INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE

Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dissertação

INTERNET DAS COISAS E MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO: PROTÓTIPO DE UM NÓ SENSOR

Fernando dos Santos Alves Fernandes

Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2020

Fernando dos Santos Alves Fernandes

INTERNET DAS COISAS E MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO: PROTÓTIPO DE UM NÓ SENSOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc.
Coorientador: Prof. Luis Guilherme Uzeda Garcia, Ph.D.

Ouro Preto
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F363i Fernandes, Fernando dos Santos Alves.
Internet das coisas e monitoramento de vibração [manuscrito]: protótipo de um nó sensor. / Fernando dos Santos Alves Fernandes. - 2020.
82 f.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.
Coorientador: Prof. Dr. Luis Guilherme Uzeda Garcia.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.
Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Áreas de risco de desastres. 2. Redes de computadores. 3. Metais - fadiga. 4. Dinâmica estrutural - vibração. I. Garcia, Luis Guilherme Uzeda. II. Rêgo Segundo, Alan Kardek. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Fernando dos Santos Alves Fernandes

Internet das Coisas e Monitoramento de Vibração: Protótipo de um Nó Sensor

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovada em 10 de setembro de 2020

Membros da banca

Doutor - Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
PhD - Luis Guilherme Uzeda Garcia - Coorientador - Bell Labs
Doutor - Bruno Nazário Coelho - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Saul Emanuel Delabrida Silva - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Robson Domingos Vieira - Ektrum

Alan Kardek Rêgo Segundo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/12/2020

Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2020, às 13:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0113401** e o código CRC **A6E2DACE**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.009599/2020-96 SEI nº 0113401

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Agradecimentos

Agredeço a Deus pela vida e pela saúde, sobretudo no atual momento difícil que a humanidade vem vivendo.

Ao meu Orientador, Prof. Alan Kardek, pelas orientações, pela enorme paciência, pela disponibilidade e por ter aceitado o desafio. É uma honra tê-lo como colega de Departamento.

Ao meu Co-orientador, Prof. Luis Guilherme Uzeda Garcia, que mesmo à distância, contribuiu com suas sugestões e encaminhamentos.

Agradeço à oportunidade de ter feito parte da 3ª turma desse Programa de Pós-Graduação. Aos colegas de turma, à UFOP e ao ITV pela infra-estrutura e professores.

Também agradeço à toda a minha família, que está sempre presente e torna a vida mais leve. Em especial, à minha querida esposa, Lucília. Parceira inseparável e pilar fundamental de NOSSAS conquistas. Sempre acredita em mim!

Enfim, meu "MUITO OBRIGADO", a todos que contribuíram!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

"Educação é uma descoberta progressiva de nossa própria ignorância." (Voltaire)

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INTERNET DAS COISAS E MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO: PROTÓTIPO DE UM NÓ SENSOR

Fernando dos Santos Alves Fernandes

Setembro/2020

Orientadores: Alan Kardek Rêgo Segundo
Luis Guilherme Uzeda Garcia

Encostas, barragens e estruturas de engenharia como pontes e edifícios podem ser consideradas áreas de risco de desastres. Dentre outros fatores que podem desencadear um colapso nessas estruturas, encontra-se a vibração, por se tratar de um possível gatilho para processos que levem a rupturas e danos. Muitos trabalhos têm buscado avaliar o uso das novas tecnologias de rede de longo alcance e baixo consumo de energia (*Low Power Wide Area Network* - LPWAN) para essa finalidade e em outras aplicações de Internet das Coisas. Na ponta da infraestrutura das redes LPWAN estão os nós sensores ou *End Devices*, que precisam atender a um de seus principais requisitos: baixo consumo de energia. Nesse sentido, neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um protótipo de nó sensor com interface LPWAN para monitoramento de vibração, com requisitos compatíveis com algumas aplicações de monitoramento de áreas de risco. O protótipo, constituído de um acelerômetro MPU-6050 e uma placa de desenvolvimento ESP32 LoRa, foi desenvolvido e avaliado em termos de aplicabilidade e consumo de energia. O uso de diferentes estratégias de coleta de dados de sensores e transmissão via rede pode contribuir para a economia de energia dos nós. Foram obtidas taxas de amostragem de: 0,29 Hz, para a estratégia que transmite os dados brutos de aceleração a cada leitura; 1,71 Hz, para a estratégia que transmite o maior pacote possível de dados; e 292,5 Hz, para a estratégia que realiza a FFT como pré-processamento dos dados, antes do envio para a aplicação. As estratégias com menores taxas de amostragem (E1 e E2) são indicadas para aplicações de monitoramento de encostas e barragens, enquanto o uso da estratégia com maior taxa de amostragem (E3) pode incluir o monitoramento de vibrações em aplicações de integridade de estruturas.

Palavras-chave: Monitoramento de Áreas de Risco, Redes LPWAN, Análise de Vibrações.

Macrotema: Mina; **Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema:** Redução de Risco de Cenários Catastróficos;

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INTERNET OF THINGS AND VIBRATION MONITORING: PROTOTYPE OF A SENSOR NODE

Fernando dos Santos Alves Fernandes

September/2020

Advisors: Alan Kardek Rêgo Segundo
Luis Guilherme Uzeda Garcia

Slopes, dams and engineering structures such as bridges and buildings can be considered disaster risk areas. Among other factors that can trigger a collapse in these structures, there is vibration, as it is a possible trigger for processes that lead to ruptures and damage. Many studies have sought to evaluate the use of new low power wide area network (LPWAN) technologies for this purpose and in other Internet of Things applications. At the end of the LPWAN network infrastructure are sensor nodes or End Devices, which need to meet one of their main requirements: low energy consumption. In this sense, this work proposes the development of a sensor node prototype with LPWAN interface for vibration monitoring, with requirements compatible with some risk area monitoring applications. The prototype, consisting of an MPU-6050 accelerometer and an ESP32 LoRa board, was developed and evaluated in terms of applicability and energy consumption. The use of different strategies for collecting sensor data and transmitting via the network can contribute to the energy savings of nodes. Sampling rates were provided: 0.29 Hz, for the strategy that transmits raw acceleration data, at each reading; 1.71 Hz, for the strategy that transmits the largest possible data package; and 292.5 Hz, for the strategy that performs FFT as pre-processing, before sending it to the application. Strategies with lower sampling rates (E1 and E2) are indicated for slope and dam monitoring applications, while using the strategy with a higher sampling rate (E3) may include monitoring vibrations in structural integrity applications.

