Na análise dos tipos de documentos publicados, com itens relacionados ao tema de pesquisa, pode-se observar que foram levantados 279 documentos, que tiveram suas publicações na forma de artigo, totalizando 89%, em sua grande maioria, seguidas das conferências apresentadas na Gráfico 5.

Separando-se as conferências que tiveram os documentos com maior número de citações na Tabela 2, destaca-se a International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS), com seis citações, e com uma citação a American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (FEDSM).

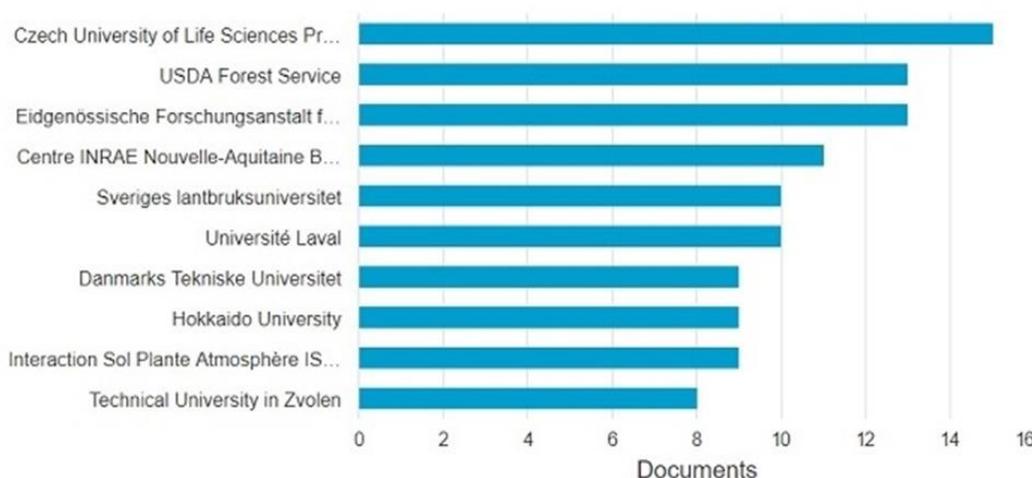


Gráfico 4 - Número de documentos publicados por instituição - Revisão 1
 Fonte: autor com base em Scopus (2020).

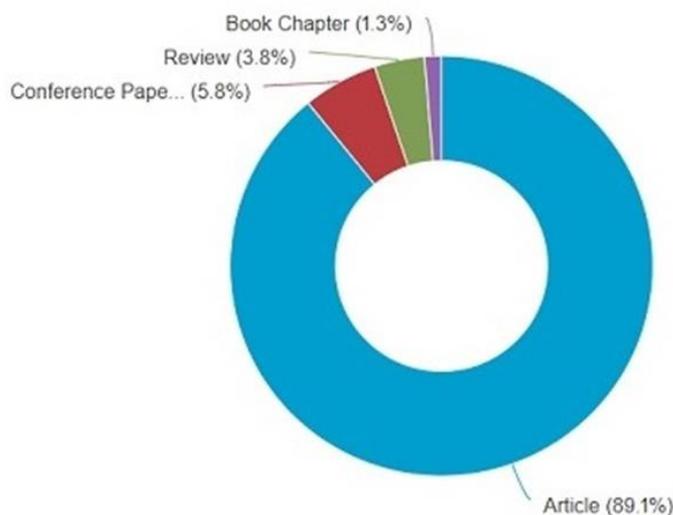


Gráfico 5 - Número de publicações por tipo de documento – Revisão 1
 Fonte: Autor com base em Scopus (2020).

Nos documentos levantados, separados por área de estudo, tem-se na primeira posição com quase 10% a mais de diferença da segunda, as Ciências Agrárias e Biológicas com 196 documentos, seguidas da segunda e terceira posições a Ciência Ambiental, com 148 documentos, e as Ciências da Terra e Planetárias, com 83 documentos. Estas três áreas de estudo representam mais de 80% dos documentos publicados (Gráfico 6).

Conferência	Citações
2019 6th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security, (IOTSMS)	6
2011 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting (ASABE)	4
2015 Progress in Electromagnetics Research Symposium	3
2014 American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM	1

Tabela 2 - Número de conferências com maior número de citações relacionadas com o tema – Revisão 1

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

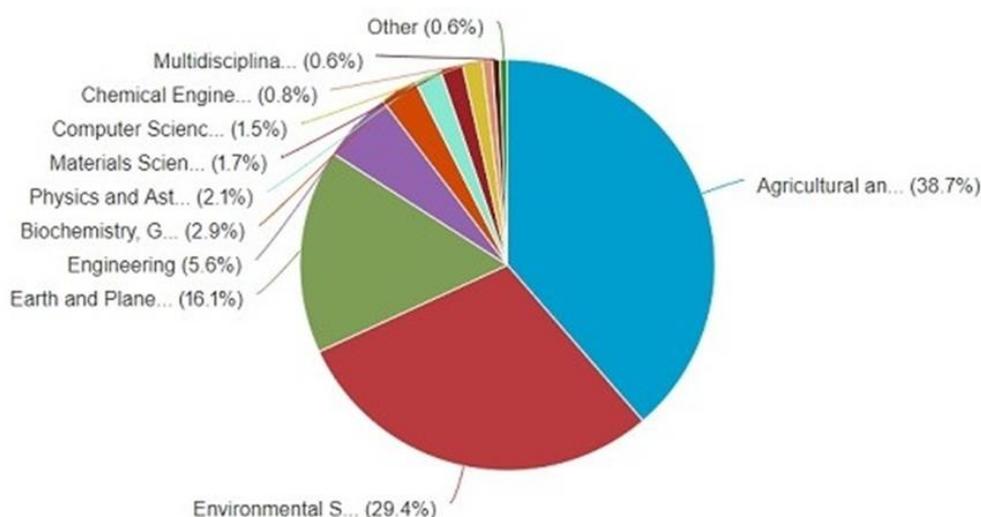


Gráfico 6 - Número de documentos publicados por área de estudo - Revisão 1
Fonte: autor com base em Scopus (2020).

O levantamento também contemplou as fundações que mais financiaram pesquisas, relacionadas ao tema. Pode-se observar que as duas primeiras fundações se destacam em relação às outras, sendo a primeira a Comissão Europeia, com 21 documentos, seguida da Fundação Nacional da Ciência dos Estados Unidos, com 19, ambas com mais do dobro de documentos financiados que a terceira, o Ministério da Educação, da Cultura, dos Esportes, da Ciência e da Tecnologia do Japão, com oito documentos financiados (Gráfico 7).

Seguindo para a análise bibliométrica, foram levantados os metadados coletados deste conjunto de documentos, na base de dados Scopus. Por conseguinte, estes dados foram importados para o software VOSviewer, com o qual se pode visualizar, com a sua metodologia de análise e clusterização dos dados, o gráfico da Figura 2. Este gráfico está presente no trabalho do autor, submetido 13th

European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment (EFITA) (FARIA et al., 2021).

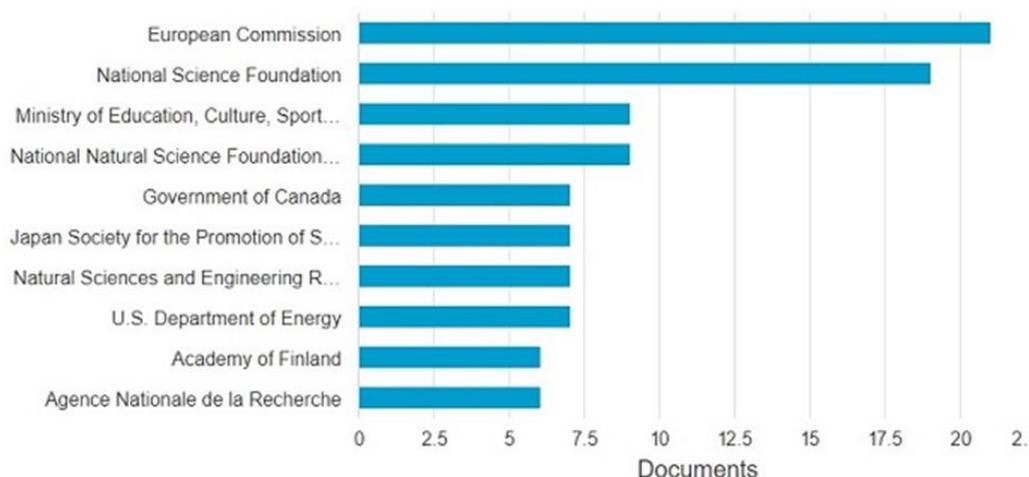


Gráfico 7 - Número de documentos publicados por fundação – Revisão 1

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Na análise dos gráficos gerados pelo VOSviewer foram selecionados aqueles que obtiveram 15 ocorrências, com 37 palavras-chave e três *clusters*. Os três *clusters* encontrados foram com as palavras-chave: (i) árvore conífera, árvore de folhas secas, perturbação, ecologia, ecossistemas, perturbação ambiental, dinâmica da floresta, ecossistema florestal, formas de relevo, mortalidade, *picea abies*, reflorestamento, regeneração, estrutura do estande, tempestade, sucessão, perturbação do vento e derrubada do vento; (ii) anemômetro, arrasto, coeficiente de arrasto, estudo experimental, floresta, silvicultura, árvore, turbulência, fluxo turbulento, vento, direção do vento, velocidade do vento; e (iii) floresta boreal, dano, gestão florestal, avaliação de risco, danos causados por tempestades, dano do vento, força do vento.

O primeiro *cluster* foi constituído pelo conjunto de palavras-chave como impactos do vento, que representa o impacto dos ventos e tempestades nas florestas e árvores e, como o vento de várias maneiras produz sua perturbação. O segundo *cluster* foi constituído por variáveis e experimentos, que representam aqueles realizados em campo e em laboratório, para estimar os impactos de ventos e tempestades em árvores e florestas, bem como a modelagem de árvores e seu comportamento. E o terceiro *cluster* foi constituído pelo manejo florestal, que está relacionado a diferentes formas de manejar os danos causados pelos ventos nas florestas e avaliar seus riscos, utilizando esta abordagem para lidar com os problemas de ruptura de árvores.

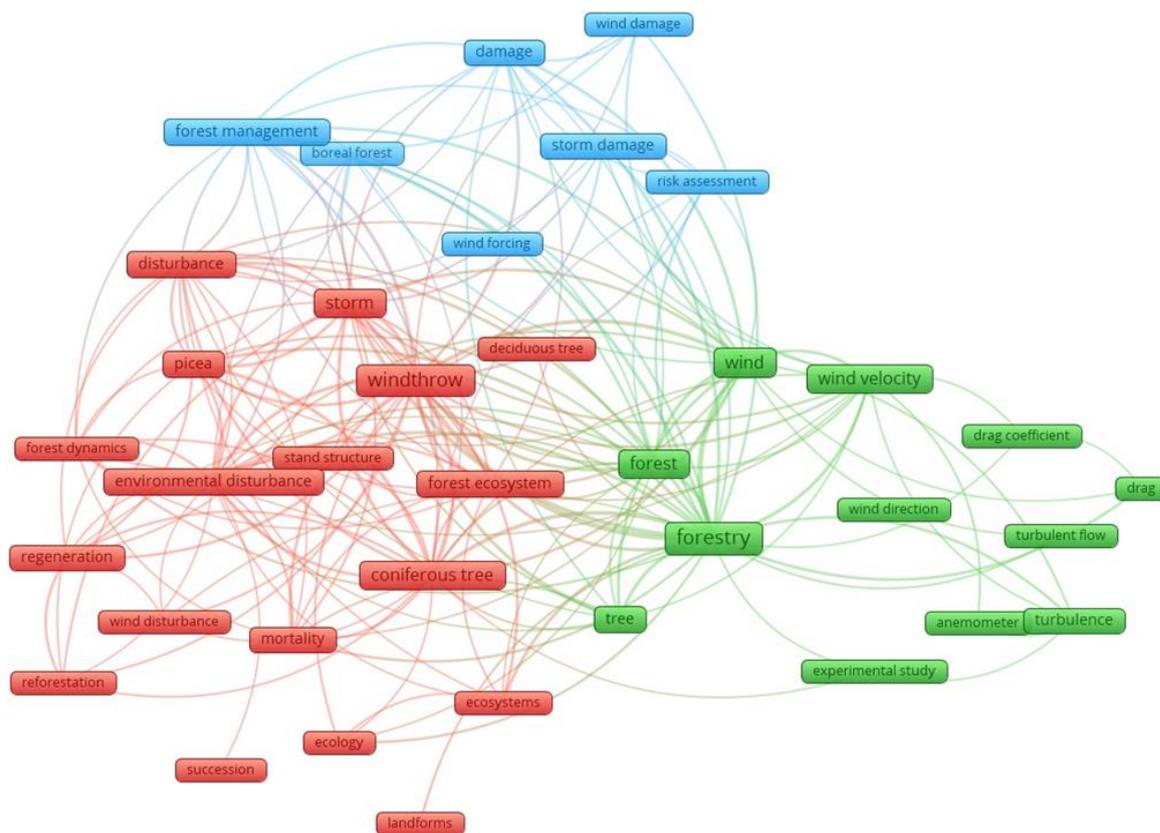


Figura 2 - Ocorrência de palavras-chaves para a revisão bibliográfica da literatura da Revisão 1

Fonte: Autor com base no VOSviewer (2020) e submetida no EFITA(FARIA et al., 2021).

2.3 ANÁLISE DA REVISÃO DA LITERATURA DA REVISÃO 2

Neste estudo bibliométrico, que complementa o da Revisão 2, teve por início o levantamento na base de dados dos documentos relacionados ao tema de pesquisa, utilizando palavras-chaves com os termos em inglês. Nesta busca foram selecionados 485 documentos.

Refinando-se a pesquisa aplicaram-se vários filtros. Na filtragem por idioma, foi selecionado o inglês, no qual foram encontrados 479 documentos, o que demonstra a predominância deste idioma. Com o filtro de área de estudo, foram encontrados 277 documentos, que foram selecionados a partir de 2014. Por fim com exclusão de documentos não relevantes, com análise final e leitura do título e resumos, foram encontrados 111 documentos.

Observando o gráfico de documentos selecionados por ano, nota-se que há um crescimento constante, com um destaque para o período de 2017 a 2018 com um aumento de mais 200% no número de publicações. Outro destaque é que os documentos começaram a ser selecionados a partir de 2014 para o conjunto de palavras-chave utilizadas na pesquisa (Gráfico 8).

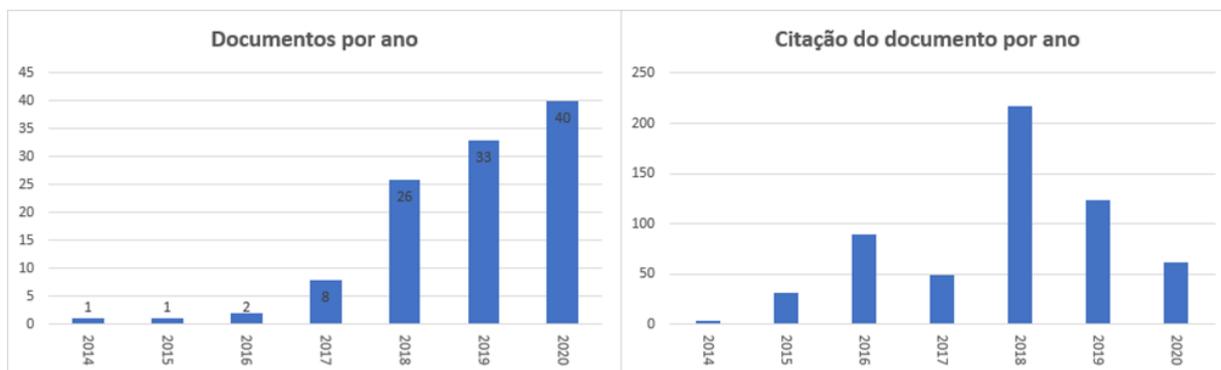


Gráfico 8 - Número de documentos publicados por ano e suas citações por ano - Revisão dois

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

No levantamento do número de documentos publicados por país, como se observa no Gráfico 9, a Índia aparece isolada com 32 documentos, sendo mais de três vezes a quantidade destes em relação a segunda posição, a Itália com nove, e tendo quase a mesma quantidade de documentos, dos países posicionados entre a segunda e a sexta posição. Os que estão além da segunda posição são: a Indonésia com sete, a Malásia com seis, Rússia com seis e Reino Unido com seis. Aqui também em sétima colocação tem-se o Brasil com cinco documentos. Cabe destacar que as palavras-chave de Revisão 2 envolvem tecnologias de menor custo, justificando a ausência de países como os EUA, que dispõem de mais recursos para a realização de suas pesquisas.

Na Tabela 3 é possível observar nas fontes que entre as cinco melhores posições, não há grande diferença no número de documentos publicados entre o primeiro e o quinto. Na fonte Avanços em Sistemas Inteligentes e Computação há um destaque com quatro documentos publicados e 12 citações, que cobre novas teorias e aplicações no campo de sistemas inteligentes e computação. O número total de fontes encontradas nesta pesquisa foi 30. Nota-se que a média de documentos por fonte foi de 1,5, tendo a grande maioria um documento publicado.

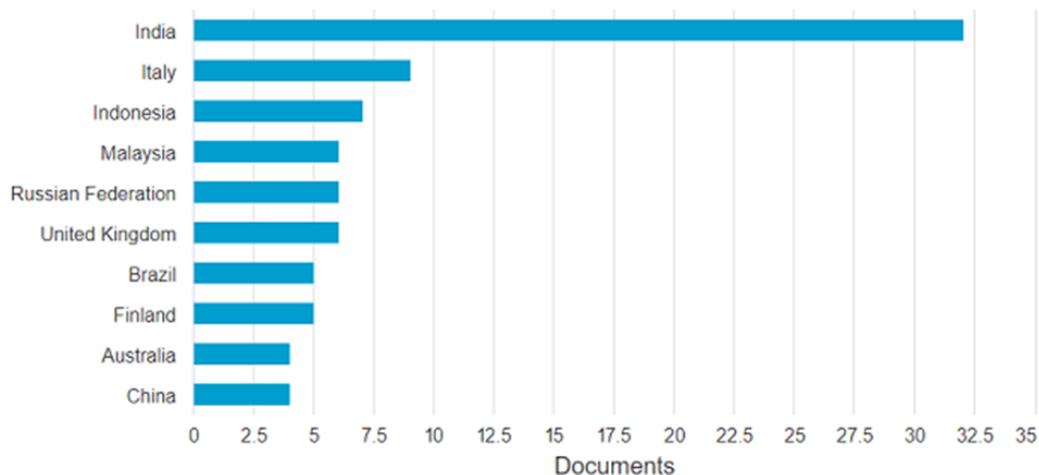


Gráfico 9 - Número de documentos publicados por país - Revisão 2

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Fonte	Documentos	Citações
Advances In Intelligent Systems And Computing	4	12
ACM International Conference Proceeding Series	4	2
Communications In Computer And Information Science	3	4
International Journal Of Engineering And Advanced Technology	3	4
IEEE Internet Of Things Journal	2	11

Tabela 3 - Número de documentos e citações relacionadas com o tema nas fontes de publicação - Revisão 2

Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Ao se observar o gráfico dos autores que tiveram mais documentos publicados relacionados ao assunto da pesquisa, nota-se na primeira posição, Mohamed Hadi Habaebi, da Universidade Islâmica Internacional da Malásia. Já da terceira à quinta posição tem-se a participação de pesquisadores da América do Sul, com Maria Calle e John Edwin Candelo Becerra da Colômbia, e Agustin Candia da Argentina (Gráfico 10).

As dez instituições que publicaram mais itens relacionados ao assunto da pesquisa estão apresentadas no Gráfico 11. As duas primeiras posições são de instituições Europeias, a Universidade de Oulu da Finlândia e a Universidade Pública em Brno da República Tcheca. Em seguida vem uma instituição da Ásia, a Universidade Islâmica Internacional da Malásia. Além destes continentes tem-se a participação das Américas, com duas instituições, e a Oceania, com uma.

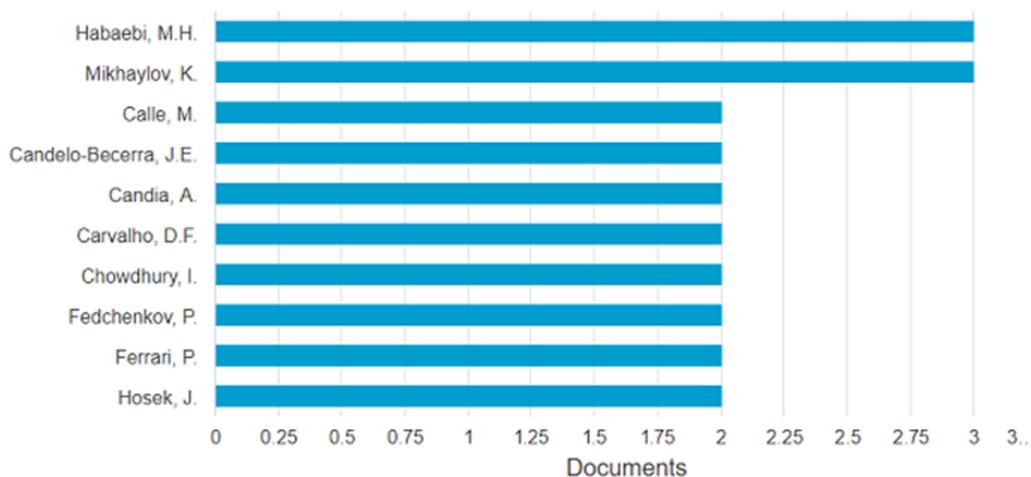


Gráfico 10 - Número de documentos publicados por autor - Revisão 2
 Fonte: autor com base em Scopus (2020).

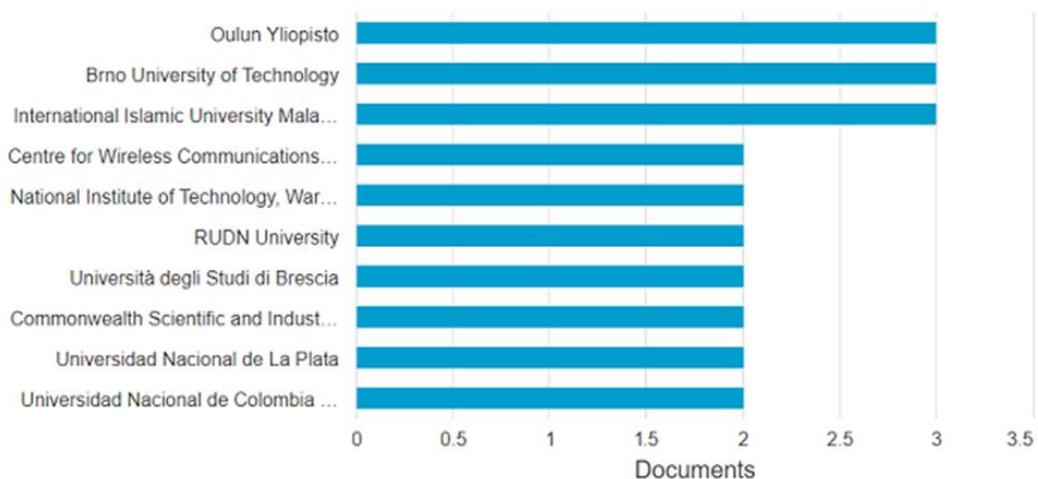


Gráfico 11 - Número de documentos publicados por instituição - Revisão 2
 Fonte: autor com base em Scopus (2020).

No Gráfico 12 sobre o tipo de documento publicado, tem-se nas conferências um número três vezes maior que os publicados em artigos.

Na Tabela 4 podem-se observar as conferências em que os documentos selecionados na pesquisa tiveram um número significativo de citações, dentre as quais se destaca o Workshop Internacional IEEE em Sistemas de Comunicação de Fábrica (WFCS) de 2018 com 57. Na segunda posição vem a International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT) de 2015, com 32 citações, tendo 78% menos citações em relação a primeira. O conjunto das conferências levantadas na pesquisa somou-se 83, com um total de 433 citações em seus documentos. A soma das citações das cinco conferências com melhores posições contempla 37% do total destas.

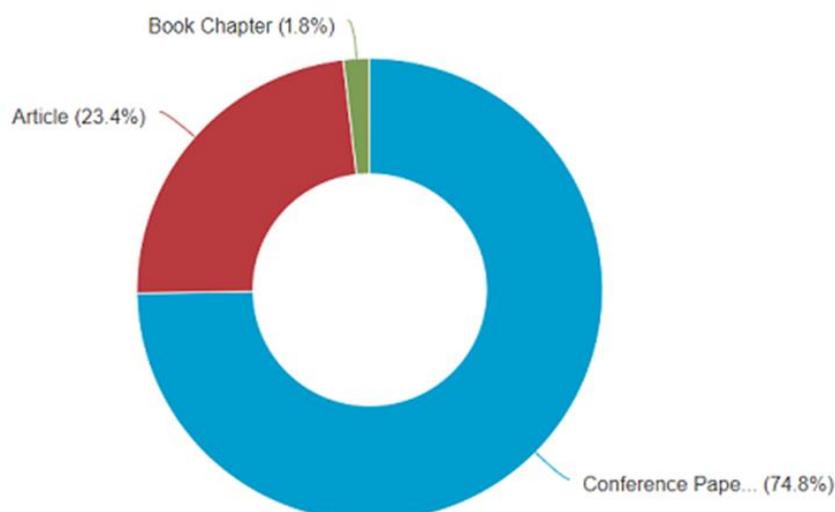


Gráfico 12 - Número de publicações por tipo de documento - Revisão 2
 Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Conferência	Citações
2018 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS	57
2015 3rd International Conference on Information and Communication Technology, ICoICT.	32
2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference, MENACOMM	30
2016 International Conference on Recent Trends in Information Technology, ICRTIT	23
2019 4th International Conference on Fog and Mobile Edge Computing, FMEC.	17

Tabela 4 - Número de conferências com maior número de citações relacionadas com o tema nas fontes de publicação - Revisão 2
 Fonte: autor com base em Scopus (2020).

No Gráfico 13 dos documentos levantados, separados por área de estudo, tem-se na primeira posição a Ciência da Computação, com 98 documentos, o dobro em relação à segunda, a Engenharia, com 49 documentos. Nestas duas áreas de estudos tem-se mais de 70% dos documentos selecionados. As áreas de estudos que também apresentaram documentos foram a Matemática, a Ciências da Decisão, Física e Astronomia e Ciência Ambiental.

Nesta pesquisa também foram levantadas as fundações que mais financiaram os documentos selecionados. Observa-se que a Comissão Europeia e o Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional se destacam das demais. Elas juntas somam

sete documentos, sendo as fundações que mais apresentaram documentos financiados. Tem-se ainda a Finlândia, na terceira posição, com dois documentos, e o Brasil, que está representado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), com dois documentos (Gráfico 14).

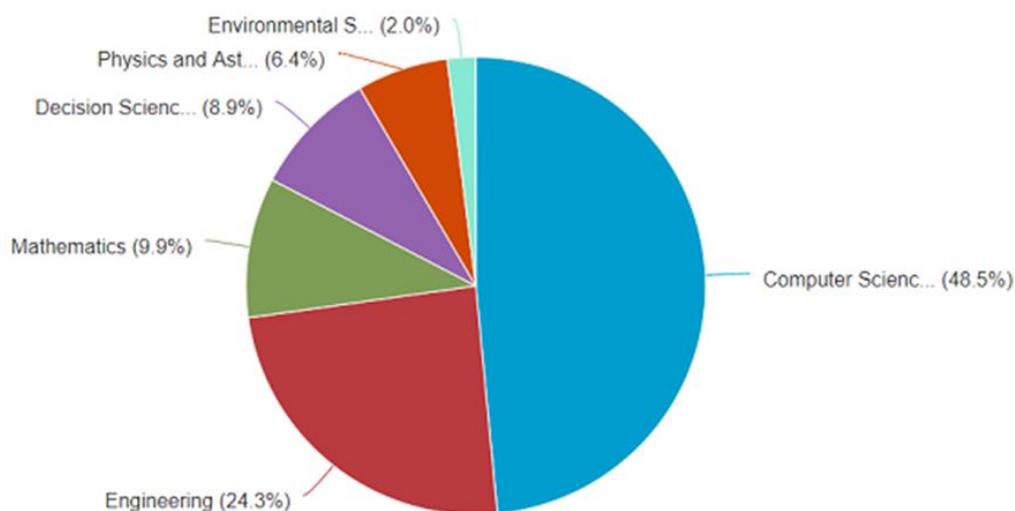


Gráfico 13 - Número de documentos publicados por área de estudo - Revisão 2
Fonte: autor com base em Scopus (2020).

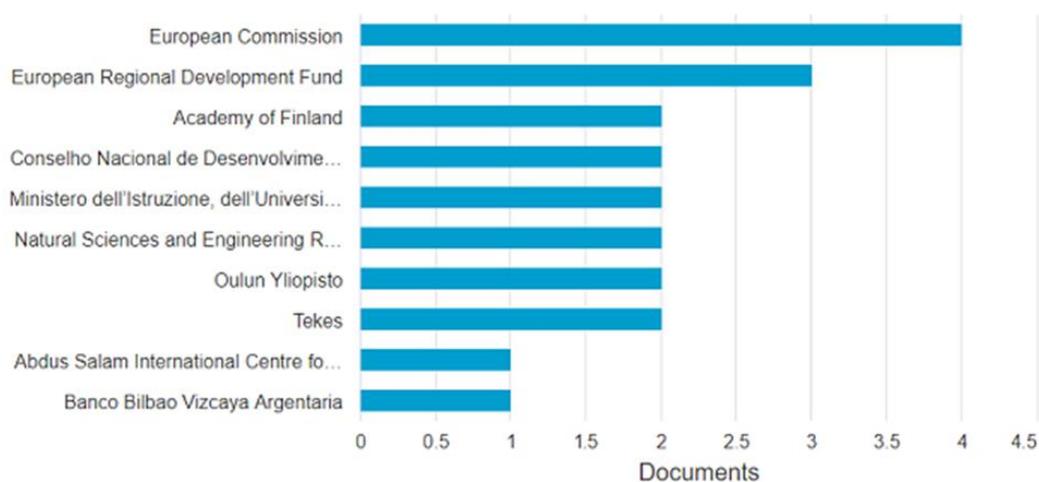


Gráfico 14 - Número de documentos publicados por fundação - Revisão 2
Fonte: autor com base em Scopus (2020).

Em relação à análise da revisão bibliométrica, foram levantados os metadados coletados deste conjunto de documentos relacionados ao tema na base de dados Scopus. Em seguida, estes dados foram importados pelo software VOSviewer, no qual, com a sua metodologia de análise e clusterização dos dados, foi obtida a Figura 3.

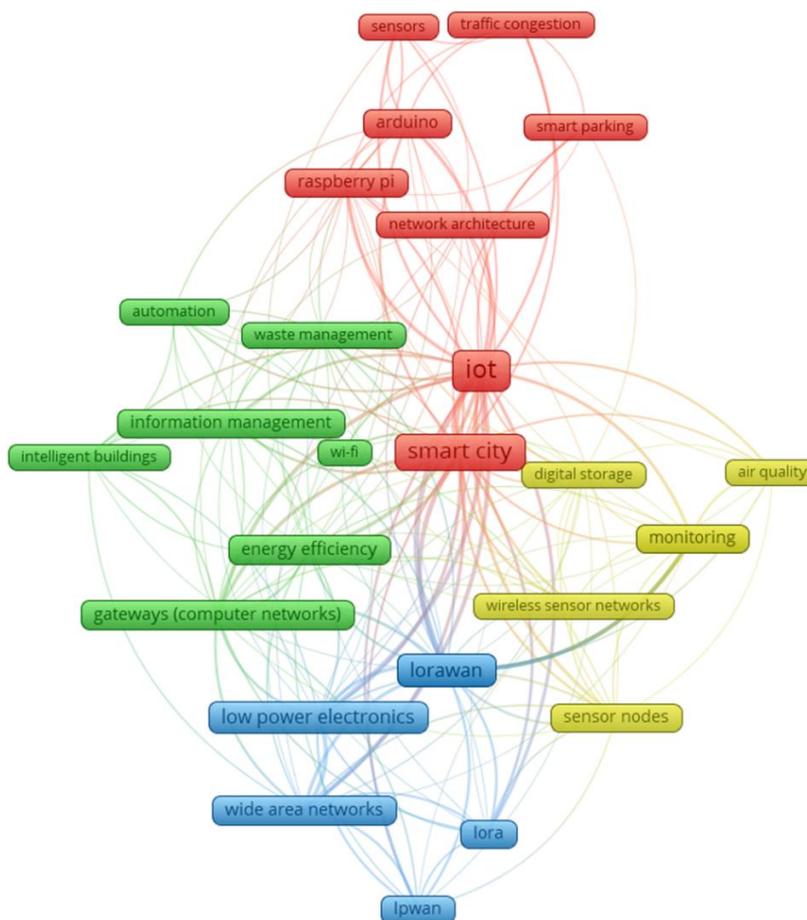


Figura 3 - Ocorrência de palavras-chave para a revisão bibliográfica da literatura da Revisão 2

Fonte: autor com base em VOSviewer (2020).

Na análise dos gráficos gerados pelo VOSviewer foram selecionados aqueles que obtiveram cinco ocorrências, com 25 palavras-chave e quatro *clusters*, encontrando-se as seguintes palavras-chaves; (i) IoT, cidade inteligente, arquitetura de rede, Raspberry pi, Arduino, estacionamento inteligente, tráfego congestionado, sensores; (ii) Wi-Fi, eficiência energética, *gateways* (redes de computadores), edifício inteligente, gestão de informação, gestão de resíduos e automação; (iii) monitoramento, armazenamento digital, qualidade do ar, redes de sensores sem fio e nós sensores; e (iv) LoRaWAN, LoRa, eletrônica de baixa potência, redes de longa distância e LPWAN (endereço único da rede pública (externa)).

O primeiro *cluster* foi denominado embarcados, que representa as tecnologias de IoT que se integram para formar um sistema de monitoramento e controle em cidades inteligentes. O segundo *cluster* foi denominado gerência de informação, que representa a forma de gerenciamento, controle e comunicação de dados em larga escala. O terceiro *cluster* foi denominado aquisição de dados, que está relacionado

às diferentes formas de coletar, monitorar e armazenar os dados em campo. O quarto *cluster* foi denominado tecnologia baixa potência, que representa uma tecnologia de rede de dispositivos que atua em uma área ampla com baixa utilização de energia, no funcionamento dos equipamentos

2.4 TRABALHOS RELACIONADOS E SOLUÇÕES EXISTENTES

a) Trabalhos relacionados e soluções existentes na revisão da literatura da Revisão 1

Mayer (1987), em seu trabalho das oscilações de árvores induzido pelos ventos, mostra a importância deste estudo na silvicultura, porque o balanço induzido nas árvores por ventos em tempestades florestais geram danos nestas, que levam a perdas econômicas importantes. As tempestades florestais podem levar a quatro tipos de danos: quebra de raiz, arremesso de árvore, quebra de tronco e quebra de estoque (quebra rente ao solo; este ponto fica na parte superior das raízes com a parte inferior do caule). Pelo seu levantamento da literatura, nas tempestades violentas, com velocidade do vento superior a 30 m/s em um período de 10 min, nenhuma espécie de árvore sobrevive. Para minimizar os danos gerados por tempestades de ventos deve se atuar na quantidade e distribuição da frequência dos ventos ou aumentar a frequência dos balanços primários das árvores. Estes dois caminhos minimizam as condições de danos nas árvores.

Coutts (1983), em um estudo abrangente sobre a arquitetura e estabilidade da raiz de uma árvore, analisou a ancoragem da raiz, com o objetivo de determinar a sua estrutura para a maior estabilidade de uma árvore. As variáveis medidas são a força aplicada, o ângulo de inclinação, o movimento da raiz e do solo. Utilizando um microfone enterrado mediu-se o tempo de propagação do som, do momento da aplicação da força à quebra das raízes. O processo utilizado foi o do guincho puxador, que aplica uma força lateral no tronco, verificando o efeito sobre o sistema de raízes, para a espécie abeto Sitka. Com os componentes de ancoragem que foram elucidados, uma abordagem de modelagem pode ser adotada para estudar sua sensibilidade à morfologia, distribuição da raiz e às propriedades do solo.

A modelagem matemática de ancoragem de raiz para o pinheiro abeto Sitka (seu nome é derivado da comunidade Sitka, do Alasca) com raízes rasas foi feito por Blackweel, Rennolls e Coutts (1990). Pela complexidade da árvore, utilizou-se um método simplificado, mas que fornece um modelo cujas suposições e resultados são fáceis de entender e que pode investigar situações ainda não entendidas. Neste modelo os autores estudaram a resistência causada por quatro componentes: peso da placa solo, ruptura do solo, força de tração de barlavento da árvore e flexão das raízes. O modelo ajuda a prever a estabilidade das árvores e as características de raiz ao solo. Mostra que, na silvicultura, a forma de manejo, cultivo, espaçamento ou desbaste das árvores, influenciam e podem alargar e aprofundar a placa de raiz, e o modelo ajuda a avaliar os resultados destas mudanças na ancoragem.

O artigo de England (2000) analisa a dinâmica dos ventos sobre as árvores, e mostra que a placa radicular de uma árvore dirige seu comportamento sob forte carga aerodinâmica a experimentos de puxar árvores, demonstrando a resistência do sistema radicular em relação ao seu movimento e rotação. Ao estudarem a dinâmica de uma árvore sobre a ação de uma rajada de vento sobreposta a um vento constante, propuseram uma fórmula empírica, que é utilizada para determinar a velocidade média do vento necessária para tombar uma árvore.

Na Oregon State University foi desenvolvido um medidor de tensão de fibra de baixo custo, utilizando um extensômetro. Este mede a tensão sobre o caule ou o galho de árvores quando sujeitas à força dos ventos. Nos experimentos de laboratório e de campo, a resposta do sinal de voltagem foi uma linha linear proporcional à deformação sofrida pelo material em laboratório. Este transdutor também se mostrou adequado para fazer medições de deslocamentos de árvores (MOORE et al., 2005).

No trabalho com clones de pinheiros abeto Sitka, estudou-se o efeito do melhoramento nas árvores, nos fatores que influenciam a sua estabilidade. Cinco clones foram cultivados por 11 anos em viveiro, e na distribuição da biomassa entre o caule e a raiz, a parte do sistema de raízes foi melhorado. No estudo, ao se comparar estes com as árvores não clonadas, foram encontradas diferenças entre a alocação de biomassa e a parte aérea, a raiz e arquitetura do sistema radicular. Os clones com distribuição uniforme das raízes, apresentam 85 % de área da seção transversal nas seis raízes maiores, e maior estabilidade que as não melhoradas com porcentagem semelhante em três raízes (NICOLL et al., 1995).

Koizumi et al. (2010) realizaram um trabalho focando na estimativa dos coeficientes de arrasto da coroa do álamo, uma espécie de árvore conífera, por método de experimentação em campo. O coeficiente de arrasto é a resistência exercida por um objeto em um meio fluídico, e pode ser utilizado no projeto em questão, considerando a árvore como objeto e o ar como meio fluídico.

O efeito dos ventos na seção transversal da árvore também foi estudado considerando tanto árvores sadias quanto árvores ocas (KOIZUMI; HIRAI, 2006). Esta é uma condição normal em ambientes urbanos, pois existem diversas árvores com diferentes níveis de degradação. Os pesquisadores utilizaram variáveis como força do vento, regularidades da seção transversal e se a seção continha parte oca. Os resultados observados demonstraram que os efeitos dos ventos na seção transversal oca foram consideráveis na velocidade crítica (40 m/s), resultando em um ponto de ruptura com velocidade menor que em uma árvore sadia, sendo um ponto a ser observado em nosso estudo.

O IPT realizou um estudo de avaliação de risco de queda de árvores iniciado em 2013, através do desenvolvimento do software ARBIO, com um modelo probabilístico de análise, armazenamento e coleta de dados via *smartphone*, facilitando a inspeção das árvores pelo técnico (IPT, 2017b). Nele foram utilizados os seguintes parâmetros: diâmetro da altura do peito (medido na perpendicular ao eixo de crescimento à altura a 1,30 m), altura total da árvore, porcentagem de deterioração interna, densidade aparente e velocidade dos ventos em 12 diferentes cenários. O resultado destas medições foi a estimativa da probabilidade de ruptura das árvores.

Brazolin (2009) avaliou o processo de biodeterioração da espécie das árvores de tipuana presentes na cidade de São Paulo, relacionando esta ao seu risco de queda. Foram selecionadas 1.109 árvores para o estudo das variáveis dendrométricas (técnica utilizada para medir as dimensões e a forma de desenvolvimento de uma árvore), risco de queda e biodeterioração interna e externa. Foi verificado que a reunião de cupins e fungos leva ao risco de queda, e variáveis dendrométricas afetam o lenho das árvores.

Van Emmerik et al. (2017) avaliam o uso de acelerômetros de baixo custo em árvores do bioma amazônico, concluindo que estes auxiliam na previsão de queda com relação à precipitação e coeficiente de arrasto da árvore.

James, Hallam, e Spencer (2013) utilizam um acelerômetro tri-axial com taxa de amostragem de 20 Hz para medir a inclinação da árvore em sua área de enraizamento estrutural (final da estrutura da raiz e início do tronco), sobrecarga estática e dinâmica da ação dos ventos. Lee e Jim (2018), por sua vez, utilizaram estes sensores para medir o deslocamento (oscilação) de árvores urbanas sob a ação de ciclones tropicais.

Os acelerômetros são ferramentas com um potencial valioso na análise do comportamento do movimento das árvores. Em pesquisas anteriores utilizando ferramentas semelhantes foi avaliada a estabilidade sob ação dos ventos dos caules e raízes, mas com os acelerômetros uma gama maior de componentes das árvores, defeitos associados e formas de crescimentos poderão ser avaliados. Neste estudo acelerômetros triaxiais foram utilizados para avaliar o movimento de dezesseis bifurcados em árvores de avelãs, mostrando que os ramos bifurcados se movem em sincronia na sua extensão, no sentido de reduzir o risco de falha sob o aumento da carga do vento (SLATER; ENNOS, 2016).

Spatz e Theckes (2013) estudaram como o amortecimento da oscilação (movimento que os ramos e folhas fazem para diminuir a área da copa) em árvores é de importância essencial para que elas resistam à força dos ventos. Estes autores observaram que, na ocorrência de uma tempestade, a árvore vai se adaptando à força dos ventos. O amortecimento estrutural está associado a um movimento que é visível dos ramos em relação ao tronco. Tem-se alguns modos de amortecimento de oscilação em árvores: amortecimento viscoso, amortecimento aerodinâmico, amortecimento estrutural, amortecimento por interação com árvores vizinhas, amortecimento por interação solo e raiz.

Enus et al. (2020), em seu estudo da interação dos ventos sobre as árvores, mostram o desafio para obtenção do cálculo da dinâmica dos fluidos, isto porque as árvores nas suas copas e estruturas de galhos tridimensionais, vão se adaptando de forma dinâmica as variações e turbulências dos ventos. Com as tecnologias de câmeras infravermelhas, as imagens podem ser captadas mostrando as interações complexas, tridimensionais e em tempo real do vento com as árvores. No geral, com ventos de baixa velocidade, tem-se uma área maior da copa e menor movimento da árvore; já com ventos de maior velocidade, tem-se uma diminuição da área, suavização das bordas e maior oscilação da copa.

Para o melhoramento do modelo de risco, nos casos de quebra, de tombamento no solo ou ruptura de galho das árvores, necessita de uma melhor compreensão destas a resposta das rajadas de ventos prejudiciais. No entanto, os conhecimentos experimentais da resposta dinâmica das árvores aos ventos são limitados, pela viabilidade de experimentos em campo com registros em seu sistema de raízes e a área estrutural das mesmas, em conjunto com a tempestade de ventos. O entendimento do risco de ruptura é importante, tendo uma melhor resposta da raiz e copa as várias condições de ancoragem da árvore, sob ventos de tempestades. Sendo um modelo genérico, pode ser transferível para outras espécie de árvores, em que tenha disponível a arquitetura da raiz e copa (YANG; DÉFOSSEZ; DUPONT, 2020).

Florestas em diferentes partes do mundo têm sofrido, nos últimos anos, incêndios com consequências que vão além da destruição ou perda do ecossistema, levando a uma crescente preocupação da população. Com o desenvolvimento da IoT, soluções podem ser implementadas para uma detecção precoce de incêndios em áreas florestais, propiciando uma avaliação do risco destes e alertando com antecedência o fato à população, podendo reduzir incêndios causados por descuido dos usuários ou causados por acidentes. A utilização da tecnologia *Long Range* (LoRa), com sensores de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e CO₂, contribui para avaliar o risco ou presença de incêndio em florestas, cobrindo uma área circular de 4 km (SENDRA et al., 2020).

No levantamento bibliográfico da literatura de Gonçalves, Linhares e Yojo (2020), são apresentados e discutidos os parâmetros que afetam o cálculo do coeficiente de arrasto em árvores urbanas, e uma variável é a pressão exercida pelo vento gerando as forças de arrasto, e tem sido considerada esta força com mais frequência, a causa de ruptura de árvores. Nesta discussão fica claro a arquitetura complexa e elementos flexíveis como copa, caule e raízes de uma árvore, que são bem diferentes das estruturas rígidas da área civis. Seguindo a direção das análises estáticas e dinâmicas, tem-se um aprofundamento da discussão, sendo o vento uma variável dinâmica à resposta de uma carga nas árvores. Por fim a metodologia utilizada pelo autor na sua forma de análise e simplificações adotadas, pode tornar complexa o caminho para o cálculo e de como medir os valores com precisão nos experimentos, para obter o coeficiente de arrasto.