Keywords: Risk Area Monitoring, LPWAN Networks, Vibrations Analysis.

Macrotheme: Mine; **Research Line:** Information Technologies, Communication and Industrial Automation; **Theme:** Catastrophic Scenario Risk Reduction;

Lista de Figuras

Figura 2.1 Elementos de uma rede LoRa. Topologia em estrela. Fonte: adaptado de (LORA ALLIANCE MARKETING WORKGROUP, 2015). 23

Figura 5.1 Vista de topo e orientação MPU-6050. Fonte: (INVENSENSE, 2013) . . . 41
Figura 5.2 Diagrama de Blocos Funcionais ESP32. Fonte: ESPRESSIF SYSTEMS (2019). 43
Figura 5.3 Arquitetura da rede LPWAN para monitoramento de vibração em áreas de risco. 46
Figura 5.4 Exemplo de aplicação na plataforma Cayenne. Fonte: autor. 47
Figura 5.5 Adicionando um dispositivo na plataforma de aplicação Cayenne. 48
Figura 5.6 Concentrador LoRaWAN MultiTech Conduit IP67. Fonte: (MULTI-TECH SYSTEMS, 2019) 49
Figura 5.7 Protótipo do nó sensor de vibração. 50
Figura 5.8 Estrutura metálica com elevador em escala de laboratório (a), com destaque para o posicionamento do nó sensor e do acelerômetro de referência (b). 54
Figura 5.9 Fonte de vibração: FrequencyGenerator Pro. 54
Figura 5.10 Estrutura em madeira utilizada para ensaio de vibração (a), com destaque para o posicionamento do nó sensor, do acelerômetro de referência e da fonte de vibração (b). 55
Figura 5.11 Sistema de aquisição de referência: NI cDAQ-9171, NI 9234 e B&K 4507-B. 56
Figura 5.12 Mapa da rede, com localização do *gateway* e dos 2 pontos monitorados (Laboratório de Química e Igreja de São Francisco de Paula). 57

Figura 6.1 Respostas em frequência para 85 Hz e 95 Hz, com o nó sensor, (a) e (c), e com o acelerômetro de referência, (b) e (d), respectivamente. 61
Figura 6.2 Respostas em frequência para 100 Hz e 150 Hz, com o nó sensor, (a) e (c), e com o acelerômetro de referência, (b) e (d), respectivamente. 62
Figura 6.3 Acelerações obtidas durante o deslocamento do elevador pelo nó sensor, usando a estretégia E1 (a) e pelo acelerômetro de referência (b). 63
Figura 6.4 Respostas em frequência para o desequilíbrio da estrutura de madeira com excitação de 100 Hz: nó sensor, com estratégia E3 (a) e acelerômetro de referência (b). 64

Figura 6.5 Acelerações obtidas durante período com ocorrência de impacto na estrutura metálica pelo nó sensor utilizando E1 (a) e pelo acelerômetro de referência (b). . . 65
Figura 6.6 Acelerações obtidas durante período com ocorrência de impacto na estrutura metálica pelo nó sensor utilizando E2 (a) e pelo acelerômetro de referência (b). . . 66
Figura 6.7 Respostas em frequência nó sensor utilizando E3 (a) e do acelerômetro de referência (b), com impacto e usando emissão sonora a 150 Hz. 67
Figura 6.8 Resposta em frequência para emissão sonora de 100 Hz, próximo ao Laboratório de Química, Campus Morro do Cruzeiro. 68
Figura 6.9 Resposta em frequência para emissão sonora de 100 Hz, na Igreja de São Francisco de Paula, Centro. 68
Figura 6.10 Detalhes que afetam a economia de energia: (a) LED removido para diminuição de consumo da placa. (b) Conector para alimentação externa. 72

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Comparação entre tecnologias LPWAN 20
Tabela 2.2 Parâmetros regionais AU915-928. 24
Tabela 2.3 Parâmetros regionais US902-928. 24

Tabela 4.1 Requisitos básicos de um módulo para monitoramento de estruturas com interface de comunicação sem fio. 31
Tabela 4.2 Síntese dos requisitos de sistema dos trabalhos relacionados. 37

Tabela 5.1 Requisitos básicos de um sistema sem fio para monitoramento de áreas de risco. 40
Tabela 5.2 Principais recursos da placa MPU-6050. 41
Tabela 5.3 Características elétricas do MPU-6050. 42
Tabela 5.4 Consumo de corrente por Modo de Energia do ESP32. 44
Tabela 5.5 Taxas Máxima Absolutas (*Absolute Maximum Ratings*) da família SX127x. 45
Tabela 5.6 Faixas de operação da família SX127x. 45
Tabela 5.7 Especificações de Consumo de Energia da família SX127x. 45
Tabela 5.8 Síntese Modos de Energia x Consumos de Corrente (MPU-6050). 57
Tabela 5.9 Síntese Modos de Energia x Consumos de Corrente (ESP32). 58
Tabela 5.10 Síntese Modo de Energia x Consumo de Corrente (SX1276). 58

Tabela 6.1 Possíveis aplicações para as diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados. 60
Tabela 6.2 Valores nominais de consumo nos modos normal e de baixo consumo . . . 69
Tabela 6.3 Orçamento de consumo para E1. 70
Tabela 6.4 Orçamento de consumo para E2. 70
Tabela 6.5 Orçamento de consumo para E3. 71