Em áreas urbanas, as mudanças climáticas podem causar impacto na estabilidade das árvores, associado com frequência a um maior risco com o crescimento da velocidade dos ventos e pela maior magnitude das condições climáticas. Em Cingapura, pode-se encontrar árvores crescendo em ruas, estradas, parques, distritos residenciais, comerciais e industriais. Parte destas áreas tem um alto índice demográfico, e a ruptura de uma árvore, pode representar perigo às pessoas ou propriedades. No momento, a avaliação da saúde das árvores é feita de modo subjetivo, pelo método visual, sendo que dois inspetores podem não ter a mesmo julgamento das condições das mesmas. Uma avaliação precoce e padronizada das árvores pode evitar a sua queda ou ruptura. A utilização da teoria da mecânica dos materiais, na descrição qualitativa e quantitativa, pode ajudar na compreensão e padronização da biomecânica das árvores, prevenindo os riscos (RAMOS-RIVERA et al., 2020).

Em toda a bacia do Mediterrâneo, incêndios florestais são um dos principais problemas ambientais. Seu estudo, controle e prevenção são essenciais para evitar que milhares de hectares sejam queimados, levando a perdas de recursos ambientais, econômicos e florestais. Tecnologias de redes de baixa potência e *Low-power WAN* (LPWAN), tem sido comum nas arquiteturas da IoT, promovendo interesse para a solução de monitoramento e prevenção de cenários de incêndios. Utilizando nós sensores na rede LoRa de baixo custo e algoritmo de avaliação das variáveis baseado na regra 30-30-30, sendo estas: a probabilidade de ignição com temperatura maior que 30 °C, a velocidade do vento maior que 30 km/h e a umidade relativa do ar menor que 30, e fazendo a coleta destes dados em tempo real, foi mostrada a capacidade de avaliar com proatividade o risco de incêndio, com a possibilidade de cobrir uma área de 1 km de raio na detecção de incêndio florestal (VEGA-RODRIGUEZ et al., 2019).

A instabilidade das árvores que ocorre durante tempestades e rajadas de ventos, vem gerando preocupação, com impacto amplo nas atividades urbanas. A queda de árvores por ventos fortes, podem causar lesões corporais graves, chegando, às vezes, a casos fatais, ou perda de imóveis residenciais e comerciais. Nas áreas rurais, estas perturbações não são exceção, podendo causar em florestas uma destruição em larga escala. Silapachote et al. (2019) analisam o espectro das cargas dinâmicas de ventos sobre árvores, utilizando dados coletados de acelerômetros MPU9250 em controladores ESP8266, ambos dispositivos de baixo

custo, podendo avaliar e estimar a estabilidade das árvores em resposta às forças dinâmicas dos ventos. A análise resultante auxilia a equipe de paisagismo e manutenção a verificar qual, quando e como podar as árvores, mantendo sua estabilidade.

Hoje, mais que no passado, o estresse induzido pelo clima compromete a estabilidade e expõem as árvores a risco de queda, levando sérios riscos a pessoas, objetos, estrutura e infraestrutura. Para evitar a queda ou ruptura de parte da árvore, o estudo contínuo dos fenômenos que relacionam eventos climáticos e árvore é crucial. O estudo de novas tecnologias que apõem pesquisa e monitoramento neste sentido, deve ser considerada, testada e implementada, trazendo vantagens econômicas, sociais e ambientais. Há vários estudos ao longo dos anos que investigam a relação vento-árvores, com abordagem teórica e experimental, e a utilização de instrumentação, como cronômetros, acelerômetros, transdutores de deslocamento, entre outros, que apresentam vantagens e desvantagens, dependendo da pesquisa e do pesquisador. A tecnologia *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) utilizada nesta pesquisa apresentou resultados promissores, com boa precisão nas medições e nos seus erros relativos, permitindo estudar a relação velocidade do vento com o movimento das árvores. Outro ponto de vantagem é seu baixo custo e a boa autonomia, sendo uma solução instrumental competitiva para fins semelhantes (MASCITELLI et al., 2019).

A fenologia das árvores florestais, que é o estudo do ciclo biológico da planta e sua relação com as condições ambientais, é uma resposta importante das plantas as mudanças climáticas. A documentação sistemática da fenologia em árvores individuais em grande área, muitas vezes se torna proibitiva, exigindo grandes esforços em trabalho e intensidade de recursos. A utilização de acelerômetros incorporado às árvores, que são pequenos dispositivos portáteis, pode superar este desafio de medir a fenologia, registrando o seu movimento em relação a força do vento. Em sua pesquisa Gougherty et al. (2018), verificam que as medidas de acelerômetros de alta resolução, podem ser utilizadas com precisão para quantificar a fenologia na primavera em árvores florestais, tendo um potencial prático pela sua portabilidade e baixo custo.

Grandes danos em partes ou no todo das árvores urbanas, podem ocorrer pela força extrema exercida pelas tempestades. Estes danos podem ser físicos, financeiros, sociais e ambientais, tornando-se uma preocupação tanto para os gestores públicos, quanto para a população. Na parte norte da Alemanha, durante a forte tempestade “Xavier”, foi utilizado um modelo tridimensional em microescala, para estudar como a força dos ventos interagem em árvores individuais levando a quebra do caule ou ao seu desenraizamento. Parâmetros que combinam a densidade foliar com a velocidade do vento se mostraram importantes, para estimar a força dos ventos. Neste estudo, a precisão dos diferentes dados de entrada demonstrou que o modelo é promissor e sua aplicação é confiável. Foi levantado que troncos de diâmetros maiores são mais resistentes a quebra e raízes com grande profundidade e boa ancoragem evitam o desenraizamento. Os experimentos mostram resultados encorajadores com as observações e descobertas da silvicultura, vista como uma boa perspectiva para aplicação futura em cidades. Isso permitiria mapear a velocidade dos ventos de uma região, com um a manutenção preventiva ou alertando a segurança pública sobre zonas perigosas a serem protegidas dos danos físicos ou a propriedade (GROSS, 2018).

Estudos dos movimentos induzidos pelos ventos na folhagem de árvores tem sido realizado há muito tempo, e é um fenômeno importante na complexa biologia das árvores. Os estudos, em geral, são separados na dinâmica das folhas em relação aos galhos e na dinâmica dos galhos. No estudo de Tadríst et al.(2018) (2018) foi verificado que há uma combinação dos movimentos nas folhas em relação aos galhos, que é afetada em baixa velocidade do vento e a combinação de galhos que sustentam folhas, que é afetado em alta velocidade. A compreensão do movimento induzido pelo vento nas árvores é de interesse em vários campos da ciência, como na agronomia na aplicação de pesticidas, na biologia para entender como as árvores extraem energia e na computação na montagem de cenas realistas (TADRIST et al., 2018).

Os estudos convencionais de Yuan, Norford e Ng (2017), que analisam as consequências da força do vento sobre árvores, focam na segurança pessoal ou perda patrimonial com relação a queda ou quebra de árvore. Neste estudo verificou-se que em área de alta densidade urbana, como a resistência ao vento nas árvores pode afetar a ventilação do ar natural no planejamento paisagístico.

Mudanças climáticas aumentam e agravam os eventos meteorológicos extremos, que afetam a frequência das tempestades de vento, que impactam nas estabilidades das árvores no ambiente urbano e na periferia. Isto tem gerado um aumento do interesse pelo desenvolvimento de modelos, que podem prever como a ancoragem das raízes influenciam na estabilidade das árvores. A ancoragem das raízes depende da morfologia e arquitetura destas, bem como a sua relação com o solo, estudo realizado por Giambastiani et al.(2017), que visaram avaliar um fator de segurança através de um modelo estático considerando a força no momento da ancoragem e tombamento.

Telhados verdes em prédio urbanos têm se tornado populares nos últimos anos, pois ajudam a reduzir a carga térmica do prédio. Plantar árvores, além de grama, é vantajoso, pois fornecem um local de lazer com sombreamento. No entanto, o risco de queda pela força dos ventos é maior nos telhados do que em solo, devido ao substrato mais fino. No estudo de Koizumi et al. (2016) a força do vento é mensurada de forma quantitativa para avaliar o risco de queda de árvores plantadas em telhados.

Danos causados pela força dos ventos em árvores e florestas urbanas têm seu impacto social e econômico, como perda de propriedades, mortes humanas e danos na infraestrutura da cidade. As árvores urbanas têm sido menos estudadas que as árvores florestais, com grande parte da pesquisa focada na gestão de risco, que auxiliam os arboriculturistas no seu manejo. Para minimizar os danos causados pelos ventos, vários fatores concorrem neste sentido, como manejo adequado às condições locais, escolhas de espécies, plantas ou sementes adequadas, aplicação de fertilizantes que não criem desequilíbrios nas plantas, entre outros (GARDINER; BERRY; MOULIA, 2016).

As florestas europeias podem ter danos importantes causados em suas árvores por tempestades, e isto ocorre mesmo em árvores com certa maturidade e com raízes profundas. É importante uma boa arquitetura e ancoragem do sistema radicular, em particular na rigidez flexural (resistência máxima ao dobramento de um material antes que ocorra fratura) em sua parte central, evitando assim o deslocamento do tronco e sua consequente falha (DANQUECHIN DORVAL; MEREDIEU; DANJON, 2016).

A cobertura de notícias dramáticas com imagens de árvores lançadas pelos ventos, trazem uma mensagem implícita na maioria das vezes que as chuvas e os

fortes ventos são a causa da queda das árvores. Contudo, as tempestades não são o único fator para a queda das árvores, como destaca o estudo de Moore (2014), que aponta que a característica e tamanho da copa tem influência sobre a força que os ventos exercem no tronco e no sistema de raízes, bem como as características do sistema radicular determina a sua falha. Outro ponto são os resultados de inspeção local, que sugerem poder haver outros fatores, como o manejo inadequado e crescimento em ambiente sob estresse, que influenciam na saúde das árvores envelhecidas. Já árvores que crescem em locais ideais, sem manejo invasivo, tendem a serem mais altas, ter um sistema radicular mais adequado, permanecendo saudáveis e vigorosas, lidando melhor com as pragas à medida que envelhecem e, em consequência, lidando melhor com as chuvas e tempestades (MOORE, 2014).

Podas parciais são com frequência aplicadas ou realizadas em florestas comerciais para o aumento do volume do caule. No entanto, isto cria abertura na floresta, com conseqüente aumento da velocidade do vento no local e risco de queda de árvores. A análise de dados de 18 árvores em pé e 18 arrancadas, mostrou que o crescimento radicular das raízes na sua forma e ângulo predispõem a tempestades. Isso significa que estas variáveis devem ser consideradas nas podas (KRAUSE et al., 2014).

Na legislação italiana, o guardião da árvore é identificado como responsável pelo monitoramento do fator de risco desta, com responsabilidade civil e criminal pelos danos que ela pode causar as pessoas ou bens. Ferramentas que avaliem a estabilidade das árvores é indispensável para preservar a segurança das pessoas e da propriedade. Métodos visuais de avaliação nem sempre permitem um estudo completo da saúde e estabilidade das árvores. Experimento de puxar controlado (*Pulling Test*) é uma ferramenta de análise e estimativa da estabilidade da placa radicular e sobre o efeito do vento crítico que causa a sua queda, com esta técnica há melhoria na avaliação da estabilidade das árvores (SANI et al., 2012).

O experimento de puxar (*Pulling Test*) foi utilizado em macieiras enxertadas para avaliação e estudo no modo de falha causado por golpes de vento. Foi verificado a quebra no porta-enxerto para as árvores jovens e o desenraizamento para árvores maduras. Como resultado dos experimentos verificou-se que o crescimento radial insuficiente, após alguns anos da enxertia, ocasionava a sua quebra, levando à necessidade de um apoio com poste para aumentar a resistência das árvores maduras (KOIZUMI et al., 2008).

b) Trabalhos relacionados e soluções existentes na revisão da literatura da Revisão 2

O paradigma da IoT combina tecnologias oriundas de diferentes abordagens. As tecnologias são mescladas para formar um sistema, fazendo com que o mundo real e o digital entrem em interação simbiótica. O alicerce da visão da IoT são os objetos inteligentes. Com a inteligência sendo colocada nos objetos do cotidiano, ele tem a capacidade de controlar, interagir e coletar informações do ambiente e também interconectar-se com o ambiente local e o externo para trocar dados (BORGIA, 2014). Com dispositivos, equipamentos e produtos inteligentes interconectados, IoT oferece novos modelos de negócios e serviços (MIORANDI et al., 2012).

A IoT é a combinação entre sensores, atuadores e dispositivos de rede em um ambiente de relacionamento único, e o compartilhamento de suas informações entre plataformas cria uma imagem operacional comum (GUBBI et al., 2013). A IoT permite a conexão entre objetos inteligentes ou entre estes e as pessoas, levando informações e ações a qualquer lugar, em qualquer hora e em qualquer mídia (SHAMMAR; ZAHARY, 2019).

Na estrutura da IoT, os dispositivos de identificação por radiofrequência (RFID) podem ser utilizados para gerenciar e proteger árvores, já tendo sido realizado experimentos em várias espécies, com dispositivos associados, tanto nas partes externas como internas (LUVISI; LORENZINI, 2014).

As cidades inteligentes buscam tecnologias para atender à população em suas necessidades e qualidade de vida, por meio de instalações modernas, utilizando tecnologia da informação e comunicação (TIC), bem como a IoT emergentes, incentivando a conversão de dados em informação sobre as áreas municipais, como coleta de lixo, saúde, educação, segurança, lazer, meio ambiente, entre outros. No estudo de Shah et al. (2021) há o levantamento de vários trabalhos em IoT voltados a melhoria e inovação na coleta de lixo em cidades, para prevenir doenças e infecções e garantir um ambiente saudável. Isto mostra a necessidade de integração de sensores e sistemas de comunicação, que levam à automação das lixeiras em suas operações essenciais, com a disponibilidade dos dados para análise e melhor tomada de decisão no futuro.

LoRa é uma tecnologia de comunicação de rede sem fio que pode fornecer conectividade de longo alcance com baixo consumo de energia, sendo uma solução

promissora nas aplicações em cidades inteligentes. Com sua operação nas bandas de rádio não licenciadas e facilidade de instalação, as redes baseadas em LoRa tem crescido. Porém, com o aumento dos dispositivos implantados, ocorre a queda de desempenho da rede com perda de mensagens, pela distorção e interferência das bandas não licenciadas. No entanto, isto pode ser melhorado com a configuração adequada dos parâmetros do rádio em cada nó (PREMSANKAR et al., 2020).

O estudo de Osório (2020) mostra que as tecnologias LPWAN estão exercendo um papel importante no ambiente de IoT, devido ao baixo custo de implementação, longo alcance, podendo atingir a distância de quilômetros, baixo consumo, o uso de frequência livre, entre outras características. Estas tecnologias de rede do tipo *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) podem atingir taxas de transmissão de dados de até 5,5 kb/s, por vários quilômetros, e está se tornando conveniente em aplicações de rastreamento ambiental, monitoramento de agricultura de precisão e cidades inteligentes, entre outros.

Sistemas de monitoramento baseado em IoT podem ajudar e oferecer melhores soluções para a indústria de petróleo e gás, reduzindo possíveis falhas e tempo de inatividade da produção, com aquisição de informações de forma mais rápida e eficiente. Soluções baseadas na tecnologia LoRaWAN para detecção de vazamentos em tempo real em experimentos de protótipos, renderam mais de 90% de precisão na detecção e superaram vários desafios dos pesquisadores anteriores, como cobertura e alcance da comunicação, custo, velocidade de detecção na solução dos problemas, vida útil da bateria e monitoramento em tempo real (BAJI; SUNDARAVADIVEL, 2019).

O paradigma da IoT e as comunicações sem fio são tecnologias chave para a transformação das cidades em cidades inteligentes, fornecendo a infraestrutura necessária para o melhoramento dos serviços ao cidadão. Candia et al. (2019) apresentam um projeto piloto para iluminação pública na cidade de La Plata na Argentina, baseado na tecnologia LoRaWAN, que pode servir de base na implementação de outras soluções em cidades inteligentes. A solução completa foi a criação de uma luminária inteligente com suas funcionalidades expandidas com a incorporação de sensor para o monitoramento da qualidade do ar.

No seu artigo, Jesi, Benetti e Mazzini (2019) implementaram uma infraestrutura de LoRaWAN, em um modelo de colaboração público-privada, para o desenvolvimento da TIC na área da saúde. Nessa infraestrutura, os sensores de

monitoramento do cidadão são disponibilizados e gerenciados em rede até a nuvem, para oferecer soluções melhores e inovadoras. Também mostram que a falta de padronização e interoperabilidade são, ainda, desafios para a implementação da IoT, mesmo quando da utilização de uma única tecnologia como a LoRaWAN.

Kam et al. (2019) realizaram um estudo para viabilizar a transformação das torres de telecomunicações tradicionais, em inteligentes na cidade de Metz, na França, em uma estrutura de rede, com o desenvolvimento de mais serviços, permitindo uma melhor supervisão dessas instalações, de seus equipamentos e energia consumida internamente, bem como dos dados nos edifícios circundantes. Foram realizados experimentos nas condições reais destas torres, verificando as interferências das diversas frequências de operação destas. Na definição das tecnologias para equipar a torre, foi considerado o protocolo LoRaWAN (rede de ampla área de longo alcance), que propiciou a coleta dos dados da IoT, tanto dela como dos edifícios circundantes. Com um único *gateway* instalado em seu topo, permitiu uma grande rede LoRaWAN, com cobertura de até 32 km.

A IoT favoreceu o desenvolvimento de aplicativos e serviços em casas e cidades inteligentes. A implementação em campo de um sistema de iluminação pública em postes solares em larga escala na cidade de Thies, no Senegal, permitiu o gerenciamento dinâmico da iluminação. A implantação foi baseada na tecnologia LoRa, que propiciou coleta de informações remotas e oportunas sobre nível de consumo de bateria, falha de equipamento e acidentes naturais ou não, garantindo diagnóstico proativo, confiável e em tempo real de possíveis falhas. Os resultados do experimento mostraram uma grande perda de pacotes devido a colisão de mensagens com a implementação de apenas um *gateway*, e que com os acréscimos de outros, tem-se a melhoria na entrega dos pacotes e consumo de energia (SARR; GUEYE; SARR, 2019).

A rápida urbanização nas últimas décadas no mundo acrescentou os desafios da vida urbana. A IoT, em um contexto de cidade inteligente, tem o papel de integrar as tecnologias TIC aos vários elementos da cidade, para fornecer um guia ao planejamento, desenvolvimento e gestão das áreas urbanas. No estudo de Ikpehai, Adebisi e Anoh (2019) foram analisados os efeitos das características do tráfego de dados nos dispositivos de IoT e o consumo de energia, em duas redes LPWAN, sendo uma LoRaWAN e a outra Sigfox (tecnologia de banda ultra estreita de comunicação com infraestrutura parecida com as redes de operadoras de telefonia

celular), em uma topologia estrela. Os resultados mostraram que tanto em aplicações de baixa carga de dados, como iluminação, como de alta carga, como parada de ônibus, no qual as mensagens diárias passam de um para 140, a vida útil dos dispositivos em LoRaWAN é pelo menos duas vezes dos dispositivos Sigfox, sendo este ideal para aplicações com tamanho de carga de dados muito baixo e poucas mensagens (menor que cinco) por dia (IKPEHAI; ADEBISI; ANOH, 2019).

Em todo o mundo se observa a transformação das cidades tradicionais em inteligentes, oferecendo ferramentas para lidar com problemas ambientais, como a poluição do ar. O efeito da poluição do ar não se restringe as populações das cidades, mas a toda atmosfera e economia global. O desenvolvimento de sistema para o monitoramento e controle da poluição do ar em cidades inteligentes, que seja escalável e econômico é imperativo. No estudo de Thu et al. (2019) foi apresentado um sistema escalável com sensores de baixo custo e comunicação de longo alcance, com tecnologia baseada na rede LoRa, servindo como uma espinha dorsal das comunicações necessárias. Os sensores coletam quatro variáveis relacionadas ao ar local, sendo elas a temperatura, umidade, poeira e dióxido de carbono, propondo um sistema no qual o dado do sensor é encaminhado ao usuário final e utilizando aprendizado de máquina, para a previsão de ações proativas que possam ser tomadas para minimizar os efeitos da poluição na cidade de Yangon, em Mianmar (THU et al., 2019).

O conceito de IoT, que abrange a conexão de vários objetos da vida cotidiana ao redor com a Internet, está em seu íntimo ligado as questões de cidade inteligente, na medida que proporciona um aumento da qualidade de vida, ajuda a proteger o meio ambiente e contribui para a redução do consumo de recursos. A arquitetura de sensores em rede é específica deste tipo de cidade, e envolve a integração de um grande número de sensores em uma larga área geográfica. Lavric (2019), em seu estudo de escalabilidade da tecnologia LoRa, obteve um resultado máximo de 1.500 sensores com alto desempenho comunicando em um mesmo canal, sendo necessário para isto, o agendamento e o planejamento da rede com o máximo cuidado possível.

Yu, Zhu e Fan (2017), em seu estudo para mostrar a viabilidade, escalabilidade e confiabilidade do protocolo LoRaWAN em aplicações de monitoramento em grandes cidades, desenvolvem um simulador baseado no software Matlab para oferecer uma abordagem em software para avaliação de

desempenho. Assim, uma rede LoRaWAN foi implementada para a área de Londres, com as simulações realistas dos requisitos de qualidade do ar e monitoramento de congestionamento, mostrando o potencial desta rede, como uma solução com dispositivo de longo alcance e baixo consumo de energia para cidades inteligentes.

A IoT ajuda na Gestão Inteligente de Lixo na cidade, com a interconexão dos vários componentes deste sistema de gestão, como contêineres de lixo, sensores, caminhões, serviços de nuvem, entre outros. Em estudo piloto de São Petersburgo, baseado no protocolo LoRaWAN, foi mostrado que esta implementação pode melhorar a qualidade do serviço e a experiência do usuário (KORTUEM et al., 2010).

c) Trabalhos relacionados e soluções existentes na revisão da literatura para a Gestão de Dados

O valor dos dados de pesquisa tem sido cada vez mais reconhecido pelos que patrocinam as pesquisas, sejam agentes governamentais ou privados. Como resultado, a maioria dos fundos de pesquisa apresentam diretrizes para o plano de gestão de dados, que descreve como estes serão manipulados e tratados, e o que será feito destes ao término do mesmo. Estes planos apresentam, com frequência, todas as etapas do ciclo da vida de dados: geração, coleta, processamento, garantia da qualidade, armazenamento, documentação, preservação e compartilhamento (MICHENER, 2015). A FAPESP reconhece o plano de gestão de dados como parte essencial de uma pesquisa (FAPESP, 2017).

A gestão de dados é uma exigência da FAPESP, como uma parte essencial das boas práticas de pesquisa.

2.5 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS NAS PESQUISAS

Coutts (1983), em suas pesquisas, utilizou a técnica de *pulling test*, com os seguintes sensores e dispositivos de medição: (i) microfones, que colocados em solo, permitem gravar as amplitudes do som, que eram proporcionais ao tamanho da raiz em sua ruptura; (ii) anemômetro de torre com hélices para medir a velocidade do vento; e (iii) potenciômetro de polia para medir a deflexão da haste, com taxa de

amostragem de 10 Hz. Mayer (1987) utilizou o mesmo tipo de instrumentação para medir as oscilações induzidas pelas árvores, responsáveis por sua ruptura,

Com a utilização de *strain gauge* e um sistema de aquisição de dados (*data logger*), Moore et al. (2005) puderam medir a resposta dinâmica das hastes e galhos das árvores.

Koizumi et al. (2010) fizeram a avaliação do coeficiente de arrasto do álamo, com um anemômetro ultrassônico para medir a velocidade e direção do vento, com sensores de deflexão com orientação na direção norte - sul e leste - oeste, e registraram em um *data logger*, com intervalos de 10 Hz, todos os dados simultaneamente.

Luvusi e Lorenzini (2014) mostraram como a tecnologia RFID pode se tornar um pré-requisito da aplicação de IoT, e ser utilizadas em aplicações de etiquetagem para gestão do inventário arbóreo urbano, e sua integração com outras tecnologias.

Utilizando acelerômetros triaxiais, um *data logger* com memória de 8 GB e duas células de bateria, com autonomia de registro de 320 dias com dados coletados na frequência de 10 Hz, Van Emmerik et al. (2017) mostraram que o espectro de frequência da oscilação das árvores está relacionado à massa da árvore.

A pesquisa de Sendra et al. (2020) se baseia em arquitetura com tecnologia LoRa, utilizando o nó LoRa como dispositivo para estimar o risco de incêndio em ambientes florestais, baseado na regra 30-30-30, que reúne dados sobre temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e chuvas nos últimos 30 dias. Recebendo os dados do nó foi utilizado gateways LoRaWAN. Estes são armazenados em Banco de Dados (BD), processados em alguns servidores de aplicação e apresentados para o usuário em uma interface Web.

Com o passar do tempo, as tecnologias foram evoluindo, passando do armazenamento de dados em fita magnética até as mais recentes, na qual o BD é utilizado na Web, sendo estes alimentados por dispositivos de IoT, tornando o monitoramento *online*, podendo ter ações proativas na manutenção de árvores.

2.6 LACUNAS OBSERVADAS

A principal lacuna observada nas pesquisas levantadas é que poucos trabalhos (aproximadamente 1,5% dos documentos) utilizaram tecnologias IoT como ferramentas para ações preventivas ou corretivas em relação aos impactos de ventos e tempestades em árvores e florestas, identificando-se que o foco no emprego nas cidades para a IoT está em outros aspectos, como na coleta de lixo, controle de qualidade do ar e da água, entre outras atividades. Isso pode prevenir ou reduzir os danos relacionados a essas áreas. Além disso, poucos trabalhos relacionados à queda de árvores no ambiente urbano foram encontrados (aproximadamente 3,5%,) já que a maior parte se encontra relacionada a florestas cultivadas. Por fim, constatou-se que a maioria dos artigos enfocavam o estudo de árvores coníferas, predominantes no hemisfério norte, sendo que pelo menos 85 % dos documentos vieram de países deste hemisfério.

Assim, três lacunas foram encontradas:

- a) Falta de estudos considerando árvores e florestas típicas do hemisfério sul;
- b) Poucos estudos que utilizam a IoT para monitorar árvores e florestas.
- c) Poucos estudos que usem monitoramento de árvores e florestas urbanas em cidades inteligentes.

2.7 PESQUISA DO TEMA AO REDOR DO MUNDO

Nesta seção tem-se uma breve apresentação das pesquisas no cenário mundial e nacional.

2.7.1 Cenário mundial

A quantidade de pesquisas com árvores observadas no cenário mundial, mostra uma preocupação, em boa parte dos países, com relação a sua saúde das árvores, envolvendo a manutenção, estabilidade e entendimento de suas estruturas, tanto no meio urbano como no rural.

As pesquisas exploram diversos pontos da árvore, como: (i) o levantamento matemático da estabilidade das árvores em particular sobre a ancoragem das raízes (COUTTS, 1983); (ii) a dinâmica na inclinação da árvore devido a uma rajada de vento (ENGLAND, 2000); (iii) o valor das florestas urbanas na mitigação da poluição (BRACK, 2002); (iv) a estimativa da força do vento com relação ao coeficiente de arrasto e a haste da seção transversal irregular da árvore no seu ponto de ruptura (KOIZUMI; HIRAI, 2006; KOIZUMI et al., 2010, 2016); (v) os serviços das florestas e ecossistemas urbanos e como isto impacta nos ciclos de água, calor e poluição urbana (LIVESLEY; MCPHERSON; CALFAPIETRA, 2016); (vi) a rede *Long Range* (LoRa) para detecção de incêndio florestal (VEGA-RODRIGUEZ et al., 2019; SENDRA et al., 2020); e (vii) o monitoramento com a internet das coisas (IoT) dos serviços dos ecossistemas de árvores urbanas (MATASOV et al., 2020).

Os cenários apresentados nessas pesquisas, ao longo do tempo, utilizaram, sempre que possível, as melhores tecnologias da época para obter seus resultados. Na atualidade a tecnologia de IoT é uma das que apresenta maior potencial de utilização.

2.7.2 Cenário brasileiro

Para o cenário brasileiro o levantamento da literatura mostra que o país publicou próximo de 4% dos documentos.

As pesquisas brasileiras consideram por exemplo: (i) biodeterioração, anatomia do lenho e análise de queda de árvores de tipuana (BRAZOLIN, 2009); (ii) levantamento dos benefícios das árvores na cidade de São Paulo (BUCKERIDGE,

2015); (iii) levantamento do ciclo da água, carbono e nitrogênio em árvores, utilizando acelerômetros (VAN EMMERIK et al., 2017); (iv) utilização de sensores em IoT, para o monitoramento de árvore e fornecimento de indicadores de chance de queda (CARVALHO JUNIOR; HARIKI; GOLDMAN, 2018); e (v) levantamento de coeficiente de arrasto em árvores (GONÇALVES; LINHARES; YOJO, 2020).

Excetuando-se os Estados Unidos, nota-se que nesta área de pesquisa o Brasil está tendo certa relevância, seguindo a tendência mundial.

2.8 MODELAGEM MATEMÁTICA DE ÁRVORES

Os trabalhos considerados na concepção da modelagem foram: (i) para os tipos de ruptura em árvores (MAYER, 1987); (ii) para componentes da árvore (NICOLL et al., 1995); (iii) para componentes resistentes da raiz e tombamento (ENGLAND, 2000); (iv) para o mecanismo de ruptura da raiz, deslocamento e momento de tombamento (COUTTS, 1983); (v) para estrutura dinâmica (CLOUGH R. W., 2003); (vi) para o esquema de obtenção de informações da árvore (KOIZUMI et al., 2010), e (vii) modelagem e aplicativo ARBIO desenvolvidos como ferramenta para a gestão de floresta urbana (IPT, 2017b; GONÇALVES; LINHARES; YOJO, 2020).

A modelagem matemática utilizada na presente pesquisa foi idealizada pela equipe técnica do IPT, que é similar à modelagem por eles desenvolvida no aplicativo ARBIO, que é uma ferramenta desenvolvida no IPT para a gestão de floresta urbana (IPT, 2017b). Essa escolha foi devido à disponibilidade de informações detalhadas relacionadas sobre diversas variáveis obtidas por um sistema de aquisição de dados, como: frequência de vibração, alongamentos, inclinações, deslocamentos e velocidade do vento. As formulações foram obtidas ajustando-se as necessidades específicas de esforços e deformações em árvores, baseadas na teoria da mecânica das estruturas.

A modelagem matemática consiste em seis etapas, apresentadas a seguir:

a) Obtenção do módulo de elasticidade do fuste

Utilizando-se equações da dinâmica das estruturas (CLOUGH R. W., 2003), pode-se obter o módulo de elasticidade (Equação (1)):

$$E = \bar{m}L^4 \left(\frac{33}{140} + \frac{M_{\text{copa}}}{\bar{m}L} \right) \frac{\omega^2}{2I} \quad (1)$$

onde

E - Módulo de elasticidade em (MPa) (incógnita);

\bar{m} - Massa por unidade de comprimento (kg/m) (variável) (Figura 4).

O valor da massa por unidade de comprimento na árvore é obtido na Equação (2), que deve ser utilizada supondo-se: o volume de **1 m³** de tronco multiplicado pela densidade da árvore (ρ) que é da ordem de **1100 kg/m³**. O diâmetro (d), em m pode ser medido a **1,3 m** de altura (Figura 4):

$$\bar{m} = \rho * 1 * \pi d^2 / 4 \quad (2)$$

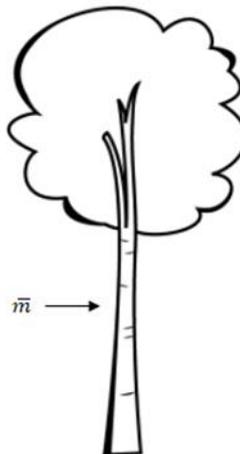


Figura 4 - Ponto onde medir o diâmetro da árvore

Fonte: autor.

O momento de inércia é dado por **I** (variável), calculada pela Equação (3):

$$I = \pi d^4 / 64 \quad (3)$$

onde

L é a altura da árvore (variável) (Figura 5).

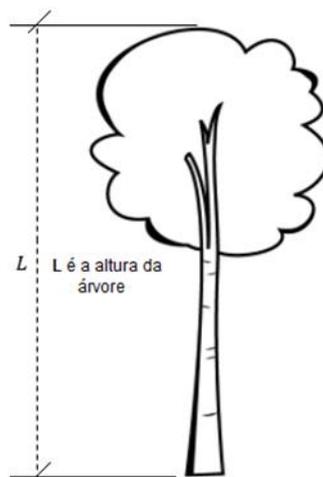


Figura 5 - Ponto onde medir a altura da árvore

Fonte: autor.

L_V - Comprimento do tronco (m) no ponto de aplicação da força de vento na copa, mostrada na (Figura 6). Este ponto é o centro de gravidade da copa, que é inferior à altura da árvore (L) (variável).

M_{copa} - Massa da copa (kg) - a massa da copa varia entre 15% e 20% da massa do tronco (variável), (Figura 7).

ω - Velocidade angular do fuste (rad/s) é o primeiro modo de vibração, medido por sensor inercial e sistema de aquisição (variável de campo), mostrado na (Figura 8).

I - Momento de inércia na Equação (4) na direção do vento (m^4) (variável).

Na Equação (4) deve-se usar o diâmetro do tronco (d).

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (4)$$

Com a avaliação do módulo de elasticidade e deslocamento calcula-se a força devido ao vento (F) (Equação (5)) (incógnita):

$$F = \frac{3 * EI * \delta}{L^3} \quad (5)$$

onde

δ - Flecha (m), - é medida no centro de aplicação da força de vento com o sensor e sistema de aquisição (variável).

Este valor é medido com um sensor de deslocamento, quando da aplicação da força na árvore.

Este deslocamento precisará ser corrigido para o centro da copa, bem como o valor de L . Como o deslocamento não vai ser medido em situação de vento, a força de vento será calculada em função do momento de tombamento versus o ângulo de inclinação da raiz.

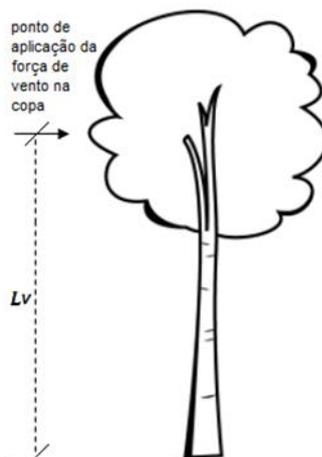


Figura 6 - Ponto onde aplicar a força do vento na copa
Fonte: autor.



Figura 7 - Ponto onde medir a massa da copa da árvore
Fonte: autor.

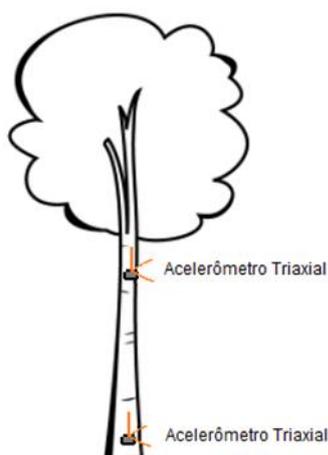


Figura 8 - Pontos onde instalar os acelerômetros na árvore
Fonte: autor.

b) Momento de tombamento (incógnita)

O momento de tombamento devido ao vento é determinado pela Equação (6):

$$M = E\varepsilon W \quad (6)$$

onde

$\varepsilon = \frac{u}{l}$ – é a deformação linear da fibra externa do tronco obtido com extensômetro;

u - é o alongamento da fibra externa obtido com extensômetro e sistema de aquisição (variável);

l - é o comprimento do *strain gauge* em milímetros (a princípio será de 200 mm) (constante).

$W = \frac{\pi d^3}{32}$ - Módulo resistente da seção circular (m³) (variável).

c) Força de tombamento (incógnita)

A força que produz o momento de tombamento é dada pela Equação (7):

$$F = \frac{M}{L} = \frac{E\pi d^3 \varepsilon}{32L} \quad (7)$$

Esta Equação deve resultar o mesmo valor da Equação (5), a menos da imprecisão das informações obtidas.

d) Força de vento (incógnita)

A força produzida pelo vento é dada pelas Equações (8) e (9):

$$F_{\text{vento}} = q * C_d * A_{\text{copa}} = \frac{\rho_{\text{ar}} * V_{\text{vento}}^2 * C_d * A_{\text{copa}}}{2} \quad (8)$$

$$q = \frac{\rho_{\text{ar}} * V_{\text{vento}}^2}{2} \quad (9)$$

onde

C_d - Coeficiente de arrasto, que com frequência se obtém em túneis de vento (incógnita);

V_{vento} - Velocidade do vento (m/s) medido no anemômetro e no sistema de aquisição (variável de campo);

A_{copa} - Área projetada da copa na direção do vento (m²) (variável), mostrada na Figura 9;

ρ_{ar} - Densidade do ar (kg/m³) em torno de 1,28 (constante).

A_{copa} – Tem-se várias formas de medir-se a copa. A forma mais prática é usar uma baliza de 2 m ou 3 m junto à árvore na vertical e tirar uma foto com o eixo principal da lente da câmera na horizontal.



Figura 9 - Ponto onde medir a área da copa da árvore
Fonte: autor.

e) Determinação do coeficiente de arrasto (incógnita)

O coeficiente de arrasto pode ser obtido igualando-se as equações (7) e (8) e (9), resultando na Equação (10):

$$C_d = \frac{E * \pi d^3 * \varepsilon}{32 * L * q * A_{copa}} \quad (10)$$

f) Resistência da raiz

A resistência no momento de tombamento com a inclinação da raiz é função da inclinação da raiz. O objetivo é determinar um parâmetro de resistência associado ao ângulo de inclinação crítico, dado pela Equação (11):

$$M = E\varepsilon W = M(\text{função de } \theta) \quad (11)$$

onde

θ - Inclinação da raiz registrado no sistema de aquisição (variável de campo).

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a revisão da literatura, mostrando as suas diversas etapas, bem como a revisão bibliográfica. Também apresentou a evolução das tecnologias utilizadas no passar do tempo, as lacunas de pesquisa encontradas e como estão atualmente as pesquisas ao redor do mundo na área de interesse do presente trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método científico que foi utilizado na presente pesquisa prevê, que após a realização do levantamento bibliográfico com análise dos documentos, sejam realizados experimentos e analisados os dados que ajudam a explicar a ocorrência de fenômenos (GIL, 2002; WAZLAWICK, 2014).

3.1 METODOLOGIA:

Após o levantamento e análise da literatura associada ao presente projeto de pesquisa, foram propostas as seguintes etapas para a sua realização:

- 1ª Etapa** - Concepção de um sistema de aquisição de dados denominado Sistema de Monitoramento de Árvores (SMA), para possibilitar a realização de experimentos;
- 2ª Etapa** - Levantamento dos requisitos funcionais e não-funcionais relacionados ao SMA para possibilitar a previsão de quedas de árvores;
- 3ª Etapa** - Acompanhamento e apoio dos experimentos em campo com a finalidade de levantamento de dados, para análise e avaliação da modelagem matemática elaborada pelo IPT, e parte dos requisitos funcionais, das etapas anteriores.

Nestes experimentos se destinam a avaliar a relação da velocidade do vento em árvores com a sua queda, envolvendo grandezas como coeficientes de arrasto (forças aerodinâmicas), vibração, deslocamento, deformação do fuste, e inclinação da raiz, de modo a parametrizar as condições que levem à sua ruptura.

- 4ª Etapa** - Realização de testes para validação dos protótipos e de experimentos em campo do SMA no paradigma da IoT, para a previsão de queda de árvores. Levou-se em consideração os requisitos funcionais e não funcionais, o ciclo de vida dos dados mostrado na Figura 10, e utilização do método de engenharia (prototipagem), conforme mostrado na Figura 11. A Figura 10 destaca a obtenção dos dados dentro do escopo da pesquisa, bem a disponibilização destes para a realização de novas pesquisas.

5ª Etapa - Avaliação dos resultados de todos os testes e experimentos.

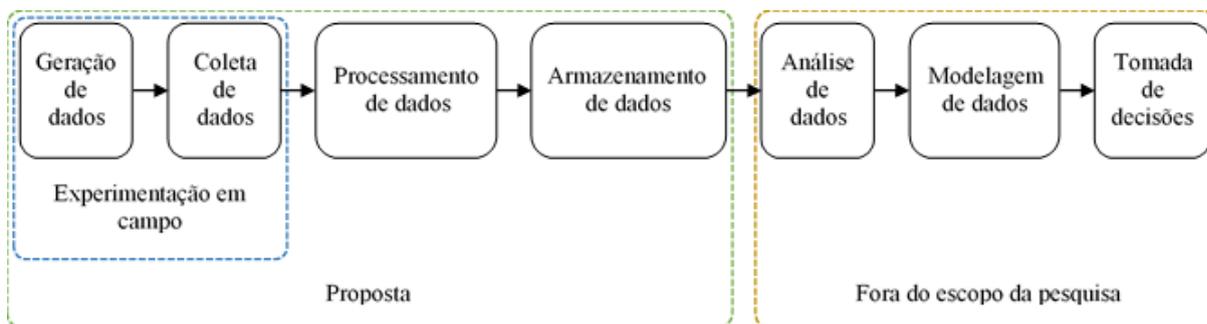


Figura 10 - Ciclo de vida dos dados e etapas abordadas pela pesquisa

Fonte: adaptado de Ball (2012).

Os passos utilizados na prototipagem, como mostrados na Figura 11 foram:

- 1º Definir o problema.
- 2º Fazer a pesquisa da área (revisão da literatura).
- 3º Especificar os requisitos (funcional e não funcional).
- 4º Pensar, avaliar e escolher a melhor solução (hardware e software).
- 5º Desenvolver e criar protótipo da solução (implementação do 4º passo).
- 6º Testar solução (testar protótipo).
 - i) Se o protótipo atender os requisitos, os resultados serão apresentados (7º passo).
 - ii) Caso o protótipo não atenda o requisito, retorna-se para o 4º, 5º e 6º passos.
- 7º Apresentar os resultados (finalizar o processo).

3.2 GESTÃO DE DADOS.

Após a finalização da pesquisa os dados gerados serão depositados no repositório da USP de gestão de dados, para poderem ser utilizados por outros pesquisadores. Serão depositados os arquivos dos dados de experimentos e o código dos programas desenvolvidos.

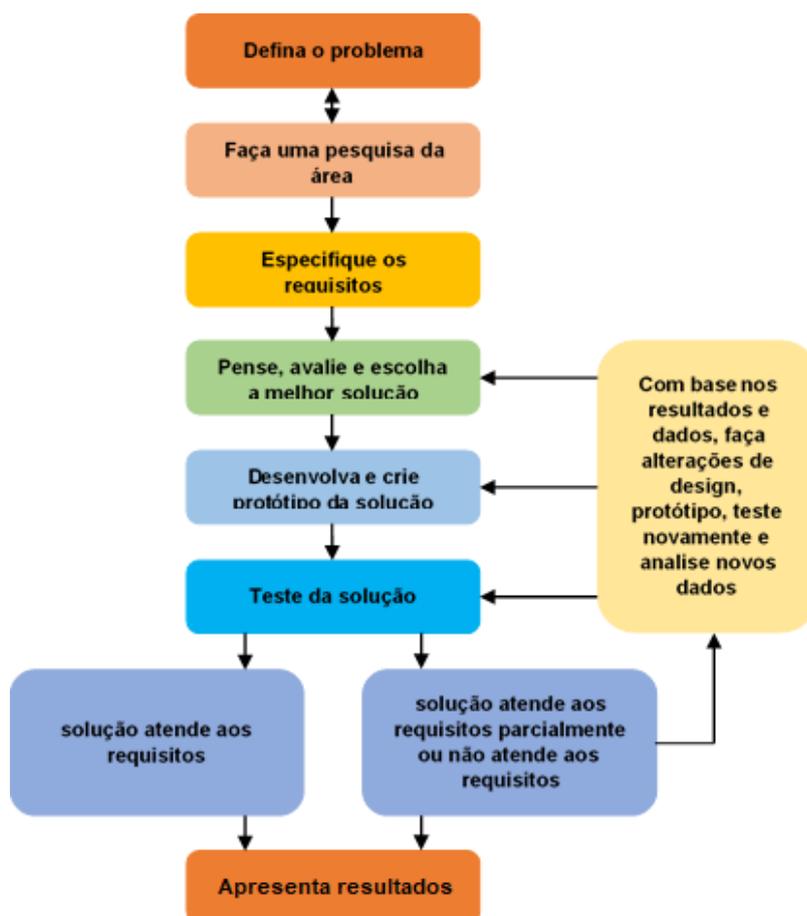


Figura 11 - Método de Engenharia - Prototipagem
 Fonte: adaptado de Sciencebuddies.org (2021).

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou as etapas de metodologia empregada, mostrou como foi abordado o ciclo de vida dos dados nessa pesquisa, as etapas utilizadas no método de prototipagem e como será a gestão de dados desta pesquisa.

4 CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ÁRVORE (SMA)

Nesta seção apresenta-se a concepção do SMA. Nela consta o levantamento dos requisitos funcionais e não funcionais, a concepção de arquitetura do SMA destinado a atender aos experimentos da modelagem matemática.