Lista de Siglas e Abreviaturas

ADC Analog-to-Digital Converter

ADR Adaptative Data Rate

BW Bandwidth

CR Code Rate

DFT Discrete Fourier Transform

FEC Forward Error Correction

FFT Fast Fourier Transform

FSK Frequency Shift Keying

ISM Industrial Scientific and Medical

LoRa Long Range

LPWAN Low Power Wide Area Network

MEMS Micro-Electro-Mechanical-System

MQTT Message Queue Telemetry Transport

PSD Power Spectral Density

RMS Root Mean Square

SBC Single-Board Computer

SHM Structural Health Monitoring

TOA Time On Air

TTN The Things Network

ULP Ultra Low Power

Sumário

1 Introdução **15**

1.1 Objetivos 16

1.2 Organização do texto 17

2 Redes de Longo Alcance e Baixo Consumo de Energia **18**

2.1 Breve histórico 18

2.2 Características Principais 18

3 Monitoramento e Análise de Vibrações em Áreas de Risco **25**

3.1 Introdução 25

3.2 Análise de Vibrações 26

3.2.1 Processamento de Sinais 26

3.2.2 Transformada Rápida de Fourier 27

3.2.3 Vibrações em Áreas de Risco 28

4 Trabalhos Relacionados **30**

5 Materiais e Métodos **39**

5.1 Requisitos do Sistema 39

5.2 Protótipo do Nó Sensor 40

5.2.1 O Módulo Sensor MPU6050 40

5.2.2 O Módulo de Processamento ESP32 43

5.2.3 O Transceptor SX1276 44

5.3 Configuração da Rede LPWAN 46

5.3.1 O Servidor de Rede 46

5.3.2 Plataforma Cayenne 47

5.3.3 O Nó Concentrador: Gateway 48

5.3.4 O Nó Sensor: End Device 50

5.4 Avaliação do Sistema 51

5.4.1 Estratégias de Coleta e Transmissão de Dados 51

5.4.2 Experimentos de Laboratório e em Campo 53

5.4.3 Avaliação do Consumo de Energia dos Nós Sensores 57

6 Resultados e Discussão **59**

6.1 Ensaios de Vibração em Laboratório e Testes de Campo 61

6.2 Avaliação de Consumo de Energia 69

7 Conclusão e Trabalhos Futuros **73**

Referências Bibliográficas **75**

1. Introdução

Encostas, taludes, barragens, pontes e edifícios são exemplos de estruturas naturais ou de engenharia sujeitas a potenciais eventos causadores de dados econômicos, ambientais e de saúde, com eventuais perdas de vidas. Podem, portanto, ser classificadas como áreas de risco. Encostas e taludes podem sofrer com eventos classificados como quedas, tombamentos, escorregamentos e corridas (BEZERRA, 2019). Barragens de terra ou rejeitos, conforme o método construtivo (montante, jusante, linha de centro), apresentam diferentes capacidades de resistência e segurança, ficando mais suscetíveis ao processo de liquefação, *piping* e outros tipos de ruptura ou colapso (CARDOZO e CORDOVA, 2019). Estruturas de engenharia como pontes, edifícios, barragens de concreto também estão sujeitas a rupturas e colapsos, seja pelo desgaste do tempo, seja em função de algum evento externo como terremotos, furacões e desastres naturais. Portanto, precisam ter sua integridade estrutural monitorada, para evitar potenciais desastres com perdas econômicas e humanas (MORENO-GOMEZ *et al.*, 2017).

Dentre outros fatores que podem levar ao aumento do risco de desastres nessas áreas (características de projeto de estruturas, métodos de construção, presença de eventos naturais, formação do solo), a vibração destaca-se como um potencial gatilho para a ocorrência de processos que levam a rupturas ou colapsos. Em razão disso, uma série de estudos foram e vêm sendo realizados com o intuito de permitir o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e alerta de vibração mais efetivos, baratos e inteligentes.

Esses sistemas de monitoramento remoto buscam nas tecnologias de informação e comunicação (TIC), uma solução para a coleta e análise de dados e auxílio na tomada de decisão. Como exemplos, têm-se projetos de monitoramento de áreas consideradas de risco como taludes, barragens e pontes (DING, 2015; LYNCH e LOH, 2006; LYNCH *et al.*, 2016; SIDDULA *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2007; ZHU *et al.*, 2018).

Os desafios desse tipo de solução, além das limitações das tecnologias de comunicação sem fio, muitas vezes estão associados aos custos de implantação da infraestrutura do sistema, seja pelos valores dos instrumentos utilizados na leitura dos dados e/ou para transmissão, seja pela necessidade de um número elevado de elementos sensores para cobrir uma grande estrutura ou uma grande área. Soluções cabeadas têm custos de instalação e manutenção mais elevados; por sua vez, em soluções sem fio, a autonomia das baterias dos nós sensores deve ser suficiente para operar por períodos longos de tempo, sem a necessidade de recarga ou substituição.

Nesse sentido, muitos trabalhos de pesquisa se voltam para o estudo de técnicas de redução de custo dos dispositivos e melhoria da autonomia dos dispositivos sensores sem fio. Ainda que se tenha uma infraestrutura de baixo custo para uma rede sem fio de coleta de dados, é necessário garantir que os outros instrumentos necessários também tenham seu custo reduzido para tornar viável sua utilização. Metodologias para a escolha dos componentes de rede para sistemas de monitoramento e alerta em áreas de risco, com vistas à economia na etapa de projeto, também têm sido estudadas(EHIAGWINA *et al.*, 2018; GONZALEZ *et al.*, 2016; LYNCH

et al., 2016; MEIRELES, 2018).

Diante dos desafios de custo e autonomia de energia e considerando a disponibilidade cada vez maior de novas tecnologias de rede de longo alcance e baixo consumo de energia (Low Power Wide Area Network - LPWAN) e plataformas de desenvolvimento de dispositivos, além da importância de sistemas de monitoramento em áreas de risco, neste trabalho descreve-se o desenvolvimento de um sistema de Internet das Coisas com tecnologia LPWAN para monitoramento de vibrações. Como principais requisitos do sistema, foram selecionados acelerômetros com tecnologia de sistemas micro-eletro-mecânicos (*Micro-Electro-Mechanical-System* - MEMS) de baixo custo e plataforma de processamento e transmissão de dados de longo alcance e baixo consumo de energia. Outra característica desejada foi garantir flexibilidade ao nó sensor em termos de estratégias adotas para a coleta e transmissão dos dados dos sensores, para torná-lo compatível com os requisitos de algumas aplicações de monitoramento de áreas de risco, como encostas, barragens e saúde de estruturas.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo de nó sensor com interface LPWAN para monitoramento de vibração, com requisitos compatíveis com algumas aplicações de monitoramento de áreas de risco. Para tanto, fez-se necessário:

- Determinar, com base na literatura, parâmetros de vibração e taxas de amostragem de acordo com cada área de risco de interesse (barragens, áreas de deslizamentos de terra ou desmoronamento, áreas de desmonte de rochas, taludes, prédios, pontes e outras estruturas de engenharia);

- Desenvolver nós sensores de vibração flexíveis em termos de estratégias de coleta e transmissão dos dados, visando atender aos desafios de: (i) eficiência energética, (ii) vasta área de cobertura e (iii) baixas taxas de transmissão (kbps);

- Integrar o protótipo aos demais elementos de uma rede LPWAN: nós concentradores, responsáveis por enviar dados para a Internet; servidores de rede, responsáveis pela gestão dos dados entre nós sensores e aplicações; servidores de aplicação, responsáveis pela análise e apresentação das variáveis medidas;

- Avaliar o consumo de energia dos nós sensores em cada estratégia de medição, de forma a ser possível estimar a vida útil de baterias.

- Avaliar o uso do sistema de monitoramento de vibração em testes de laboratório e, eventualmente, em campo.

1.2. Organização do texto

Este trabalho foi organizado em sete capítulos. No Capítulo 2, uma visão geral a respeito das redes de longo alcance e baixo consumo de energia (LPWAN) é apresentada. A tecnologia de rede LoRa e seu protocolo LoRaWAN também são apresentados.

No Capítulo 3, alguns aspectos a respeito do monitoramento de vibrações em áreas de risco são brevemente descritos. Ainda nesse capítulo, apresenta-se uma das principais estratégias de processamento de sinais para análise de vibrações.

No Capítulo 4, são apresentados alguns trabalhos relacionados ao monitoramento das áreas de risco de interesse.

O Capítulo 5 caracteriza a área de estudo e descreve os elementos que compõem o sistema de monitoramento proposto e a metodologia de validação do sistema, assim como as estratégias de coleta e transmissão de dados implementadas para contribuir para aumentar a vida útil das baterias dos dispositivos.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados das coletas e análise dos dados de vibração dos experimentos realizados. Apresentam-se ainda, os resultados da avaliação do consumo de energia do nó sensor, com base nas diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados.

Finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Redes de Longo Alcance e Baixo Consumo de Energia

2.1. Breve histórico

A origem das LPWANs (Low Power Wide Area Networks) pode ser atribuída ao final dos anos 1980, quando a ADEMCO (agora o padrão sem fio da Honeywell para segurança doméstica) construiu uma rede de baixa taxa de transmissão de dados para monitorar painéis de alarme. Na mesma época, a Morotola lançou uma rede de longa distância de baixa velocidade, chamada ARDIS, para operar em processos de automação de vendas e rastreamento de transações. O termo LPWA, propriamente, é mais recente. Surgiu em 2013 como uma classe de tecnologias sem fio que são adequadas para necessidades específicas de comunicação machine-to-machine (M2M) e dispositivos de Internet das Coisas (Internet of Things - IoT). Embora diferentes dos LPWANs modernos, essas inovações serviram como precursores da tecnologia atualmente conhecida (THALES GROUP, 2020).

Na década de 1990, o 2G[1] nasceu quando as operadoras de celular começaram a transmitir dados junto com a voz em longas distâncias. Com o tempo, a demanda pela Internet cresceu, levando as empresas a incluirem recursos de conectividade em cada vez mais dispositivos. Com essa tendência, surgiu a necessidade de soluções de comunicação sem fio de baixo custo e baixo consumo de energia (FRUCI, CHRIS, 2019; THALES GROUP, 2020).

Entre 2009 e 2010, a empresa francesa SigFox construiu, em Tolouse, França, a primeira LPWAN capaz integrar aplicativos em tempo real com mais eficácia do que as formas anteriores de tecnologia de rádio. A tecnologia LPWAN da SigFox é proprietária, tendo soluções de IoT comercializadas em mais de 30 países. A tecnologia de LPWAN Long Range (LoRa), que opera em várias bandas não-licenciadas, regulamentadas conforme o país onde está localizada, foi criada por uma start-up chamada Cycleo, em 2009, em Grenoble, na França, sendo adquirida, três anos depois pela empresa Semtech[2]. Atualmente, várias empresas vêm implementando redes LoRaWAN e muitas delas participam da LoRa Alliance[3], associação sem fins lucrativos, criada em março de 2015, que consiste em mais de 500 organizações com o propósito de estabelecer padrões e protocolos LPWAN globais (MEKKI *et al.*, 2019; THALES GROUP, 2020).

2.2. Características Principais

As redes LPWAN são baseadas em tecnologias que operam com uma baixa taxa de dados, numa modulação de frequência robusta, que permite alcances de comunicação na faixa de quilômetros, com um baixo consumo de energia, garantindo uma boa vida útil às fontes de

[1] 2G: Telefonia móvel de segunda geração, que inclui os protocolos GSM, TDMA, CDMA e D-AMPS.

[2] Semtech Corporation: companhia proprietária da tecnologia LoRa (`https://www.semtech.com/`)

[3] O protocolo LoRaWAN foi padronizado em 2015 pela LoRa Alliance e é hoje implantada em mais de 40 países.A LoRa Alliance é um consórcio de empresas responsável pelas especificações do padrão aberto LoRaWAN (`https://lora-alliance.org/`).

energia utilizadas nos dispositivos (ADELANTADO *et al.*, 2017).