4.1 LEVANTAMENTO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS E NÃO FUNCIONAIS

4.1.1 Requisitos funcionais

Com base nos experimentos de Koizumi et al. (2010), de Slater e Ennos (2016), de Argus-Electronic (2021) e de (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022), o SMA deverá ser capaz de medir, armazenar e transmitir as seguintes grandezas:

1. **Aceleração**, na faixa de 0 a 2 g, com acurácia $\pm 0,01$ g.
2. **Deslocamento horizontal**, na faixa de 0 mm a 500 mm de deslocamento, com acurácia com ± 1 mm.
3. **Deformação mecânica**, na faixa de 0 a 10.000 micro strain, com acurácia de ± 50 micro strain.
4. **Inclinação biaxial**, na faixa de 0 a 10° , com acurácia de $\pm 0,01^\circ$.
5. **Velocidade do vento**, na faixa de 1,0 a 40,0 m/s, com acurácia de $\pm 0,1$ m/s.
6. **Direção do vento**, na faixa de 0° a 360° , com acurácia de $\pm 1^\circ$.
7. **Alarmes sobre os dados coletados**: definir alarmes para a sinalização de eventos relevantes, de forma a garantir que os dados coletados sejam transferidos para armazenamento na nuvem, ficando disponíveis para análise.

Foram selecionados sensores disponíveis no mercado que atenderam estas características: (i) acelerômetro triaxial, para medir a vibração da árvore; (ii) sensor de deslocamento, para medir o afastamento da árvore de um ponto de referência a outro; (iii) extensômetro, para medir o quanto as fibras da árvore se estendem ou se

contraem; (iv) inclinômetro biaxial, para medir, indicar a inclinação da árvore; (v) anemômetro, para medir, indicar a velocidade do vento incidente na árvore; e (vi) anemoscópio, para medir a direção do vento incidente na árvore. Todos os sensores foram conectados a um *data logger*, para a coleta e armazenamento dos dados, com seus respectivos instantes de ocorrência (*timestamp*) durante um período determinado, para realização de cada experimento.

As especificações dos sensores e do *data logger* encontram-se apresentados no Apêndice B.

4.1.2 Requisitos não funcionais

Os requisitos não funcionais do SMA são:

1. **Disponibilidade:** utilizar energia de alimentação de reserva que garanta que a coleta de dados não seja interrompida na falta de energia da rede elétrica.
2. **Facilidade de uso:** utilizar aplicativos de fácil interação com o usuário.
3. **Segurança dos dados coletados:** utilizar criptografia dos dados coletados e garantia de sua manipulação, apenas por usuário autorizado.
4. **Escalabilidade:** permitir que o sistema que seja capaz de aumentar ou diminuir a quantidade de sensores utilizados nos experimentos.
5. **Manutenção:** é desejável que o SMA seja de fácil manutenção, para não prejudicar a programação e oportunidades de realização de experimentos.
6. **Entrega de dados de ponta a ponta:** garantia da entrega de dados consistentes, da coleta até o armazenamento na nuvem.
7. **Armazenamento flexível dos dados:** permitir que os dados sejam coletados com a periodicidade desejada a cada experimento.

4.2 CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para atender o SMA, o foco desta pesquisa, foi proposto um sistema com todos os caminhos percorridos pelos dados, desde sua coleta em campo até o seu armazenamento na nuvem. E como complemento desta pesquisa, foi apresentado um sistema que atende a modelagem matemática, na qual os dados coletados dos diversos instrumentos instalados na árvore alimentam esse modelo.

4.2.1 Arquitetura para o SMA

A concepção da arquitetura do SMA para obter dados sobre a saúde das árvores e encaminhá-los à nuvem foi baseada no artigo de Carvalho Junior, Hariki e Goldman (2018). Nesse artigo os autores utilizaram sistemas de código aberto para instrumentar árvores e avaliar sua saúde. O artigo de Veja-Rodriguez et al. (2019) propõe uma rede de comunicação baseada na tecnologia LoRa, de baixo custo, para detectar incêndios florestais, e o artigo de Sendra et al.(2020) propõe uma rede LoRaWAN para monitorar e prevenir incêndios em áreas rurais.

Na concepção do SMA foram utilizados: sensores, para a obtenção de dados das grandezas de interesse, recursos para coletar, processar e transmitir dados, e plataforma em nuvem para armazenar e permitir a análise os dados (descritos no Apêndice B, C e D), como representado na Figura 12 e na Figura 13.

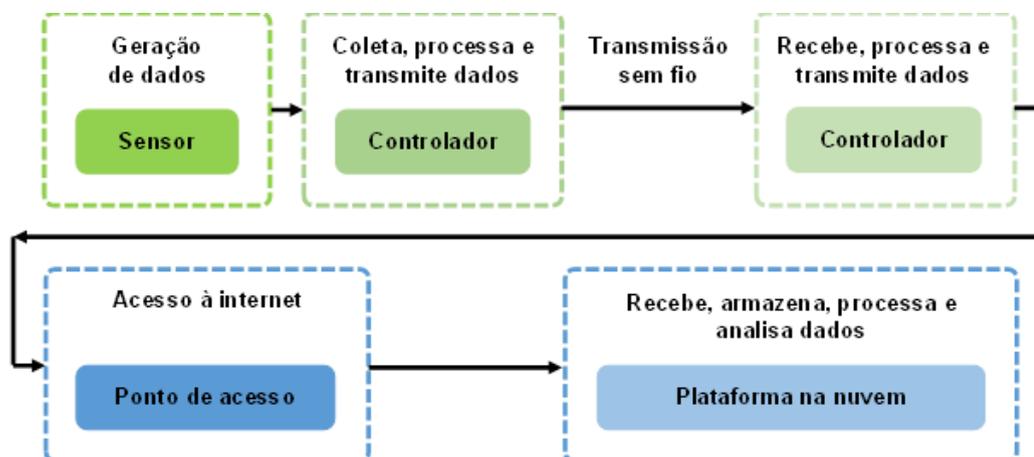


Figura 12 - Diagrama da arquitetura do SMA
Fonte: autor.

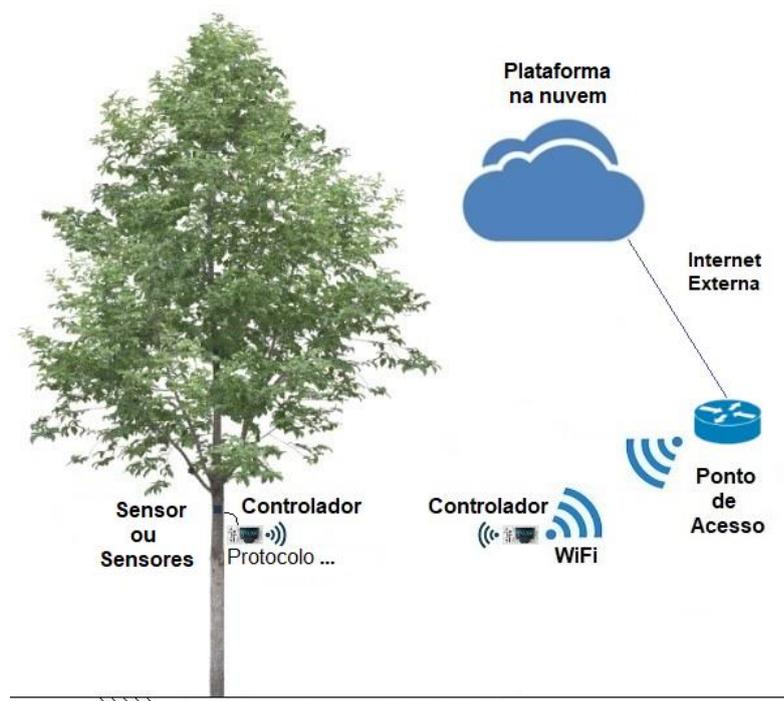


Figura 13 - Arquitetura para o SMA

Fonte: autor.

4.2.2 Sistema para aquisição de dados para atender a modelagem matemática

A concepção de um sistema para obter dados para alimentar o modelo matemático de comportamento das árvores foi baseada no artigo de Koizumi et al. (2010), que utiliza experimentos em campo, para avaliação do coeficiente de arrasto, e no artigo de Slater e Ennos (2016), que utiliza acelerômetros triaxiais, para avaliar o comportamento do movimento dos galhos na bifurcação em aveleira, sob a ação dinâmica dos ventos e na instrumentação da empresa Argus Electronic gmgh (2021), que faz experimento de carga em árvores para avaliação de risco de queda.

Para atender esta arquitetura foram utilizados os seguintes sensores: acelerômetro triaxial, inclinômetro, extensômetro, sensor de deslocamento horizontal, anemômetro e anemoscópio. Para coleta e armazenamento dos dados coletados foi utilizado um *data logger* (descrito no Apêndice B), como representado na Figura 14 e na Figura 15.

Esse sistema foi concebido para ser utilizado em testes isolados, realizados nas instalações do IPT, próximas aos laboratórios de apoio. Como decorrência

desses testes, o SMA foi concebido no sentido de se dispor de um dispositivo compacto, autônomo e com recursos para a transferência de dados, que pudesse ser instalado massivamente em árvores de uma cidade, no sentido de se obter dados de árvores com potencial de queda, buscando evitar que estas ocorram.

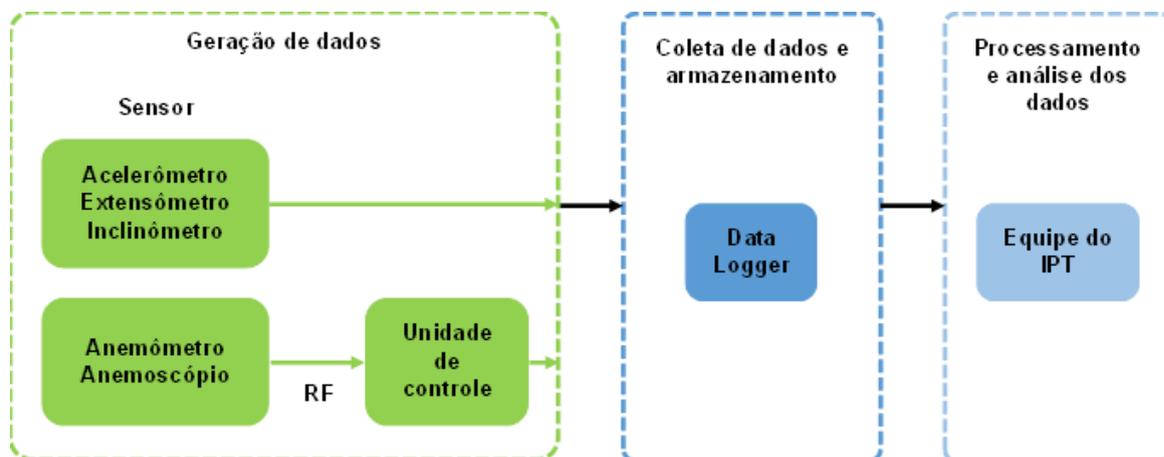


Figura 14 - Diagrama do sistema que atende a modelagem matemática
Fonte: autor.

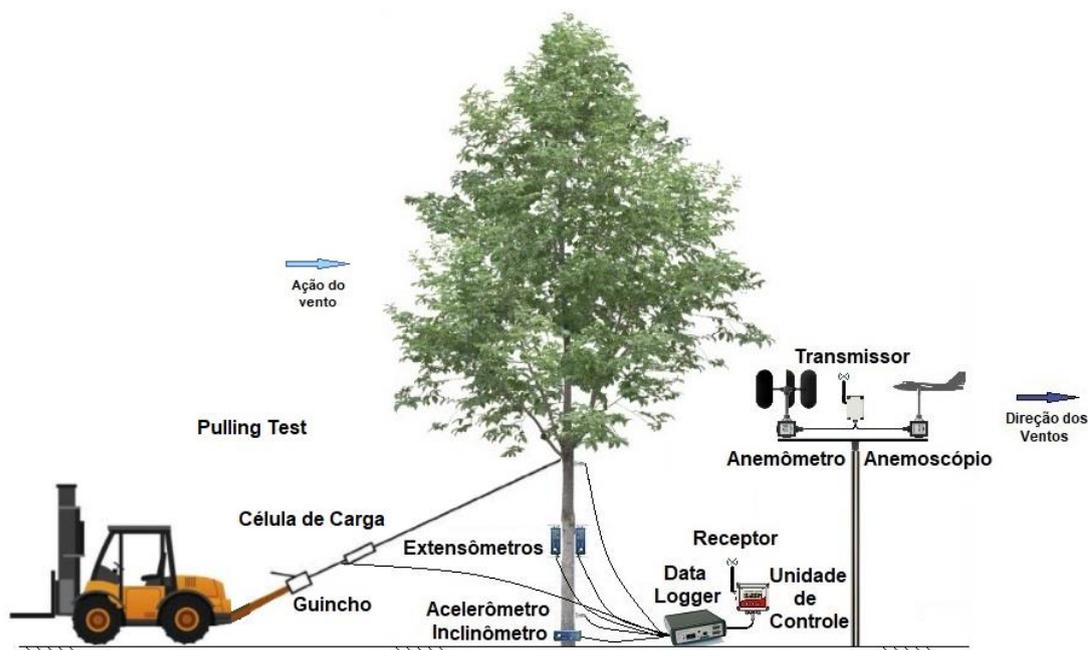


Figura 15 - Sistema que atende a modelagem matemática
Fonte: adaptado de Koizumi et al. (2010).

4.3 TESTES EM ÁRVORES

Um tipo de teste utilizado por pesquisadores da área de arborização para avaliar a estabilidade e segurança de árvores é denominado *pulling test*. Trata-se de um experimento que envolve a aplicação de carga de flexão no tronco de uma árvore, por meio de um cabo preso neste (FAKOPP, 2021).

Nesse experimento forçado, a árvore deve receber instrumentos de medição e ser tracionada por um cabo até um limite seguro, de forma quase-estática. Em seguida, o carregamento deve ser liberado, resultando em um movimento de oscilação livre da árvore (Figura 16).

O experimento deve ser conduzido com velocidade de vento igual ou menor a 3,3 m/s, que corresponde a uma brisa leve na escala de Beaufort (CPTEC, 2019).

Dois (ou quatro, se possível) extensômetros devem ser instalados no tronco da árvore com defasagem de 90°. Alinhados com os extensômetros, devem ser instalados dois postes a uma distância de 0,5 metro da base do tronco, que servirão de suporte para os sensores de deslocamento. O acelerômetro deve ser instalado na extremidade superior do tronco, e o inclinômetro (ou um acelerômetro funcionando como inclinômetro), na base do mesmo, como ilustrado na Figura 17.

A posição da estaca deve corresponder, de preferência, à tendência de flexão da árvore, conforme a maior probabilidade de orientação da velocidade do vento no local. Os experimentos consistem em realizar trações no plano da bifurcação da árvore e perpendicular a ela.

Nos suportes dos sensores de deslocamento são colocados tripés, para evitar que as raízes sejam atingidas na cravação dos postes (Figura 17).

É recomendável que sejam incluídos na montagem cabos de limitação para evitar o efeito chicote do cabo principal ao ser liberado subitamente.

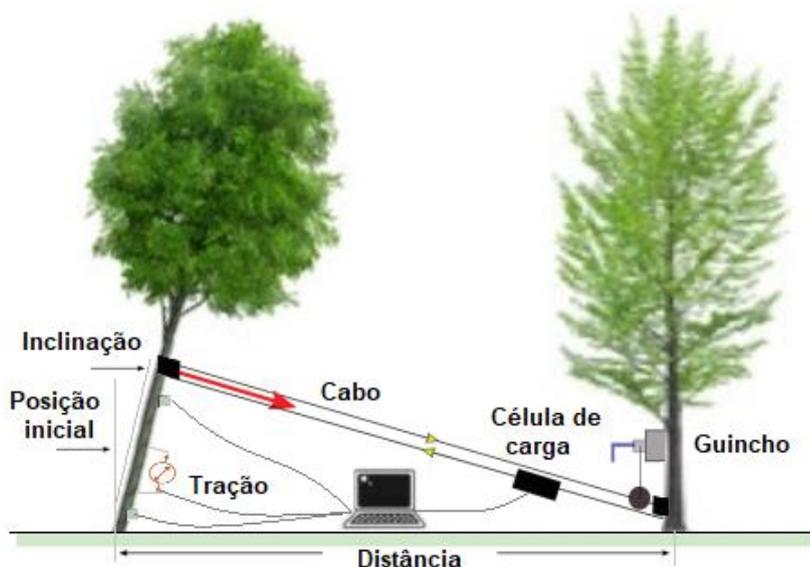


Figura 16 - Experimento de *pulling test*

Fonte: adaptado de Argus-electronic (2021) e Fakopp (2021).

O tripé do anemômetro deve ser posicionado em uma altura suficiente para que ele fique acima da copa da árvore.

Considerou-se, na concepção do experimento o limite de alerta de 0,1% de deformação em compressão, que foi definido com base no manual do PICUS TreeQinetic Load Tests da Argus-electronic, empresa de instrumentação, que desde 1998 desenvolve instrumentos de inspeção de árvores (ARGUS-ELECTRONIC, 2021).

Os passos apresentados a seguir para a realização dos experimentos foram definidos pela equipe técnica do IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022):

- 1° Instalar sensores conforme descrito.
- 2° Instalar a estaca e o sistema de aplicação de carga na primeira posição.
- 3° Ligar sistema de aquisição de dados (*data logger*), configurar taxa de aquisição em 100 Hz, e iniciar a aquisição.
- 4° Aplicar carga até o limite seguro (0,2° de inclinação da base, ponto de segurança da árvore.)
- 5° Após a aplicação da carga, acionar o dispositivo de liberação rápida (experimento dinâmico) e manter o equipamento de aquisição ativo até o amortecimento completo dos movimentos oscilatórios do tronco da árvore.

Este mesmo passo será realizado para o experimento estático, no qual não há a liberação rápida do dispositivo, mas que liberará a carga com lentidão até a árvore voltar a sua posição normal.

6° Repetir os passos 4 e 5 por três vezes.

7° Reposicionar a estaca e cabo de tração a 90°, conforme ilustrado no esquema, e repetir os passos anteriores.

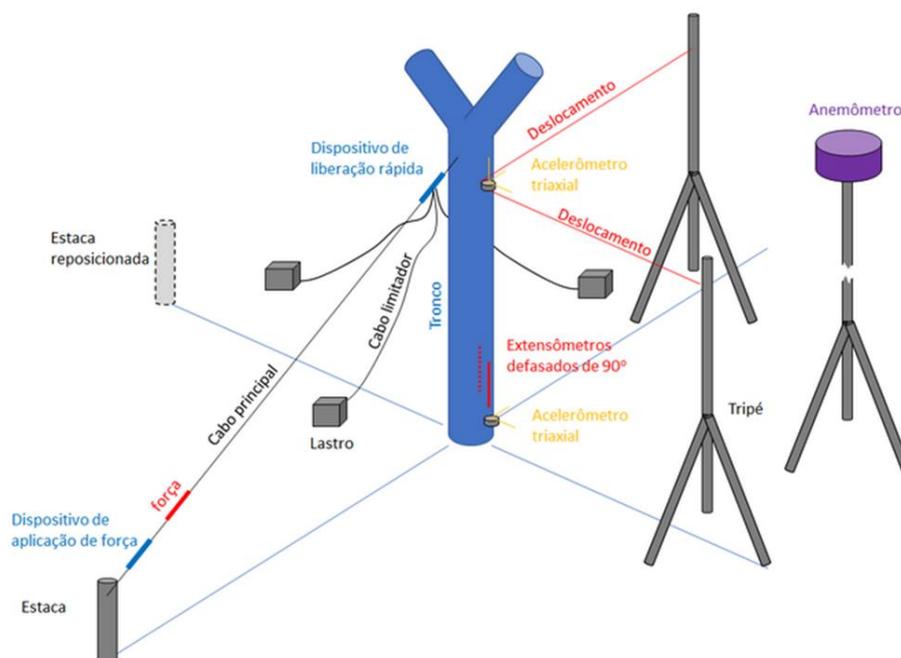


Figura 17 - Procedimento dos experimentos de *pulling test* em campo

Fonte: Equipe técnica do IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022).

Os dados coletados por meio dos sensores instalados na árvore são utilizados para a validação da modelagem matemática.

Os experimentos são executados em duas etapas, sendo que na primeira, é realizado um experimento forçado de *pulling test*, com imposição de forças e deslocamentos sobre a árvore e monitoramento de variáveis características, como mostrado na Figura 17. Na segunda etapa, a árvore será monitorada por um período prolongado (meses), para se observar o efeito do vento sobre as mesmas variáveis ou um subconjunto delas (caso haja impedimento de uso de algum sensor por tempo prolongado, em condições ambientais variadas).

4.4 PONTOS DA ESTRUTURA DO SMA, TESTADAS NOS EXPERIMENTOS REALIZADOS ENTRE O CAMPO E A NUVEM

São mostrados, nesta seção, como os dados gerados em campo foram tratados até seu armazenamento na nuvem.

4.4.1 Coleta de dados - formato das mensagens e amostragem

São apresentados, a seguir, o formato das mensagens enviadas para a nuvem, com o seu conteúdo e quantidade das amostragens por experimento.

4.4.1.1 Carga útil e formato das mensagens

O máximo de carga útil nas mensagens do LoRa pode chegar até 250 bytes (ALMUHAYA et al., 2022). Foram utilizadas, nos experimentos mensagens que vão de 0 a 48 bytes de carga útil. Na Tabela 5, segue exemplo de carga útil em bytes e formato para a instrumentação e dados.

Descrição	Quantidade de Bytes	Formato
Acelerômetro triaxial (3)	12	Ponto flutuante
Giroscópio triaxial (3)	12	Ponto flutuante
<i>Strain gauge</i> (2)	8	Ponto flutuante
Anemômetro	4	Ponto flutuante
Anemoscópio	2	Inteiro
Sensor de deslocamento	8	Ponto flutuante
<i>Status</i>	2	Inteiro

Tabela 5 - Número de bytes de carga útil e formato para a instrumentação dos dados nas mensagens

Fonte: autor.

No dado de *status*, em 1 byte pode-se ter até 256 valores diferentes, o que significa que se pode ter este mesmo número de informações diferentes.

4.4.1.2 Amostragem

A cada experimento, a amostragem dos dados coletados vai variar conforme a necessidade destes para as respectivas análises. Segue na Tabela 6 o valor das amostragens nos experimentos.

Experimento	Amostras
Em laboratório	A cada varredura do programa
Verificação da calibração	256
Estabilidade em leituras contínuas	22 por segundo
Movimento de inclinação	400
Média móvel	400
Estabilidade de operação com a nuvem	1 a cada 15 segundos
Consumo de energia	A cada varredura do programa
RTC (<i>Real-Time Clock</i>)	A cada varredura do programa
Distância e potência rede LoRa	1 por segundo
Algoritmo de aquisição para o SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore	60 segundos

Tabela 6 - Número de amostragem por experimento

Fonte: autor.

4.4.2 Sistema de sinalizações

Foram implementadas mensagens que auxiliam o usuário na realização dos testes, como evitar a ruptura da árvore e para manter o monitoramento operando. Segue abaixo o Quadro 6 com as mensagens implementadas.

Mensagem	Sinalizações
1	Do ponto de ruptura da árvore, quando supera o limite de sua estabilidade
2	Perda de comunicação com o dispositivo, que é realizado por um algoritmo de análise na nuvem

Quadro 6 - Mensagens de sinalização

Fonte: autor.

4.4.3 Estrutura da comunicação dos dispositivos nos experimentos

Foram realizados os experimentos com comunicação ponto a ponto, mostrando a viabilidade da estruturação de um SMA, utilizando sensor inercial.

4.4.4 Estrutura e análise dos dados na Nuvem

Para a colocação dos dados coletados pelo SMA na nuvem, algumas plataformas disponíveis foram avaliadas: (i) Mosquitto, que é um *broker*, ou um servidor que recebe dados enviados de um dispositivo, e em seguida, roteia esses dados para o destino relevante (MOSQUITTO, 2021); (ii) TagoIO, que é uma plataforma na nuvem de alto nível, para monitoramento de ambientes via dispositivos IoT (TAGOIO, 2021); (iii) InterSCity, que é um projeto de código aberto, para apoiar tecnicamente o desenvolvimento de projetos de Cidades Inteligentes (INTERSCITY.ORG, 2021), (descrito no Apêndice D) . Nessas plataformas foram exploradas as suas infraestruturas, como de armazenamento, visualização e análise, para criar uma interface de monitoramento da árvore na nuvem.

4.4.5 Sincronismo dos dados - *TimeStamp*

Foi verificada a necessidade ou não de sincronismo em relação aos dados coletados. Nos experimentos foram utilizados o módulo DS3231, que é um relógio em tempo real, com os seguintes dados: dia, mês, ano, hora, minuto e segundo (MAXIM INTEGRATED, 2015), descrito no Apêndice B.

Ele foi montado para a plataforma em nuvem InterSCity no formato International Organization for Standardization (ISO) 8601, por exemplo: 2020-05-27T21:52:56.183Z (INTERSCITY.ORG, 2021).

4.4.6 Distância e potência no envio de mensagem

Utilizando a configuração padrão da rede LoRa, verificou-se a potência e distância máxima da recepção dos sinais transmitidos, considerando-se a presença ou não de obstáculos. No Capítulo 5 - Experimentos e Resultados, são apresentadas as distâncias obtidas. (SEMTECH CORPORATION, 2019a).

4.4.7 Algoritmo de aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore

Nesta pesquisa utilizou-se o algoritmo para a aquisição de dados do SMA, visando sinalizar o ponto de ruptura da árvore, proposto pelo IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022) (Figura 18). Os dados utilizados neste algoritmo estão descritos no Quadro 7.

Dado fluxograma	Descrição
des	Desvio padrão atual
des_{lim}	Desvio padrão limite
m	Média atual
m_{ant}	Média anterior
lim	Limite da diferença proporcional a média
Oper_{média_móvel} > 45	Calcular a média móvel com valor 45
des > des_{lim}	Verificar se há perturbação momentânea (por exemplo passou um caminhão ao lado da árvore e alterou a leitura, gerando erro)
$\frac{ m - m_{ant} }{m_{ant}} > \text{lim}$	Verificar se há movimentação acima do limite configurado

Quadro 7 - Descrição dos dados do fluxograma

Fonte: autor.

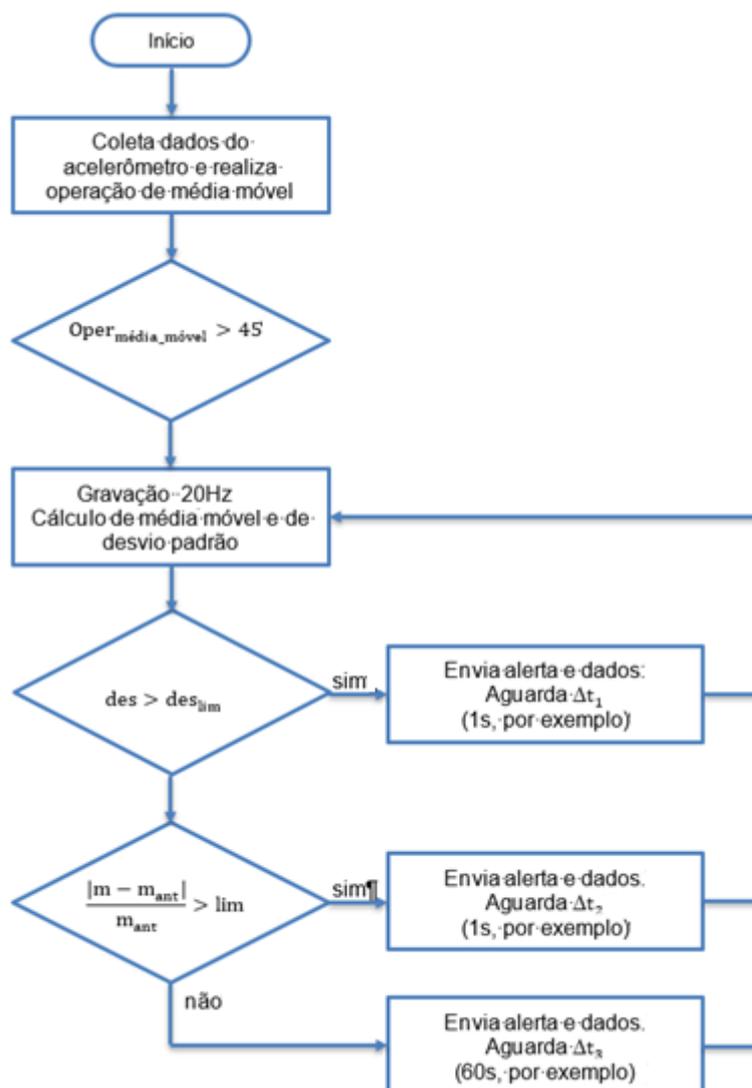


Figura 18 - Fluxograma do algoritmo de aquisição de dados do SMA

Fonte: adaptado do fluxograma de (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022)

4.4.8 Definição do hardware básico para o SMA

Com a realização do experimento em laboratório e com a ajuda do grupo de estudos do IPT envolvido nas outras pesquisas, foi definido um hardware básico do SMA:

- a) Nó sensor para medir a aceleração com tecnologia MEMS, o MPU 9250 do fabricante InvenSense (INVENSENSE, 2022).
- b) Nó com microcontrolador para realizar o processamento e coleta de dados em campo: o ESP32 da empresa Espressif Systems (ESPRESSIF, 2021).

- c) Para a comunicação sem fio, foi utilizada a tecnologia LoRa, padronizada pela LoRa. O fabricante deste módulo é a empresa Semtech Corporation (SEMTECH CORPORATION, 2019a).
- d) Como kit de desenvolvimento, foi utilizado o módulo *Wireless Fidelity* (WiFi) LoRa 32(V2) da empresa Heltec Automation (HELTEC.ORG, 2022), que tem incorporado em sua placa um microcontrolador ESP32, com interfaces de comunicação WiFi, LoRa e Bluetooth , além de um display OLED 0.96”, dentre outros recursos.

Outros detalhes destes módulos e dispositivos utilizados são apresentados no Apêndice B.

4.5 PRINCIPAIS FLUXOGRAMAS DAS ROTINAS DO SMA

São mostradas, nesta seção, os principais fluxogramas das rotinas utilizadas desenvolvidas para o SMA, e utilizadas nos experimentos.

São apresentados os fluxogramas do primeiro experimento, realizado em laboratório, com a finalidade de definir os softwares e hardwares que foram requeridos pelos experimentos subsequentes, e estes são mostrados nas Figura 19, 20 e 21.

Os programas correspondentes aos fluxogramas das Figura 19 e 20, foram desenvolvidos utilizando-se o *Integrated Development Environment* (IDE) do modulo de processamento Arduino (ARDUINO.CC, 2022), e a sua similaridade se repete nos demais experimentos desta pesquisa. Na Figura 21 o fluxograma corresponde a plataforma na nuvem TagoIO, que oferece monitoramento de ambiente, via dispositivos de IoT conectados a sua rede.

4.5.1 Fluxograma do módulo instalado na árvore

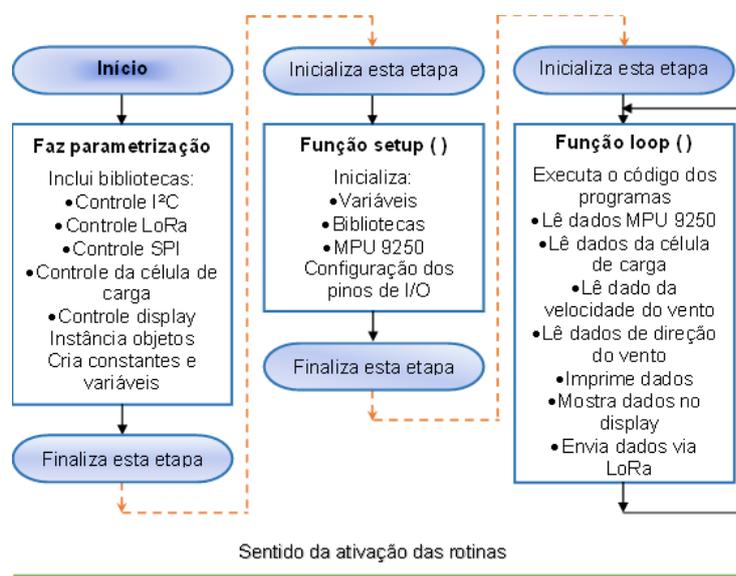


Figura 19 - Fluxograma do programa do primeiro experimento realizado em laboratório

Fonte: autor.

4.5.2 Fluxograma do gateway instalado no laboratório

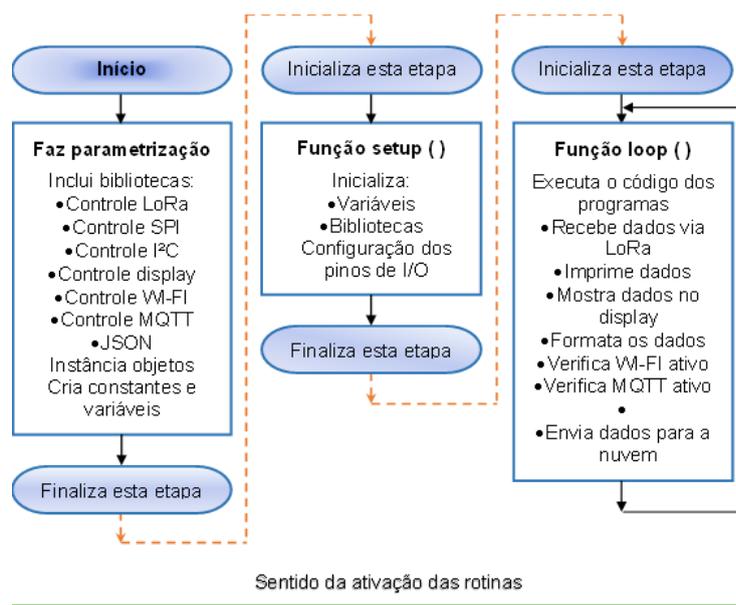


Figura 20 - Fluxograma do programa do gateway do primeiro experimento realizado em laboratório

Fonte: autor.

4.5.3 Fluxograma na nuvem Tago IO

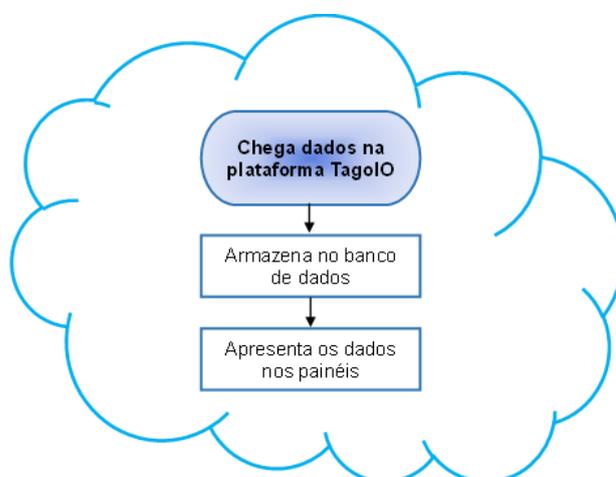


Figura 21 - Fluxograma do programa utilizado na nuvem do primeiro experimento realizado em laboratório

Fonte: autor.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou o levantamento dos requisitos funcionais e não funcionais do SMA, e a concepção dos experimentos de aquisição de dados para atender a demanda da modelagem matemática a para previsão do ponto de ruptura de árvores, que também foi descrita. O teste clássico citado na literatura para a avaliação das condições da estabilidade e da segurança de árvores, denominado *pulling test* também foi descrito.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados e resultados obtidos com os protótipos, no sentido de avaliar as soluções propostas.

5.1 EXPERIMENTO EM LABORÁTÓRIO E CAMPO

Houve duas etapas de experimentos realizadas nesta pesquisa, visando validar os protótipos desenvolvidos: uma em laboratório e outra em campo.

5.1.1 Experimento em laboratório e prototipagem

Com o protótipo do SMA desenvolvido foram realizados experimentos visando avaliar, paulatinamente, cada recurso de hardware e software. Também a coleta e o envio dos dados para a nuvem foram avaliados.

5.1.1.1 Etapas do experimento

Foram realizadas várias etapas dos experimentos, acrescentando em cada uma, uma nova rotina, um novo módulo de hardware ou um novo aplicativo, conforme arquitetura da Figura 22.

Ao final destas etapas foi obtido a base do protótipo para os experimentos de IoT em campo.

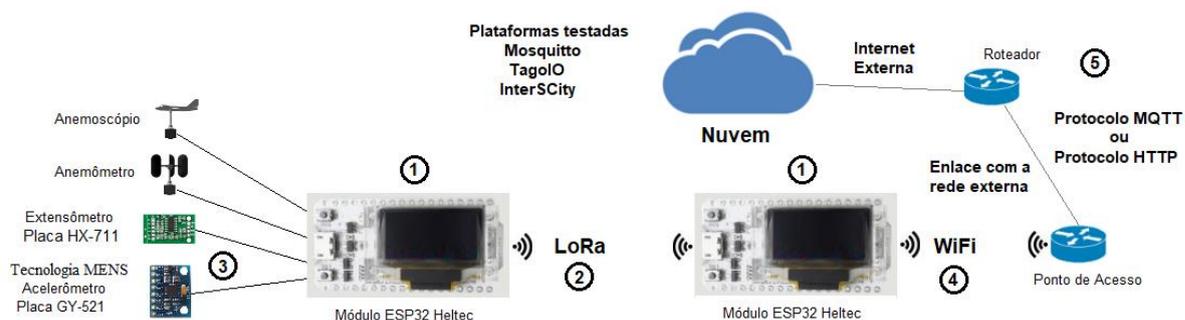


Figura 22 - Arquitetura do experimento em laboratório

Fonte: autor.

- 1ª **Etapa** - foram configurados e programados os módulos ESP32 da Heltec com teste das funcionalidades do *display*, que vem incorporado nestes controladores, o que irá propiciar uma visualização dos resultados dos experimentos em tempo real.
- 2ª **Etapa** - foram configurados e programados dois módulos ESP32 da Heltec para se comunicarem no *link* de camada física LoRa, um como emissor e outro como receptor, sendo a transferência de dados feita na forma de pacotes de informação. Nos seus *displays* foram apresentas as mensagens que confirmam que as rotinas estão sendo executadas corretamente.
- 3ª **Etapa** - no módulo ESP32 emissor foi acrescentado um módulo MPU 9250 (acelerômetro triaxial) e realizada as configurações e programações necessárias, para coletar deste os valores de aceleração dos eixos X, Y e Z, bem como o dado de temperatura, uma placa HX-711 com *strain gauge* (extensômetro), um anemômetro e um anemoscópio. Os dados gerados e coletados destes módulos foram acrescentados ao pacote de transmissão de dados via canal LoRa. Como na etapa anterior estes novos dados também foram acrescentados aos *displays*. A visualização destes dados no *display*, confirma a transferência correta destes entre os dois ESP32.
- 4ª **Etapa** - Com a confirmação da correta transferência de pacotes de dados no *link* LoRa, foi feita uma configuração e programação da conexão *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) presente no módulo ESP32 para um ponto de acesso, propiciando assim o envio destes dados para uma rede Internet externa.
- 5ª **Etapa** - com a conexão Wi-Fi ativa a uma rede Internet externa, foram definidas, configuradas e programadas mensagens com os dados recebidos

no segundo módulo ESP32, via canal LoRa, para o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), em um primeiro instante, e para o protocolo *Hyper Text Transfer Protocol* (HTTP), em um segundo instante. Com estas mensagens sendo trocadas de acordo com o previsto, foram testadas as três plataformas *web*, duas das estruturas em MQTT e uma em HTTP. As plataformas *web* Mosquitto da Eclipse Foundation, TagoIO e InterSCity foram testadas na nuvem. A Figura 23 mostra o painel de controle com os dados recebidos, na plataforma **TagoIO** (TAGOIO, 2021). A Figura 24 apresenta o painel de controle com os dados recebidos, na plataforma **Mosquitto da Eclipse Foundation** (MOSQUITTO, 2021). Já a Figura 25 mostra os dados sendo recebida, na plataforma **InterSCity** (INTERSCITY.ORG, 2021).

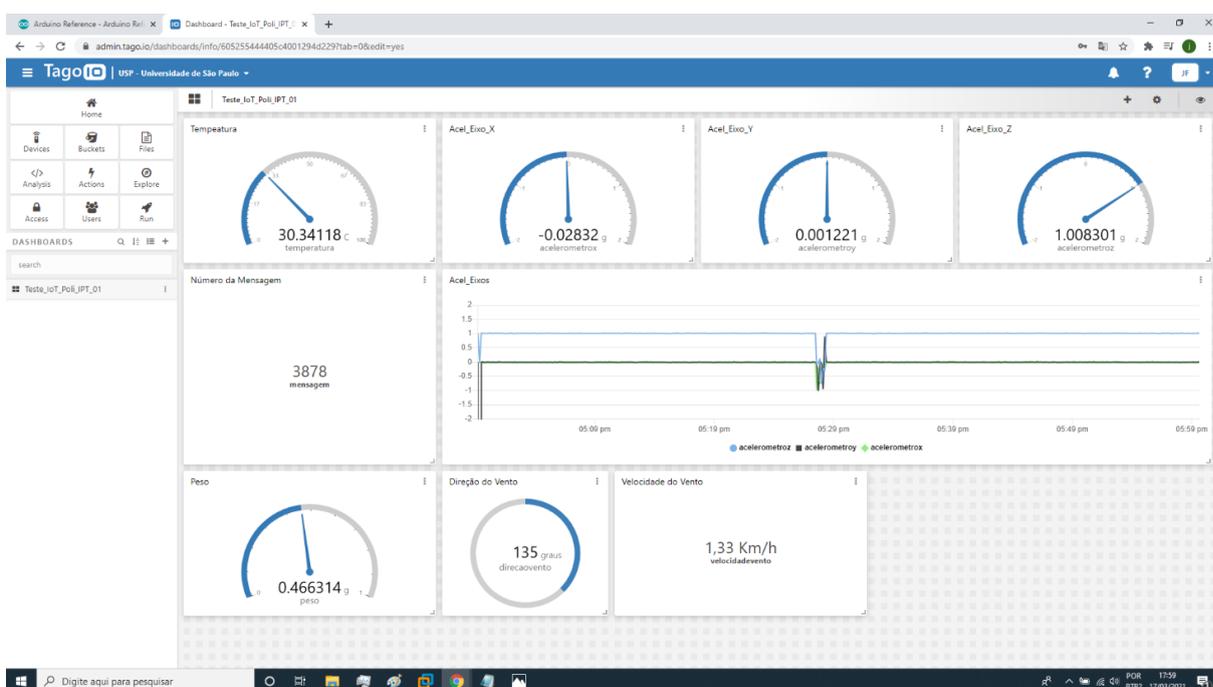


Figura 23 - Confirmação do recebimento dos dados na plataforma TagoIO
Fonte: autor com base em TagoIO (2021).

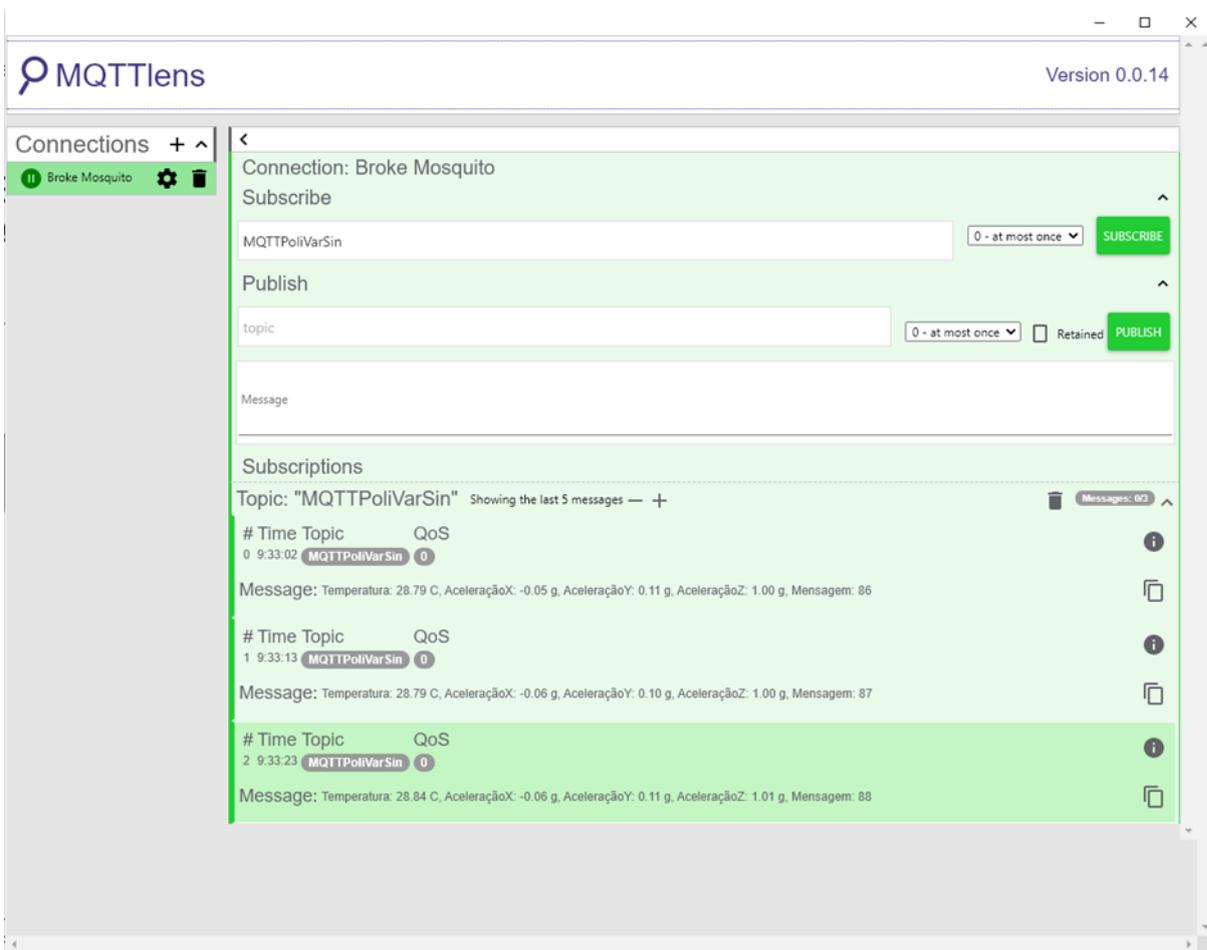


Figura 24 - Confirmação do recebimento dos dados na plataforma Mosquitto da Eclipse Foundation
 Fonte: autor com base em Mosquitto (2021).

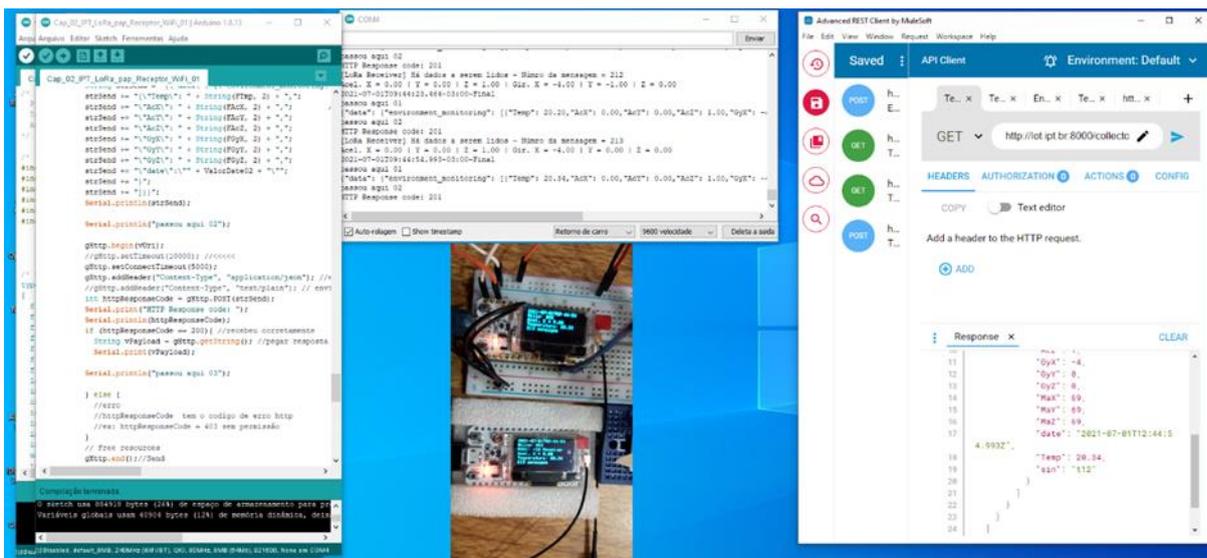


Figura 25 - Confirmação do recebimento dos dados na plataforma InterSCity
 Fonte: autor com base em InterSCity (2021).

5.1.2 Experimento de validação das medições do MPU 9250

A seguir são apresentados os experimentos realizados para a validação do funcionamento do módulo MPU 9250.

5.1.2.1 Verificação da calibração

O fabricante do módulo aconselha a fazer uma calibração se o usuário não utilizar o software desenvolvido por ele (INVENSENSE, 2022). Esta é uma calibração estática com a finalidade de verificar ou corrigir os erros intrínsecos de fabricação. Esta calibração consiste em executar uma rotina preparada para esta finalidade, coletando as amostras em uma grande quantidade (neste caso optou-se por 256 amostras) dos três eixos do acelerômetro e calcular a média destas.

Esta calibração deve ser realizada em uma superfície estável e nivelada, de preferência com ausência de vibração, na qual é colocado o módulo com o eixo Z para cima ou para baixo sinalizado próximo de ± 1 g e os eixos X e Y com valores ao redor de 0 g. Também é importante observar que o acelerômetro sofre influência da temperatura, sendo aconselhável deixá-lo ligado por um tempo de 2 min 5 min antes de coletar as amostras.

Com este experimento foi possível verificar a dispersão dos valores amostrados e o comportamento do vetor unitário para o acelerômetro conforme Equação (12) e Tabela 7.

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 1 \quad (12)$$

	Quadrante	Com correção	Sem correção
Acelerômetro 01	1°	1,0029 g	0,9919 g
	3°	1,0027 g	1,0276 g
Acelerômetro 02	1°	1,0058 g	1,0208 g
	3°	1,0011 g	1,0029 g
Acelerômetro 03	1°	0,9949 g	1,0350 g
	3°	0,9901 g	0,9727 g

Tabela 7 - Dos valores do vetor unitário para os acelerômetros
Fonte: autor.

O que se nota é que o vetor unitário tem um erro maior em todos os casos apresentados, em seu correspondente não corrigido.

5.1.2.2 Validação com leituras contínua

A verificação do funcionamento dos módulos em operação contínua, foi feita executando-se uma rotina de coleta de dados nos três acelerômetros com duração de 24 horas, e por um período de mais de sete dias, com uma frequência de amostragem de 22 Hz, em média, como mostrado na Figura 26.



Figura 26 - Experimento de teste dos acelerômetros MPU 9250
Fonte: autor.

Na Tabela 8 é apresentado o erro que se pode obter em cada leitura feita, conforme dados do fabricante Invensense, nos eixos, X, Y e Z.

Na Tabela 9 são apresentadas alguns dados e o formato respectivos formatos de armazenamento na memória do microcontrolador. Para gerar a estampa de tempo foi utilizado o módulo *Real-Time Clock* (RTC) DS 3231, que tem a capacidade de gerar ano, mês, dia, hora, minuto e segundo, dados estes que foram analisados posteriormente.

Tolerância de leitura MPU 9250	
Nível de componente, X	± 60 mg
Nível de componente, Y	± 60 mg
Nível de componente, Z	± 80 mg

Tabela 8 - Tolerância na leitura do MPU 9250

Fonte: adaptado de Invensense (2022).

O que se pode observar no Gráfico 15A, Gráfico 16A e Gráfico 17A, que apresentam os valores instantâneos e médios do acelerômetro nos eixos X, Y e Z, é que eles estão coerentes com a tolerância prevista pelo fabricante, apesar da dispersão ocorrida, mas pode-se melhorar o valor dessa tolerância se for calculada a média dos valores coletados em cada amostragem de 22 Hz, como mostrado nos Gráfico 15B, Gráfico 16B e Gráfico 17B, que exibem uma redução da tolerância e dispersão dos dados no MPU 9250.

----- Acelerômetro 01 -----				
Data:YYYY-MM-DDThh:mm:ss.ms-Fuso	Acel. X (g)	Acel. Y (g)	Acel. Z (g)	Leitura
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	-0,003	-0,002	1,004	1
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0,001	-0,004	0,997	2
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0	0,001	1,008	3
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0,002	-0,001	0,998	4
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	-0,005	0	1,006	5
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	-0,001	-0,003	1,01	6
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	-0,002	0,004	0,994	7
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0	0,003	0,998	8
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0,002	0,002	0,996	9
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	-0,001	0,002	0,993	10
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0,001	0,002	0,994	11
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0,002	-0,001	1,005	12
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	0,004	-0,003	1,004	13
2022-03-24T12:24:02.000-03:00	-0,002	-0,001	0,999	14

Tabela 9 - Formato dos dados no experimento de funcionamento do MPU 9250

Fonte: autor.

Como comentado no parágrafo anterior, sobre a melhoria da tolerância na leitura dos dados, em todos os Gráfico 15B, Gráfico 16B e Gráfico 17B, na série1 em cada ponto azul tem-se o resultado da média da amostragem de 22 Hz, já na série2 a linha abóbora ilustra a média de todas as amostras apresentadas no Gráfico 16A, Gráfico 16A e Gráfico 17A.

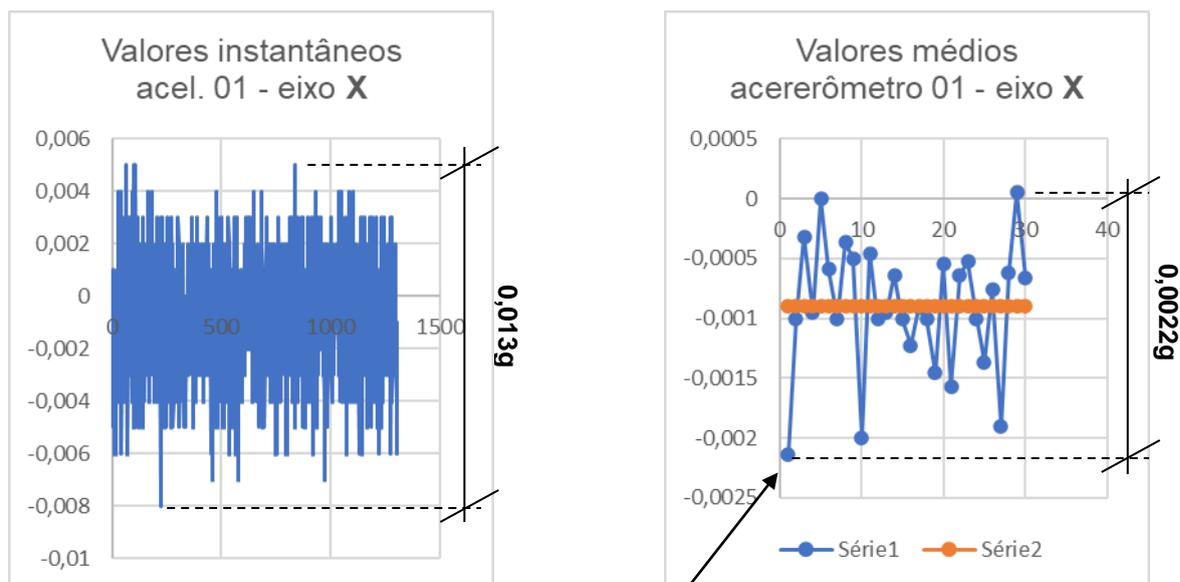


Gráfico 15A e B - Valores instantâneo e médio do acelerômetro 01 - eixo X
Fonte: autor.

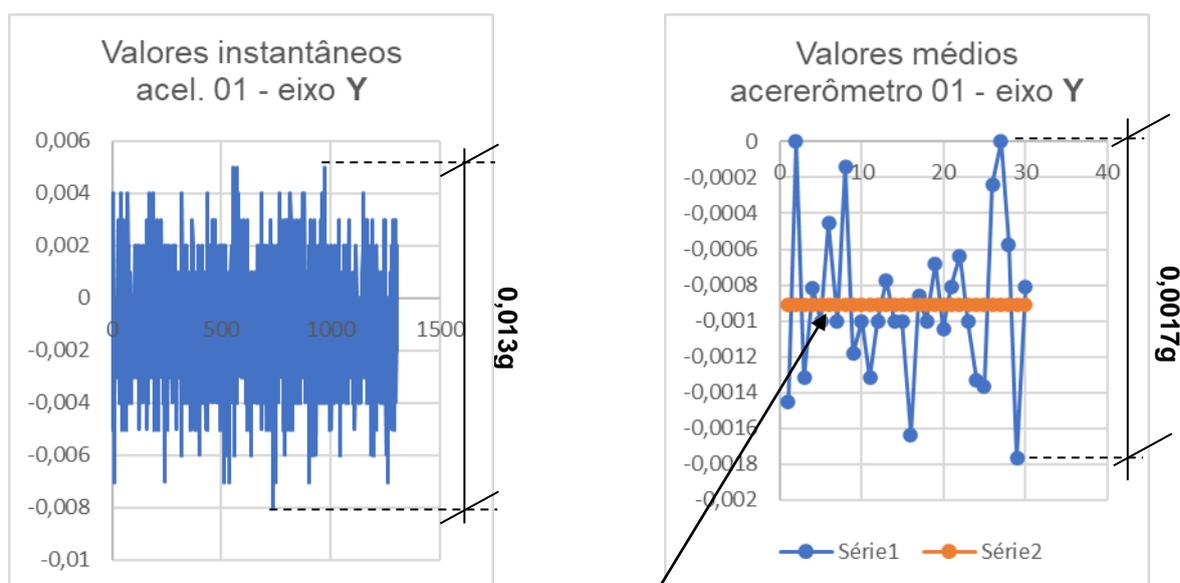


Gráfico 16A e B - Valores instantâneo e médio do acelerômetro 01 - eixo Y
Fonte: autor.

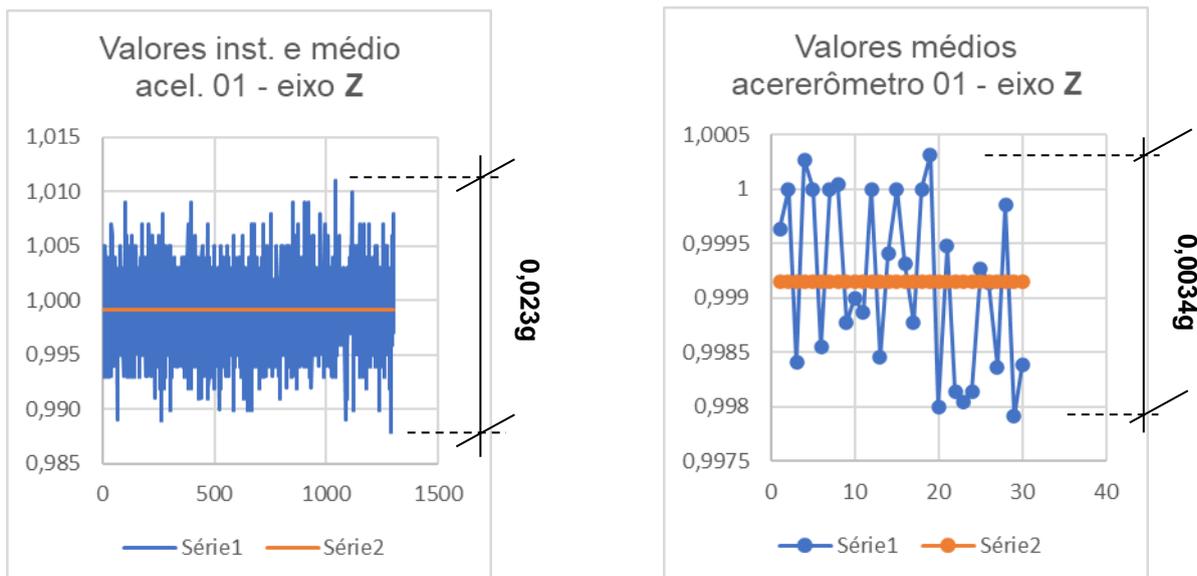


Gráfico 17A e B - Valores instantâneo e médio do acelerômetro 01 - eixo Z
Fonte: autor.

5.1.2.3 Leituras obtidas em movimento de inclinação

Foi utilizado um procedimento similar de teste de funcionamento do inclinômetro, coletando-se dados da inclinação de 0,5' em 0,5' (minuto), acrescentando este passo em uma faixa de 24', começando em - 12' até + 12' (doze minutos de graus corresponde a 0,2°, que é o limite de inclinação de uma árvore, antes de uma possível queda). Cada coleta correspondeu a 400 amostras, apresentados nos Gráfico 18, 19 e 20 que mostram o valor instantâneo destas amostras, as dispersões a cada 0,5' e o valor médio destas. Todos os gráficos correspondem ao eixo Y do acelerômetro. O experimento foi realizado em uma mesa de inclinação como mostrado na Figura 27.

O que pode ser observado no Gráfico 18, é que em toda a faixa entre - 12' a + 12' (as quase 20.000 amostras), o acelerômetro proporciona uma dispersão constante dos valores, acompanhando o movimento de inclinação da mesa.



Figura 27 - Mesa para experimento de movimento de inclinação

Fonte: autor

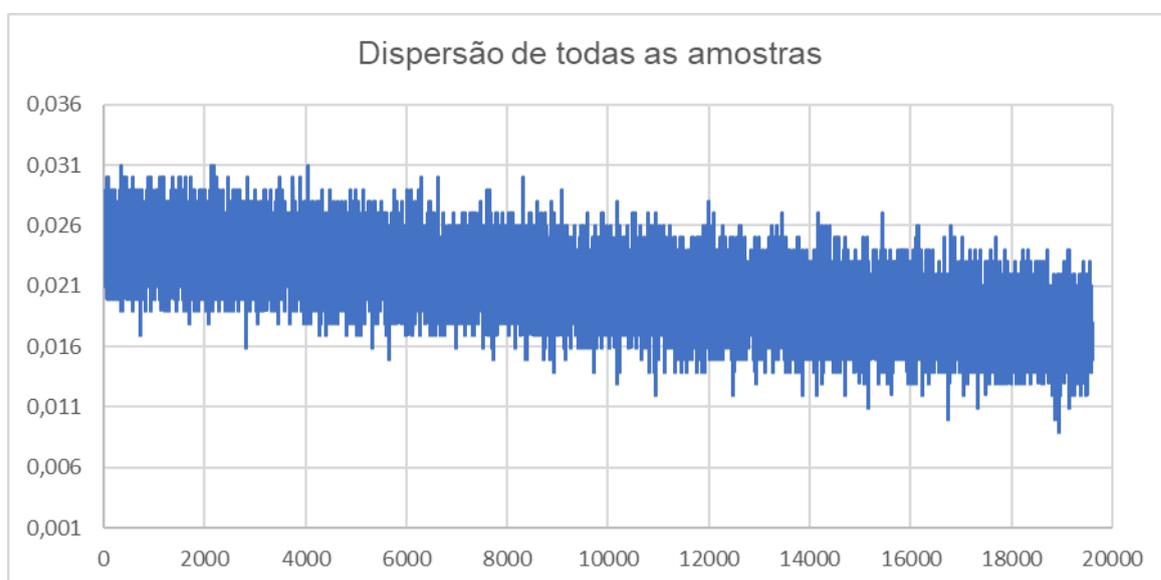


Gráfico 18 - Dispersão das amostras coletadas do eixo Y, no experimento de inclinação

Fonte: autor.

O Gráfico 19 mostra, no eixo horizontal o passo de 0,5' utilizado na rotação da mesa de inclinação e o ponto de parada, para a coleta dos dados das 400 amostras por passo. Os círculos em azul correspondem aos pontos em que se obteve uma maior frequência de amostras de dispersão naquele ponto de parada. Foi feita a medição destas dispersões em dois pontos, obtendo-se o valor de 0,013 g e 0,015 g, que estão próximos do valor de 0,01° de inclinação.

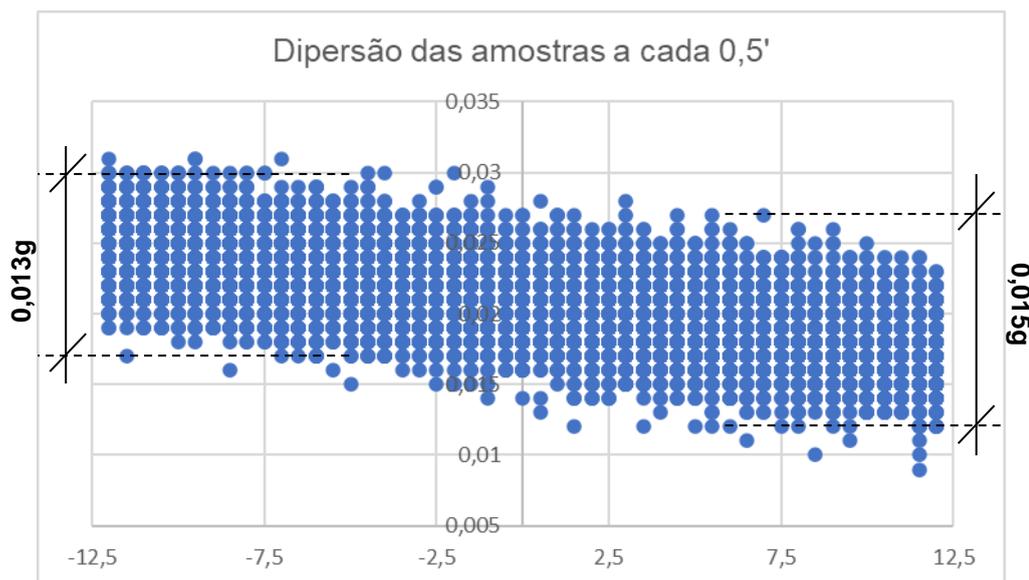


Gráfico 19 - Mostra da dispersão das amostras a cada coleta com passo de 0,5', no experimento de inclinação

Fonte: autor.

No Gráfico 20, ao se obter a média dos valores dispersos a cada passo de 0,5', a curva se comporta como uma reta, mostrando com a tolerância ± 60 mg a ± 80 mg do acelerômetro é possível reduzir a sua dispersão, e como consequência a sua tolerância melhora, assim como a acurácia das medidas.

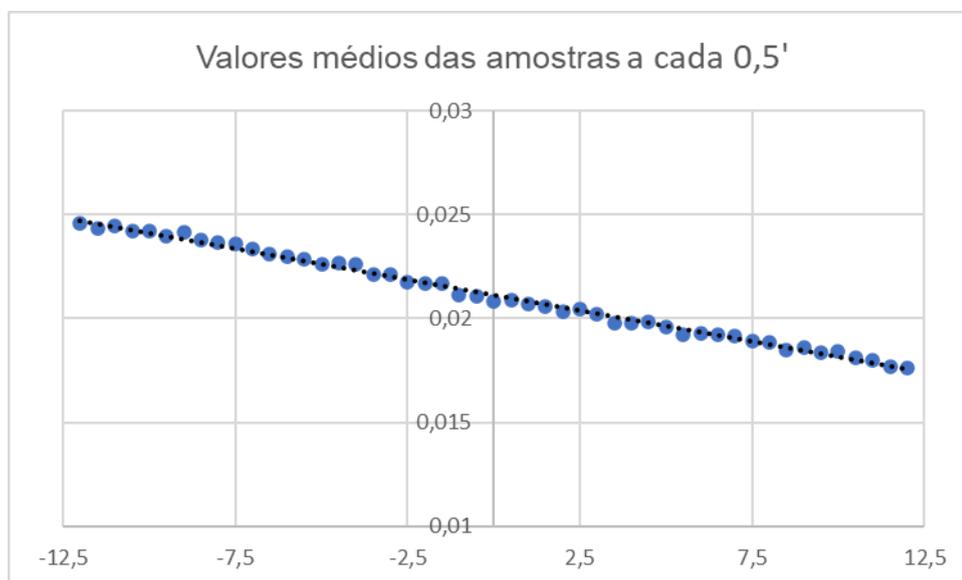


Gráfico 20 - Dos valores médios das amostras a cada passo de 0,5', no experimento de inclinação

Fonte: autor.

5.1.2.4 Média móvel na coleta de dados

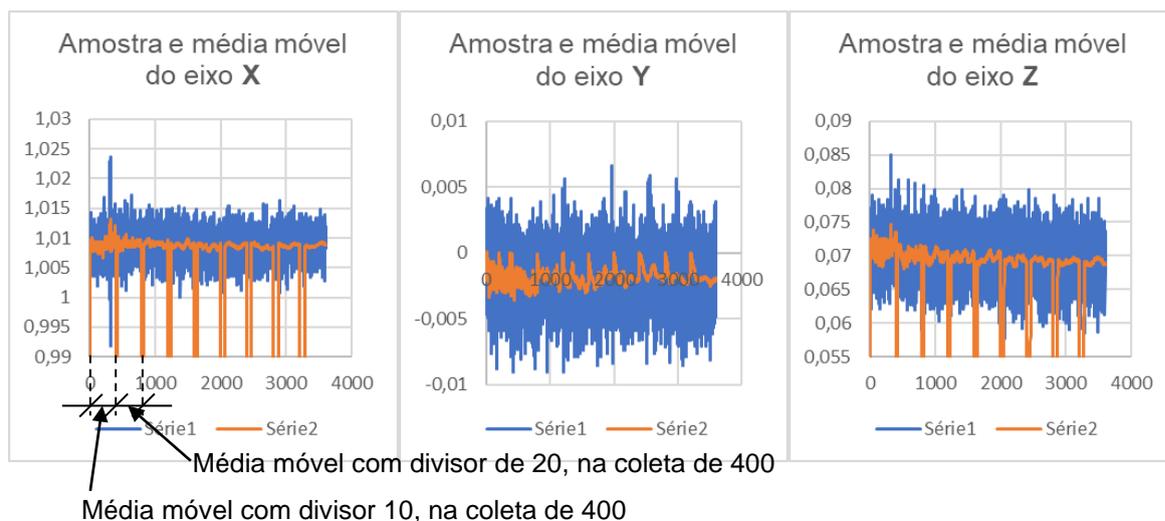
Neste experimento para se tirar a média móvel dos dados do acelerômetro nos eixos X, Y e Z, foi utilizada uma rotina de leitura de 400 amostras, alterando-se o divisor na equação da média com um acréscimo de 10 em 10, começando com o valor 10 indo até 90. Neste protótipo também foi utilizado o módulo RTC para se ter uma estampa de tempo, e um módulo micro SD para guardar em memória os dados para análise, como mostrado na Figura 28.



Figura 28 - Protótipo utilizado no experimento na média móvel

Fonte: autor.

Nos Gráficos 21 A, B e C são apresentadas, na série 1, as amostras coletadas nos três eixos do acelerômetro, bem como, na série 2, as médias móveis dos mesmos. Todas as leituras das 400 amostras com as respectivas médias móveis de um determinado eixo foram agrupadas em um único gráfico. Na análise destes gráficos nota-se que, a partir de um divisor 20 para a média móvel, começa-se a estabilizar e diminuir a dispersão dos dados, e com o divisor de 20 a 90, os gráficos apresentam uma maior estabilidade das curvas.



Gráficos 21A, B e C - Amostras e média móvel dos eixos X, Y e Z

Fonte: autor.

Um novo experimento foi realizado dentro dos divisores de 20 a 50. Nesta coleta foram utilizados os divisores 25, 35 e 45, para a realização das médias móveis. Aqui também as leituras das amostras por eixo foram agrupadas em um gráfico único, conforme demonstrado nos Gráficos 22A, B e C.



Gráficos 22A, B e C - Média móvel para 25, 35 e 45 amostras

Fonte: autor.

Nesta análise foi observado que, ao se fazer a média móvel com 45 amostras, ela ficou estável em toda a extensão das 355 amostras restantes coletadas. Este valor foi utilizado nas rotinas deste projeto, para se realizar a média móvel e estabilizar os valores coletados nos três eixos X, Y e Z do acelerômetro.

5.1.3 Experimentos em campo para levantamento da característica da árvore

Os experimentos descritos nesta seção tem o propósito de levantar dados que atendam a modelagem matemática idealizada pelo IPT (IPT, 2017b). Ele foi realizado em duas fases: na primeira, por um período de alguns meses, foram coletados os dados de dois acelerômetros triaxiais fixos na árvore, de um anemômetro e de um anemoscópio. Na segunda houve a realização do experimento *pulling test* e foram coletados os seus dados. Nestes experimentos toda a parte de coleta de dados e análise foi realizada com o apoio e participação do grupo do IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022) em suas diversas áreas.

5.1.3.1 Experimento de coleta de dados do acelerômetro triaxial, anemômetro e anemoscópio

Para a realização dos testes, acelerômetros triaxiais foram instalados pela equipe técnica do IPT em uma árvore típica escolhida em suas instalações. Um dos acelerômetros foi instalado na parte de cima da árvore, perto de uma bifurcação de galhos. Já o segundo acelerômetro foi instalado na parte inferior da referida árvore, perto das suas raízes. A coleta de dados dos acelerômetros foi realizada por meio de um *data logger*, com oito canais, modelo DLG4000, da empresa Lynx (LYNX, 2020) Figura 30.

Já o anemômetro e o anemoscópio, foram configurados e instalados na parte superior de uma caixa d'água localizada ao lado do prédio 39 do IPT, nas proximidades da árvore escolhida Figura 30.

As principais características desses dispositivos são:

- a) O anemômetro e anemoscópio são um único instrumento modelo NA-3C da empresa S&E instrumentos (S&E-INSTRUMENTOS, 2020).
- b) O acelerômetro triaxial com tecnologia MEMS, é da série SNS-ABS05, fornecido pela empresa Lynx (LYNX, 2019).

- c) O *data logger* possui oito canais é o modelo DLG4000 da empresa Lynx (LYNX, 2020).

Outras informações sobre os acelerômetros e o *data logger* encontram-se no Apêndice A.

Ao se analisar a forma de retirar os dados gerados pelo instrumento NA-3C e enviá-los ao *data logger* DLG4000, observou-se que a sua saída segue o padrão de 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA para os dados de velocidade do vento (anemômetro), mas para o dado de direção do vento (anemoscópio), o padrão disponível é o RS 485, incompatível com as entradas analógicas do *data logger*.

Para atender esta necessidade foi desenvolvido um protótipo para transformar este dado disponibilizado via protocolo Modbus, na interface RS 485, em um dado de tensão de 0 a 5 VCC, ficando compatível com a entrada do *data logger*.

O protótipo utilizado para a realização do experimento de coleta de dados do acelerômetro triaxial, anemômetro e anemoscópio utilizou os seguintes módulos e dispositivos (Figura 29), cujos detalhes são apresentados no Apêndice A:

- a) Um controlador Arduino Mega 2560 R3.
- b) Um *protoshield* Arduino Mega.
- c) Um módulo conversor de dados do padrão TTL para o padrão RS485.
- d) Um *display* LCD 1602A.
- e) Uma fonte bivolt 100-240 V, com saída em 9 V, corrente de 1 A.

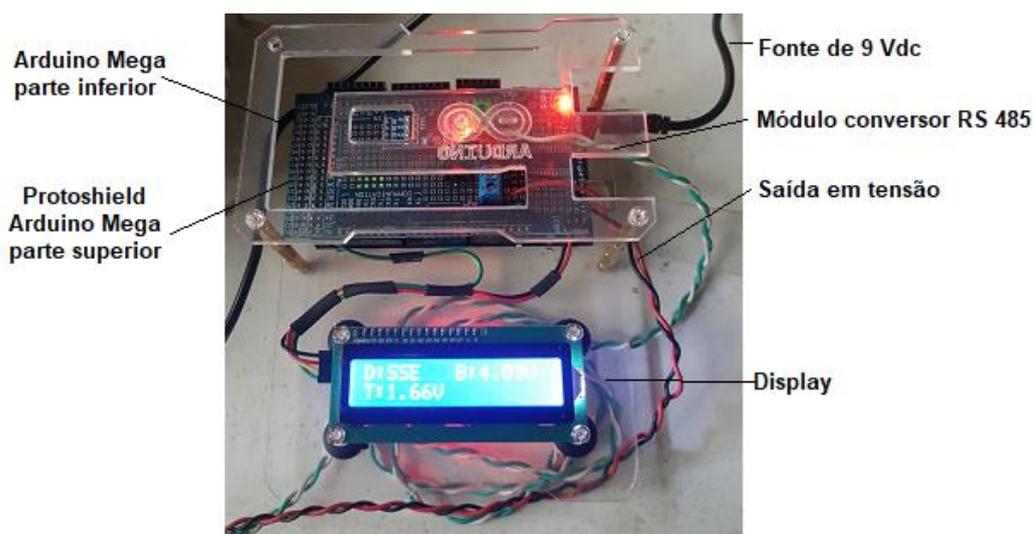


Figura 29 - Protótipo para converter o padrão do anemoscópio para o padrão do *data logger*

Fonte: autor.

A Figura 30, mostra as posições nas quais foram instalados os acelerômetros em uma árvore escolhida para testes, o local de instalação do anemômetro e do anemoscópio (sobre uma caixa d'água), o *data logger*, o módulo NA-3C e protótipo do SMA.

5.1.3.2 Pulling test

Este experimento requereu, a instalação de instrumentos, e foi realizado em conjunto com a equipe técnica do IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022).

Foram realizados experimentos estáticos (uma força contínua é aplicada) e dinâmicos (uma força é aplicada e em seguida é eliminada), como mostrado na Figura 31.

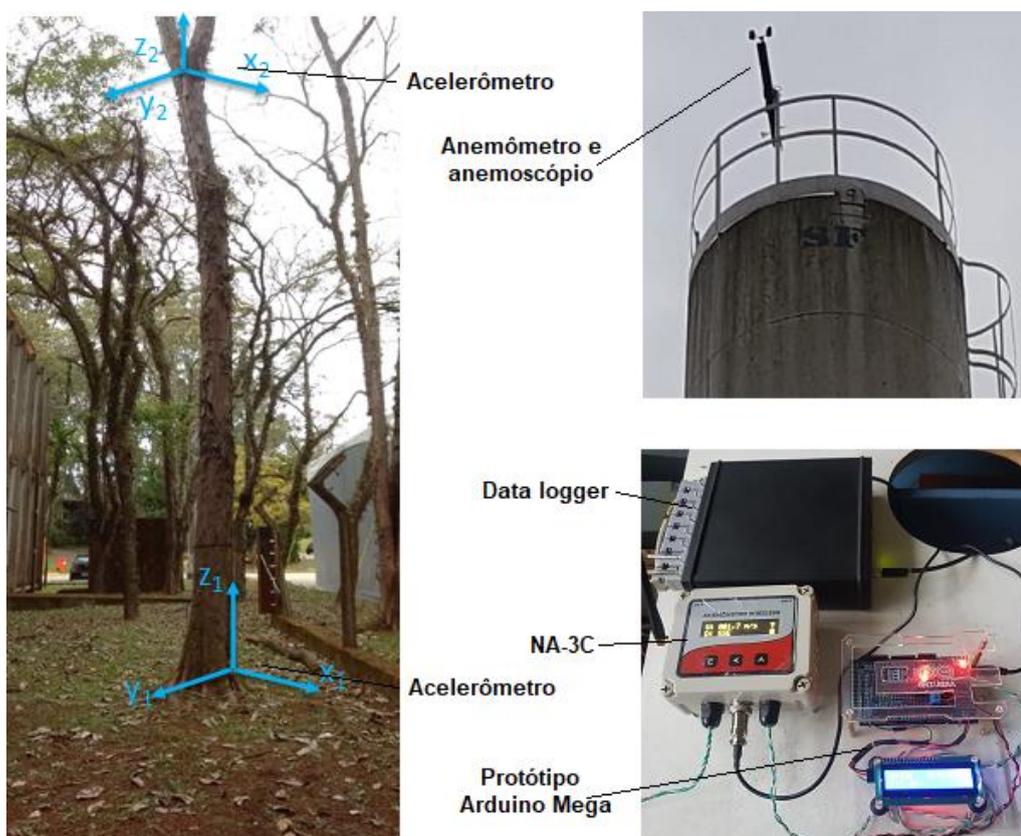


Figura 30 - Experimento de coleta de dados do acelerômetro triaxial, do anemômetro e do anemoscópio

Fonte: Equipe técnica do IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022) e conjunto com o Autor.

Os dados foram coletados para análise pelo IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022).



Figura 31 - *Pulling Test*

Fonte: Equipe técnica do IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022) e conjunto com o Autor.

5.1.4 Experimentos para avaliar a comunicação do SMA

Os experimentos desta seção visam avaliar a parte de comunicação do SMA, que possibilita torná-lo compatível com os conceitos da IoT.

5.1.4.1 Experimento de conectividade do SMA com a nuvem

Neste experimento, foi instalado em uma árvore um protótipo do SMA, que possui um módulo controlador ESP32, no qual foi incorporado um acelerômetro MPU 9250, um conjunto de duas baterias para o trabalho autônomo deste, um circuito de monitoramento destas baterias, um módulo RTC para fornecer a data e hora. Estes dados foram convertidos para o formato ISO 8601, e utilizou-se um módulo de comunicação LoRa para o seu envio, e um *display* OLED para a visualização da troca de mensagens.

Foram desenvolvidas várias rotinas para que o protótipo atendesse às necessidades do experimento como: (i) o controle de canal de comunicação, como o *Inter-Integrated Circuit (I²C)*, o *Serial Peripheral Interface (SPI)*, e o LoRa; (ii) o controle do módulo MPU 9250; (iii) utilização do módulo de RTC para gerar os dados de data e hora em tempo real; e (iv) a exibição de mensagens no display.

Este módulo do protótipo faz varredura dos dados do acelerômetro, do giroscópio e do relógio de tempo real, que são formatados e transmitidos, via canal LoRa, para serem enviados para o outro módulo do protótipo instalado em um laboratório do IPT. Também foi feita uma sinalização no *display* deste, que mostra informações relacionadas com o funcionamento do programa. Esse módulo do protótipo, também baseado no ESP32 com display OLED, destina-se ao controle da comunicação com o módulo instalado na árvore, processamento dos dados coletados, e comunicação com a nuvem, por meio de WiFi Figura 32. O programa desenvolvido deste para o ESP32 inclui rotinas de controle dos canais de comunicação I²C, SPI, LoRa e Wi-Fi e o display.

Para a conexão com a nuvem, utiliza-se um canal Wi-Fi para que, via protocolo MQTT sejam enviados dados para a plataforma TagoIO, ou via protocolo HTTP sejam enviados estes mesmos dados para a plataforma InterSCity.



Figura 32 - Experimentos em campo do SMA

Fonte: autor.

As Figura 33 a Figura 36 apresentam exemplo de telas de visualização dos dados recebidos nas plataformas InterSCity e TagoIO.

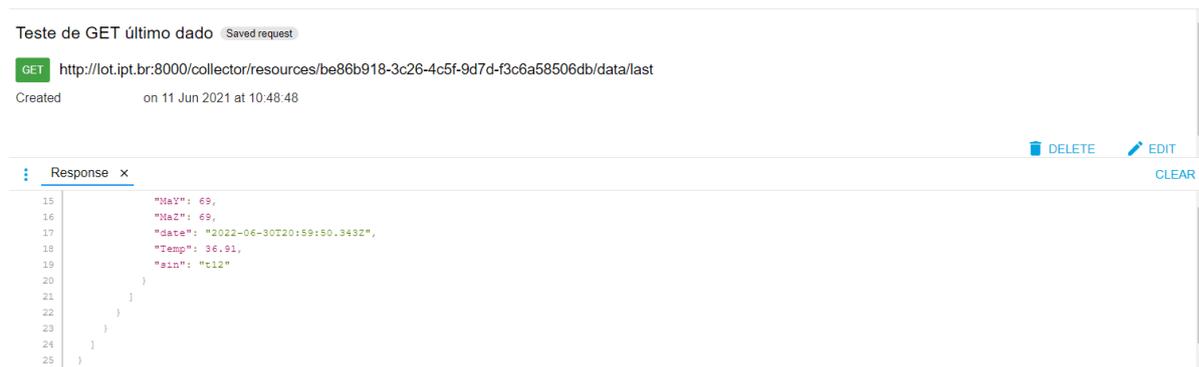


Figura 33 - Tela de visualização dos dados recebidos na plataforma InterSCity
Fonte: autor com base em InterSCity (2021).

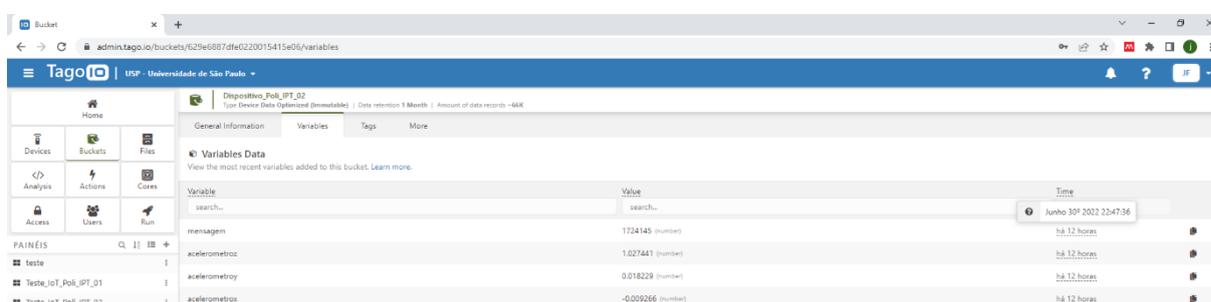


Figura 34 - Tela de visualização das tags na plataforma TagoIO
Fonte: autor com base em TagoIO (2021).

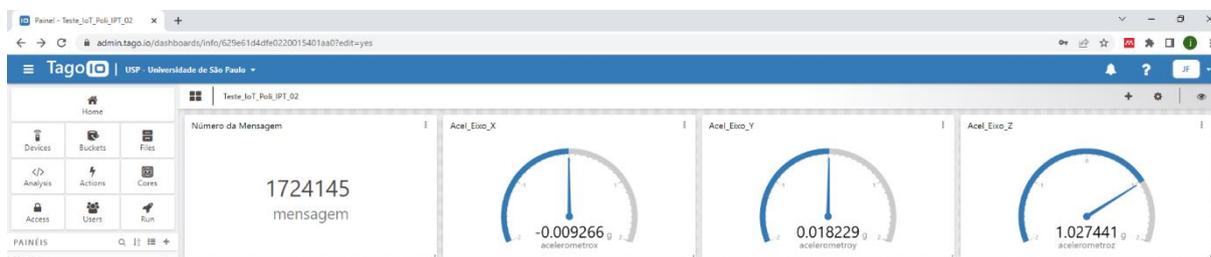


Figura 35 - Tela de visualização do painel de controle na plataforma TagoIO
Fonte: autor com base em TagoIO (2021).

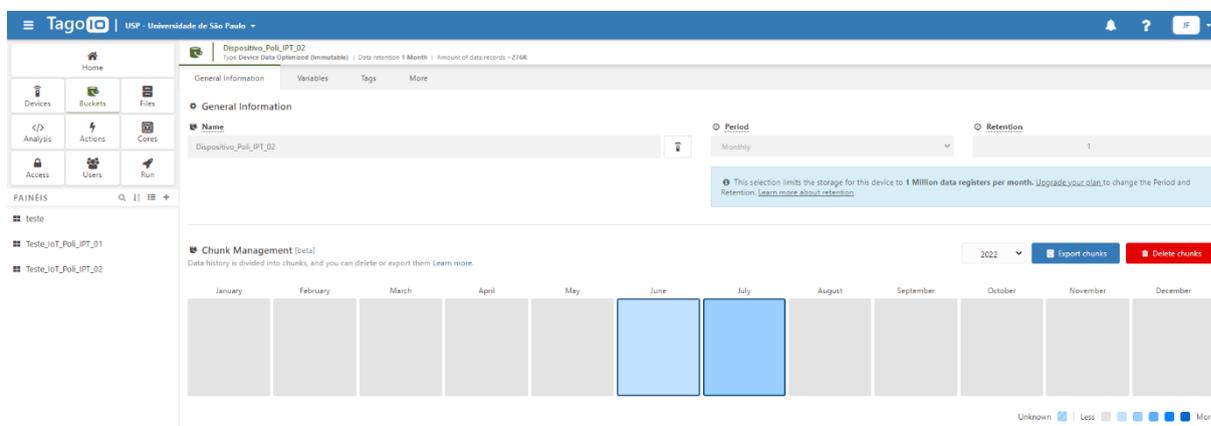


Figura 36 - Dados sendo armazenados na plataforma TagoIO
Fonte: autor com base em TagoIO (2021).

5.1.4.2 Experimentos de avaliação de consumo de energia do módulo do SMA instalado em uma árvore

Com o propósito de levantar o consumo de energia associado ao processamento das rotinas desenvolvidas para o protótipo instalado na árvore, de modo a estimar a autonomia da sua bateria, foi desenvolvido um protótipo de um dispositivo para medir e armazenar os dados de corrente e tensão do módulo avaliado, orientando, ainda, pontos que poderiam ser aprimorados e otimizados no sentido de reduzir ainda mais o consumo de energia.

Como mostrado na Figura 37, foram utilizados os seguintes módulos no protótipo:

- a) Um controlador Arduino Mega 2560 R3.
- b) Um módulo com memória micro SD.
- c) Três sensores de corrente e tensão ACS712 com variação de medição entre $\pm 5A$, $\pm 20A$ ou $\pm 30A$.
- d) Um sensor de corrente INA219 com variação de medição entre $\pm 3,2A$.
- e) Um *display* LCD 2004A 20x4.
- f) Um controlador Arduino Mega 2560 R3.

Esse protótipo mediu o consumo, em laboratório, de módulo igual ao instalado em uma árvore. Em cada experimento foram coletadas 400 amostras do consumo de corrente, iniciando os testes com a execução de todas as rotinas. Para cada novo teste foram retiradas uma a uma dessas rotinas, verificando o seu impacto no consumo.

Para verificar a consistência dos testes, foram feitas medições com o multímetro Minipa modelo ET – 1002, obtendo-se o valor de tensão de 4,02 VCC e de corrente entre 30 mA a 170 mA. Foi verificada nesta medição a similaridade dos valores destes dados como os coletados via sensor de corrente.

A título de comparação, foi levantado o consumo do processador ESP32, que segundo o seu datasheet ele pode variar de 30 mA a 68 mA quando em operação (ESPRESSIF, 2021; HELTEC.ORG, 2022).

Outro dado levantado foi o consumo do canal de comunicação LoRa, que pode variar de 50 mA a 130 mA em transmissão, dependendo da configuração da potência do transmissor (HELTEC.ORG, 2022).