O uso de bandas de frequência sub-GHz[4] permite comunicações robustas e confiáveis com baixo consumo de energia. Em comparação com a banda de frequência de 2,4 GHz, utilizada pela maioria das redes sem fio de curto alcance (Wi-Fi, ZigBee etc.), as bandas de frequência sub-GHz (430 MHz, 868 MHz, 902 MHz, 915 MHz etc.) garantem menos atenuação e desvanecimento causados por obstáculos. Como ainda não são empregadas em larga escala, o congestionamento oriundo do compartilhamento da banda de frequência se reflete em conectividade com maior cobertura entre nós e estações base (RAZA *et al.*, 2017).

As tecnologias LPWAN são projetadas para alcançar um orçamento de link (ou *link budget*) de cerca de 150 dB, o que permite um alcance de sinal variando de alguns quilômetros em áreas urbanas a dezenas de quilômetros em áreas rurais, conforme a área de implantação. Características de projeto relacionadas à camada física das redes LPWAN e às técnicas de modulação do sinal, garantem receptores com sensibilidade de até -130 dBm (RAZA *et al.*, 2017).

As duas principais técnicas de modulação utilizadas por diferentes tecnologias LPWAN são: modulação por banda estreita (em inglês, *narrowband*), e modulação por espalhamento de espectro (em inglês, *spread spectrum*). Na modulação por banda estreita ou ultra-estreita, busca-se otimizar o espectro de frequência, abribuindo à frequência portadora uma largura de banda muito pequena, o que resulta em um nível de ruído muito pequeno, facilitando a decodificação pelo receptor. Na modulação por espalhamento, o sinal transmitido assemelha-se a um ruído, em razão da codificação, o que aumenta a imunidade a interferências, mas torna o trabalho de decodificação mais custoso, em termos de processamento. A maior resiliência a ruídos e interferências e a maior confiabilidade dos dados, aliados à sensibilidade dos receptores, permitem conectividades de longo alcance (RAZA *et al.*, 2017).

Para estender a cobertura de redes de curto alcance, normalmente, a topologia *mesh* é utilizada. Além do alto custo de implantação dessa topologia para um grande número de dispositivos, o tráfego gerado pelos múltiplos saltos pode gerar congestionamentos e consequente aumento no consumo de energia de alguns nós, esgotando suas baterias. Em redes LPWAN, a topologia em estrela é mais comum, ou seja, como os nós se conectam diretamente às estações base, diminui-se a complexidade da rede, eliminando-se a necessidade de estratégias de roteamento. Uma estação base sempre ativa, dentro da área de cobertura dos nós, oferece acesso rápido aos nós, quando necessário. Essas características da topologia em estrela refletem em economia no consumo de energia dos dispositivos (RAZA *et al.*, 2017; SANCHEZ-IBORRA e CANO, 2016).

Outra estratégia que contribui para que as redes LPWAN operem com baixo consumo de energia é a adoção do chamado ciclo de trabalho dos transceptores (ou, *radio duty cycle*), que consiste em desligar os tranceptores quando eles não forem necessários. O *duty cycle* define um limite máximo de tempo em que o módulo de comunicação deve permanecer ligado, transmitindo ou recebendo dados. Regulamentações regionais também limitam o tempo que

[4]sub-GHz: Frequências portadoras de sinais abaixo de 1 GHz, dentro do espectro de radiofrequência.

um transmissor pode ocupar uma banda do espectro de frequência compartilhada com outros dispositivos utilizando o mesmo canal (RAZA *et al.*, 2017).

O baixo custo de implantação de redes LPWAN pode ser obtido com o uso de bandas de frequência de espectro não-licenciadas dedicadas a aplicações industriais, científicas e médicas (*Industrial Scientific and Medical* - ISM). A robustez das redes LPWAN pode ser alcançada graças às técnicas de espalhamento espectral utilizadas, que aumentam a resistência do sinal a interferências e provêem um maior nível de segurança (ISMAIL *et al.*, 2018).

Atualmente, existe uma série de tecnologias LPWAN, operando em bandas de frequência licenciadas (EC-GSM-IoT, LTE Cat M1, Weightless-P, NB-IoT) e em bandas de frequência não-licenciadas (LoRa, IQRF, RPMA Ingenu, Telensa, DASH7, Weightless e SNOW), do espectro de radiofrequência[5]. As tecnologias LPWAN também podem ser classificadas como: celulares ("dependentes"de infraestrutura), derivadas de tecnologias e protocolos de telefonia celular existentes, cuja principal vantagem é o aproveitamento da infraestrutura das operadoras, e não-celulares ("independentes"de infraestrutura) (ISMAIL *et al.*, 2018; KABALCI e ALI, 2019; QADIR *et al.*, 2018).

A Tabela 2.1 apresenta as principais características de algumas das tecnologias LPWAN em maior evidência.

Tabela 2.1: Comparação entre tecnologias LPWAN

Recurso	**LoRaWAN**	**LTE Cat-1**	**LTE Cat-M**	**NB-IoT**
Modulação	CSS	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Largura de banda	500-125 KHz	20 MHz	20-1.4 MHz	200 KHz
Taxa de Dados	290 bps - 50 Kbps	10 Mbps	200 Kbps - 1 Mbps	∼20 Kbps
Número máximo de mensagens	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
Máxima potência de saída	20 dB	23 - 46 dBm	23/30 dBm	20 dBm
Orçamento de link	154 dB	130 dB+	146 dB	150 dB
Tempo de vida de bateria 2000 mAh	105 meses	-	18 meses	-
Eficiência energética	Muito alta	Baixa	Média	Média-Alta
Imunidade a interferência	Muito alta	Média	Média	Baixa
Coexistência	Sim	Sim	Sim	Não
Segurança	Sim	Sim	Sim	Sim
Mobilidade/localização	Sim	Mobilidade	Mobilidade	Mobilidade limitada, sem localização

Dentre as tecnologias LPWAN, uma que vem se destacando, sobretudo no cenário das aplicações de Internet das Coisas é a tecnologia LoRa® e sua pilha de protocolos de rede LoRaWAN. Com a tecnologia LoRa, podem ser implantadas rede privadas de longo alcance, sem a utilização de infraestrutura pré-existente e sem custo adicional com operadoras de telecomunicações. Quando desejável, dispositivos LoRa podem conectar-se a uma rede existente, fazendo uso de provedores LoRaWAN públicos, como Senet[6], The Things Network[7], machineQ[8] e outros (MEKKI *et al.*, 2019; THALES GROUP, 2020).

[5]Espctro de Radiofrequência: parte do espectro eletromagnético utilizado para a transmissão de sinais. No Brasil, quem controla a utilização do espectro por operadoras de telecomunicações é a ANATEL (`https://bit.ly/3j951Ui`). Parte do espectro é globalmente utilizado para aplicações ISM (*Industrial, Scientific and Medical*).

[6]Senet: Provedor LPWAN e de IoT (`https://www.senetco.com/`).

[7]TTN: Servidor de Rede LoRaWAN (`https://www.thethingsnetwork.org/`).

[8]machineQ: Provedor de rede LoRaWAN (`https://machineq.com/`.)

LoRa dá nome à tecnologia e à camada física, que se beneficia do grande orçamento de link fornecido pelo esquema de modulação de espalhamento de espectro, para obter transmissões de longo alcance. Opera em uma banda de frequência não licenciada abaixo, definida conforme o país em que está implantada (433 MHz, 868 MHz, 902 MHz, 915 MHz). Seu esquema de modulação de espalhamento de espectro é derivado da modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que negocia a taxa de dados por sensibilidade dentro de uma largura de banda de canal fixa e espalha um sinal de entrada de banda estreita por uma largura de banda de canal mais ampla. O sinal resultante tem propriedades semelhantes a ruído, tornando-o mais difícil de detectar ou bloquear. O CSS, desenvolvido na década de 1940, era tradicionalmente usado em aplicações militares devido às suas longas distâncias de comunicação e robustez de interferência. LoRa é sua primeira implementação de baixo custo para uso comercial (RAZA *et al.*, 2017; SINHA *et al.*, 2017).

Na implantação de uma rede LoRa, são três os principais parâmetros que devem ser configurados:

- **Spreading Factor (SF)**: Pode assumir valores entre 7 e 12. Quanto maior o valor de SF, menos informações podem ser transmitidas por bit, reduzindo-se a taxa de dados, ou seja, incrementar para o próximo SF, implica em reduzir a taxa de bits pela metada, dobrando o *air time*.

- **Bandwidth (BW)**: Pode assumir os valores 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz, para um dado valor de SF. Um valor de BW menor, aumenta a sensibilidade da recepção, mas aumenta o tempo de transmissão (*Time On Air*).

- **Forward Error Correction (FEC) ou Code Rate (CR)**: Parâmetro que regula a detecção e correção de erros.

Os valores selecionados para a largura de banda (BW) e para o fator de espalhamento (SF) definem a taxa de dados com a qual serão realizadas as trocas de mensagens na rede LoRaWAN. A relação entre esses parâmetros e a taxa de dados é dada pela expressão 2.1. Quem define o valor do parâmetro de espalhamento (SF) é o dispositivo final e esse parâmetro determina o tempo necessário para a realização da transmissão de um pacote(VEIGA, 2019; YOUSUF *et al.*, 2018).

$$DateRate = SF.\frac{BW}{2^{SF}}.CR \tag{2.1}$$

Outro parâmetro importante é a ***Carrier Frequency (CF)***, que é a frequência central usada para a banda de transmissão. A faixa de frequência, configurável, pode variar de 860 MHz a 1020 MHz ou de 137 MHz a 1020 MHz, dependendo do chip de rádio desenvolvido pela Semtech (BOR *et al.*, 2016).

Esses parâmetros determinam o *bit rate*, o máximo *payload size* e o *time on air*, influenciando o tamanho das mensagens, o alcance e consumo de energia dos dispositivos. Outra

funcionalidade disponível nas redes LoRa é o chamado *Adaptative Data Rate (ADR)*, que permite o gerenciamento da taxa de dados e da potência de saída do transmissor em cada *end device*, buscando otimizar as taxas de transmissão e minimizar o consumo de energia, aumentando a capacidade da rede. As mensagens enviadas pelos *End Devices* através dos *gateways* incluem metadados sobre o tempo de recepção e a força do sinal. Com base nesses metadados, o servidor de rede determina qual é a taxa de dados ótima com a qual o nó deveria transmitir (GARCIA e KLEINSCHMIDT, 2017; SEMTECH CORPORATION, 2013).

Basicamente, uma rede LoRaWAN é composta por:

- Dispositivos finais (*end devices*), também conhecidos por *nodes* ou *motes*, cujo papel é a coleta de dados via sensores ou realização de uma ação, via atuadores.
- Dispositivos concentradores (*gateways*), que fazem a comunicação entre *End Devices* e servidores de rede. Os *gateways* são capazes de receber (via modulação LoRA) mensagens simultâneas de *End Devices* com diferentes configurações (SF, BW, CR), entregando-as aos servidores de rede.
- Servidores de rede (Network Servers) gerenciam os dados entregues *gateways*, eliminam mensagens duplicadas, identificam corretamente os *End Devices* remetentes e os *gateways* mais indicados para uma eventual mensagem de retorno, das aplicações para os nós.
- Os Servidores de aplicação (Application Servers) pertencem à camada de aplicação da rede LoRaWAN. Eles são responsáveis pela entrega de serviços aos usuários, processamento e análise de dados recebidos dos *End Devices* e podem enviar de volta informações e comandos de controle.

Na Figura 2.1, pode-se ver a arquitetura e topologia básica de uma rede LoRaWAN. Os *end devices*, *gateways*, *Network Server* e *Application Servers* formam uma topologia "estrela de estrelas". Essa conformação permite aliar longo alcance e baixo consumo de energia, comparada com arquiteturas que utilizam uma topologia mesh, por exemplo, em que os nós acabam por consumir uma maior quantidade de energia ao buscarem garantir a maior cobertura possível (ADELANTADO *et al.*, 2017).