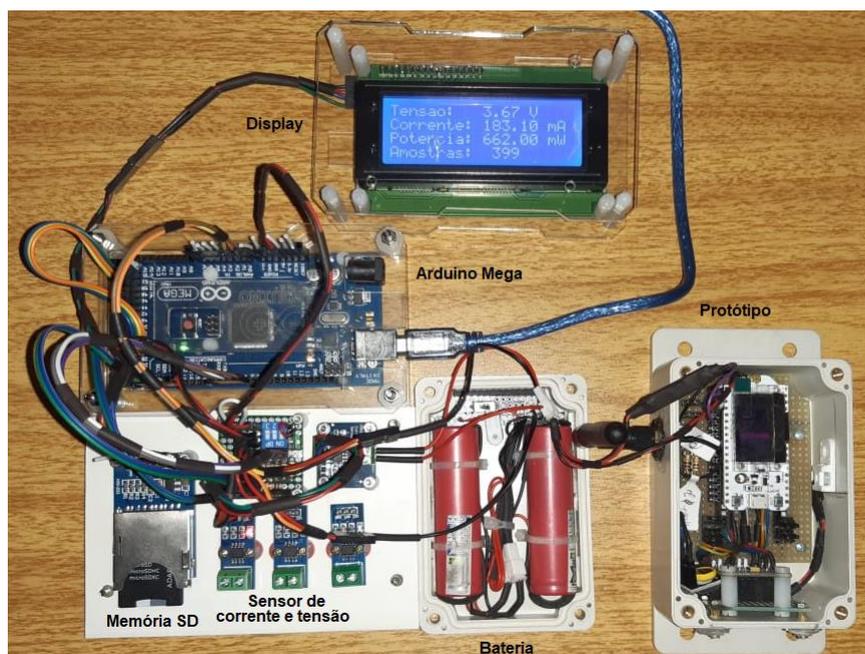


Figura 37 - Protótipo desenvolvido para a análise do consumo do módulo do SMA instalado em árvores

Fonte: autor.

Com o protótipo executando o mesmo programa instalado em campo, foram realizados cinco testes, denominados de 01, 02, 03, 04 e 07, em que em cada um, foram retiradas rotinas ou alterados os parâmetros de rotinas, com a intenção de verificar o quanto cada uma influenciava no consumo de corrente. Também foram realizados dois testes (Teste 05 e Teste 06) com os protótipos executando um programa de transmissão e recepção de dados via canal LoRa, para verificação da influência do tamanho da carga útil das mensagens trocadas entre os protótipos, no consumo de corrente.

O Quadro 8 mostra as rotinas ativas em cada teste.

O Gráfico 23 mostra o consumo de corrente das várias rotinas e módulos presentes no protótipo, este corresponde aos dados levantados no Teste 01, Todos os demais testes, apresentam gráficos similares a este.

Analisando-se o Gráfico 23 nota-se que a corrente média consumida do ESP32 é de 52,79 mA, dentro da faixa de variação e um pouco acima da média apresentada pelo fabricante (ESPRESSIF, 2021). No caso do transmissor LoRa, tem-se a média de 180,89 mA e ao se descontar a corrente média consumida do ESP32, obtém-se o valor de 128,10 mA, também dentro da faixa de variação, mas no limite superior desta, como apresentado pelo fabricante (HELTEC.ORG, 2022). Isto se deve à configuração de 20 dB para transmissão desta simulação.

Teste	Rotina ativas nos experimentos
01	Verifica o consumo com todas as rotinas em execução (coletas de dados do módulo MPU 9250, e do módulo RTC, sinalização de bateria, média móvel e <i>display</i>). Potência de transmissão dos dados: 20 dB.
02	Em relação ao Teste 01 foi retirada a rotina do módulo RTC. Potência de transmissão dos dados: 20 dB.
03	Em relação ao Teste 02 foram retiradas as rotinas sinalização de bateria e de média móvel. Potência de transmissão dos dados: 20 dB.
04	Em relação ao Teste 03 foi retirada a rotina de controle do <i>display</i> . Potência de transmissão dos dados: 20 dB.
05	Verifica o consumo, executando um programa de transmissão e recepção de dados via canal LoRa, transmitindo 48 Bytes. Potência de transmissão dos dados: 20 dB.
06	Verifica o consumo, executando um programa de transmissão e recepção de dados via canal LoRa, transmitindo 24 Bytes. Potência de transmissão dos dados: 20 dB
07	Idêntico ao Teste 04, alterando a potência de transmissão dos dados: 10 dB.

Quadro 8 - Descrição das rotinas ativas nos experimentos de consumo

Fonte: autor.

Outro ponto a ser observado no Gráfico 23 é a corrente média consumida no conjunto ESP32 e LoRa, que é de 66,88 mA, já que com este valor se pode determinar o tempo de autonomia das baterias.

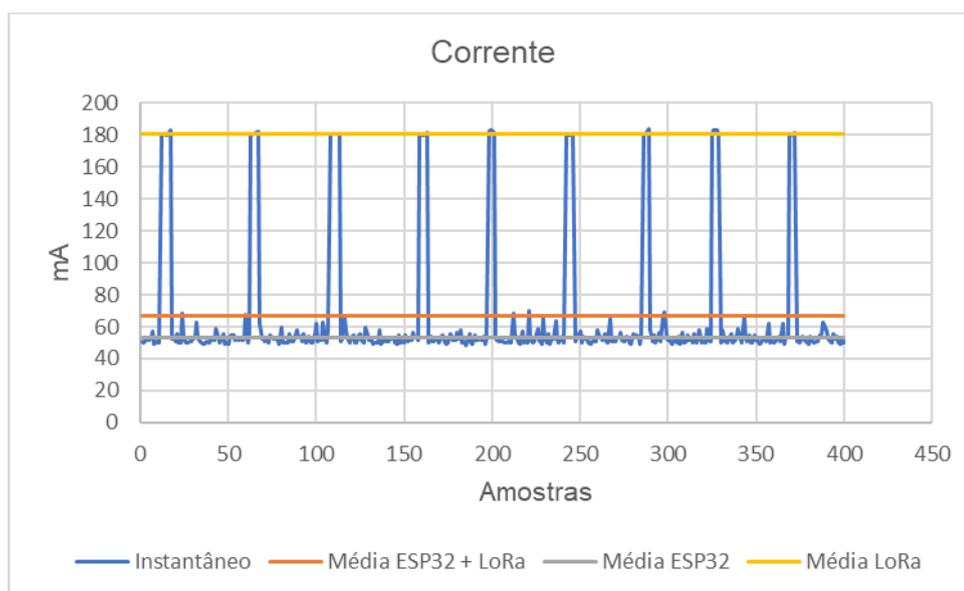


Gráfico 23 - Consumo de corrente no Teste 01

Fonte: autor.

Na Tabela 10 e no Gráfico 24 são apresentadas as médias de consumo de corrente dos testes. Como é mostrado, a cada retirada ou alteração dos parâmetros

de uma rotina, há a diminuição do consumo de corrente no protótipo, que na média fica com um valor próximo de 14 mA, e que corresponde a 20% do maior consumo médio.

Média					
Teste	Item	ESP32 (mA)	ESP32 + LoRa (mA)	LoRa (mA)	
01	01	52,79	66,88	180,89	
02	02	51,77	61,14	180,92	
03	03	52,55	61,60	181,71	
04	04	48,56	57,46	175,80	
07	05	48,19	53,17	128,00	
05	06	51,59	62,17	183,77	
06	07	53,25	59,51	185,06	

Tabela 10 - Médias de consumo de corrente dos testes

Fonte: autor.

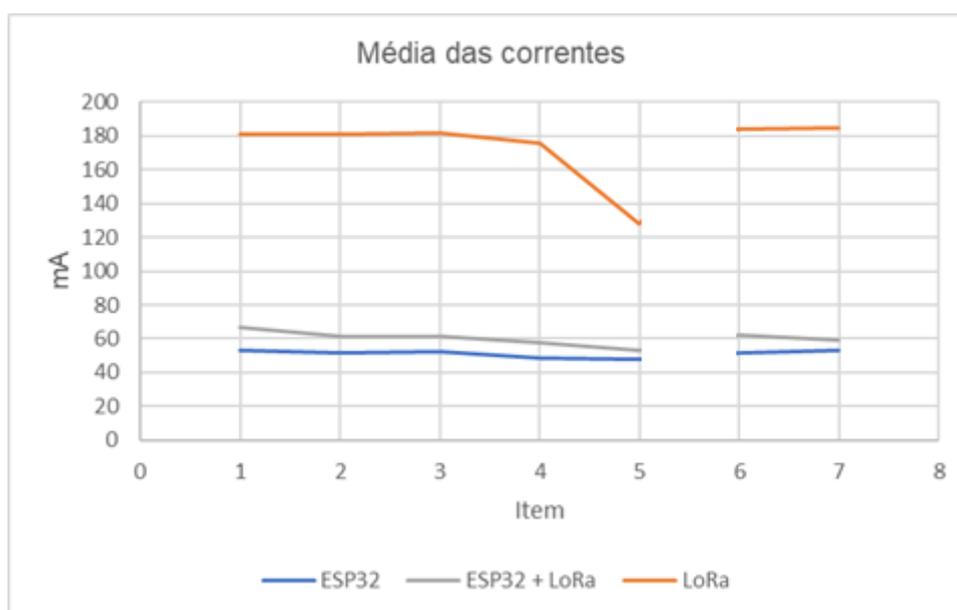


Gráfico 24 - Médias de consumo de corrente dos testes

Fonte: autor.

No Gráfico 25, foi apresentado apenas a média dos pulsos de transmissão do canal LoRa em cada simulação. No Teste 01 o pulso se manteve por 131 ms e com consumo próximo a 180 mA. Observando os Testes 02, 03, 04 e 07, há uma diminuição por volta 50 ms (40%) no tempo em que é mantida a transmissão, isto ocorreu com a retirada da rotina do módulo RTC e seus dados, diminuindo assim a carga útil de transmissão.

No caso do Teste 07 em relação os Testes 01 a 04, pode-se observar uma diminuição no consumo de 53 mA, no pulso de transmissão. Aqui houve a diminuição de 20 dB para 10 dB na potência de transmissão.

No Teste 06 em relação ao 05, pode-se observar a diminuição de 48 ms (50%), na largura do pulso de transmissão e isto ocorre em consequência da diminuição de 48 Bytes para 24 Bytes na carga útil de transmissão.

Destes testes, pode ser observado que tanto na configuração da carga útil transmitida como da potência, tem-se como diminuir ou aumentar a corrente consumida na transmissão.

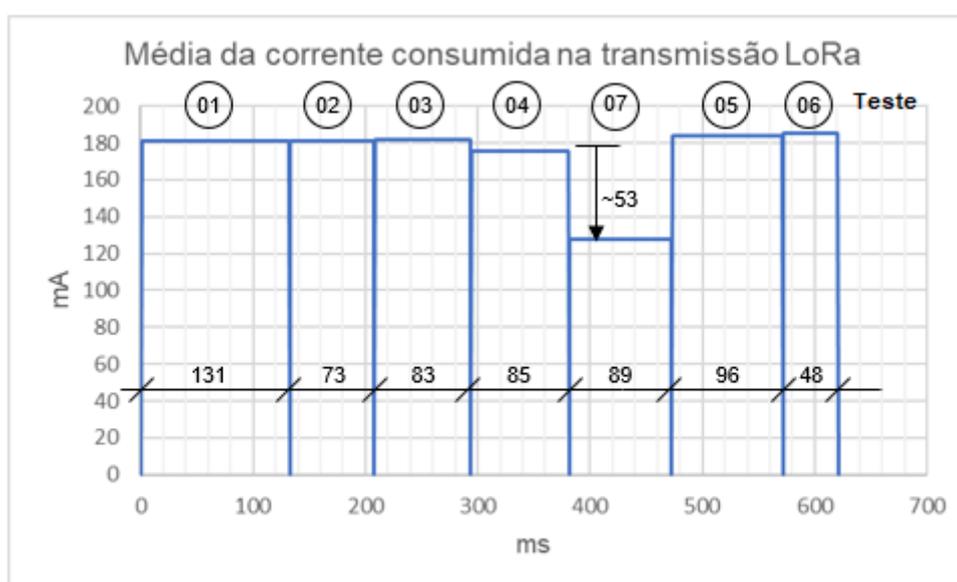


Gráfico 25 - Média da corrente consumida na transmissão LoRa

Fonte: autor.

No Gráfico 26, observa-se quantas horas de duração das baterias podem ser acrescentadas ao se retirar uma rotina, mudar um parâmetro ou a carga útil da mensagem.

Tem-se no gráfico a curva azul com os testes 01, 02, 03, 04 e 07. Neste programa que é executado em campo, o tempo de operação das baterias vão de 62 até 76 horas, com um ganho de mais de meio dia. Com a curva laranja, relativa à execução do programa de transmissão com uma carga útil de 48 bytes o tempo de operação fica próximo de 66 horas, chegando a 69 horas com 24 bytes.

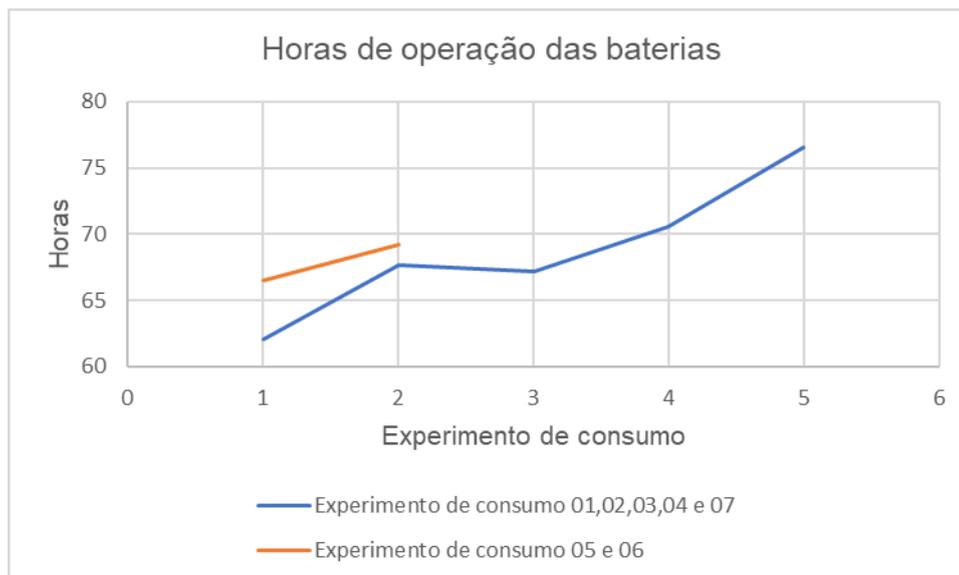


Gráfico 26 - Horas de duração das baterias

Fonte: autor.

5.1.4.3 Experimento de RTC com *TimeStamp*

O RTC tem a sua importância em aplicações de IoT, já que determina a data e hora da ocorrência dos eventos. Foram feitos dois experimentos para avaliar o RTC: um utilizando o módulo DS3231 e outro com o protocolo *Network Time Protocol* (NTP).

1º Experimento – com o módulo DS3231, utilizando a biblioteca RTCLib.h, cujo autor é a *Adafruit Industries*, há a disponibilização via interface de comunicação I²C, dos dados de data (ano, mês e dia) e hora (hora, minuto e segundo).

Este módulo foi instalado no protótipo instalado nas árvores, para incorporar o carimbo de data/hora, aos dados recebidos, também via I²C do módulo MPU9250. Esses dados, foram formatados de acordo com a norma ISO 8601, emitida pela International Organization for Standardization (ISO).

Com a formatação, estes dados são incorporados aos dados recebidos do MPU9250 e enviados para o outro módulo do SMA instalado no laboratório. Aqui alguns pontos a serem observados: quando foi realizado o empacotados dos dados e enviados via protocolo LoRa, estes ao serem recebidos no outro protótipo, são desempacotados, e a data e hora, que estavam no formato de dado *string*, tiveram a

sua informação deteriorada, o mesmo ocorrendo quando se mudou para o formato *char*. Para se ter os dados com a informação correta nos dois protótipos, houve a necessidade de transformar os dados de ano, mês, dia, hora, minuto, segundo e milissegundo para os tipos *int* e *unsigned long*. Desta forma, as informações se apresentaram sem deterioração, ao serem recebidas no módulo do laboratório.

Com isto tem-se um acréscimo de consumo de energia, pelo processamento necessário para os ajustes destes dados. Na Figura 38 é mostrado o módulo DS3231 e sua localização no protótipo.

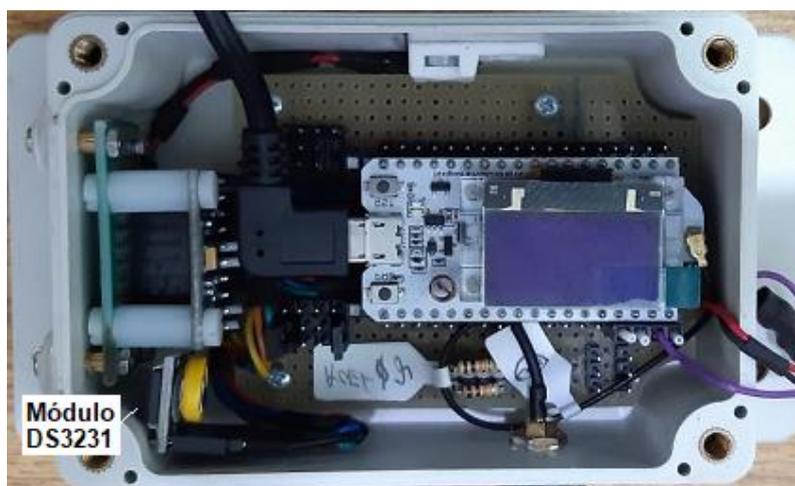


Figura 38 - Mostra o módulo DS3231 e sua localização

Fonte: autor.

2º Experimento – o protocolo NTP, foi utilizado no protótipo do laboratório, com a biblioteca NTPClient.h, que se conecta, via WiFi, a um servidor de horário do protocolo NTP na Internet, mantendo este sincronizado.

Os dados de data e hora recebidos pelo protocolo NTP, foram formatados de acordo com a norma ISO 8601, e incorporados aos dados do MPU 9250, recebidos via protocolo LoRa, e enviados à nuvem. O carimbo de data/hora deste método tem o acréscimo do tempo de latência na comunicação do protocolo LoRa. Estes dados formatados estão mostrados na Figura 39.

Com a utilização do protocolo NTP no módulo do SMA do laboratório, é possível economizar a energia da bateria do módulo do SMA instalado em árvores, devido à retirada do módulo DS3231 e seu respectivo processamento, e envio, via LoRa, destes dados, como mostrado no item anterior do experimento de consumo de energia.

O *chirp*, é um sinal senoidal cuja frequência aumenta (*up-chirp*) ou diminui (*down-chirp*), conforme a informação é codificada, em função dos bits a serem transmitidos.

O fator de espalhamento é utilizado no controle da taxa de varredura *chirp*, o que significa que ele controla a velocidade de transmissão de dados. Portanto um SF de valor baixo, proporciona *chirps* mais rápidos, tendo-se como resultado uma taxa de transmissão de dados mais alta, obtendo-se um resultado oposto para um SF de valor alto. Um ponto a ser observado é que para cada acréscimo do SF em uma unidade (por exemplo, do valor 6 para 7), a taxa de varredura *chirp* cai pela metade, bem como a taxa de transmissão de dados sofre a mesma redução.

Estas alterações do SF, estão relacionadas também com a alteração do alcance a ser atingido na transmissão.

A rede também usa fatores de espalhamento para controlar o congestionamento. Segundo Sun et al. (2017), os fatores de espalhamento são ortogonais, de modo que os sinais modulados com diferentes fatores de espalhamento e transmitidos no mesmo canal de frequência ao mesmo tempo, não interferem entre si.

b) **BW** (*Bandwidth*) ou Largura de banda na comunicação. No LoRa, ela pode variar entre os valores de 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz para um mesmo SF e estes valores dependem dos parâmetros regionais (THETHINGSNETWORK.ORG, 2022).

c) **CR** (*Code Rate*) ou Taxa de código na comunicação. No LoRa, ele pode variar entre os valores de 0, 1, 2, 3 ou 4 para a mesmo SF. Este valores definem o grau utilizado para a detecção dos erros em cada transmissão de dados, sendo implementada pela técnica *Forward Error Correction* (FEC) (MAURYA; SINGH; KHERANI, 2022). A Tabela 11 mostra o quanto a transmissão de dados é alterada ao se alterar o valor do CR.

CR	0	1	2	3	4
Taxa de codificação	1	4/5	4/6	4/7	4/8
Taxa de sobrecarga acrescida	0	0,25	0,5	0,75	1
Taxa de sobrecarga total	1	1,25	1,5	1,75	2

Tabela 11 - Taxas de código para controle de erro na transmissão

Fonte: autor com base em Sun et al. (2017).

A Figura 40 mostra a relação de como, na transmissão dos dados via LoRa, as variáveis BW, CR e SF, influenciam os valores da taxa de bits, da energia gasta e do tempo da mensagem no ar.

A Tabela 12 completa as informações da taxa de bits, mostradas na Figura 40, com relação as variáveis BW, CR e SF.

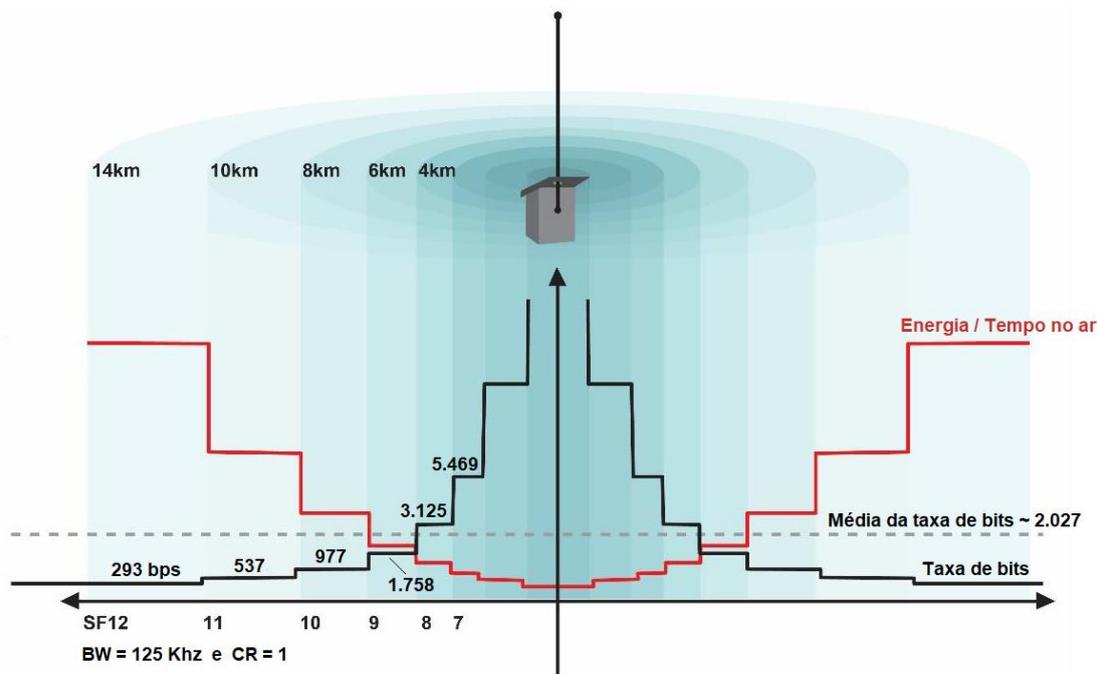


Figura 40 - Relação da taxa de bit x SF - resultado dado pela fórmula LoRa data rate
Fonte: autor com base em Semtech Corporation (2019b).

		Taxa de bits						
		SF	12	11	10	9	8	7
BW = 125 KHz	CR = 1		293	537	977	1,758	3,125	5,469
	CR = 4		183	336	610	1,099	1,953	3,418
BW = 500 KHz	CR = 1		1,171	2,148	3,906	7,031	12,500	21,875
	CR = 4		732	1,343	2,441	4,395	7,813	13,672

Tabela 12 - Relação da taxa de bit x SF - resultado dado pela fórmula LoRa data rate (R_b)

Fonte: autor.

A Tabela 13, mostra as características de modulação LoRa em uma forma genérica. Para cada região estes dados são definidos no documento Parâmetros Regionais LoRaWAN, disponível na LoRa Alliance® (LORA ALLIANCE, 2021). Neste documento é definido o tamanho máximo da carga útil do usuário em bytes, na transmissão ou recepção das mensagens via um rádio LoRa.

Taxa de dados (DR)	Fator de propagação (SF)	Frequência do canal	Uplink ou downlink	Taxa de Bit (bit/s)	Tamanho máximo da carga útil do usuário (bytes)
0	SF10	125 kHz	<i>Uplink</i>	980	11
1	SF9	125 kHz	<i>Uplink</i>	1,760	53
2	SF8	125 kHz	<i>Uplink</i>	3,125	125
3	SF7	125 kHz	<i>Uplink</i>	5,470	242
4	SF8	500 kHz	<i>Uplink</i>	12,500	242
5-7					
8	SF12	500 kHz	<i>Downlink</i>	980	53
9	SF11	500 kHz	<i>Downlink</i>	1,760	129
10	SF10	500 kHz	<i>Downlink</i>	3,125	242
11	SF9	500 kHz	<i>Downlink</i>	5,470	242
12	SF8	500 kHz	<i>Downlink</i>	12,500	242
13	SF8	500 kHz	<i>Downlink</i>	21,900	242

Tabela 13 - Características de modulação LoRa

Fonte: autor com base em Semtech Corporation (2020).

A transmissão e recepção via rádio LoRa, tem que ser bem planejada, para se ter a melhor eficiência, com o consumo de energia em sua operação.

Utilizando-se a rede LoRa em uma configuração ponto a ponto foi realizado um experimento na área de abrangência do IPT, para avaliar a relação entre a potência de transmissão e a distância máxima de recebimento do sinal, tanto com obstáculos como sem obstáculos.

Os parâmetros utilizados neste experimento estão apresentados na Tabela 14, sendo que o Gain LoRa é a potência para transmissão LoRa do emissor, em dB.

Parâmetros	Valor
CR	5
SF	7
BW	125
Gain LoRa	20

Tabela 14 - Parâmetros LoRa utilizados no experimento de distância e potência

Fonte: autor.

Para este experimento elaborou-se um protótipo, para a geração automática de informações, como a localização e potência de recebimento dos dados no protótipo, via canal LoRa. Assim, pode-se avaliar a eficiência desta rede. A Figura 41 mostra os módulos utilizados neste experimento.



Figura 41 - Módulos utilizados no experimento de comunicação
Fonte: autor.

A Figura 42 mostra o protótipo elaborado para este experimento.

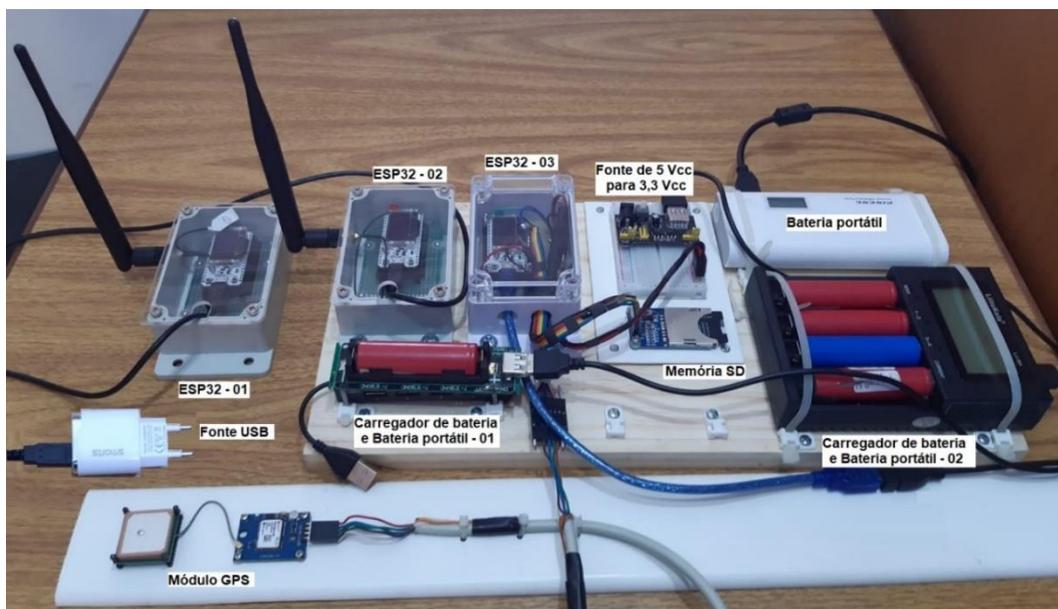


Figura 42 - Dispositivos utilizados no experimento de comunicação
Fonte: autor.

Foram utilizados os seguintes módulos no protótipo:

- a) Três módulos ESP32 a Heltec, numerados em 01, 02 e 03.
- b) Uma fonte de 5 VCC para 3,3 VCC.
- c) Uma fonte USB.
- d) Um módulo de memória micro SD.
- e) Uma bateria portátil.
- f) Dois carregadores de bateria e bateria portátil.
- g) Um módulo *Global Positioning System* (GPS).

A função de cada módulo é:

1ª Função – O ESP32 – 01 tem a função de montar uma mensagem de 48 bytes, correspondendo à maior quantidade de dados que uma árvore pode gerar no experimento, e transmiti-la, via canal LoRa, para o ESP32 – 02.

2ª Função – O ESP32 – 02 tem a função de receber a mensagem de 48 bytes enviada pelo ESP32 – 01, verificar a potência de seu recebimento, formatar os dados e enviá-los, via canal ESP-NOW, para o ESP32 – 03. A razão de se utilizar o ESP32 – 03 foi, devido ao fato de a interface serial SPI nos dois primeiros ESP32 serem usadas para a comunicação LoRa, e tem-se a necessidade de utilizar este mesmo canal para utilizar o módulo de memória micro SD.

3ª Função – O ESP32 – 03 tem a função de receber os dados formatados do ESP32 – 02, receber os dados do módulo GPS, formatar o conjunto destes dados e gravar estes na memória micro SD. Foi criado um arquivo de dados para armazená-los, e cada dado tem as informações geradas no processo de coleta para gravação, mostradas no Quadro 9:

Informação	Descrição
1	Número da mensagem recebida
2	Potência (em dB) de recebimento da mensagem
3	Número de bytes na mensagem entre os módulos ESP32 – 01 e 02
4	Data enviada pelo GPS no momento da formatação dos dados
5	Hora enviada pelo GPS no momento da formatação dos dados
6	Longitude enviada pelo GPS no momento da formatação dos dados
7	Latitude enviada pelo GPS no momento da formatação dos dados
8	Número de satélites que o GPS acessou no momento da formatação dos dados
9	Altitude enviada pelo GPS no momento da formatação dos dados
10	Sinalização de gravação do dado na memória micro SD

Quadro 9 - Descrição das informações geradas na coleta dos dados no experimento de distância e potência.

Fonte: autor.

4ª Função – A fonte de 5 VCC para 3,3 VCC tem a função de alimentar o módulo GPS.

5ª Função – A fonte USB tem a função de alimentar o ESP32 - 01.

6ª Função – A bateria portátil tem a função de alimentar o ESP32 - 02.

7ª Função – O carregador de bateria portátil e bateria portátil 01 tem a função de alimentar a fonte de 5 VCC para 3,3 VCC.

8ª Função – O carregador de bateria portátil e bateria portátil 02 tem a função de alimentar o ESP32 - 03.

Este experimento foi realizado, iniciando-se a movimentação a partir do local da árvore selecionada para os experimentos no IPT, movimentando-se com um veículo ao longo do IPT e em algumas partes da Cidade Universitária da USP.

Na Figura 43, é mostrado o local de instalação do ESP32 – 01 e sua antena perto do laboratório, e também o protótipo, GPS e antena de recepção no automóvel.

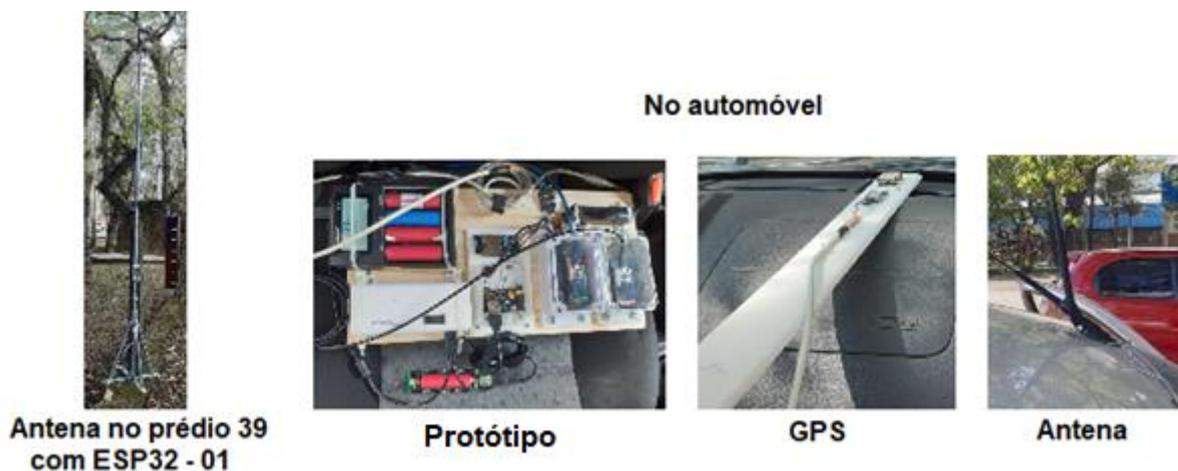


Figura 43 - Local de instalação dos dispositivos no campo e no automóvel
Fonte: autor.

Os dados obtidos neste levantamento foram colocados em um mapa obtido por meio do Google, como mostrado na Figura 44.



Figura 44 - Mapa obtido no Google com os pontos coletados no experimento de comunicação
Fonte: autor.

Na Tabela 15 foram relacionados os pontos que mais se distanciaram do ponto um inicial nas várias direções. Como se pode observar, o ponto 76, com 645 m, foi a maior distância obtida, e o ponto 34, com 368 m, foi a menor distância. A área de cobertura foi de 0,425 km² até 1,131 km². Neste experimento se nota que toda a área do IPT pode ser coberta por um único ponto de recepção de dados da rede LoRa.

Ponto inicial	Ponto final	Valor (m)	Área em km ² coberto (A = πr^2)	Potência do sinal (dB), ponto final
1	12	443	0,617	-117
1	55	432	0,586	-117
1	65	369	0,428	-117
1	66	600	1,131	-117
1	75	644	1,303	-118
1	76	645	1,307	-118
1	34	368	0,425	-118

Tabela 15 - Pontos com a maior distância obtida nas várias direções no experimento de distância e potência

Fonte: autor.

5.1.4.5 Experimento de mensagens de sinalização e análise dos dados na nuvem

Neste experimento foi estudada a sinalização de falha de comunicação dos dispositivos do módulo do SMA instalado em uma árvore, utilizando as estruturas presentes em plataforma da nuvem.

Foram utilizadas duas mensagens: uma que sinaliza a possibilidade de ruptura ou queda da árvore, que ocorre quando um dos eixos do acelerômetro apresenta uma variação de $\pm 0,02$ g, e a outra sinaliza a perda de comunicação entre os dispositivos instalados em uma árvore com a plataforma de conexão com a nuvem. Em ambos os casos foram utilizados os recursos da plataforma TagoIO (TAGOIO, 2021).

Na mensagem de ruptura ou queda da árvore, foi utilizado o recurso *actions* (ações) do TagoIO, e este pode criar um gatilho (evento), que pode ser: (i) o envio de um *Electronic Mail* (e-mail), (ii) o envio de um *Short Message Service* (SMS), e (iii) a execução de *scripts* utilizando o recurso de análise, entre outros.

A primeira mensagem é um alerta que indica que a árvore sofreu uma inclinação em relação ao seu ponto de repouso, e que esta variação pode gerar uma ruptura ou queda da árvore. Para isso, foi realizada a configuração mostrada na Figura 45, tanto para o envio de alerta para um e-mail como para um SMS.

A Figura 46, mostra as telas com a mensagem “O ponto de ruptura da árvore para o eixo X, foi ultrapassado!!!”, recebida em um e-mail e por SMS, e o gráfico com a oscilação ocorrida.

A segunda mensagem foi gerada com o recurso de análise do TagoIO e foi utilizada a mensagem “Alerta dispositivo em off-line”, sendo configurada a mensagem de alerta para ser recebida em um e-mail e por SMS, nas Figura 47 e Figura 48.

Na Figura 49, são mostradas as mensagens de “Alerta dispositivo em off-line” tanto no e-mail como no SMS.

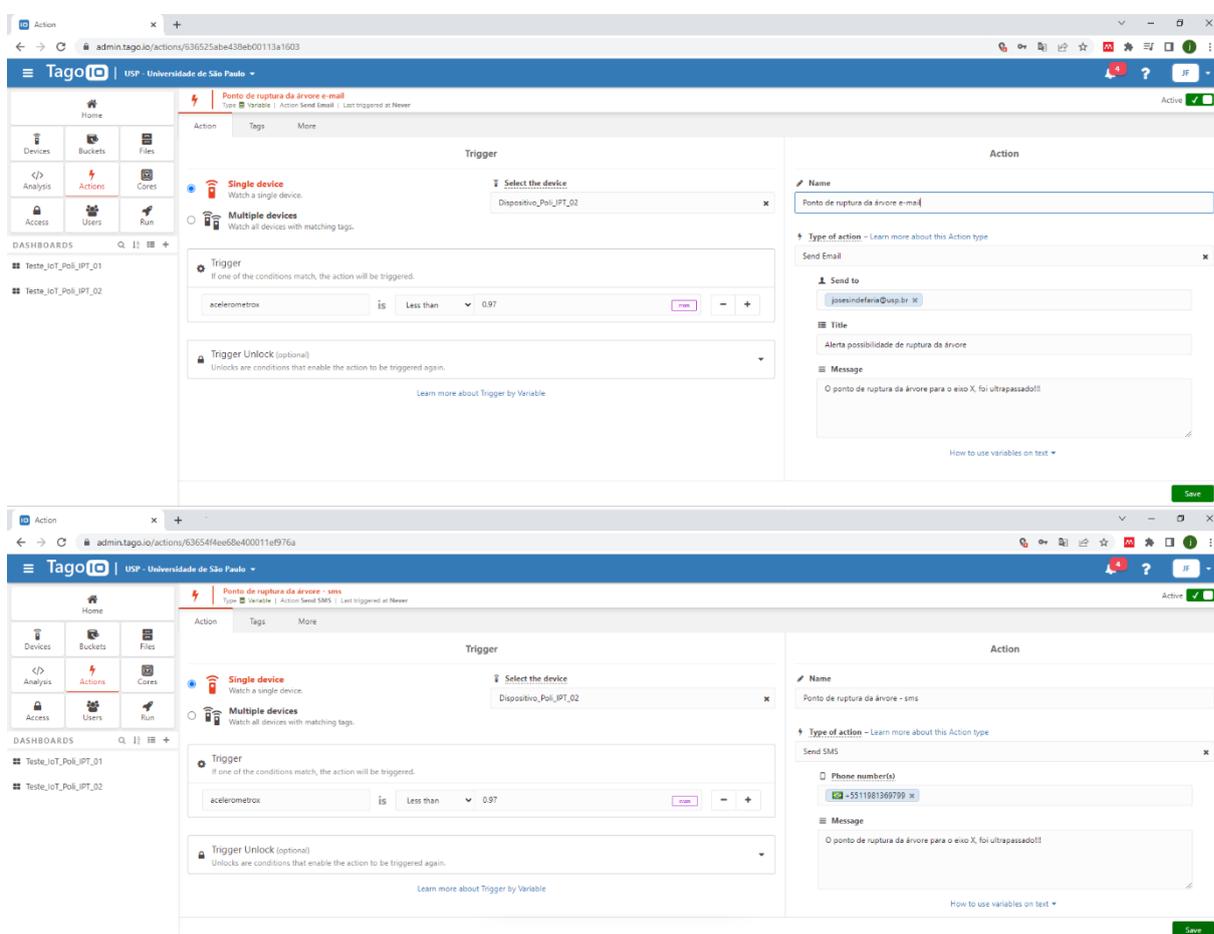


Figura 45 - Configuração da mensagem de alerta do Tagolo para uma possível ruptura da árvore

Fonte: autor com base em Tagolo (2021).

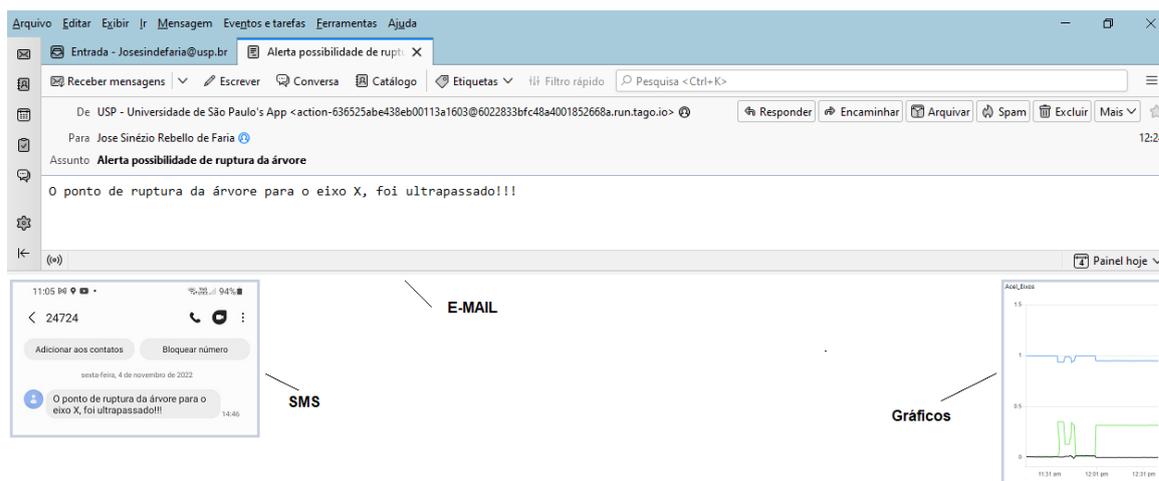


Figura 46 - Mensagem de alerta de ruptura de árvore enviado para e-mail e SMS
Fonte: autor com base em TagIO (2021).

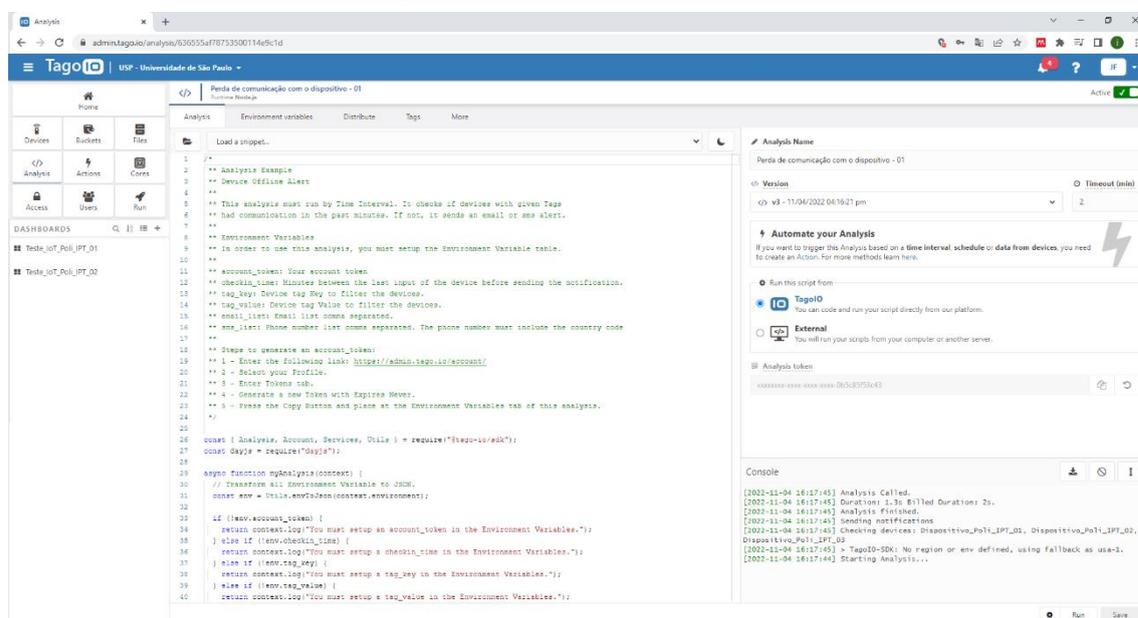


Figura 47 - Configuração do recurso de análise do TagIO com mensagem de alerta de dispositivo off-line
Fonte: autor com base em TagIO (2021).

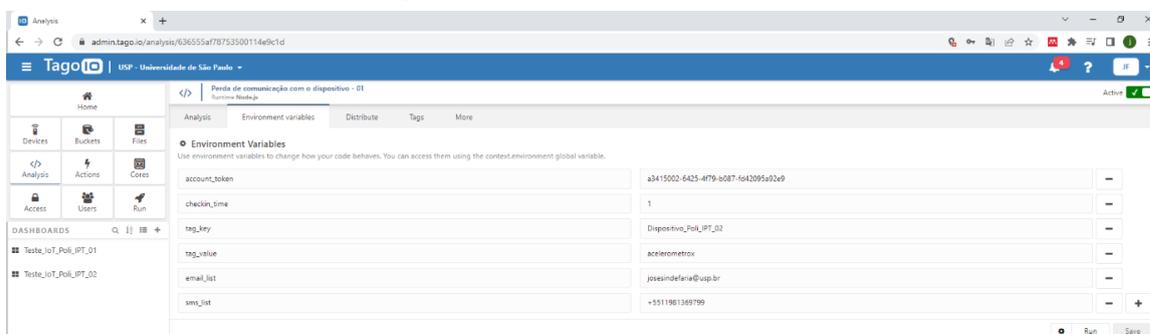


Figura 48 - Configuração do recurso de análise do TagIO com mensagem de alerta de dispositivo off-line
Fonte: autor com base em TagIO (2021).