Na rede LoRaWAN, os *End Devices* não estão associados ao nó concentrador. Eles se comunicam com um ou mais *gateways* usando comunicações *single-hope*, usando uma modulação LoRa® ou FSK. Seus dados são transmitidos e recebidos por múltiplos *gateways*, que encaminham para o servidor de rede, utilizando algum padrão de conexão IP seguro (Wi-Fi, Ethernet, celular etc.). O servidor de rede se encarrega de gerenciar os pacotes, fazer as checagens de segurança e intermediar a comunicação com as aplicações (LORA ALLIANCE MARKETING WORKGROUP, 2015).

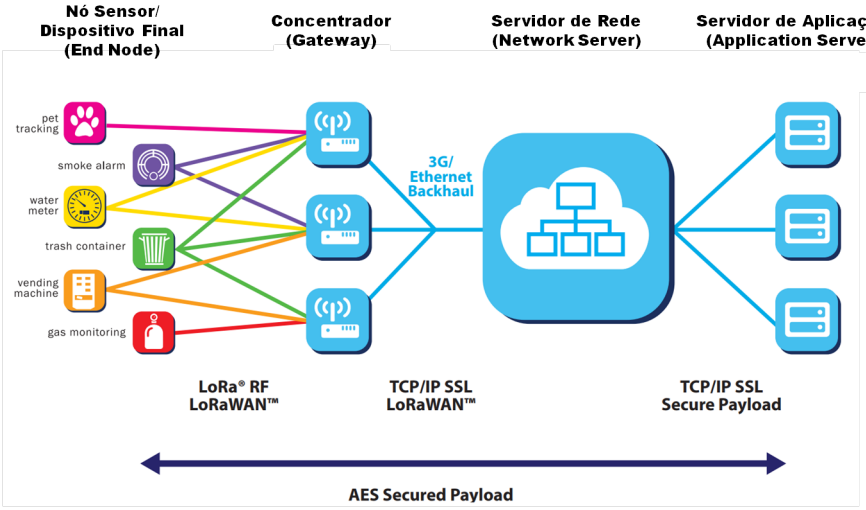


Figura 2.1: Elementos de uma rede LoRa. Topologia em estrela. Fonte: adaptado de (LORA ALLIANCE MARKETING WORKGROUP, 2015).

Existem diferentes classes de dispositivos finais, de acordo com a implementação do protocolo LoRaWAN, cujo tempo de vida de bateria é inversamente proporcional à latência das mensagens de *downlink* do *End Device*:

- **Classe A**: Nos dispositivos da Classe A, cada transmissão de *uplink* (envio de dados) é seguida por duas pequenas janelas de recepção (*downlink*). O *slot* escalonado pelo *End Device* é baseado na sua necessidade própria de comunicação com uma pequena variação baseada num tempo aleatório. Esse tipo de operação é a que permite o menor consumo de energia do nó para aplicações que só demandem transmissões de *downlink* após ter sido realizada uma transmissão de *uplink*. Quaisquer mensagens enviadas de uma aplicação para o *End Device* precisa esperar a próxima janela que segue uma transmissão pelo *End Device*. Em geral, são dispositivos alimentados por baterias, portanto, precisam mais eficientes em termos de energia e todos os dispositivos LoRaWAN devem implementar essa classe.

- **Classe B**: Os dispositivos da Classe B permitem mais *slots* de recepção, mas necessitam de um *Beacon* de tempo sincronizado pelo *gateway*. Essa classe é mais indicada para dispositivos atuadores, alimentados por baterias, com boa eficiência energética, cuja latência é controlada pelas mensagens de *downlink*.

- **Classe C**: Já os dispositivos da Classe C se mantém prontos para recepção, fechando essa janela apenas durante suas operações de transmissão. Consomem mais energia, mas garantem menor latência na comunicação entre o *Server* e o *End Device*. São indicados para dispositivos atuadores, cuja latência na comunicação é um aspecto crítico.

As especificações relacionadas ao uso de frequências ISM não-licenciadas não têm uma abrangência global. Existem parâmetros regionais, que descrevem quais faixas de frequência

estão disponíveis e o subconjunto de canais que será utilizado numa determinada região do planeta. No Brasil deve-se adotar, de acordo com a resolução ANATEL 680, de 2017, no seu Art. 10 e de acordo com o Ato 1448, também de 2017, na sua Seção 10.3, o mesmo Plano de Frequências da Austrália (AU915-928), que contempla a faixa de frequência entre 915 MHz e 928 MHz, com 9 canais para *uplink* e 8 para *downlink*; larguras de banda (*Band Width* - BW) de 125 kHz / 500 kHz para *uplink* e 500 kHz para *downlink*; fator de espalhamento (*Spread Factor* - SF) de 7 a 12; *Date Rate* de 0 a 4, para *uplink* e de 8 a 13 para *downlink*. O Plano de Frequências dos Estados Unidos (US902-928) também pode ser utilizado no Brasil, desde que respeitadas as restrições para a subfaixa, situada entre 907,5 MHz e 915 MHz, destinada para uso licenciado. A Tabela 2.2 apresenta a relação entre os parâmetros: *Date Rate*; configurações de SF e BW; *bit rate* e tamanho máximo de *payload* para os parâmetros regionais AU915-928. A Tabela 2.3 apresenta a mesma relação, para os parâmetros regionais americanos (ANATEL, 2019a,b; LORA ALLIANCE MARKETING WORKGROUP, 2017).

Tabela 2.2: Parâmetros regionais AU915-928.

DR	**Config (SF/BW)**	**Bit Rate (bps)**	**Payload Size (bytes)**
0	SF12/125 kHz	250	59
1	SF11/125 kHz	440	59
2	SF10/125 kHz	980	59
3	SF9/125 kHz	1760	123
4	SF8/125 kHz	3125	230
5	SF7/125 kHz	5470	230
6	SF8/500 kHz	12500	41
8	SF12/500 kHz	980	117
9	SF11/500 kHz	1760	230
10	SF10/500 kHz	3900	230
11	SF9/500 kHz	7000	230
12	SF8/500 kHz	12500	230
13	SF7/500 kHz	21900	230

Tabela 2.3: Parâmetros regionais US902-928.