Figura 49 - Resultado da análise com mensagem de alerta de dispositivo em off-line enviada para um e-mail e um SMS

Fonte: autor com base em TagIO (2021).

Estes são alguns dos recursos que podem ser utilizados nas plataformas na nuvem.

5.1.4.6 Experimento do algoritmo para a aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore

Neste experimento foi realizada uma estimativa de consumo do protótipo instalado em campo, utilizando o algoritmo para a aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore. Nas Tabela 16, 17 e 18 são apresentados o consumo em operação dos CIs do MPU 9250, ESP32 e LoRa.

Modo	Taxa de atualização (Hz)	Consumo
Normal	-	450 μ A
Baixa potência	0,98	8,4 μ A
Baixa potência	31,25	19,8 μ A

Tabela 16 - Consumo do CI MPU 9250

Fonte: autor com base em Invensense (2022).

Modo	Consumo
Normal	30 mA ~ 68 mA
Dormir	150 μ A

Tabela 17 - Consumo do CI ESP32

Fonte: autor com base em Espressif (2021).

Modo	Transmissão (dB)	Consumo
LoRa	20	130 mA

Tabela 18 - Consumo do CI LoRa

Fonte: autor com base em Heltec.org (2022).

Na estimativa do processamento do ESP32 foi utilizado o valor de 49 mA, que é a média entre o valor mínimo e máximo. Na transmissão do LoRa tem-se a soma do valor de 130 mA ao valor do processamento, e quando passa para o modo de baixo consumo (chamado de dormir) passa para 600 μ A, que é a soma do 150 μ A do ESP32 com os 450 μ A do MPU 9250. O resultado da estimativa é mostrado no Gráfico 27.

Com o valor médio de consumo em 7 mA e utilizando as mesmas baterias do experimento de consumo de energia, pode-se projetar a sua duração para 714 horas, próximo de um mês de operação do protótipo, que é quase 10 vezes o valor de 76 horas, obtido naquele experimento.

Isto pode ser melhorado conforme os experimentos apontem para um maior espaçamento entre os picos de processamento e transmissão de dados.

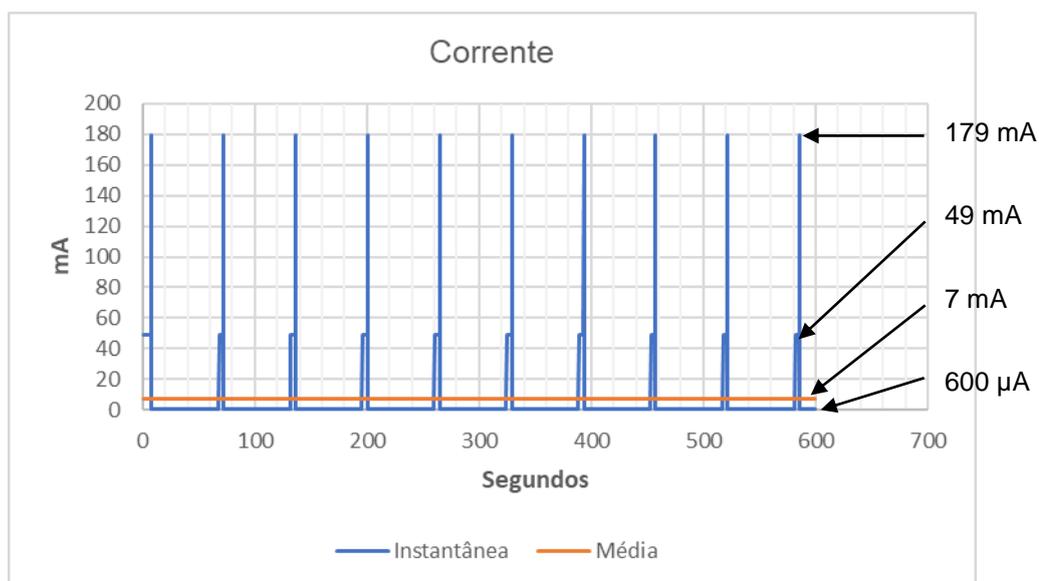


Gráfico 27 - Estimativa do consumo do algoritmo para a aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore
Fonte: autor.

5.2 SÍNTESE DOS EXPERIMENTOS

O primeiro experimento realizado foi em laboratório, que constou de cinco etapas, proporcionando a avaliação dos protótipos, do ponto de vista do hardware, do software, dos protocolos e das plataformas empregadas.

Nos experimentos em campo, que visaram o levantamento de algumas características de uma árvore, os dados foram coletados a partir de vários instrumentos nela instalados, que foram: acelerômetros triaxiais, extensômetros, sensores de deslocamentos, anemômetro e anemoscópio. Os dados coletados foram armazenados em arquivos para possibilitar que pesquisadores da equipe do projeto possam futuramente realizar as suas análises. Dois experimentos foram realizados: o *pulling test* (estático e dinâmico), realizado em um só dia, e o levantamento de dados contínuo, no qual a coleta dos dados foi realizada em um período de alguns meses.

Nos experimentos com o acelerômetro triaxial MPU 9250 foi verificado que ele atende à tolerância indicada pelo fabricante, mesmo com a dispersão de suas leituras. Quando colocadas estas leituras em um gráfico, observa-se que a dispersão pode influenciar no resultado de uma análise, do ponto de queda ou ruptura de uma árvore. Então, para eliminar este risco de influência, foi feito o experimento com a implementação de uma rotina de média móvel, que melhorou a acurácia nas leituras.

Com os experimentos realizados em campo com estruturas do paradigma da IoT, foi mostrado que é viável fazer um SMA utilizando sensores inerciais nesse modelo. Nestes experimentos foram utilizados acelerômetros triaxiais, para gerar dados em campo e estes foram encaminhados à nuvem. Aqui foram detectados alguns problemas no protótipo, como: (i) a parada aleatória do processamento do ESP32, que foi corrigido com uma rotina de *watchdog timer* para reinicializar o módulo, e (ii) o consumo alto de energia, contornado pelo emprego de uma fonte de energia conectada à rede elétrica.

No sentido de se verificar o consumo de energia foi implementado um protótipo para possibilitar o levantamento do consumo individual em cada rotina. Estas informações serão úteis para a busca de otimizações em protótipos futuros.

Para verificar o comportamento do RTC na ocorrência de eventos foi utilizado o módulo DS 3231 incorporado ao protótipo em campo e implementadas as rotinas necessárias para obtenção da data e hora. No experimento foi mostrado que a utilização do protocolo NTC nos *gateways*, produz os mesmos resultados, eliminando a necessidade de utilização do módulo DS 3231 e, como consequência, a diminuição do consumo de energia no protótipo.

O experimento do alcance do envio de mensagens mostrou que a rede LoRa pode transmitir dados a distâncias significativas, e mesmo o emprego de um único *gateway* possibilita a cobertura de uma área ampla, como a área do IPT.

Foram feitos dois experimentos de sinalização de mensagem de alerta, um com a mensagem de “O ponto de ruptura da árvore para o eixo X, foi ultrapassado!!!” e a outra de “Alerta dispositivo em off-line”. Todas as mensagens foram recebidas em ambos os serviços de e-mail e de SMS.

Com o experimento de teste do algoritmo sobre a estimativa da ruptura de árvores, levantou-se que a sua implementação pode aumentar a vida útil das baterias em até 10 vezes em relação aos demais experimentos de consumo realizados, podendo chegar próximo de um mês de operação.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os experimentos realizados em laboratório e em campo, bem como seus resultados, que serão base para as discussões do capítulo seguinte.

6 DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos neste trabalho e de suas possíveis implicações, como os prós e contra para a implementação do modelo de comportamento de árvores proposto. No capítulo anterior foram apresentados os experimentos realizados, no sentido de mostrar a viabilidade da utilização de sensores inerciais para o monitoramento de árvores, para prevenir sua queda ou ruptura. Neste capítulo os resultados obtidos foram comparados com trabalhos similares e discutidos.

6.1 COMPARAÇÃO COM TRABALHOS SIMILARES

O SMA proposto, desenvolvido e avaliado atendeu as necessidades de pesquisa, possibilitando a realização de diversos experimentos, e tem potencial para servir de base para o desenvolvimento de dispositivos comerciais e que podem ser utilizados em larga escala. Ele tem similaridade com alguns trabalhos levantados na revisão da literatura, resumidos no Quadro 10.

Conforme destacado na revisão da literatura, essa verificação envolve os trabalhos que apresentam alguma similaridade, pois não foram encontrados trabalhos com a mesma proposta.

Trabalho	Objetivo do trabalho
SMA	Monitoramento de árvores para a previsão do risco de quedas em ambientes urbanos utilizando IoT
(SENDRA et al., 2020)	Monitoramento de incêndio em ambientes rurais
(VEGA-RODRIGUEZ et al., 2019)	Deteção de incêndios florestais por meio de sistemas de baixo custo
(CARVALHO JUNIOR; HARIKI; GOLDMAN, 2018)	Monitoramento da saúde de árvores por meio da transpiração das folhas, medição do fluxo de seiva e avaliação do ambiente, indicando sua chance de queda
(MATASOV et al., 2020)	Monitoramento dos Serviços de Ecossistemas Urbanos de Árvores utilizando IoT

Quadro 10 - Trabalhos similares à proposta de pesquisa

Fonte: autor.

Estes trabalhos têm arquitetura similar a utilizada na pesquisa, com um ou vários sensores, coletando dados da árvore em campo por um controlador, que processa e os envia, através de uma rede sem fio para as estruturas em nuvem.

6.2 ANÁLISE DA ARQUITETURA PARA ATENDER A MODELAGEM MATEMÁTICA

Os experimentos realizados em campo para levantamento das informações das árvores requeridas pelo modelo matemático foram divididos em dois tipos: um de *pulling test* e outro que coleta e armazenamento de dados coletados dos sensores por um período de três meses. Eles foram realizados utilizando-se todos os requisitos funcionais para o monitoramento da árvore e servem para alimentar o modelo matemático de avaliação do risco de queda da árvore, visando avaliar o grau de sua proximidade com a realidade.

Essa avaliação, que não fez parte do escopo do presente trabalho, se encontra em sua fase final pelos técnicos, com potencial de fornecer informações relevantes sobre a biomecânica das árvores urbanas, que proporcionem uma boa visão da sua estrutura mecânica, sobre as ações dos ventos e a possibilidade de queda ou ruptura da árvore. Nesta etapa da pesquisa, os trabalhos dos seguintes autores foram considerados na estruturação das equações: Coutts (1983), Mayer (1987), Nicoll et al. (1995), England (2000) e Koizumi et al. (2010).

Com a utilização de ferramentas biomecânicas espera-se uma melhoria na análise da saúde e manutenção das árvores, pois até o momento essa avaliação é realizada com subjetividade, pelo método visual por dois inspetores, que podem não ter o mesmo julgamento das condições das mesmas. Neste sentido, o trabalho de Ramos Rivera et al. (2020), utilizando a teoria da mecânica dos materiais, ajuda na compreensão e padronização da biodinâmica das árvores, prevenindo o risco de queda ou ruptura. Sani et al. (2012) também comentam que métodos visuais de avaliação nem sempre permitem um estudo completo da saúde e estabilidade das árvores, e que a técnica de *pulling test* é uma ferramenta de análise e estimativa que melhora a avaliação tanto da estabilidade das árvores, quanto do risco de ruptura.

Os experimentos de *pulling test*, foram realizados com uma inclinação da árvore indo de 0° à 0,2°, seguindo as orientações da empresa FAKOPP (2021), para garantir que o teste em si não danifique ou comece a arrancar a árvore do solo.

6.3 ANÁLISE DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA O SMA

Para verificar a arquitetura proposta para o SMA foi realizada uma série de experimentos realizados em laboratório e em campo para a validação das medições dos seus módulos, como o MPU 9250, e da sua configuração para atuar segundo o paradigma da IoT.

6.3.1 Validação das medições do módulo MPU 9250

Nesta seção é analisado se o acelerômetro triaxial MPU 9250 selecionado atende às necessidades de acurácia na medição de aceleração nesta pesquisa, através dos experimentos realizados na seção anterior:

- a) Verificação de calibração - Ao ser executada a rotina de calibração que faz a correção do erro intrínseco presente no dispositivo, houve uma melhoria na acurácia. Isto é demonstrado ao se aplicar os valores obtidos na equação de vetor unitário, onde o resultado obtido nesta equação com o valor corrigido se mostra melhor em relação ao não corrigido.
- b) Validação com leituras contínuas – Foi realizada coleta contínua dos valores gerados em todos os eixos do acelerômetro (X,Y e Z) por sete dias e com três conjuntos de protótipos, mostrando-se a sua estabilidade de operação. Ao se colocar estes dados em gráficos, apesar da dispersão dos valores, estes se mostraram dentro da tolerância apresentada pelo fabricante do MPU 9250, e ao se fazer a média em amostragem a 22 Hz, foi mostrado que a sua acurácia melhorava.
- c) Validação com leituras com movimento de inclinação – Foi um experimento com a finalidade de verificar se no momento da inclinação do acelerômetro, ele mantém a sua estabilidade e sua acurácia, o que foi obtido e apresentado em gráfico. Isto também ocorreu ao se fazer a média das amostras coletadas e ao se colocar estas em um gráfico, podendo-se

constatar que elas também se comportam como uma reta, mostrando sua estabilidade.

- d) Média móvel na coleta de dados – Com os resultados dos experimentos anteriores, que mostraram que ao se realizar um média dos valores coletados, havia uma melhoria na acurácia dos valores, foram realizados experimentos de média móvel para se obter um valor de amostras para fazer esta média, que não sobrecarregasse o processador além do necessário para obtê-la. O valor obtido foi de 45 amostras, com uma dispersão minimizada, e se tem um gráfico próximo ao de uma reta. Optou-se por este valor, pois a partir deste ponto, foi observado haver um aumento do processamento, sem uma melhoria na dispersão.

Estas avaliações apresentadas mostram que a acurácia medidas nestes acelerômetros os qualificaram para ser utilizado na pesquisa. No Quadro 11 são mostrados trabalhos nos quais o acelerômetro foi o protagonista.

Trabalho	Objetivo do trabalho
(JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013)	Medindo inclinação de zonas de raízes estruturais de árvores sob carga estática e eólica
(VAN EMMERIK et al., 2017)	Medindo propriedades e respostas da árvore usando acelerômetros de baixo custo
(LEE; JIM, 2018)	Aplicação de acelerômetro triaxial de precisão para monitorar a oscilação do galho de uma árvore urbana em um ciclone tropical
(SLATER; ENNOS, 2016)	Uma avaliação do comportamento de movimento das bifurcações em avelã sob carregamento dinâmico de vento usando acelerômetros triaxiais

Quadro 11 - Trabalhos onde o acelerômetro é o protagonista

Fonte: autor

Estes trabalhos foram realizados com coleta de dados localmente e, como observado, o acelerômetro pode ser utilizado para se obter várias informações das árvores. Isto mostra que os resultados destas análises auxiliam na avaliação de quais e quando fazer a manutenção das árvores. Sem estas ferramentas, o arborista treinado e experiente depende só da sua avaliação visual.

6.3.2 Estruturas no paradigma da IoT

Nesta seção são analisados os vários experimentos em campo envolvendo as estruturas para viabilizar a aderência ao paradigma da IoT:

- a) Validação dos dados gerados em campo e seu armazenamento na nuvem – Neste experimento, houve falha de comunicação provocada pelo travamento do controlador ESP32 sem causa identificada, porém com a instalação de uma rotina de *Watchdog Timer* para reinicialização do processador, foi obtido um sistema estável para continuidade dos experimentos.
- b) Consumo de energia no protótipo – Neste experimento o objetivo foi o de verificar qual era a vida útil das baterias nos protótipos, e se ela seria razoável no contexto das aplicações de IoT. Para isto, executou-se a aplicação e gradualmente foram sendo retirados as suas rotinas, para verificar o quanto cada uma influenciava no consumo de energia. Este experimento mostrou os pontos do hardware e software com seus respectivos consumos, e que há a necessidade da realização de mais experimentos caso se deseje otimizar o processamento dos dados e aumentar a vida útil das baterias e uma possível utilização massiva do SMA.
- c) RTC – Foi observado que a instalação no protótipo de um dispositivo para associar a data e hora de ocorrência de cada evento e medição realizada, e incorporadas nas mensagens enviadas para a nuvem, gera um maior consumo de energia. Uma solução mais eficiente seria a utilização desta informação apenas quando necessária, em um dispositivo *gateway* de acesso à Internet.
- d) Distância e a potência das mensagens da rede LoRa – A rede LoRa se mostrou eficiente do ponto de vista de alcance de comunicação e consumo de energia, chegando em alguns experimentos a mensagem superar a distância de 600 m. Porém, para a obtenção deste resultado, há a necessidade de uma configuração conveniente dos seus parâmetros, como o CR, SF, BW e *Gain* LoRa.

- e) Mensagens de sinalização e análise dos dados na nuvem – No experimento de envio das mensagens de alerta e análise de dados nas plataformas na nuvem, constatou-se que o envio de e-mails e de SMSs constituíram-se em um procedimento ágil e redundante de comunicação, empregando soluções de uso amplo, corriqueiro e confiável, mostrando que a sua incorporação de uma plataforma em nuvem torna mais eficiente o monitoramento de árvores.
- f) Algoritmo para a aquisição de dados do SMA para sinalizar o ponto de ruptura de uma árvore – Este experimento foi realizado na forma simulada, utilizando os recursos presentes de consumo mínimo de energia tanto no ESP32 como no MPU 9250, quando de sua operação. Foi observado que se pode aumentar em quase 10 vezes a vida útil da bateria em relação ao experimento de consumo de energia no protótipo.

Estes experimentos envolvendo a aplicação no contexto da IoT são aderentes aos trabalhos apresentados do Quadro 12, que mostram, que nas cidades inteligentes, a utilização da TIC, bem como da IoT incentivam a conversão de dados coletados em informação úteis aos gestores municipais, como os de coleta de lixo, saúde, educação, segurança, lazer, meio ambiente entre outros.

Trabalho	Objetivo do trabalho
Shah et al. (2021)	Apresenta uma revisão do sistema de monitoramento de nível de resíduos inteligente baseado em IoT para cidades inteligentes
(CANDIA et al., 2019)	Propõe soluções LoRaWAN IoT para cidades inteligentes
(KAM et al., 2019)	Propõe um sistema de supervisão e gestão de energia para torre de telecomunicações inteligentes com base no protocolo LoRaWAN
(CARVALHO JUNIOR; HARIKI; GOLDMAN, 2018)	Propõe o monitoramento da saúde das árvores por meio da transpiração das folhas, medição do fluxo de seiva e avaliação do ambiente, indicando sua chance de queda
(MATASOV et al., 2020)	Apresenta o monitoramento dos Serviços de Ecossistemas Urbanos de Árvores utilizando IoT

Quadro 12 - Trabalhos com IoT

Fonte: autor

6.4 RESPOSTAS AS QUESTÕES DESTA PESQUISA

Nesta seção são apresentadas as respostas às questões de pesquisa propostas no Capítulo 1:

a) QP1 - Como as tecnologias para monitorar árvores e florestas evoluiu ao longo do tempo, com base nos artigos levantados na revisão da literatura?

No Capítulo 2 é apresentada a evolução da utilização das tecnologias que podem ser utilizadas no monitoramento de árvores, constatando-se que a opção da tecnologia pelo pesquisador é normalmente, a mais recente no momento da pesquisa. A título de exemplo, na década de 1980 o artigo de Mayer (1987) relata uma pesquisa que utilizou um anemômetro de torre com hélice Gill para medir a velocidade do vento, e um par de linhas de aço inoxidável trançadas, ligadas à um potenciômetro de polia, para medir a deflexão da haste da árvore (HOLBO; CORBETT; HORTON, 1980). Na década de 2000, Koizumi et al. (2008), no seu artigo sobre resistência ao vento de macieiras em pomares, utilizou-se de uma célula de carga ligada a um *data logger*, com uma estrutura de coleta de dados locais. Na década de 2010, o artigo de Vega-Rodríguez et al. (2019) utilizou, na aquisição de dados, uma rede de sensores sem fio (RSSF), um banco de dados (DB) e uma aplicação *web online* para prevenir incêndio em florestas.

O que se nota no levantamento dos principais artigos da área é que conforme a tecnologia de aquisição de dados evoluía, as pesquisas envolvendo árvores e florestas também evoluíram, passando a utilizar a tecnologia de IoT.

b) QP2 - Quais são as principais técnicas usadas na análise e conservação da saúde das árvores e florestas urbanas, no que diz respeito ao risco de queda?

- i. Uma forma de avaliação convencional é feita de modo subjetivo e visual por um inspetor, o que não garante que o julgamento de dois inspetores seja o mesmo para as mesmas condições (BRAZOLIN, 2009; RAMOS-RIVERA et al., 2020).
- ii. Uma outra forma de avaliação envolve o emprego de softwares, como o ARBIO desenvolvido pelo IPT, que utiliza um modelo probabilístico de análise (IPT, 2017b).

- iii. A técnica conhecida como *pulling test* é citada em diversos artigos, constituindo-se em uma ferramenta de análise e estimativa de estabilidade de árvores (KOIZUMI et al., 2008; SANI et al., 2012; JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013; ARGUS-ELECTRONIC, 2021; FAKOPP, 2021).
 - iv. A utilização de *strain gauge* (extensômetro) para medir a deformação das fibras das árvores, quando sujeita a uma força ou ação dos ventos, é uma técnica utilizada em diversas pesquisas (MOORE et al., 2005; KOIZUMI et al., 2010, 2016).
 - v. A utilização de acelerômetro como ferramenta para analisar vários comportamentos da árvore, como a oscilação desta sob a ação de forças externas, avaliar formas de crescimento, entre outras características, é uma técnica utilizada em diversas pesquisas (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013; SLATER; ENNOS, 2016; VAN EMMERIK et al., 2017; GOUGHERTY et al., 2018; MASCITELLI et al., 2019).
 - vi. Um sistema para armazenar dados, como o *data logger*, é uma técnica para o armazenamento dos dados coletados e utilizada em diversas pesquisas (MOORE et al., 2005; KOIZUMI et al., 2010, 2016; JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013; SLATER; ENNOS, 2016; VAN EMMERIK et al., 2017; GOUGHERTY et al., 2018; MASCITELLI et al., 2019; SILAPACHOTE et al., 2019).
- c) QP3 - Como a tecnologia de Internet das Coisas pode beneficiar ou ajudar no monitoramento das árvores e florestas urbanas?

A IoT é um conceito que possibilita o emprego de rede que envolve sensores, atuadores e dispositivos de comunicação em um ambiente único, levando informações e ações a qualquer lugar e com qualquer tipo de mídia (GUBBI et al., 2013; SHAMMAR; ZAHARY, 2019), e pode ser utilizada para gerenciar e proteger árvores (LUVISI; LORENZINI, 2014) contribuindo, assim, na sua saúde e manutenção, podendo envolver ações preventivas (THU et al., 2019), minimizar ou evitar acidentes.

Alguns trabalhos comprovam os benefícios da IoT no monitoramento de árvores, podendo-se destacar: (i) o de prevenção de incêndios em áreas florestais (VEGA-RODRIGUEZ et al., 2019; SENDRA et al., 2020); (ii) o que utiliza dispositivos de RFID em tempo real para gerenciamento e proteção das árvores (LUVISI;

LORENZINI, 2014); (iii) e a utilização de tecnologia LoRaWAN em aplicações de rastreamento ambiental e monitoramento em agricultura de precisão (OSORIO et al., 2020b).

As estruturas de IoT, como as utilizadas na presente pesquisa, constitui-se em uma técnica promissora para o monitoramento e prevenção de ruptura de árvores, pois além de permitirem a coleta dos dados em campo, pode processá-los desde o momento de coleta, até a após a sua colocação na nuvem, de acordo com a necessidade e interesse, proporcionando múltiplas possibilidades, como a de gerar alertas em tempo real e *online*.

6.5 AVALIAÇÕES DECORRENTES DOS EXPERIMENTOS

Nesta seção, é mostrado o resumo das principais avaliações relacionadas com a implementação do SMA, obtidas a partir dos experimentos realizados:

- a) Os acelerômetros, como o MPU 9250, atendem às necessidades da pesquisa.
- b) A transmissão de dados na rede LoRa, nas condições dos experimentos realizados, permitem atingir distâncias superiores 600 m.
- c) As mensagens de alerta se mostraram eficientes em suas sinalizações.
- d) O conjunto das estruturas da IoT experimentados se mostraram flexíveis e promissores.
- e) A vida útil da bateria nos primeiros experimentos durou próximo de 3 dias, o que não seria adequado em aplicações de uso massivo, que requerem uma maior duração (por exemplo, 1 ou mais anos). Há a necessidade de mais experimentos para identificar possíveis otimizações no processamento e transmissão dos dados.
- f) A utilização de RTC no dispositivo gasta energia desnecessária, tendo sido identificadas alternativas mais eficientes.
- g) O emprego de redes baseadas em LoRa requer a seleção criteriosa de seus parâmetros, para maior eficiência.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção foram discutidos os experimentos de laboratório e prototipagem, que forneceram uma direção de quais dispositivos e estruturas de IoT devem ser utilizados nos experimentos de campo. Nestes últimos, foram discutidas as características do MPU 9250 e as estruturas de IoT, no sentido de verificar se atendiam os objetivos da pesquisa, finalizando com o levantamento dos pontos favoráveis e desfavoráveis associados ao SMA.

7 CONCLUSÕES

Esta seção finaliza o presente trabalho de pesquisa, apresentando o seu mérito, destacando os seus pontos positivos e negativos, as principais dificuldades enfrentadas, o potencial para uma aplicação prática, e perspectivas de continuidade.

7.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

No levantamento da literatura, pode ser observado que há um interesse no meio científico na pesquisa sobre as condições das árvores tanto no meio rural como urbano, e o que fazer para conservá-las em boas condições de saúde, com um bom crescimento e uma boa manutenção. Em vários trabalhos pode ser observado que estas pesquisas têm um ponto em comum, o econômico, podendo gerar ganhos ou perdas. Por exemplo, na silvicultura, com os reflorestamentos e suas indústrias correlacionadas, como também em cidades, pelos benefícios que proporcionam, e quando de sua queda ou ruptura, os problemas que geram para a infraestrutura e para as pessoas.

O número de documentos selecionados na Revisão 1, que totalizou 313, evidencia o interesse dos pesquisadores pelo estudo da queda de árvores pela ação dos ventos, tanto em áreas rurais como urbanas. Nas áreas de estudos, é possível destacar as de Ciências Agrárias e Biológicas e Ciências Ambientais, ambas ligadas ao contexto rural e urbano. O que se observa também, ao se considerar instituições, fundações e territórios, é que quase todos pertencem a países desenvolvidos e ao hemisfério norte. O conjunto de cada *cluster* do VOSviewer, no qual está a floresta e a ação dos ventos relacionados, indica que nos artigos os pesquisadores buscam soluções para os danos causados pelos ventos nas florestas, pois trazem benefícios econômicos e menos danos sociais. A revisão da literatura apresentou poucos estudos em cidades e ambientes urbanos.

Quando da realização da Revisão 2, foram selecionados 111 documentos. Aqui se destacam as pesquisas da IoT, com um menor número de documentos

sobre árvores, com um maior número de documentos na área da ciência da computação e engenharia, tendo uma boa participação de países em desenvolvimento, como a Índia e Indonésia. Nesta revisão a IoT está presente em diversas pesquisas, como o monitoramento de coleta de lixo e controle de iluminação de ruas, que são alguns dos exemplos, que serviram de orientação para o desenvolvimento do SMA. No gráfico do VOSviewer, no conjunto de *clusters* está relacionado às ferramentas utilizadas na IoT, que buscam soluções para as diversas atividades presentes em uma cidade para o seu bom funcionamento.

Portanto, partindo-se destes pontos, nota-se relevância de pesquisas como a presente, que originou o desenvolvimento do SMA, utilizando sensores inerciais dentro do paradigma da IoT.

Com os experimentos realizados em laboratório, em conjunto com os realizados pelo grupo de estudos do IPT, foram obtidos resultados promissores, que propiciaram a seleção dos hardwares e dos softwares utilizados nos experimentos posteriores em campo. O experimento com o acelerômetro triaxial permitiu a verificação da sua acurácia e atendimento das necessidades para a análise de quebra ou ruptura de árvore. Com a realização dos experimentos de calibração, estabilidade e inclinação, foi observado uma dispersão nas leituras dos dados quando apresentados em um gráfico, e que ao se implementar uma rotina de média móvel, observou-se a melhoria da acurácia destes.

Nos experimentos envolvendo a IoT, demonstrou-se a viabilidade de implementar-se um SMA dentro do seu paradigma. Desenvolveu-se e avaliou-se um dispositivo contendo um acelerômetro triaxial, no qual os seus dados foram gerados e coletados em campo (na árvore), encaminhado por toda a estrutura da IoT e armazenadas na nuvem.

Outros experimentos que foram realizados são o de consumo de energia no protótipo, mostrando a necessidade de uma análise e otimização de todas as programações e rotinas implementadas no protótipo. O de RTC, que mostrou que a implementação do protocolo NTC no *gateway* é mais viável que a utilização do módulo DS 3231. O experimento para o levantamento da distância de comunicação e potência no envio de mensagem mostrou que as distâncias que podem ser obtidas nos dispositivos da rede LoRa são razoáveis, e evidenciou a necessidade de uma escolha criteriosa dos parâmetros de configuração de seus parâmetros.

7.2 DIFICULDADES ENFRENTADAS

A pandemia de Covid-19 interrompeu o processo natural da pesquisa, impossibilitando aos trabalhos em laboratório e em campo durante os anos de 2020 e 2021, o que exigiu a prorrogação do prazo originalmente previsto.

A multidisciplinaridade do tema correspondeu a um outro fator de dificuldade, exigindo estudos complementares para a proposição de soluções e superação dos desafios de pesquisa.

7.3 POTENCIAIS DA APLICAÇÃO

Há um bom potencial para aplicação do SMA em cidades inteligentes, existindo no presente, um incentivo para a conversão em dados em informação para os serviços de uma cidade, como coleta de lixo, iluminação, saneamento básico, saúde, educação, segurança, lazer, meio ambiente, entre outros.

O monitoramento de árvores faz parte de um conjunto de serviços que a população de uma cidade necessita para o seu bem-estar, e uma forma econômica de se implementar estes serviços seria a integração deste monitoramento à infraestrutura já implantada nas cidades, como a de iluminação pública.

7.4 PESQUISAS FUTURAS

Como pesquisas que poderiam ser realizadas em continuidade, podem ser elencadas:

- a) A realização de experimentos em campo que contemplem a escalabilidade da rede LoRa e a exploração do potencial de outras possibilidades de topologias.
- b) A exploração de outras funcionalidades proporcionadas pelas plataformas na nuvem, como a análise dos dados (com ferramentas de aprendizado de

- máquina e inteligência artificial), e mensagens de sinalização de alerta, entre outros.
- c) A alimentação dos módulos do SMA por meio de baterias recarregadas por células fotovoltaicas.
 - d) A implementação do algoritmo idealizado pela equipe do IPT (R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO, 2022) no SMA.
 - e) A utilização de um conjunto maior de instrumentos, além do acelerômetro, do extensômetro, do sensor de deslocamento, do anemômetro e do anemoscópio, visando levantar as propriedades físicas da árvore, como massa, seiva e umidade, entre outros, possibilitando uma análise mais completa da saúde das árvores.
 - f) A realização de ensaio em um conjunto maior de árvores e de diversas espécies, visando uma melhor avaliação do modelo matemático.
 - g) A utilização de um simulador de rede LoRa, para verificando com maior rapidez e facilidade as opções de cobertura da comunicação em diversas áreas.
 - h) O aprimoramento da transferência periódica dos dados dos módulos do SMA, transferindo-os em lotes, utilizando-se a topologia de dispositivo para dispositivo (D2D), possibilitando uma primeira análise e sinalização de alarme no próprio local. A posteriori, estes dados seriam transferidos para uma estação base (BS) regional, e deste para um armazenamento na nuvem.
 - i) A implementação de um intervalo de aquisição adaptativo, que seria aumentado gradativamente nos momentos de pouca variabilidade (que, em geral, predominam), e reduzido gradativamente, caso contrário. Essa estratégia tem o potencial de redução do consumo significativo de energia dos módulos do SMA, tanto pela redução do processamento, como pela menor frequência da transmissão de dados.
 - j) A avaliação da adoção SMA em cidades do ponto de vista econômico, avaliando a economia proporcionada pela redução dos danos advindos da queda de árvores, e a conseqüente amortização dos investimentos.

7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusão final, o conjunto de experimentos das estruturas da IoT atingiu o objetivo proposto na concepção do SMA, para análise e previsão de risco de quedas destas em ambientes urbanos.

Recomeçar a estudar no mundo acadêmico, após mais de trinta anos trabalhando com engenharia de automação implantando sistemas, foi um desafio.

Não ter a ideia do tempo necessário para realização das várias tarefas de um projeto de pesquisa foi outro desafio e aprendizado.

Não saber, à princípio, que toda pesquisa tem um limite e que com acréscimo de novos requisitos não previstos ao longo da sua realização pode não gerar uma melhoria efetiva no resultado final.

Apesar de todas essas dificuldades encontradas, fazer parte desta jornada foi algo muito gratificante e enriquecedor.

REFERÊNCIAS

ADELANTADO, F. et al. Understanding the Limits of LoRaWAN. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 9, p. 34–40, 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8030482/>>.

ALMUHAYA, M. A. M. et al. A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions. **Electronics**, v. 11, n. 1, p. 164, 5 jan. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/11/1/164>>.

ARDUINO.CC. **Arduino IDE Software**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/software>>. Acesso em: 25 ago. 2022.

ARDUINO. **Arduino ® MEGA 2560 Rev3 Features**. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

ARGUS-ELECTRONIC. **PiCUS TreeQinetic Load tests**. Disponível em: <<https://www.argus-electronic.de/en/tree-inspection/products/picus-treeqinetic>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

BAAS, J. et al. Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. **Quantitative Science Studies**, v. 1, n. 1, p. 377–386, fev. 2020. Disponível em: <<https://direct.mit.edu/qss/article/1/1/377-386/15571>>.

BAGWARI, S. et al. LoRa Based Metrics Evaluation for Real-Time Landslide Monitoring on IoT Platform. **IEEE Access**, v. 10, p. 46392–46407, 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9762329/>>.

BAIJI, Y.; SUNDARAVADIVEL, P. ILoLeak-detect: An IoT-based LoRAWAN-enabled oil leak detection system for smart cities. **Proceedings - 2019 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems, iSES 2019**, p. 262–267, 2019.

BALL, A. **Review of Data Management Lifecycle Models**. Disponível em: <<https://purehost.bath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/206543/redm1rep120110ab10.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2019.

BALLINAS, M.; BARRADAS, V. L. The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. **Journal of Environmental Quality**, v. 45, n. 1, p. 157–166, 2016.

BERTOLETI, P. **Projetos com ESP32 e LoRa**. São Paulo: Editora NCB (Instituto Newton C. Braga), 2019.

BLACKWELL, P. G.; RENNOLLS, K.; COUTTS, M. P. A root anchorage model for shallowly rooted sitka spruce. **Forestry**, v. 63, n. 1, p. 73–91, 1990.

BORGIA, E. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. **Computer Communications**, v. 54, p. 1–31, dez. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>>.

BRACK, C. L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. **Environmental Pollution**, v. 116, n. SUPPL. 1, p. S195–S200, mar. 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749101002512>>.

BRAZOLIN, S. **Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP**. 2009. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-20042010-092326/>>.

BUCKERIDGE, M. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 85–101, ago. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142015000200085&lng=pt&tlng=pt>.

CANDIA, A. et al. LoRaWAN IoT Solutions for SmartCities. **2019 6th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security, IOTSMS 2019**, p. 265–269, 2019.

CARVALHO JUNIOR, A. D.; HARIKI, V. S.; GOLDMAN, A. Sensing Trees in Smart Cities with Open-Design Hardware. In: 2018 IEEE 17th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA), **Anais...IEEE**, nov. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8548274/>>.

CLOUGH R. W., P. J. **Dynamics of structures**. Third Edit ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 2003.

COUTTS, M. P. Root architecture and tree stability. **Plant and Soil**, v. 71, n. 1–3, p. 171–188, 1983.

CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Escala de Beaufort - Glossários**. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>>. Acesso em: 21 ago. 2019.

DANQUECHIN DORVAL, A.; MEREDIEU, C.; DANJON, F. Anchorage Failure of Young Trees in Sandy Soils Is Prevented by a Rigid Central Part of the Root System with Various Designs. **Annals of Botany**, v. 118, n. 4, p. 747–762, out. 2016. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85032212359&doi=10.1093%2Faob%2Fmcw098&partnerID=40&md5=bff2fcdef0bc86f0f85e2829ef8e3421>>.

ECLIPSE FOUNDATION. **Eclipse.org**. Disponível em: <<https://www.eclipse.org/>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

ENGLAND, A. H. A dynamic analysis of windthrow of trees. **Forestry**, v. 73, n. 3, p. 225–238, 1 mar. 2000. Disponível em: <<https://academic.oup.com/forestry/article-lookup/doi/10.1093/forestry/73.3.225>>.

ENUŞ, M. et al. Three-dimensional measurements of tree crown movement using an infrared time-of-flight camera. **Experiments in Fluids**, v. 61, n. 11, p. 1–13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00348-020-03053-y>>.

ESPRESSIF. **ESP32 Series Datasheet**. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2021.

ESPRESSIF, S. **ESP32 - A feature-rich MCU with integrated Wi-Fi and Bluetooth connectivity for a wide-range of applications**. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>>. Acesso em: 19 abr. 2022.

FAKOPP. **The FAKOPP PullingTest**. Disponível em: <<https://fakopp.com/docs/products/pullingtest/PullingTestManual202103.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2021.

FAPESP. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Plano de Gestão de Dados - FAPESP. p. 5, 2017. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/gestaodedados/>>. Acesso em: 7 out. 2019.

FARIA, J. S. R. et al. Bibliometric Review on the Use of Internet of Things Technologies to Monitor the Impacts of Wind on Trees and Forests. In: The 13th EFITA International Conference, Basel Switzerland. **Anais...** Basel Switzerland: MDPI, 24 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4591/9/1/16>>.

GARDINER, B.; BERRY, P.; MOULIA, B. Plant Science Review : Wind impacts on plant growth , mechanics and damage. **Plant Science**, v. 245, p. 94–118, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006>>.

GIAMBASTIANI, Y. et al. On the Tree Stability: Pulling Tests and Modelling to Assess the Root Anchorage. **Procedia Environmental Science, Engineering and Management**, v. 4, n. 4, p. 207–218, 2017. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85043515225&partnerID=40&md5=aae0e88324afa359c4607965dd7fb060>>.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.

GONÇALVES, R.; LINHARES, C.; YOJO, T. Drag coefficient in urban trees. **Trees - Structure and Function**, n. m, p. 13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00468-019-01951-1>>.

GOUGHERTY, A. V et al. Estimating Tree Phenology from High Frequency Tree Movement Data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 263, p. 217–224, 2018. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85052613907&doi=10.1016%2Fj.agrformet.2018.08.020&partnerID=40&md5=f7f2a4ecf03137938fa93a032557baaf>>.

GROSS, G. A windthrow model for urban trees with application to storm “Xavier”. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 27, n. 4, p. 299–308, 2018.

GUBBI, J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

HELTEC.ORG. **Heltec ESP32-LoRa especificação técnica**. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 29 jul. 2022.

HELTEC AUTOMATION. **BUILD NETWORK Heltec LoRa Gateway**. Disponível em: <<https://heltec.org/>>. Acesso em: 19 abr. 2022.

HOU, G.; CHEN, S. Probabilistic modeling of disrupted infrastructures due to fallen trees subjected to extreme winds in urban community. **Natural Hazards**, v. 102, n. 3, p. 1323–1350, 8 jul. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-020-03969-y>>.

I²C-BUS.ORG. **I²C-bus.org**. Disponível em: <<https://www.i2c-bus.org/>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

IGA. **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Boletim Climatológico anual da Estação Meteorológica do IAG/USP - 2017**. Disponível em: <<http://www.estacao.iag.usp.br/Boletins/2017.pdf%0D>>. Acesso em: 25 set. 2019.

IKPEHAI, A.; ADEBISI, B.; ANOH, K. Effects of Traffic Characteristics on Energy Consumption of IoT End Devices in Smart City. **2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium, GIIS 2018**, 2019.

INSTRUMENTS, T. **I²C bus extender**. Disponível em: <<https://curtocircuito.com.br/datasheet/modulo/pcf8574.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

INTERSCITY.ORG. **InterSCity**. Disponível em: <<https://interscity.org/>>. Acesso em: 25 set. 2021.

INVENSENSE. **InvenSense - TDK Corporation**. Disponível em: <<https://invensense.tdk.com/>>. Acesso em: 2 maio. 2022.

IPT. Qualidade de vida. **Pesquisa FAPESP**, p. 3, 2017a. Disponível em: <https://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1185>. Acesso em: 22 nov. 2021.

IPT. Controle da paisagem. **Pesquisa FAPESP**, p. 076–079, 2017b. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2017/06/076-079_arvores-urbanas_256.pdf>.

IPT. **Transformação Digital: Manufatura Avançada e Cidades Inteligentes**. São Paulo, 2018. .

JAMES, K.; HALLAM, C.; SPENCER, C. Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 160–167, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.009>>.

JESI, G. P.; BENETTI, E.; MAZZINI, G. Building an IoT public network infrastructure. **2019 27th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2019**, 2019.

JIM KUROSE, K. R. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down**. São Paulo: Editora – Pearson Universidades, 2013.

KAM, O. M. et al. Supervision and energy management system for smart telecom tower based on the LoRaWAN protocol. **2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019**, p. 539–544, 2019.

KOIZUMI, A. et al. Windthrow Resistance of Apple Trees Grafted in an Orchard. **Journal of Wood Science**, v. 54, n. 1, p. 10–15, 2008. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-39749184971&doi=10.1007%2Fs10086-007-0907-7&partnerID=40&md5=65b3774557dcb1f08dccbf483e0e36a1>>.

KOIZUMI, A. et al. Evaluation of Drag Coefficients of Poplar-Tree Crowns by a Field Test Method. **Journal of Wood Science**, v. 56, n. 3, p. 189–193, 2010. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77953870149&doi=10.1007%2Fs10086-009-1091-8&partnerID=40&md5=aaefdd72df543a507ffede19b4e650eb>>.

KOIZUMI, A. et al. In situ drag coefficient measurements for rooftop trees. **Journal of Wood Science**, v. 62, n. 4, p. 363–369, 2016.

KOIZUMI, A.; HIRAI, T. Evaluation of the section modulus for tree-stem cross sections of irregular shape. **Journal of Wood Science**, v. 52, n. 3, p. 213–219, 1 jun. 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10086-005-0747-2>>.

KOLOBE, L. G. F.; LEBEKWE, C. K.; SIGWENI, B. Systematic literature survey: applications of LoRa communication. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, v. 10, n. 3, p. 3176, 1 jun. 2020. Disponível em: <<http://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/20934>>.

KORTUEM, G. et al. Smart objects as building blocks for the internet of things. **IEEE Internet Computing**, v. 14, n. 1, p. 44–51, 2010.

KRAUSE, C. et al. How Does the Root System Inhibit Windthrow in Thinned Black Spruce Sites in the Boreal Forest? **Trees**, v. 28, n. 6, p. 1723–1735, 10 dez. 2014. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84919930238&doi=10.1007%2Fs00468-014-1080-4&partnerID=40&md5=1daa9cba24dcc4d901211576b83b0770>>.

KRIŠĀNS, O. et al. Structural Root-Plate Characteristics of Wind-Thrown Norway Spruce in Hemiboreal Forests of Latvia. **Forests**, v. 11, n. 11, p. 1143, 28 out. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/11/11/1143>>.

KYOWA-ELECTRONIC INSTRUMENTS. **Strain Gages KFC-20-C1-11 Dados:** Disponível em: <https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/kfgs/index.html>. Acesso em: 2 maio. 2022.

LAVRIC, A. LoRa (long-range) high-density sensors for internet of things. **Journal of Sensors**, v. 2019, 2019.

LEE, L. S. H.; JIM, C. Y. Applying Precision Triaxial Accelerometer to Monitor Branch Sway of an Urban Tree in a Tropical Cyclone. **Landscape and Urban Planning**, v. 178, p. 170–182, 2018. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048421030&doi=10.1016%2Fj.landurbplan.2018.05.028&partnerID=40&md5=e4197c194a15c75992213bfe996085d2>>.

LIVESLEY, S. J.; MCPHERSON, E. G.; CALFAPIETRA, C. The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. **Journal of Environmental Quality**, v. 45, n. 1, p. 119–124, jan. 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2134/jeq2015.11.0567>>.

LORA ALLIANCE. **A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN™ What is it?** November. Disponível em: <<https://hz137b.p3cdn1.secureserver.net/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf?time=1671456125>>. Acesso em: 27 ago. 2021.

LORA ALLIANCE. **RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters**. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/>. Acesso em: 19 ago. 2022.

LUVISI, A.; LORENZINI, G. RFID-plants in the smart city: Applications and outlook for urban green management. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13, n. 4, p. 630–637, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2014.07.003>>.

LYNX. **SNS-ABS05**. Disponível em: <https://lynxtec.com.br/download/brochuras/DS_SNS-ABS05_P1_DA.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2021.

LYNX. **DLG4000**. Disponível em: <https://www.lynxtec.com.br/download/brochuras/DLG4000_R3.pdf>. Acesso em: 6 out. 2020.

MASCITELLI, A. et al. Tree motion: Following the wind-induced swaying of arboreal individual using a GNSS receiver. **Italian Journal of Agrometeorology**, v. 2019, n. 3, p. 25–36, 2019.

MATASOV, V. et al. IoT monitoring of urban tree ecosystem services: Possibilities and challenges. **Forests**, v. 11, n. 7, p. 775, 19 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/11/7/775>>.

MAURYA, P.; SINGH, A.; KHERANI, A. A. A review: spreading factor allocation schemes for LoRaWAN. **Telecommunication Systems**, v. 80, n. 3, p. 449–468, 5 jul. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11235-022-00903-4>>.

MAXIM INTEGRATED. **DS3231 RTC General Description**. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>>.

MAYER, H. Wind-induced tree sways. **Trees**, v. 1, n. 4, p. 195–206, 1987.

MICHENER, W. K. Ten Simple Rules for Creating a Good Data Management Plan. **PLOS Computational Biology**, v. 11, n. 10, p. 9, 22 out. 2015. Disponível em: <<http://dx.plos.org/10.1371/journal.pcbi.1004525>>.

MIORANDI, D. et al. Internet of things: Vision, applications and research challenges. **Ad Hoc Networks**, v. 10, n. 7, p. 1497–1516, set. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>>.

MOORE, G. M. Wind-Thrown Trees: Storms or Management? **Arboriculture and Urban Forestry**, v. 40, n. 2, p. 53–69, 2014. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84897522798&partnerID=40&md5=0bc1c67c6893f26cf90aefe9d71d6f08>>.

MOORE, J. R. et al. An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 132, n. 1–2, p. 78–83, set. 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192305001395>>.

MOSQUITTO. **Mosquitto.org**. Disponível em: <<https://test.mosquitto.org/>>. Acesso em: 25 set. 2021.

MOTOROLA INC. **SPI Block Guide**. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20150413003534/http://www.ee.nmt.edu/~teare/ee308l/datasheets/S12SPIV3.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

NICOLL, B. C. et al. Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of Sitka spruce clones. **Wind and Trees**, n. January 1995, p. 276–292, 1995.

NITOSLAWSKI, S. A. et al. Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry. **Sustainable Cities and Society**, v. 51, n. July, p. 101770, nov. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101770>>.

NORTON, B. A. et al. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 127–138, fev. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>>.

NOWAK, D. J. et al. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. **Environmental Pollution**, v. 193, p. 119–129, out. 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749114002395>>.

OSORIO, A. et al. Routing in LoRaWAN: Overview and Challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 58, n. 6, p. 72–76, 2020a.

OSORIO, A. et al. Routing in LoRaWAN: Overview and Challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 58, n. 6, p. 72–76, jun. 2020b. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9141219/>>.

PREMSANKAR, G. et al. Optimal Configuration of LoRa Networks in Smart Cities. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 12, p. 7243–7254, dez. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8998148/>>.

R.Z.H. ALMEIDA; S.F.D. ANTONIO; J.C.S. CORDEIRO. **Relatório técnico IPT 168 714-205**. [s.l: s.n.].

RAMOS-RIVERA, J. et al. Mechanical response of the real tree root architecture under lateral load. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, n. 7, p. 595–607, 2020.

S&E-INSTRUMENTOS. **MANUAL AN3C**. Disponível em: <https://www.seinstrumentos.com.br/manuais/MANUAL_AN3C.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2020.

SÁNCHEZ-GARCÍA, J. C.; VARGAS-MORÚA, G.; HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, B. R. Entrepreneurs' Well-Being: A Bibliometric Review. **Frontiers in Psychology**, v. 9, n. SEP, p. 1–19, 12 set. 2018. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2018.01696/full>>.

SANI, L. et al. Preliminary Experiments and Verification of Controlled Pulling Tests for Tree Stability Assessments in Mediterranean Urban Areas. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 3, p. 218–226, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861345493&doi=10.1016%2Fj.biosystemseng.2012.04.004&partnerID=40&md5=e77d480d907d07c7d1d7a7f622944720>>.

SANTOS, C. R. B. dos. **Fundamentos de Projetos Eletrônicos Envolvendo Esp32 E Esp32 Lora**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2021.

SARR, Y.; GUEYE, B.; SARR, C. Performance analysis of a smart street lighting application using LoRa wan. **Proceedings - 2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking, CommNet 2019**, 2019.

SCIENCEBUDDIES.ORG. **The Engineering Design Process**. Disponível em: <<https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/engineering-design-process/engineering-design-process-steps>>. Acesso em: 25 set. 2021.

SEMTECH CORPORATION. **Datasheet SX1268**. June. Disponível em: <<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000000HTIE/.wr7MYcDJegmsXUflvtVGp7PiqAzdCdqRkXqRr3J8Y4>>. Acesso em: 19 jul. 2022a.

SEMTECH CORPORATION. **Understanding the LoRa Adaptive Data Rate**. December. Disponível em: <<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/understanding-adr>>. Acesso em: 16 ago. 2022b.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview**. February. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2022.

SENDRA, S. et al. LoRaWAN Network for Fire Monitoring in Rural Environments. **Electronics**, v. 9, n. 3, p. 531, 23 mar. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/9/3/531>>.

SHAMMAR, E. A.; ZAHARY, A. T. The Internet of Things (IoT): a survey of techniques, operating systems, and trends. **Library Hi Tech**, v. 38, n. 1, p. 5–66, 5 out. 2019. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/LHT-12-2018-0200/full/html>>.

SILAPACHOTE, P. et al. Spectral Analysis of Dynamic Wind Loads on Trees. In: 2018 IEEE Region 10 Conference, TENCON 2018, Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand. **Anais...** Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063237856&doi=10.1109%2FTENCON.2018.8650213&partnerID=40&md5=cd64d30e5d2e7f5b590b4a096cc83cb8>>.

SILVA, T. C. et al. Non-Timber Forest Products in Brazil: A Bibliometric and a State of the Art Review. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7151, 2 set. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/7151>>.

SLATER, D.; ENNOS, R. An assessment of the movement behaviour of bifurcations in hazel (*Corylus avellana* L.) under dynamic wind loading using triaxial accelerometers. **Arboricultural Journal**, v. 38, n. 4, p. 183–203, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/03071375.2016.1210859>>.

SPATZ, H.; THECKES, B. Oscillation damping in trees. **Plant Science**, v. 207, p. 66–71, jun. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.02.015>>.

SUN, Y. et al. Theoretical Analysis and Performance Testing of LoRa Technology. In: 2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC), **Anais...IEEE**, dez. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8789103/>>.

TADRIST, L. et al. Foliage motion under wind, from leaf flutter to branch buffeting. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 15, n. 142, 2018.

TAGOIO. **TagoIO Platform**. Disponível em: <<https://tago.io/>>. Acesso em: 25 set. 2021.

TE SENSOR SOLUTIONS. **SP1-12-3 Stringed potentiometer - Datasheet**. October. Disponível em: <<https://www.te.com/usa-en/products/sensors.html>>. Acesso em: 10 out. 2022.

THETHINGSNETWORK.ORG. **Frequency Plans by Country**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

THU, M. Y. et al. Smart air quality monitoring system with LoRaWAN. **Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System, IOTAIS 2018**, p. 10–15, 2019.

TINSHARP. **TC1602A-01T Datasheet**. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TC1602A-01T.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

VALENTINI, R. et al. New tree monitoring systems: From industry 4.0 to nature 4.0. **Annals of Silvicultural Research**, v. 43, n. 2, p. 84–88, 2019.

VALÉRIE, D.; PIERRE, A. G. Bibliometric indicators: Quality measurements of scientific publication. **Radiology**, v. 255, n. 2, p. 342–351, 2010.

VAN EMMERIK, T. et al. Measuring Tree Properties and Responses Using Low-Cost Accelerometers. **Sensors**, v. 17, n. 5, p. 1098, 11 maio 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1098>>.

VEGA-RODRIGUEZ, R. et al. Low Cost LoRa based Network for Forest Fire Detection. In: 2019 Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS), **Anais...IEEE**, out. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8939193/>>.

VOSVIEWER. **VOSviewerCentre for Science and Technology Studies**. Leiden University, , 2020. . Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

WAZLAWICK, R. S. **Metodologia de Pesquisa para Ciência da Computação**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2014.

XIAO, Q.; MCPHERSON, E. G. Surface Water Storage Capacity of Twenty Tree Species in Davis, California. **Journal of Environmental Quality**, v. 45, n. 1, p. 188–198, 2016.

YANG, M.; DÉFOSSEZ, P.; DUPONT, S. A root-to-foliage tree dynamic model for gusty winds during windstorm conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, n. February, p. 107949, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107949>>.

YU, F.; ZHU, Z.; FAN, Z. Study on the feasibility of LoRaWAN for smart city applications. **International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications**, v. 2017- Octob, p. 334–340, 2017.

YUAN, C.; NORFORD, L.; NG, E. A semi-empirical model for the effect of trees on the urban wind environment. **Landscape and Urban Planning**, v. 168, n. September, p. 84–93, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.029>>.

ZELENOVSKY, R.; MENDONÇA, A. **Arduino Guia Avançado para projetos**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2019.

APÊNDICE A – PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

Este apêndice apresenta os programas que foram desenvolvidos no projeto de pesquisa e suas funcionalidades. Eles estão armazenados na área de gestão de dados da USP.

1. Programa de interface entre instrumento NA-3C e o *data logger* DLG4000

Nome do Programa	Cap_01_SimpleModbusMasterArduinoMega_10_Anem_WDT
Descrição	Interface de comunicação entre a unidade de controle AN3C da S&E e o <i>data logger</i> DLG4000.

2. Programas utilizados nos experimentos de laboratório com comunicação ponto a ponto LoRa e o envio dos dados para a Nuvem

Nome do Programa	Cap_02_IPT_LoRa_pap_Emissor_01
Descrição	Programa do experimento em laboratório no qual um ESP32 coleta os dados de um acelerômetro e de um módulo RTC, empacota-os e transmite-os via canal LoRa para outro ESP32.
Nome do Programa	Cap_02_IPT_LoRa_pap_Receptor_WiFi_01
Descrição	Programa do experimento em laboratório no qual o ESP32 que recebeu os dados enviados via LoRa, formata estes dados e os envia via WiFi para a plataforma InterCity na nuvem.
Nome do Programa	Cap_11_lora_p_a_p_emissor_IPT_06_Final_04
Descrição	Programa do experimento em laboratório no qual um ESP32 coleta os dados de um acelerômetro, de um extensômetro, de um anemômetro e de um anemoscópio, empacota-os e transmite-os via canal LoRa para outro ESP32.
Nome do Programa	Cap_11_lora_p_a_p_receptor_IPT_06_Final_A
Descrição	Programa do experimento em laboratório no qual o ESP32 que recebeu os dados enviados via LoRa, formata estes dados e os envia por meio de WiFi para a plataforma Mosquitto na nuvem.
Nome do Programa	Cap_11_lora_p_a_p_receptor_IPT_06_Final_B
Descrição	Programa do experimento em laboratório no qual o ESP32 que recebeu os dados enviados via LoRa, formata estes dados e os envia por meio de WiFi para a plataforma TagoIO na nuvem.

3. Programas utilizados no experimento de verificação da calibração

Nome do Programa	ESP32_MPU9250_Cal_Quadrante_1
Descrição	Programa do experimento de verificação da calibração. Ele foi executado em três módulos MPU 9250 diferentes, verificando, assim, a sua calibração. Este é do quadrante 1, quando o eixo Z está com o valor em torno de +1g.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_Cal_Quadrante_3
Descrição	Programa do experimento de verificação da calibração. Ele foi executado em três módulos MPU 9250 diferentes, verificando, assim, a sua calibração. Este é do quadrante 3, quando o eixo Z está com o valor em torno de +1g.

4. Programas utilizados no experimento de avaliação com leituras contínuas

Nome do Programa	ESP32_MPU9250_Estab_Acel_01
Descrição	Programa do experimento de verificação de avaliação com leituras contínuas do acelerômetro, implementado para cada módulo MPU 9250 denominado 01.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_Estab_Acel_02
Descrição	Programa do experimento de avaliação com leituras contínuas do acelerômetro, implementado para cada módulo MPU 9250, denominado 02.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_Estab_Acel_02
Descrição	Programa do experimento de avaliação com leituras contínuas do acelerômetro, implementado para cada módulo MPU 9250, denominado 03.

5. Programa utilizado no experimento de avaliação com leituras com movimento de inclinação

Nome do Programa	ESP32_MPU9250_Estab_Acel_01_Incl
Descrição	Programa do experimento de avaliação com leituras do acelerômetro com movimento de inclinação. Ele foi executado em um módulo MPU 9250 denominado de 01.

6. Programa utilizado no experimento de implementação da média móvel

Nome do Programa	ESP32_MPU9250_Estab_Acel_0x_Media_Movel
Descrição	Programa do experimento de implementação da média móvel, implementado no módulo MPU 9250 em seus três eixos.

7. Programas utilizados no experimento em campo com estruturas no paradigma da IoT

Nome do Programa	ESP32_MPU9250_RTC_LoRa_Emissor_03
Descrição	Programa do experimento em campo com estruturas no paradigma da IoT, para a coleta e processamento dos dados, que são enviados estes para o ESP32, instalado no laboratório.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_RTC_LoRa_WiFi_Receptor_02A
Descrição	Programa do experimento em campo com estruturas no paradigma da IoT, que recebe os dados do ESP32 instalado em campo, enviando-os para as estruturas da IoT na nuvem.

8. Programas utilizados no experimento de consumo de energia no protótipo instalado na árvore

Nome do Programa	ESP32_Consumo_07
Descrição	Programa do experimento de consumo de energia no protótipo instalado na árvore, que realizou as medições de consumo e gerou os arquivos correspondentes.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_RTC_LoRa_Emissor_03_Cons_01
Descrição	Este programa operou, conforme descrição do Quadro 8 do item Teste 01.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_RTC_LoRa_Emissor_03_Cons_02
Descrição	Este programa operou, conforme descrição do Quadro 8 do item Teste 02.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_RTC_LoRa_Emissor_03_Cons_03
Descrição	Este programa operou, conforme descrição do Quadro 8 do item Teste 03.
Nome do Programa	ESP32_MPU9250_RTC_LoRa_Emissor_03_Cons_04
Descrição	Este programa operou, conforme descrição do Quadro 8 do item Teste 04.

Nome do Programa	ESP32_MPU9250_RTC_LoRa_Emissor_03_Cons_07
Descrição	Este programa operou, conforme descrição do Quadro 8 do item Teste 07.
Nome do Programa	ESP32_lora_ponto_a_ponto_emissor_Cons_05
Descrição	Este é o programa de transmissão de dados, que operou, conforme descrição do Quadro 8 do item Teste 05 e 06.
Nome do Programa	ESP32_lora_ponto_a_ponto_receptor_Cons_05
Descrição	Este é o programa de recepção de dados, que operou, conforme descrição do Quadro 8 do item Teste 05 e 06.

9. Programa utilizado no experimento de RTC com *TimeStamp*

Nome do Programa	ESP32_Protocolo_NTP
Descrição	Programa do experimento de RTC, que implementou o protocolo NTP para gerar os dados de data e hora no formato ISO 8601.

10. Programas utilizados experimento de distância e potência de comunicação no envio de mensagem

Nome do Programa	ESP32_lora_pponto_emissor_par_def
Descrição	Programa do experimento de distância e potência de comunicação via canal LoRa, que transmite dados com 48 Bytes.
Nome do Programa	ESP32_lora_pponto_receptor_par_def_now_emissor
Descrição	Programa do experimento de distância e potência de comunicação via canal LoRa, que recebe dados com 48 Bytes e os transmite via canal ESP-NOW para um terceiro ESP32.
Nome do Programa	ESP32_lora_pponto_receptor_par_def_now_receptor_gps
Descrição	Programa do experimento de distância e potência de comunicação via canal LoRa, que recebe dados com 48 Bytes via canal ESP-NOW e os grava em uma memória micro SD.

APÊNDICE B – MÓDULOS E DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Neste apêndice são mostradas as principais características, funcionalidades e interligação dos módulos e dispositivos de hardwares utilizados no projeto, e como a integração destes ocorreram para atender os objetivos do projeto de pesquisa.

1. Microcontrolador ESP32

1.1. Introdução

O ESP32 é um microcontrolador de baixo consumo de energia e baixo custo. Ele foi criado e desenvolvido pela empresa Espressif Systems (ESPRESSIF, 2022), especializada em soluções de Wi-Fi e Bluetooth de baixa potência, que inclui em sua linha de microcontroladores, além do ESP32, os módulos e placas de desenvolvimento ESP8266 com suas variações, que aproveitando a computação sem fio, oferecem e proporcionam soluções para serem aplicadas em IoT (BERTOLETI, 2019).

Com o ESP32, há a possibilidade de uma prototipagem rápida em projetos, oferecendo uma boa capacidade computacional, nos itens de processamento, quantidade de memória e conectividade.

Para a programação do ESP32, pode ser utilizada uma variedade de plataformas de desenvolvimento, como o Arduino IDE com a linguagem C / C++ (SANTOS, 2021), o Espruino com a linguagem JavaScript SDK, e ESPlorer IDE com a linguagem Lua.

O ESP32 utiliza a tecnologia *System on a Chip* (SoC), que é um circuito integrado que reúne dois ou mais componentes eletrônicos de um único chip, como processadores, vários tipos de memória (ROM, RAM, EEPROM e memória flash), GPUs (*Graphics Processing Units*), diversos padrões de conectividade, como Wi-Fi, GPS, Bluetooth, interfaces analógicas (Conversor Analógico Digital (ADC) e Conversor Digital Analógico (DAC)), reguladores de tensão e circuitos de gerenciamento de energia, entre outros. Os SoCs têm como meta a redução do consumo de energia e melhoria do desempenho de equipamentos e dispositivos, como notebooks, computadores e *tablets*.

1.2 Descrição dos recursos

Na Figura 50 é apresentado o diagrama do ESP32, destacando os seus principais recursos, que são descritos a seguir:

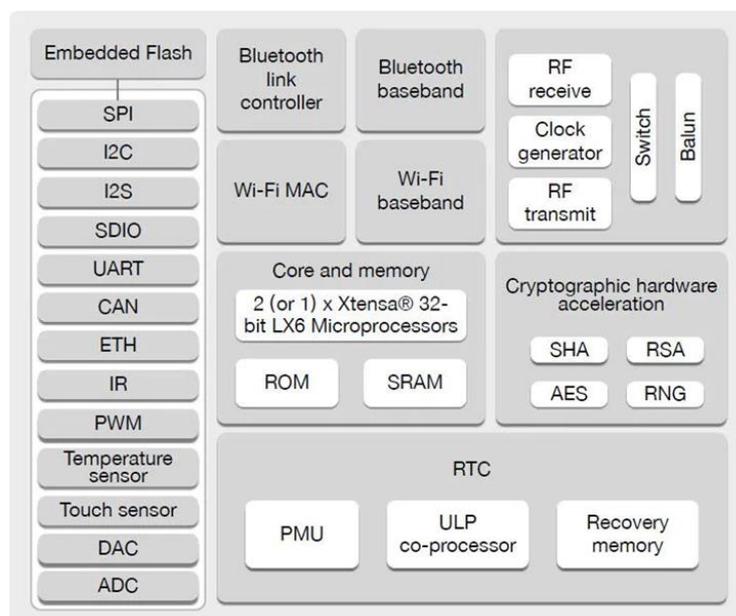


Figura 50 - Diagrama do ESP32

Fonte: autor com base em Bertoleti (2019).

- a) **Processador e Memória:** microprocessador Xtensa Single/Dual-core de 32 bits LX6, 160 MHz a 240 MHz, 600 DMIPS; coprocessador de baixo consumo de energia; e memórias ROM com capacidade de 448 KB e SRAM com capacidade de 520 KB.
- b) **Conectividade sem fio:** Wi-Fi que atende os padrões 802.11 b/g/n/e/, e Bluetooth de versão v4.2 BR/EDR e BLE.
- c) **Segurança:** suporta os padrões IEEE 802.11 WPA, WPA/WPA2 e WAPI, boot seguro, criptografia de memória flash, aceleração de hardware criptográfico de padrões AES, SHA-2, RSA, criptografia de curva elíptica (ECC), e gerador de números aleatórios (RNG).
- d) **Gerenciamento de energia:** regulador interno de baixa queda; domínio de energia individual para RTC; corrente de desativação profunda de 5µA; ativação por interrupção no GPIO; temporizador; medições ADC; e interrupção do sensor de toque capacitivo.
- e) **Interfaces Periféricas:** ADC de 12 com bits até 18 canais; dois DACs de 8 bits, 10 sensores de toque (GPIOs de detecção capacitiva); sensor de temperatura; quatro portas SPI; duas interfaces I2S; duas interfaces I2C; três

UART; controlador de host (SD/SDIO/CE-ATA/MMC/e MMC); controlador escravo (SDIO/SPI); interface Ethernet MAC com suporte dedicado a DMA e IEEE 1588; interface *Controller Area Network 2.0* (CAN); controlador remoto infravermelho (TX/RX, até oito canais); sensor de efeito Hall; pré-amplificador analógico de potência ultrabaixa.

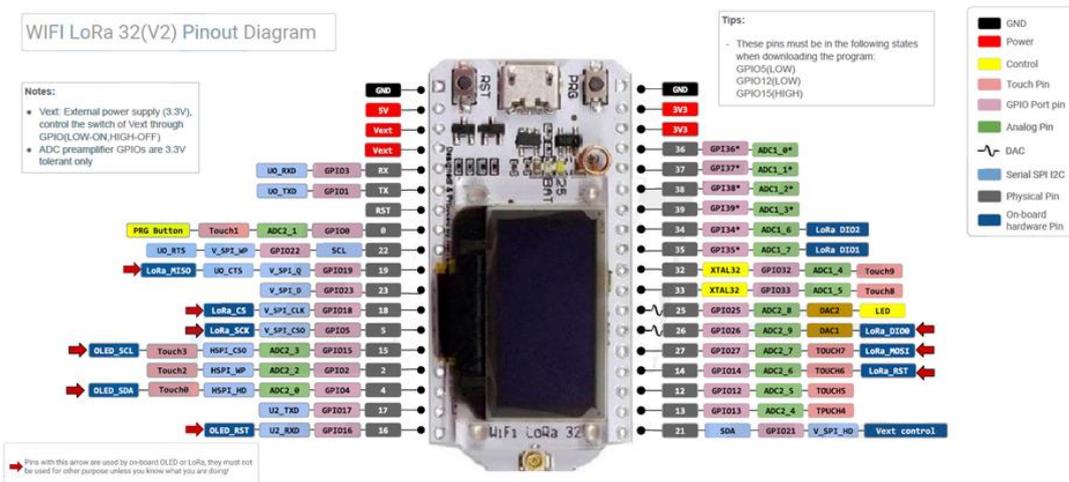
2. Módulo WiFi LoRa 32(V2)

O Módulo WiFi LoRa 32(V2), de fabricação da Heltec (HELTEC.ORG, 2022), é um poderoso sistema integrado, que além de ter um ESP32, possui:

- Um *chip* LoRa SX1276, com modo de modulação LoRa, FSK, GFSK e OOK, frequência de operação de 915 MHz e potência máxima de 20 dB.
- Um *display* OLED 0.96", com de resolução: 128x64 pixels e escrita azul.
- O Arduino IDE, como ferramenta de programação.

Com todas estas características é um bom candidato nos projetos da IoT.

Figura 51 apresenta a sua, pinagem com a indicação das respectivas funções.



Outros recursos nele incorporados são: um relógio de precisão; um sensor de temperatura; filtros digitais e interrupção programável; e interfaces seriais I²C e SPI.

Fabricado segundo a tecnologia MEMS, é utilizado para criar dispositivos integrados miniaturizados, que possuem componentes eletrônicos e mecânicos. São fabricados no processo de lote de CI, podendo seu tamanho variar de menos de um micron a até alguns milímetros.

Tem como uma das suas principais aplicações o acompanhamento e detecção de movimento. Outras aplicações são as de: avaliar a posição relativa e o ajuste do visor de *smartphone*; detectar a posição em *tablets* e videogames; e monitoramento humano da saúde, ginástica e esporte, em serviços baseados em localização, entre outras.

O seu fabricante Invensense (INVENSENSE, 2022) disponibiliza pelo menos dois manuais para utilização do seu *chip*, o MPU-9250 *Product Specification* e o MPU-9250 *Register Map and Descriptions*.

3.2. Fundamentos do Acelerômetro

No presente projeto foi utilizado apenas o acelerômetro do MPU 9250, cujos fundamentos de seu funcionamento são apresentados a seguir.

Pela segunda lei do movimento do cientista Isaac Newton, a aceleração está relacionada a massa e a força, através da Equação $F = ma$ (Figura 52).

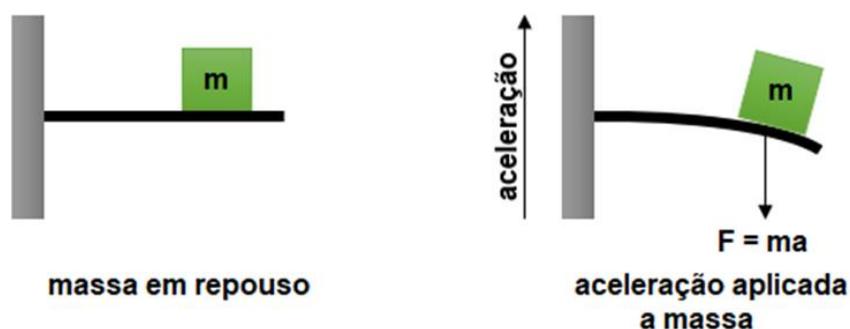


Figura 52 - Representação da Segunda Lei de Newton
Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

Já o sistema de massa e mola é o princípio básico por trás do funcionamento deste acelerômetro. A mola e outros materiais elásticos seguem a Lei de Hooke, enquanto dentro da região linear, que diz que quando uma mola sofre deformação exercida por uma força, ocorre uma força restauradora, que tende a voltar à sua forma inicial, quando a força é retirada, ou seja $F = kx$, no qual k é a constante elástica da mola, como mostrado na Figura 53.

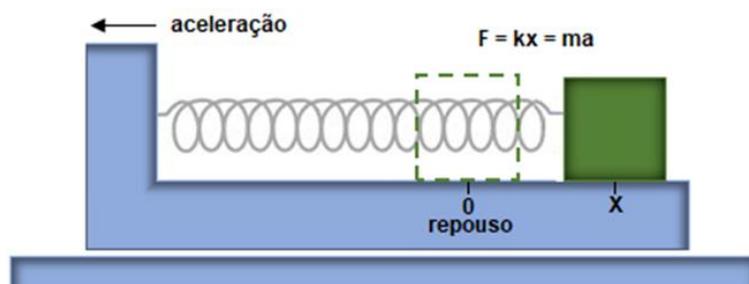


Figura 53 - Lei de Hooke

Fonte: autor.

Igualando as duas equações, tem-se $F = ma = kx$, podendo ser observado que a aceleração causa um deslocamento na massa $x = (ma)/k$. Como há um deslocamento, a massa está sobre ação de uma aceleração $a = (kx)/m$. Assim a medida do deslocamento de uma massa resulta na medida da aceleração. Nesta Figura 53, obtém-se a aceleração ao longo da mola, que é a representação de um acelerômetro em um único eixo. Para medir mais de um eixo é necessário este sistema ao longo dos outros eixos.

No acelerômetro MPU 9250 foi utilizada a tecnologia MEMS, que consiste em um sistema de massa e mola, construída em estruturas mecânicas de tamanho microscópico, feito em sua forma padrão em pastilhas de silício. Como mostrado na Figura 54 a estrutura é suspensa por molas que estão ancoradas em pontos fixos, a deflexão desta estrutura, vai deslocar as placas móveis em direção as placas fixas, com a variação da capacitância de C1 e C2 e esta variação é proporcional a aceleração naquele eixo.

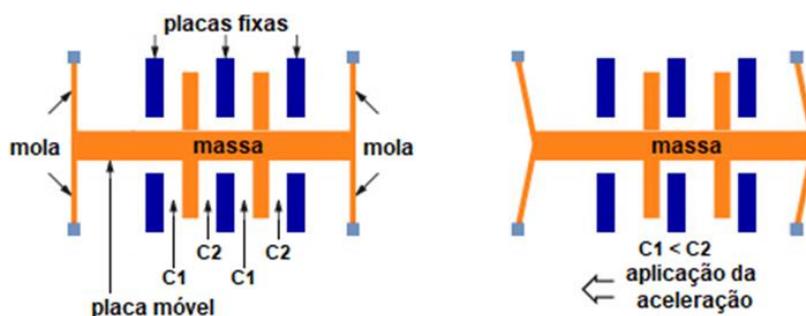


Figura 54 - Funcionamento da tecnologia MEMS no acelerômetro

Fonte: autor.

Os principais recursos do dispositivo, da placa com o *chip* integrado e as conexões elétricas do MPU 9250 são apresentadas a seguir.

- a) **Recursos do acelerômetro MEMS:** possui três eixos com saída digital, com valores de escala programável de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g e ± 16 g. e conversor

ADC de 16 bits integrado. A corrente de operação normal é de 450 μ A. A corrente do modo de baixa potência é de 8,4 μ A a 0,98 Hz e 19,8 μ A a 31,25 Hz. A corrente do modo de *standby* é de 8 μ A. Possui interrupções programáveis pelo usuário, interrupção *Wake-on-motion* (WoM), que transmite uma interrupção de alerta ao usuário quando há transição no acelerômetro de um estado estacionário para o de movimento, maior que a programada, e Autoteste.

- b) **Recursos adicionais:** Interface serial. I²C operando em modo rápido de 400k Hz. Interface serial I²C auxiliar para leitura de sensores externos. Interface serial SPI de 1 MHz. Possui buffer FIFO de 512 bytes para rajadas de leitura de dados. A sua corrente de operação normal é de 3,5 mA, com os nove eixos e o DMP habilitados. Possui sensibilidade de eixo transversal mínima entre os eixos dos três sensores; sensor de temperatura; filtros digitais programáveis para o acelerômetro, giroscópio e sensor de temperatura pelo usuário; 10.000 g de tolerância a choque; e tensão de alimentação VCC com faixa de 2,4 a 3,6 VCC.

3.3. Descrição da placa com o *chip* integrado

A placa MPU 9250 tem incorporado um regulador de tensão de 3,3 VCC, que permite que se aplique tensão entre 3,3 a 5 VCC em sua alimentação, mas quando se apresenta em 3,3 VCC fixo, recomenda-se que feche o *jumper* que existe entre a entrada e saída do regulador de tensão. Nos Pinos SDA (*Serial Data*) e SCL (*Serial Clock Line*) tem-se o barramento I²C, no qual se faz a comunicação deste dispositivo com um controlador, podendo enviar o conjunto de dados deste para o processamento. No pino AD0 pode-se endereçar esta placa, podendo-se instalar até duas destas em um mesmo barramento. Com a aplicação de uma tensão VCC neste pino, a placa terá endereço 0x69, caso contrário, o endereço será 0x68. Os pinos EDA e EDL são um barramento I²C auxiliar, no qual podem ser conectados outros dispositivos. O pino INT pode ser ligado a um processador, para controle deste. O pino NCS, ao ser ativado, faz a seleção do canal SPI. O pino FSYNC é utilizado para sincronizar medidas. Estes pinos estão descritos na Quadro 13.

3.4. Interligação elétrica do MPU 9250 (GY 9250)

A interligação entre o MPU 9250 e o ESP32 para a coleta de dados é feita por meio da interface serial I²C nos pinos SDA e SCL para o dispositivo, e para o

controlador, nos pinos GPIO4 (SDA) e GPIO15 (SCL). Sua alimentação é fornecida pelos pinos 3V3 (VCC) e GND do ESP32. O pino AD0 no presente projeto foi conectado ao VCC, fornecendo o endereço 0x69. Os pinos EDA, EDL, NCS e FSYNC não foram utilizados. O pino INT foi ligado em uma interrupção do ESP32, para o controle de economia de energia. A Figura 55 apresenta interligação entre ESP32 e o MPU 9250.

Pino	Descrição	Observação	Foto
VCC	3,3 a 5 V	-	
GND	Terra	-	
SCL	Bus I ² C	<i>pull-up</i> de 10k Ω	
SDA	Bus I ² C	<i>pull-up</i> de 10k Ω	
EDA	Bus I ² C auxiliar	-	
EDL	Bus I ² C auxiliar	-	
ADO	Endereço	<i>pull-down</i> de 10k Ω	
INT	Interrupção	-	
NCS	Seleciona <i>chip</i>	<i>pull-up</i> de 10k Ω	
FSYNC	Sincronizador de <i>frame</i>	<i>pull-down</i> de 10k Ω	

Quadro 13 - Pinagem da placa GY 9250 (MPU 9250)

Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

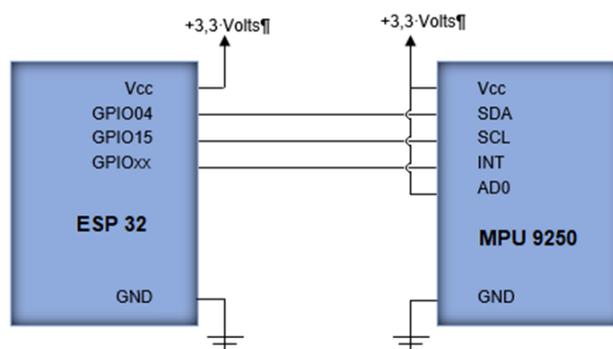


Figura 55 - Interligação entre ESP32 e o MPU 9250

Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

3.5. Instalação do MPU 9250 em árvores

Um ponto a ser observado na instalação desta placa de circuito impresso é a orientação dos eixos X, Y e Z, em relação ao ponto de marcação, como mostrado na Figura 56.

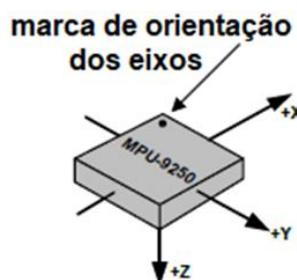


Figura 56 - Sinalização da marca de orientação dos eixos do acelerômetro
Fonte: autor com base em Invensense (2022).

O MPU 9250 é um acelerômetro triaxial. Como o dispositivo estará sobre a superfície da terra, ficará sujeita a aceleração da gravidade (g). Se o dispositivo não for instalado de forma inclinada um dos eixos deverá indicar 1 g.

3.6. Comunicação MPU 9250 com o ESP32

A troca de dados entre o MPU 9250 e o controlador é feita através de seus registradores via interface serial I²C (INVENSENSE, 2022).

Quando se faz a leitura dos registradores do MPU 9250, as informações contidas neles estão na forma de bit ou byte, tanto para *status* quanto para dados dos dispositivos. Portanto, para se obter o dado de qualquer eixo do acelerômetro (X, Y ou Z), tem-se que se concatenar dois bytes. Estes dados estão nos endereços de forma contínua dos registros de 0x3B até 0x40. No Quadro 14 apresenta-se como concatenar estes dados.

		Eixo	Bits [15:8]	Bits [7:0]
Acelerômetro	X	Endereço	0x3B	0x3C
		Registro	ACCEL_XOUT_H	ACCEL_XOUT_L
	Y	Endereço	0x3D	0x3E
		Registro	ACCEL_YOUT_H	ACCEL_YOUT_L
	Z	Endereço	0x3F	0x40
		Registro	ACCEL_ZOUT_H	ACCEL_ZOUT_L
			8 bits	8 bits
			16 bits	

Quadro 14 - Forma de concatenar os registros do GY 9250 (MPU 9250)
Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

Os valores de aceleração são sinais de 16 bits de dados (faixa de leitura de 32.768 até 32.767). A interpretação deste valor está relacionada ao dado configurado no registro ACCEL_CONFIG (0x1C), que pode variar de ± 2 g até ± 16 g, conforme mostra a Tabela 19.

Acelerômetro		
AFS_SEL	Escala	Resolução
0	± 2 g	2/32.767
1	± 4 g	4/32.767
2	± 8 g	8/32.767
3	± 16 g	16/32.767

Tabela 19 - Escala e resolução do acelerômetro

Fonte: autor com base em Invensense (2022).

No Gráfico 28 está representada a escala e resolução utilizada neste projeto de pesquisa.

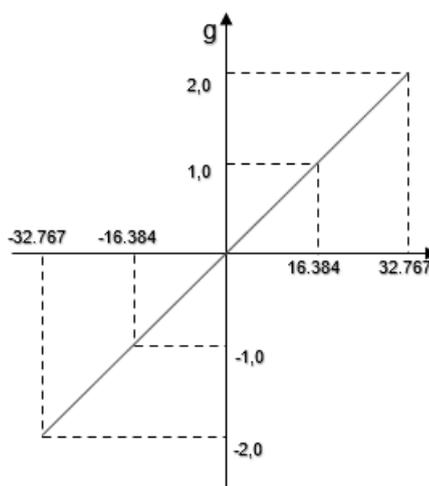


Gráfico 28 – Valor da escala em relação a resolução

Fonte: autor com base em Invensense (2022).

3.7. Controle de interrupção

No MPU 9250 as funcionalidades de interrupção são configuradas por meio de registros. Os itens a serem configurados são o pino, o travamento, a limpeza e o gatilho da interrupção. O Quadro 15 apresenta as possibilidades de configuração.

Na Figura 57, tem-se o fluxograma com a explicação da configuração a ser seguida nos registros do MPU 9250, para uma interrupção por detecção de movimento. Os detalhes estão nos documentos Mapa de Registros e Descrição dos Registros do MPU 9250 (INVENSENSE, 2022).

Para habilitar de forma correta a interrupção, o pino de interrupção deve ser interligado em um pino do GPIO do processador que seja capaz de ativar o seu sistema interno.

Nome da interrupção	Módulo
Detector de movimento	Movimento
Estouro FIFO	FIFO
Dados prontos	Registros de Sensores
Erros do mestre I ² C: arbitragem perdida, NACKs	Mestre I ² C
Escravo I ² C 4	Mestre I ² C

Quadro 15 - Fontes de Interrupção MPU 9250

Fonte: autor com base em Invensense (2022).

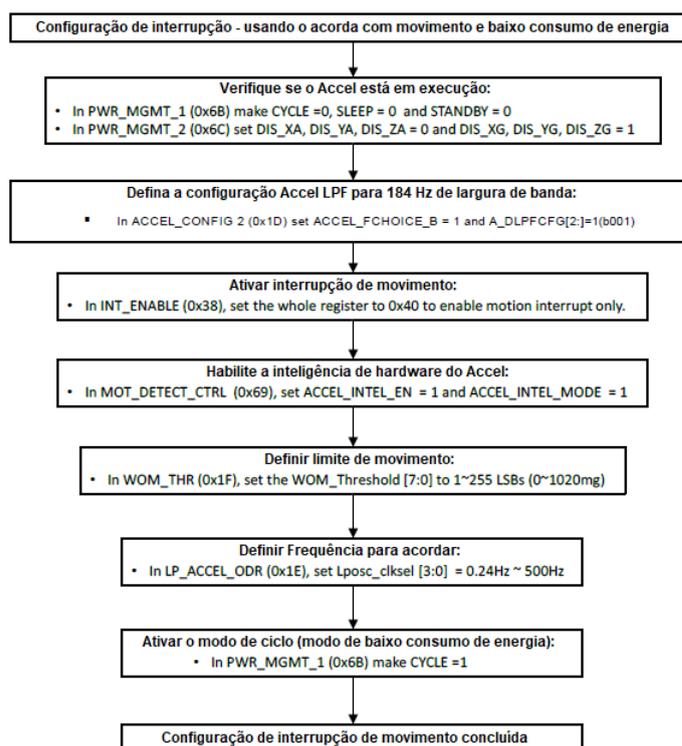


Figura 57 - Fluxograma da configuração de interrupção pela detecção de Movimento
Fonte: autor com base em Invensense (2022).

4. DS3231 Real Time Clock

4.1. Introdução

O DS3231 é um relógio em tempo real (RTC) com boa precisão e baixo custo, com comunicação I²C e compensação de temperatura integrado. Possui entrada para bateria incorporada ao dispositivo, possibilitando a cronometragem precisa mesmo com a interrupção de sua alimentação (MAXIM INTEGRATED, 2015).

4.2. Descrição dos recursos

- Possui funções de cronometragem, como segundos, minutos, horas, data do mês, mês, dia da semana e ano, com compensação de ano bissexto válida até 2100.

- b) Interface serial I²C com o processador.
- c) Possui operação de baixa energia, com prolongamento do tempo de duração da bateria de *backup*.

4.3. Interligação e pinagem da placa DS 3231

A interligação entre DS 3231 e o ESP32 para a coleta de dados é feita pela interface serial I²C, utilizando os pinos SDA e SCL do dispositivo e no controlador, utiliza os pinos GPIO4 (SDA) e GPIO15 (SCL). Sua alimentação é fornecida pelos pinos 3V3 (VCC) e GND do ESP32, como mostrado na Figura 58 e no Quadro 16.

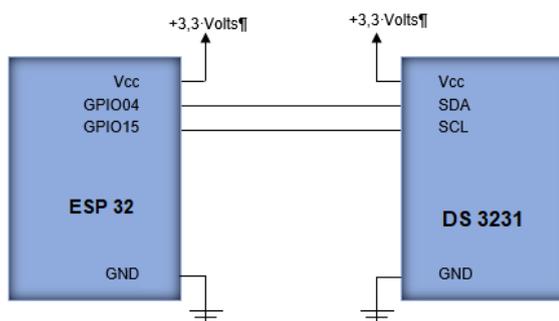


Figura 58 - Interligação entre ESP32 e o DS 3231

Fonte: autor.

Pino	Descrição	Observação	Foto
VCC	3,3 a 5 V	-	
GND	Terra	-	
SCL	Bus I ² C	<i>pull-up</i> de 10kΩ	
SDA	Bus I ² C	<i>pull-up</i> de 10kΩ	

Quadro 16 - Pinagem da placa DS 3231

Fonte: autor.

4.4. Comunicação DS 3231 com o ESP32

A troca de dados entre o DS 3231 e o controlador é feita através de seus registradores via interface serial I²C, descritos no site da Maxim Integrated (2015).

5. Interface serial I²C

5.1. Introdução

A interface I²C (*Inter-Integrated Circuit*) é um barramento serial a dois fios projetada pela Philips no início dos anos 1980, permitindo uma comunicação simples e de baixo custo entre os componentes em uma mesma placa de circuito impresso ou em placas próximas. Em 2006 a Philips vendeu a sua divisão de semicondutores para a empresa NXP.

Um barramento I²C pode comporta até 127 dispositivos, cada um com endereço único. A qualquer momento dois dispositivos podem usar o barramento, sempre sendo um com a função de mestre, e o outro, de escravo. As conexões também podem ser via cabo, com aspectos simples e flexíveis o que os torna atrativos para muitas aplicações(I²C-BUS.ORG, 2022).

Two Wire Interface Bus, que significa *Two Wire Interface*, é um barramento que na maioria das vezes é igual ao I²C, exceto em algumas situações como o endereçamento em 10 Bit e transmissão. Esse nome foi introduzido pela empresa Atmel Corporation e outras para evitar conflito relacionado a marca I²C.

5.2. Descrição dos recursos

- O barramento necessita de apenas dois condutores.
- Pode operar os dispositivos como mestre ou escravo.
- O barramento pode ter múltiplos mestre, que fornecem arbitragem e detecção de colisão.
- Utiliza 7 bits para endereçamento (128 endereços).
- O mestre gera um *clock* de barramento.
- A taxa de transmissão, pode chegar até 400 kbit/s.
- Possui uma forma simples e eficiente de comunicação.

5.3. Barramento

O barramento para comunicação I²C possui dois condutores, denominados SDA e SCL, no qual todos os dispositivos são conectados. Nestes condutores podem ser utilizados dois resistores de pull-up, um para cada um deles. O valor pode variar de 2 k Ω a 10 k Ω , sendo que seu valor típico é 4,7 k Ω , conforme mostrado na Figura 59.

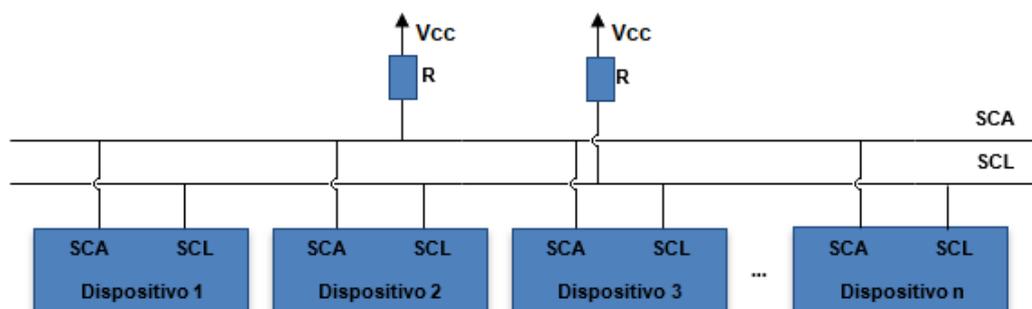


Figura 59 - Interligação dos dispositivos no barramento I²C
Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

5.4. Protocolo

a) Controle de barramento.

A forma de controle dos dados no barramento é apresentada, no Quadro 17.

Controle	Descrição
Mestre	Inicia e termina a transmissão; também é o responsável em gerar o <i>clock</i> no condutor SCL.
Escravo	Dispositivo endereçado pelo mestre.
Transmissor	Envia dados pelo barramento.
Receptor	Recebe dados pelo barramento.

Quadro 17 - Controle de dados no barramento I²C

Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

As combinações possíveis deste controle estão mostradas no Quadro 18.

Modo	Descrição
Mestre transmissor	Mestre envia dados para o escravo.
Mestre receptor	Mestre recebe dados do escravo.
Escravo transmissor	Escravo envia dados para o mestre.
Escravo receptor	Escravo recebe dados do mestre.

Quadro 18 - Modo de controle do barramento I²C

Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

6. Interface serial SPI

6.1. Introdução

A interface *Serial Peripheral Interface* (SPI) é um barramento serial a quatro fios. Utiliza a arquitetura mestre-escravo, de forma geral com um único mestre (que controla a comunicação). Ele projetado pela Motorola em meados da década de 1980, tornando-se popular na eletrônica digital (ZELENOVSKY, R.; MENDONÇA, 2019).

Seu protocolo permite a comunicação de microcontroladores com diversos outros componentes em modo síncrono bidirecional, formando uma rede. Operação em alta velocidade, o que o impede de se comunicar com placas de circuito impresso (PCI) separadas, pois nesse caso há um aumento da capacitância adicionado às linhas de sinal que distâncias mais longa produz. Dessa forma, o padrão é recomendado para curtas distâncias (MOTOROLA INC., 2003).

6.2. Descrição dos recursos

- a) Opera como mestre ou como escravo.
- b) Comunicação *full-duplex* (bidirecional) de alta velocidade.

- c) O barramento utiliza três condutores, com transferência síncrona.
- d) Opera a rede com um único mestre.
- e) Mestre com saída de seleção de escravo individual.
- f) Sequência de bit flexível, entre bit mais e menos significativo e vice-versa.
- g) *Flag* para indicar final da transmissão dos dados.
- h) Relógio serial com polaridade, fase e *baud rate* programáveis.

6.3. Barramento

O barramento para comunicação SPI possui três fios, e utiliza o conceito de mestre e escravo. O mestre controla o barramento, é responsável por gerar a linha de sincronismo no pino SCK, e iniciar e finalizar as comunicações. O escravo só responde a solicitações feitas pelo mestre. As comunicações de dados são realizadas pelas linhas denominadas MOSI (*Master Output Slave Input*), MISO (*Master Input Slave Output*), SCK – sinal de *clock* gerado pelo mestre e conectado ao escravo para sincronismo dos dados, e SS – linha para selecionar qual o escravo que irá trocar dados com o mestre. Ela é individual e deve ter uma para cada escravo. Os detalhes desse barramento são mostrados nas Figura 60 e Figura 61.

6.4. Protocolo

Os registradores que permitem o controle e operação da interface SPI e o protocolo empregado, são descritos no manual Motorola (2003).

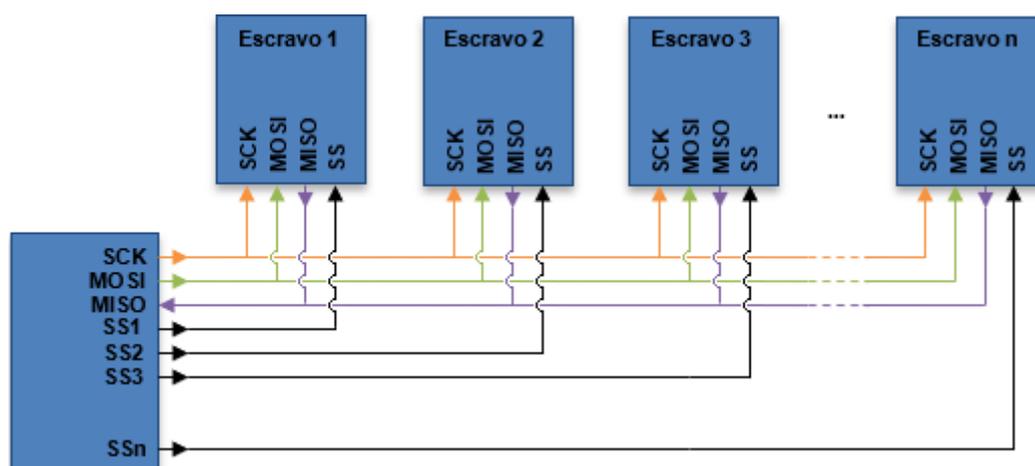


Figura 60 - Interligação dos dispositivos mestre e escravo no barramento SPI
Fonte: autor.

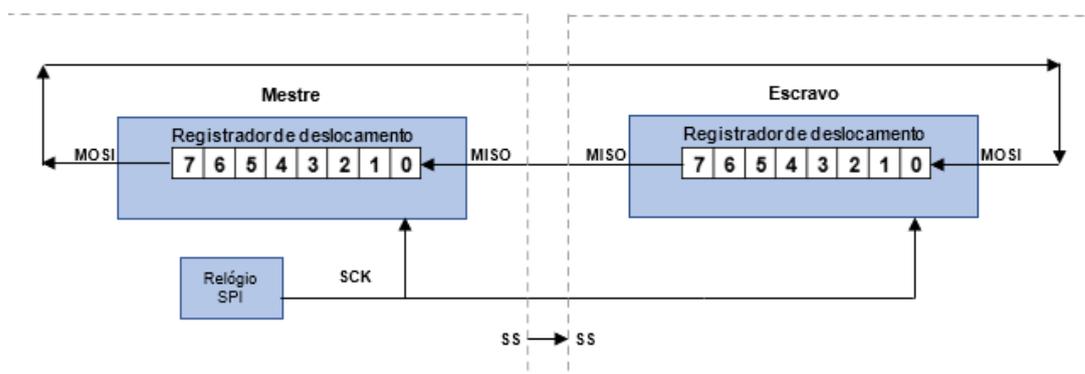


Figura 61 - Interligação do mestre com o escravo, com destaque para o registrador de deslocamento

Fonte: autor com base em Zelenovsky e Mendonça (2019).

7. DLG4000 - Data logger

7.1. Introdução

O *data logger* DLG4000 é um registrador de dados, que pode trabalhar como um coletor de dados autônomo de alta performance ou como um sistema de aquisição de dados convencional, enviando os dados coletados para um computador (Figura 62). Estes dados são armazenados em tempo real, podendo (opcionalmente) ser georreferenciados (LYNX, 2020).

7.2. Descrição dos recursos

- Entradas analógicas configuráveis por software, suportando diversos tipos de sensores.
- Alimentação de 90 a 240 VAC ou de 10 a 30 VCC, sendo adequado para operar em sistemas embarcados.
- GPS opcional.
- Armazenamento em memória SDHC até 32 Gbytes de dados.
- Baixo consumo de energia.



Figura 62 - Data logger DLG4000

Fonte: autor com base em (LYNX, 2020).

8. SNS-ABS05 - Acelerômetro

8.1. Introdução

O acelerômetro triaxial, construído com tecnologia MEMS, é um dispositivo com a sua eletrônica integrada. Suas principais aplicações são ensaios estruturais, análise de vibração e análise de movimento, como mostrado na Figura 63 (LYNX, 2019).

8.2. Descrição dos recursos

- a) Saídas de tensão independentes para cada eixo.
- b) Alimentação de 5 VCC, com baixo consumo.
- c) Medição de componente DC da aceleração.
- d) Caixa com alta resistência mecânica.



Figura 63 - Acelerômetro SNS-ABS05
Fonte: autor com base em (LYNX, 2019).

9. AN-3C- Anemômetro e Anemoscópio

9.1. Introdução

O anemômetro é um equipamento que serve para medir a velocidade de um fluido. Normalmente os anemômetros são utilizados em Estações Meteorológicas. Seus principais tipos são: o de concha, o sônico e o de hélice, utilizados para medição do vento. O anemoscópio é um dispositivo que mostra a direção ou mudança na direção do vento.

O dispositivo AN-3C é composto por três unidades: de sensoriamento, transmissora e controladora, mostradas na Figura 64 (S&E-INSTRUMENTOS, 2020).

9.2. Descrição dos recursos

- a) Unidade de sensoriamento com anemômetro para medição de velocidade máxima do vento de 150 km/h, e com anemoscópio que utiliza a rosa dos ventos para apresentar a direção do vento que é formada pelos pontos cardeais, pontos colaterais e seus intermediários.

- b) Unidade transmissora com rádio de 433 MHz e alcance de até 1 km em área livre, com alimentação através de energia solar e bateria recarregável
- c) Unidade controladora com *display* que apresenta os dados de velocidade e direção do vento, sinal de transmissão da antena e tensão da bateria da unidade transmissora, com saída em corrente com o valor da velocidade do vento, canal Modbus que reproduz os dados do *display*, palavra de status, e sua alimentação de 85 a 260 VAC ou de 9 a 30 VCC.

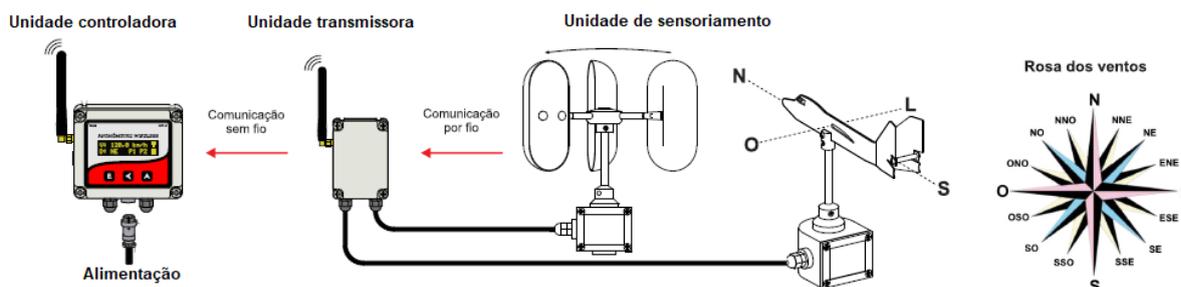


Figura 64 - Anemômetro e Anemoscópio AN-3C
Fonte: autor com base em (S&E-INSTRUMENTOS, 2020).

10.SP1-12 - Transdutores de extensão de cabo

10.1. Introdução

Trata-se de um transdutor compacto que utiliza um cabo flexível, um carretel com mola e um potenciômetro para detectar e medir uma posição linear, como mostrado na Figura 65 (TE SENSOR SOLUTIONS, 2022).

10.2. Descrição dos recursos

- a) Intervalos de curso de 0 a 50”.
- b) Sinal de saída com divisor de tensão (potenciômetro).
- c) Resistência de entrada de 10k Ω .
- d) Alimentação de 30 VCC.



Figura 65 - Transdutor de extensão de cabo - SP1-12
Fonte: autor com base em (TE SENSOR SOLUTIONS, 2022).

11. KFC-20-C1-11 – Extensômetro (*strain gauge*)

11.1. Introdução

Trata-se de um transdutor capaz de medir mudanças relativas no comprimento de um material (deformações mecânicas em corpos de prova), devido a forças aplicadas. É um bipolo de resistência nominal, que quando fixado sobre o corpo de interesse e este sofre deformação, tem alterada a sua resistência, como mostrado na Figura 66 (KYOWA-ELECTRONIC INSTRUMENTS, 2022).

11.2. Descrição dos recursos

- a) Resistência $120,0\Omega \pm 0,3\Omega$.
- b) Fator de medição $2,10 \pm 10\%$.
- c) Faixa de temperatura operacional -20 a $80\text{ }^\circ\text{C}$.
- d) Comprimento 20 mm.
- e) Nível de tensão ± 1.500 micro-strain.
- f) Medição uniaxial.



Figura 66 - Extensômetro KFC-20-C1-11

Fonte: autor com base em (KYOWA-ELECTRONIC INSTRUMENTS, 2022).

12. Arduino MEGA 2560 – Microcontrolador

12.1. Introdução

Placa da plataforma Arduino, que possui recursos para prototipagem eletrônica em código aberto, e que se baseia em hardware e software flexíveis e fáceis de usar, mostrado na Figura 67 (ARDUINO, 2022).

12.2. Descrição dos recursos

- a) Processador ATMEGA2560.
- b) Alimentação de 7 a 30 VCC.
- c) 54 pinos de entradas e saídas digitais, sendo que 15 destes podem ser utilizados como saídas PWM.
- d) 16 entradas analógicas.
- e) Comunicação USB, Serial, SPI e I²C.
- f) Fornece tensão de 3,3 VCC ou 5 VCC.
- g) Fornece *Ground* de referência.



Figura 67 - Microcontrolador Arduino MEGA 2560
Fonte: autor com base em (ARDUINO, 2022).

13. LCD 16x2 – Display com módulo I²C

13.1. Introdução

É um dispositivo que é utilizado para mostrar informações ou imagens, como mostrado na Figura 68 (TINSHARP, 2009) e (INSTRUMENTS, 2003).

13.2. Descrição dos recursos do *display*

- a) Cor verde.
- b) Controlador HD44780.
- c) Alimentação 5 VCC.
- d) Linhas 2.
- e) Colunas 16.
- f) Área visível 64,5 x 16 mm.

13.3. Descrição dos recursos do módulo I²C

- a) Comunicação I²C com endereço: 0x20-0x27 (padrão 0x20, mas pode ser modificado).
- b) Compatível com Display LCD 16X2 e LCD 20X4.
- c) Alimentação 5 VCC.

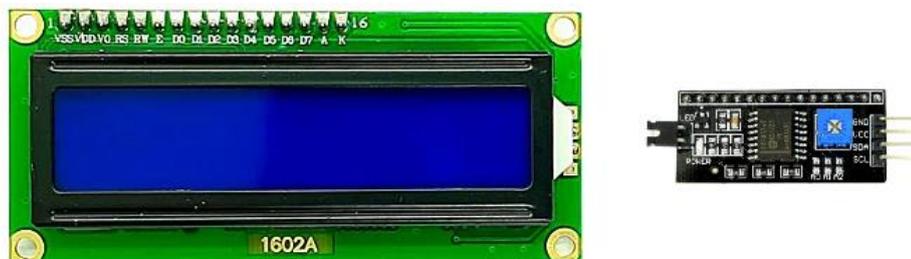


Figura 68 - Display LCD 16x2 com módulo I²C
Fonte: autor com base em (TINSHARP, 2009) e (INSTRUMENTS, 2003).

APÊNDICE C – PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO UTILIZADOS

Neste apêndice são apresentadas as principais características e funcionalidades dos protocolos utilizados no projeto, como protocolo das camadas OSI, arquitetura de rede e testes.

1. Protocolo MQTT

1.1. Introdução

O protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) foi desenvolvido pela International Business Machines (IBM) e Eurotech (agora Cirrus Link), na década de 1990, de forma a não exigir um alto poder computacional (baixo processamento e uso de memória) e baixa largura de banda, garantindo algum nível de segurança e confiabilidade na entrega das mensagens.

Em 1999 os engenheiros Andy Stanford-Clark (IBM) e Arlen Nipper (Cirrus Link), tiveram a ideia que levou ao desenvolvimento na época da primeira aplicação, que era conectar um sistema de monitoramento de oleoduto de petróleo, através de satélites, que era um recurso muito caro naquele momento. A princípio o protocolo era para uso particular, sendo liberado ao público só no ano de 2010, e se tornou um padrão da Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS) em 2014. A versão 5.0 é a mais recente do protocolo, desde abril de 2019.

Com características de baixo consumo de memória e banda e a baixa necessidade de processamento para o envio de mensagem, é um bom protocolo para as aplicações em IoT e comunicação de *Machine to Machine* (M2M). O protocolo MQTT é usado em uma ampla variedade de aplicações, como nas indústrias de petróleo, gás, automotiva, manufatura, telecomunicações, entre outras.

1.2. Descrição do protocolo MQTT

O MQTT é um protocolo de mensagens leve e comandos entre dispositivos e sensores, otimizado para redes TCP/IP (*Transmission Control Protocol* (TCP) e *Internet Protocol* (IP)), situando-se na Camada e Aplicação. O padrão de troca de mensagens é baseado no modelo Publicador-Subscritor (BERTOLETI, 2019; SANTOS, 2021).

a) Conceitos do protocolo.

1) *Publisher* / *Subscriber*.

Publisher (remetente) é um dispositivo MQTT que envia a mensagem.

Subscriber (destinatário) é um dispositivo MQTT que recebe a mensagem.

Inúmeros dispositivos podem enviar e/ou receber mensagens e elas podem ser apenas de dados ou de comandos. Na Figura 69 tem-se o diagrama de comunicação do protocolo MQTT.

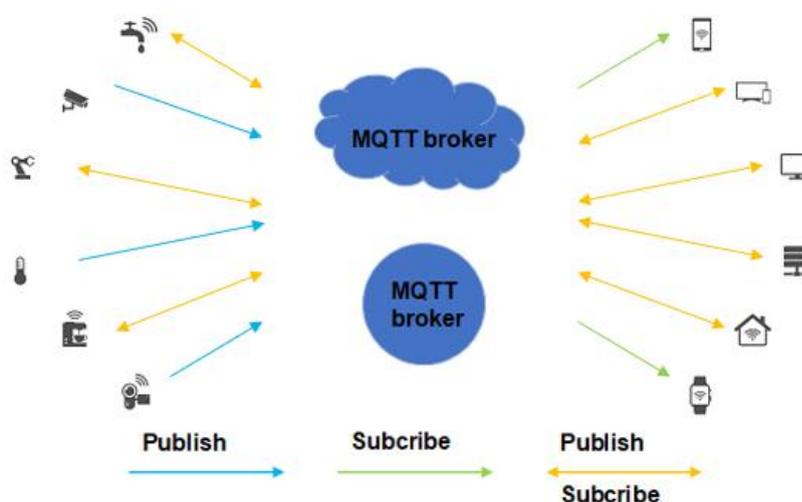


Figura 69 - Diagrama de comunicação do protocolo MQTT

Fonte: autor.

2) **Broker.**

Elemento essencial no protocolo, ele é um servidor intermediário de informação entre os dispositivos “*publisher*” e “*subscriber*”.

Sua função é receber, filtrar, enfileirar e distribuir as mensagens, a quem está interessado nela ou não. Na Figura 70, Figura 71 e Figura 72 tem-se os diagramas de comunicação do protocolo MQTT.

3) **Tópico.**

É utilizado para direcionar a mensagem publicada. É o endereço para o qual os dados serão encaminhados.

4) **Payload.**

É o conteúdo da mensagem enviada.

5) **Quality of Service (QoS).**

É um acordo entre remetente e destinatário, com relação a garantia da entrega da mensagem. Neste protocolo há três tipos de qualidade de serviço, que são:

QoS = 0, envia a mensagem uma vez.

É a mais simples das configurações. Faz a entrega da mensagem apenas uma única vez, tendo a possibilidade de chegar ao destino, já que não há configuração de confirmação de entrega. Diagrama da comunicação mostrado na Figura 70.

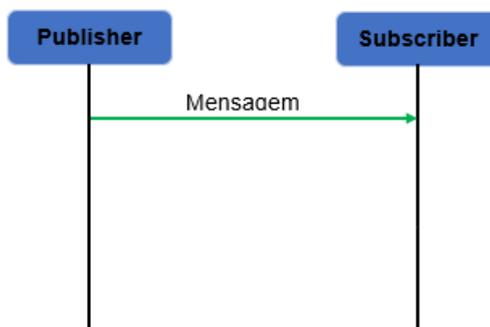


Figura 70 - Diagrama de comunicação QoS = 0
Fonte: autor com base em Santos (2021).

QoS = 1, envia a mensagem uma ou mais vezes.

É a configuração padrão. Esta configuração garante que a mensagem seja entregue pelo menos uma vez. O emissor envia a mensagem e espera a confirmação, se não receber envia novamente, podendo assim o receptor receber a mensagem mais de uma vez. Diagrama da comunicação mostrado na Figura 71.

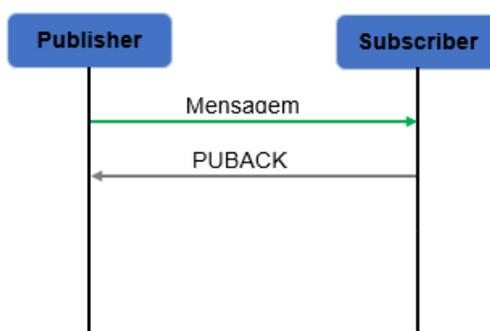


Figura 71 - Diagrama de comunicação QoS = 1
Fonte: autor com base em Santos (2021).

QoS = 2, assegura o recebimento de apenas uma mensagem.

É a mais segura das configurações, garantindo que a mensagem chegue uma única vez, porém esta fica mais lenta. O diagrama da comunicação da Figura 72, mostra como ocorrem as confirmações de envio das mensagens.

6) Portas de comunicação.

Porta 1883 - Conexão com broker MQTT sem encriptação.

Porta 8883 - Conexão com broker MQTT com encriptação.

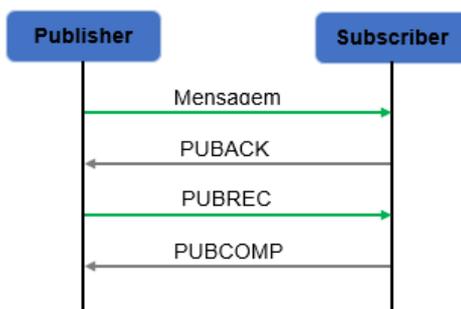


Figura 72 - Diagrama de comunicação QoS = 2

Fonte: autor com base em Santos (2021).

2. o HTTP

2.1. Introdução

Embora a Internet tenha sido criada na década de 1960, até a década de 1990 os principais usuários eram acadêmicos, pesquisadores e estudantes universitários, que a utilizavam para transferir arquivos entre hospedeiros locais e remotos e vice-versa, correio eletrônico e enviar e receber notícias. Mas a partir desta década com o surgimento da *World Wide Web* (WWW), houve a necessidade de se criar um padrão para organizar a troca de informações que trafegavam na rede e também permitir o acesso dos computadores, devido esta necessidade foi criado o protocolo HTTP (JIM KUROSE, 2013).

a) Conceitos do protocolo.

1) Versões padronizadas.

HTTP 1.0 – ano 1996 [RFC 1945].

HTTP 1.1 – ano 1999 [RFC 2610].

HTTP 2.0 – ano 2015 [RFC 7540].

HTTP 3.0 – ano 2022 [RFC 9114 e RFC 9204].

2) Funcionamento.

Para o protocolo HTTP enviar ou receber dados pela Web, são necessários os protocolos TCP/IP, que possibilitam a conexão entre cliente e servidor. Este modelo cliente-servidor é baseado no paradigma de requisição e resposta e utiliza a porta 80.

3) Mensagem.

O protocolo HTTP faz a comunicação por meio de mensagens entre cliente e servidor. Um cliente requisita um recurso enviando uma mensagem e um servidor responde com uma mensagem a solicitação do cliente.

A mensagem é composta de **cabeçalho** que é utilizada para enviar informações adicionais entre o cliente e o servidor, e pode ter um **corpo** de dados.

Utiliza *request* (requisição) que é um pacote que permite que se faça requisição HTTP, e *response* (resposta) que é um pacote de retorno a solicitação feita, como mostrado na Figura 73 .

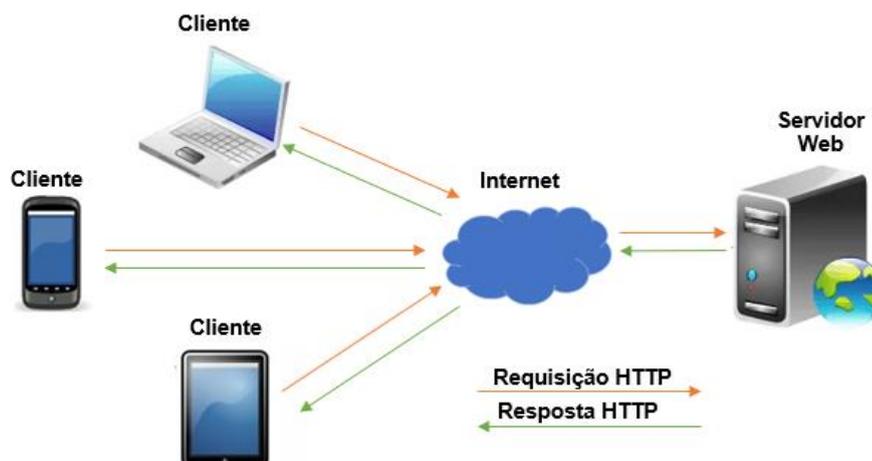


Figura 73 - Protocolo HTTP

Fonte: autor.

4) Métodos de solicitação.

Get - Cria uma sequência de consulta.

Post - Envia dados para serem processados para o recurso especificado.

Head - Solicita os cabeçalhos retornados de um recurso específico.

Put – Semelhante ao Post, só que sobrescreve os dados ficando com um único registro atualizado.

Delete – Exclui o recurso.

Connect - Começa a comunicação bidirecional com o recurso solicitado.

Options - Recupera os métodos HTTP que o servidor aceita.

Trace – Ecoa o pedido, para que o cliente possa investigar modificações na mensagem causadas por intermediários.

5) Códigos de retorno.

1xx: Informational (Informação) – A requisição foi recebida e está sendo processada;

2xx: Success (Sucesso) – A requisição do cliente foi bem-sucedida.

3xx: Redirection (Redirecionamento) – Informa qual a ação adicional do cliente deve ser tomada para completar a requisição.

4xx: *Client Error* (Erro no cliente) – avisa que o cliente fez uma requisição que não pode ser atendida ou tem erro de sintaxe.

5xx: *Server Error* (Erro no servidor) – O servidor não conseguiu atender uma requisição válida.

6) **Segurança.**

O protocolo HTTP, não garante a segurança contra ataques de pessoas mal intencionadas.

3. Protocolo LoRa/LoRaWAN

3.1. Introdução

A tecnologia *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN) é um tipo de rede de telecomunicações sem fio, projetada para suportar uma grande parte dos dispositivos previstos para a IoT, e que permite o envio de poucos dados, em longas distâncias e com baixo consumo de energia (LORA ALLIANCE, 2015).

Neste contexto, tem-se LoRa/LoRaWAN como parte desta tecnologia, sendo o LoRa a parte física, que se baseia nas técnicas de modulação de espectro espalhado, que é derivado da tecnologia *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Muitos sistemas sem fio *Frequency Shifting Keying* (FSK) em sua camada física, porque ela é eficiente, possibilitando o emprego de baixa potência de transmissão. O LoRa é baseado no conceito de *chirp*, que mantém as características de baixa potência da modulação FSK, mas com aumento do alcance de comunicação. O chirp é uma tecnologia utilizada na comunicação militar devido ao seu alcance e robustez à interferência (KOLOBE; LEBEKWE; SIGWENI, 2020).

O LoRaWAN, define o protocolo de comunicação da camada de *Media Access Control* (MAC) e a arquitetura do sistema para a rede. O protocolo e a arquitetura de rede têm influência na capacidade da rede, na vida útil da bateria no dispositivo, na qualidade do serviço e na segurança, dos vários dispositivos e aplicativos atendidas pela rede. LoRaWAN é uma tecnologia para enviar pequenas quantidades de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia. Algumas aplicações que se beneficiam dessa tecnologia são: agricultura de precisão, monitoramento remoto do ambiente, cidades inteligentes e monitoramento de infraestrutura (OSORIO et al., 2020b).

3.2. Características do LoRaWAN

A seguir são descritas as características da tecnologia LoRaWAN, que a torna atrativa para aplicações em IoT.

a) Arquitetura de rede.

A arquitetura de rede estrela-de-estrelas de longo alcance, permite uma comunicação bidirecional segura em ambas as direções, o que faz mais sentido para preservar a vida útil da bateria, quando a conectividade de longo alcance pode ser atingida. A tecnologia LoRa/LoRaWAN devido a topologia estrela de estrelas, oferece vantagens, como mensagens curtas, baixo consumo de energia, simplicidade, ampla cobertura, com a possibilidade de se implantar uma rede privada, segurança e com facilidade de gerenciamento.

Nesta rede os nós não estão associados a um *gateway* específico, pois em vez disso os dados transmitidos por um dispositivo final, serão recebidos por vários *gateways* (os mais próximos), que os encaminham para um servidor de rede, no qual os pacotes duplicados são filtrados, gerenciados, garantindo a segurança destes. Outra vantagem desta rede é quando um dispositivo está em movimento. Como tem mais de um *gateway* recebendo seus dados, não há necessidade de transferência dos dispositivos de *gateway* para *gateway*. Por fim utilizando qualquer uma das integrações disponíveis, as informações recebidas são encaminhadas para servidores de aplicativos (ALMUHAYA et al., 2022).

A arquitetura do LoRaWAN define os três tipos fundamentais de dispositivos, mostrados na Figura 74, que são:

- 1) Dispositivos finais (*end devices* - ED): são os sensores e atuadores que transmitem ou recebem dados dos *gateways*;
- 2) Gateways (GW): estes são os dispositivos de modulação e demodulação da comunicação LoRa, que transmitem os dados entre o servidor de rede e os dispositivos finais em uma rede sem fio. Também são os pontos de acesso com fio ou sem fio que se conectam à Internet;
- 3) Servidor de rede (*network server* - NS): este dispositivo atua como o *backend* principal de uma rede LoRaWAN, recebendo os dados de todos os dispositivos finais na rede e processando estes em um servidor de aplicativos.

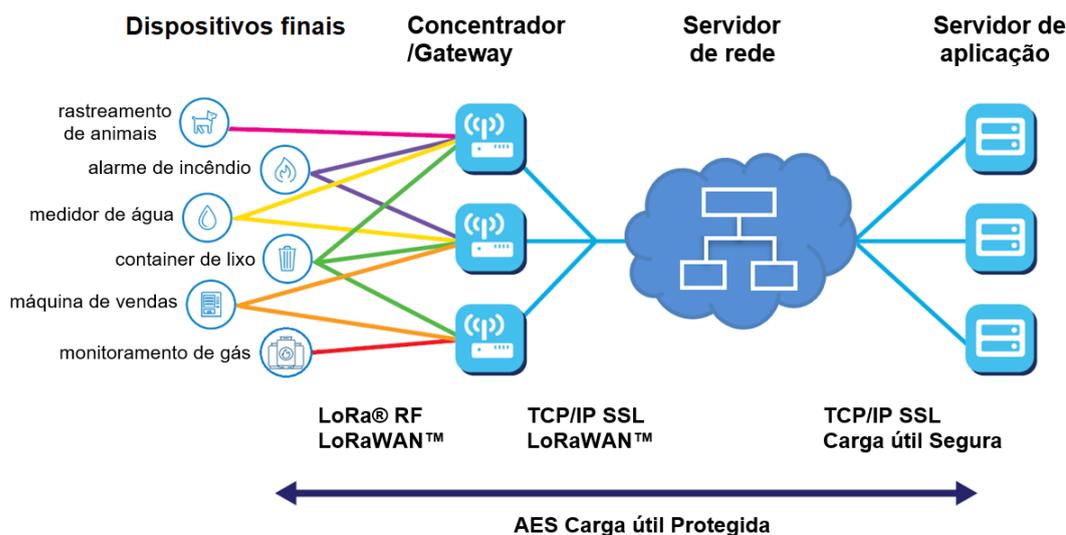


Figura 74 - Arquitetura LoRaWAN

Fonte: autor com base em LoRa Alliance (2015).

b) Bateria.

Os dispositivos em uma rede LoRaWAN™ operam de forma assíncrona e fazem transmissão de dados quando os têm prontos para enviar, sendo orientados a eventos ou programados, aumentando, assim, a vida útil da bateria, pelo baixo consumo de energia (LORA ALLIANCE, 2015).

c) Capacidade da rede.

Para obter uma rede em estrela de longo alcance, o *gateway* deve ter uma boa capacidade de receber mensagens dos dispositivos em um volume alto. Esta capacidade pode ser alcançada utilizando-se taxa de dados adaptável e usando *gateways* de multicanal, para que mensagens simultâneas possam ser recebidas. Os fatores críticos que afetam a capacidade são o número de canais simultâneos, a taxa de dados (tempo no ar), o comprimento da carga útil e a frequência com que os dispositivos transmitem (LORA ALLIANCE, 2015).

Um *gateway* LoRaWAN, para atingir um boa capacidade de rede, cobrindo uma faixa de dezenas de quilômetros e com condições de servir até milhares de dispositivos finais, deve ser bem dimensionado para atender aos requisitos de uso de cada dispositivo na rede (ADELANTADO et al., 2017).

d) Classe dos dispositivos.

O LoRa é uma tecnologia multiuso, podendo os seus dispositivos finais atender a diferentes aplicativos e tipos de ambientes. Para otimizar uma variedade de perfis de aplicativos, o LoRaWAN define três modos de operação como classes: A, B e C (ALMUHAYA et al., 2022). A princípio todos os dispositivos finais devem ser

inicializados na Classe A, pois é o modo padrão quando eles enviam dados a qualquer momento para o *gateway*, através de um protocolo MAC LoRaWAN, baseado em ALOHA.

Classe A: com comunicação bidirecional, opera de forma que, após cada transmissão do dispositivo final (*uplink*), abrem-se duas janelas receptoras em momentos específicos. Sua transmissão é programada pelos próprios dispositivos conforme a sua necessidade. É o que utiliza a menor quantidade de energia.

Classe B: com comunicação bidirecional, esta classe é um modo opcional, que precisa receber informações adicionais do *gateway*. Mesmo sem receber mensagens, os *gateways* abrem mais janelas de recepção, transmitindo sinalizadores de sincronização, que permitem ao servidor saber quando o dispositivo está escutando. Todas estas operações consomem mais energia do que a classe A.

Classe C: com comunicação bidirecional, os dispositivos finais mantêm suas janelas de recepção abertas o tempo todo, só as fechando quando ocorre uma transmissão. Esta classe aumenta o consumo de energia, uma vez que obriga os dispositivos a receber mensagens constantemente.

Na Figura 75 é apresentado as classes de dispositivos LoRaWAN.

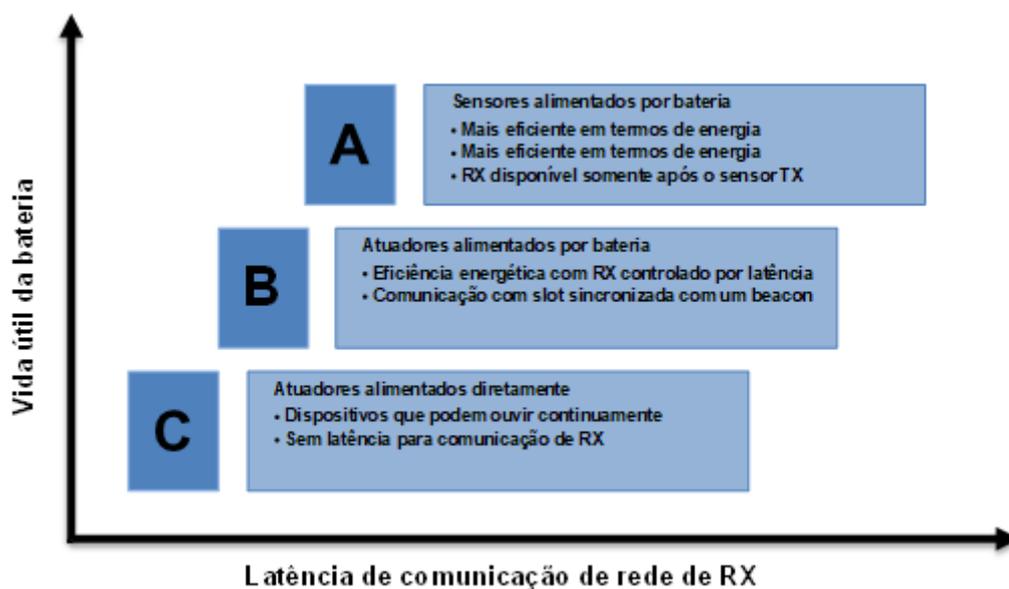


Figura 75 - Classes de dispositivos LoRaWAN
Fonte: autor com base em LoRa Alliance (2015).

e) Segurança.

Nas duas camadas de rede e aplicação o LoRaWAN incorpora um sistema de segurança. Na rede garante a autenticidade do dispositivo, enquanto na camada de

aplicação garante que o operador da rede não tenha acesso aos dados do aplicativo do usuário final. A criptografia *Advanced Encryption Standard* (AES) é usada com a troca de chaves utilizando um identificador IEEE EUI64 (LORA ALLIANCE, 2015).

f) Região.

O LoraWAN opera em bandas de frequência regional gratuitas, como a frequência portadora: 915 MHz EUA, 868 MHz na Europa e 433 MHz na Ásia. Ele utiliza 125, 250 ou 500 kHz como sua largura de banda.

g) Alguns pontos favoráveis.

- 1) Uma faixa de cobertura de até 20 km.
- 2) Menos de 14 dB de potência de transmissão.
- 3) Alguns aplicativos relatam vidas teóricas de bateria de até dez anos.
- 4) Utilização de infraestrutura mínima
- 5) Sistema aberto.
- 6) Baixo custo dos dispositivos finais.

APÊNDICE D – PLATAFORMAS PARA A COLOCAÇÃO DOS DADOS NA NUVEM

Neste apêndice são apresentadas as principais características e funcionalidades das plataformas em nuvem utilizadas nesta pesquisa, destacando-se como elas armazenam os dados, geram alarmes, e fazem interface com o usuário, entre outras características.

1. TagoIO

A TagoIO é uma plataforma na nuvem da Internet para IoT, que oferece monitoramento de ambiente, via dispositivos de IoT conectados a sua rede. Foi concebida em 2014 pelo engenheiro Fábio Rosa, e sua matriz está localizada em Raleigh, Carolina do Norte.

Ela oferece ferramentas para gerenciar dispositivos, armazenar dados, executar análises e integrar serviços, com um aplicativo de fácil utilização e gerenciamento pelo usuário (TAGOIO, 2021).

1.1. Recursos

a) Dispositivos.

Podem ser conectados a uma quantidade grande de dispositivos. Para tanto, inicia-se o aplicativo e faz-se a adição de um dispositivo no qual, de forma automática, um *token* (chave eletrônica) é gerado, para autenticar o dispositivo real (esta chave é instalada no dispositivo real, em campo). A adição pode vir de uma lista de dispositivos do TagoIO ou na forma manual, personalizando os campos para comunicar-se com algumas estruturas internas da plataforma, que incluem conectores, serviços de Web e de análises.

b) *Dashboards* (painéis).

Com uma ampla variedade de *widgets* (interface gráfica), possibilita a criação de painéis que atendem e se adaptam as necessidades do processo. Em pouco tempo pode-se criar painéis com atualização em tempo real, com *widgets* que podem mostrar imagens, vídeos, mapas, gráficos, medidores, entre outros.

c) Gestão de dados.

Os dados do dispositivo são armazenados em *buckets* (acumulador de dados) e qualquer arquivo que possa precisar. Quando um dispositivo é adicionado um *bucket* é criado para ele. Pode gerenciar ou visualizar todas ou cada variável na lista de *buckets*, sem a necessidade de conhecimento de banco de dados.

d) Análise.

Recurso, que é implementado por *script*, manipula dados de qualquer dispositivo em tempo real. Pode gerar relatórios, fazer cálculos e implementar aprendizado de máquina.

e) Ações.

Faz o sincronismo dos eventos e executa ações, que vão do envio de e-mails, SMSs, notificações e comandos para os dispositivos. Pode executar *script* na área de análise, acionar suas próprias ações, e tem uma ampla possibilidade de criação de eventos.

f) Implantação.

Com o TagoRUN, pode-se implantar uma plataforma de IoT, atendendo as necessidades do processo, com suas particularidades e utilizando todos os recursos disponíveis.

A tela com os recursos, é mostrada na Figura 76 .

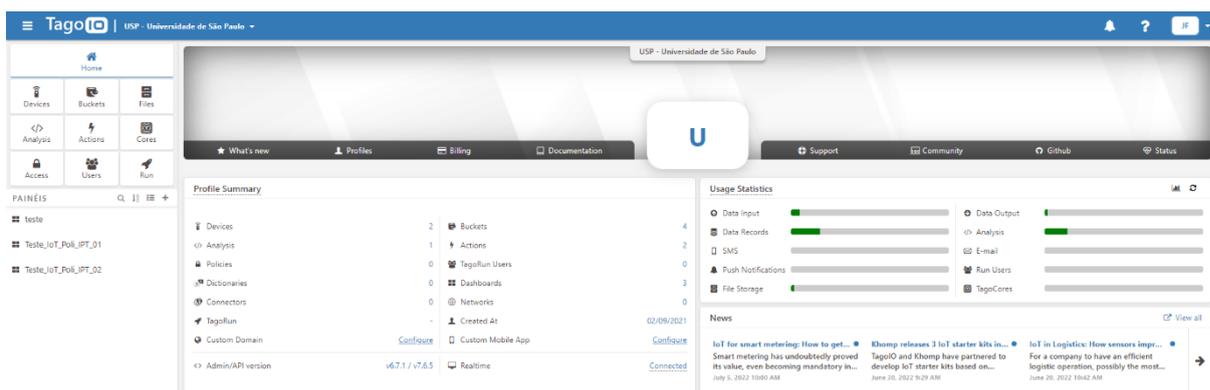


Figura 76 - Plataforma Tago IO

Fonte: autor com base em TagoIO (2021).

1.2. Algumas integrações com a plataforma

a) Métodos.

Podem ser utilizados os protocolos MQTT ou HTTPS com os APIs da TagoIO, no qual é necessário gerar um *token*, que associado ao dispositivo permite o

acesso a plataforma. Como exemplo de utilização tem-se os controladores, como Arduino, Raspberry, entre outros.

b) Serviços externos de provedores.

Pode ser utilizado LoRaWAN, Sigfox, ThingsMatrix, Celulares, entre outros, e é necessário gerar uma Autorização.

1.3. Áreas que se beneficiam

- a) Agricultura.
- b) Edifícios.
- c) Cidades.
- d) Energia.
- e) Indústrias.
- f) Cadeia de Suprimentos.
- g) Transporte.

2. Mosquitto

É uma plataforma que hospeda um *server/broker* da Eclipse Mosquitto MQTT disponível publicamente para testes. O projeto Eclipse foi inicialmente criado pela IBM em novembro de 2001, para suportar um consórcio de fornecedores de software, e ainda é utilizado. A Eclipse Foundation foi fundada em janeiro de 2004, para atuar como administradora na comunidade Eclipse, sendo uma corporação sem fins lucrativos e independente (ECLIPSE FOUNDATION, 2022).

2.1. Recursos

a) Servidor.

É um servidor *Publisher/ Subscriber*, com protocolo MQTT, que pode escutar os dispositivos em várias portas, no caso deste projeto de pesquisa, só irá utilizar as portas 1883: (MQTT, não criptografado, não autenticado) e a 8883: (MQTT, criptografado, não autenticado).

2.2. Algumas integrações com a plataforma

a) Métodos.

Utiliza-se o protocolo MQTT. Como ele é muito leve, torna-se adequado para mensagens M2M, como sensores de baixa potência ou dispositivos móveis.

A Figura 77 mostra a interface do usuário da plataforma Mosquitto.

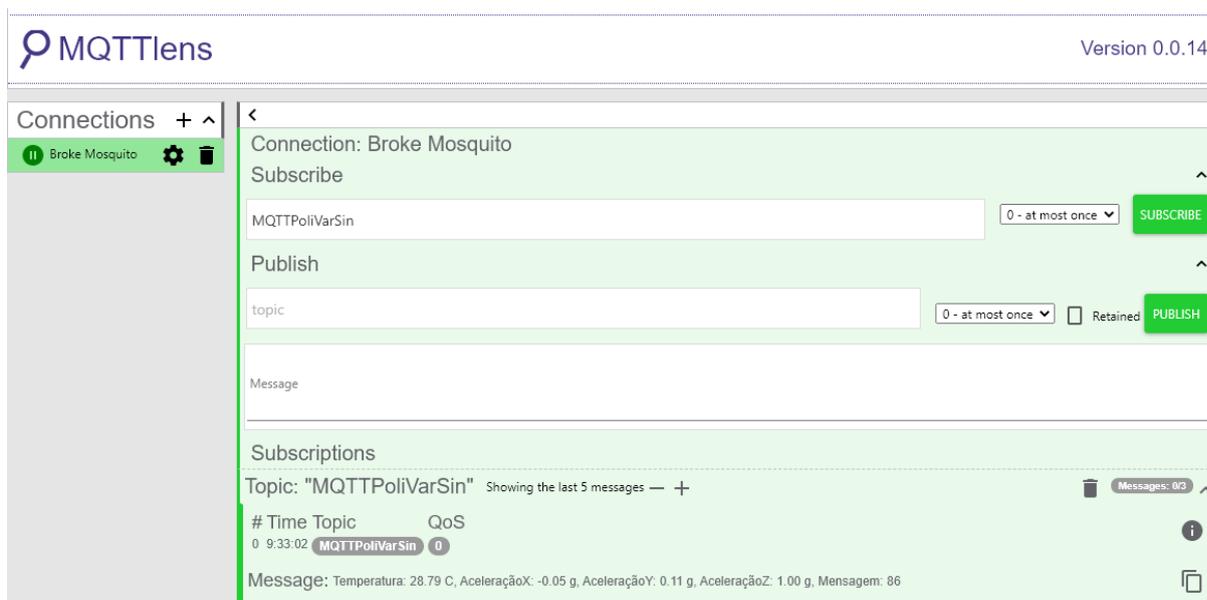


Figura 77 - Plataforma Mosquitto
 Fonte: autor com base em Mosquitto (2021).

3. InterSCity

É um projeto colaborativo de pesquisa de código aberto, com sua sede no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT), para o desenvolvimento da Internet do Futuro em Cidades Inteligentes. O projeto tem a participação de nove instituições brasileiras, além de parceiros internacionais.

O projeto busca utilizar e aplicar novas técnicas de ciência e tecnologia da computação para encontrar a melhor maneira de solucionar problemas sociais nas populações urbanas, aproveitando os dados existentes, que em conjunto com novos dados coletados, podem apoiar na formulação de políticas públicas baseadas em evidências.

Possui três frentes de pesquisas:

- a) Redes e Computação Distribuída de Alto Desempenho.
- b) Engenharia de Software para a Internet do Futuro.
- c) Análise e Modelagem Matemática para a Internet do Futuro e Cidades Inteligentes.