DR	**Config (SF/BW)**	**Bit Rate (bps)**	**Payload Size (bytes)**
0	SF10/125 kHz	250	19
1	SF9/125 kHz	440	61
2	SF8/125 kHz	980	133
3	SF7/125 kHz	1760	250
4	SF8/125 kHz	3125	250
8	SF12/500 kHz	980	41
9	SF11/500 kHz	1760	117
10	SF10/500 kHz	3900	230
11	SF9/500 kHz	7000	230
12	SF8/500 kHz	12500	230
13	SF7/500 kHz	21900	230

3. Monitoramento e Análise de Vibrações em Áreas de Risco

3.1. Introdução

A definição de desastre pode ser entendida como qualquer tipo de perturbação grave do funcionamento de uma comunidade ou da sociedade, com perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais. Se estende ainda ao impacto sobre valores culturais do Patrimônio Mundial. O risco de desastre é o produto do perigo potencial (um fenômeno, como um terremoto) e da vulnerabilidade (exposição ao perigo) (UNESCO, 2015).

Os principais tipos de risco que podem causar desastres são: meteorológicos (furacões, tornados); hidrológicos (inundações, tsunamis); geológicos (terremotos, movimentos de massa); astrofísicos (meteoritos); biológicos (epidemias); antrópicos (confrontos sociais, terrorismo) e mudanças climáticas (transbordamento lagos glaciais, aumento da frequência e intensidade de tempestades. Os riscos podem ser naturais ou induzidos pelo ser humano. Riscos sísmicos, por exemplo, podem ocorrer em função de tremores de terra ou movimento induzido (liquefação e movimento de massa). Movimentos de massas podem ser causados por danos a represas, reservatórios, por uma explosão nuclear ou por atividades de mineração (UNESCO, 2015).

Vibração é o estudo de movimentos repetitivos de objetos em relação à uma posição de equilíbrio. Está presente em todos os lugares e, em muitos casos, afeta a natureza e os projetos de engenharia. A explicação física para o fenômeno da vibração se encontra na interação entre a energia potencial e a energia cinética. Quando a energia potencial é armazenada, a energia cinética é liberada na forma de movimento (vibração) de uma massa (PRANDONI e VETTERLI, 2008).

Para Thomson (1978), a vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e às forças a eles associadas. Os sistemas oscilatórios podem ser caracterizados como *lineares* ou *não-lineares* e as vibrações podem ser classificadas, de maneira geral, como *livres*, quando um sistema oscila na ausência de forças externas e pode vibrar com uma ou mais *frequências naturais*, ou *forçadas*, quando ocorre sob excitação de forças externas. Quando ocorrem vibrações externas, sua frequência pode coincidir com uma das frequências naturais do sistema, levando-o ao estado de *ressonância*, capaz de causar colapsos e danos às estruturas de edifícios, pontes, barragens, máquinas e equipamentos.

O monitoramento de vibrações é realizado por várias razões. Especialmente em projetos de engenharia, as frequências naturais de uma estrutura ou de uma máquina são extremamente importantes na prevenção e entendimento do comportamento dinâmico de um sistema. O principal objetivo da realização de testes de vibração em um sistema é determinar suas frequências naturais. Além disso, os testes são úteis para modelos analíticos propostos para determinado sistema. Se as frequências e formas de onda medidas estão de acordo com aquelas previstas no modelo analítico, constata-se que o modelo proposto pode ser utilizado, com confiança, no

projeto e na previsão de resposta a vibrações.

Testes de vibração também podem ser utilizados para avaliar a durabilidade e robustez de uma peça ou equipamento. Submetido a vibrações forçadas, com frequências, amplitude e tempo conhecidos, após o teste, a peça ou equipamento deve continuar a realizar a sua função original. Dessa forma, é possível verificar, experimentalmente, que o item testado é robusto o suficiente para suportar condições de vibração específicas. Frequentemente, são realizados no diagnóstico e previsão na manutenção de máquinas e equipamentos. O monitoramento contínuo das frequências naturais de equipamento ou de uma estrutura permitem a observação de mudanças na frequência ou em outros parâmetros da vibração, indicando falhas ou a necessidade de manutenção, além auxiliar o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e alerta.

3.2. Análise de Vibrações

3.2.1. Processamento de Sinais

O processamento digital de sinais consiste no processo de amostragem do sinal real contínuo no tempo, e sua transformação para um domínio no qual seja possível efetuar uma análise. A transformada de Fourier é um exemplo de técnica de processamento de sinais em que o sinal é transformado numa representação no domínio da frequência. Os chamados *espectros de frequência* podem então ser analisados como uma representação do sinal original.

Sinais discretos no tempo são representações de sinais contínuos no tempo, ou seja, representações de amostras tomadas em pontos discretos do tempo. Uma representação discreta do tempo, de um sinal contínuo no tempo, pode ser obtida por meio de uma amostragem periódica, em que uma sequência de amostras $x[n]$, de um sinal contínuo $x_c(t)$, obedece a relação:

$$x[n] = x_c(nT), -\infty < n < +\infty \tag{3.1}$$

em que T é o *período de amostragem* e $f_s = 1/T$ é a *frequência de amostragem*, em amostras por segundo e n é o índice da amostra.

Seja $x_c(t)$ um sinal com $X_c(j.\omega) = 0$, para $|\omega| \geq \omega_n$. Então $x_c(t)$ é determinado unicamente por suas amostras $x[n] = x_c(nT)$, para $n = 0, \pm 1, \pm 2, ...$, se $\omega_s = 2\pi/T \geq 2\omega_N$.

ω_s é a frequência angular de amostragem e a frequência ω_N é comumente referida como *frequência de Nyquist*, e a frequência $2\omega_N$, que deve corresponder ao valor mínimo da frequência de amostragem, para posterior recuperação do sinal, é chamada de *taxa de Nyquist* (OPPENHEIN *et al.*, 1999).

A relação acima descrita é condição para que um sinal discreto no tempo possa ser reconstruído e também vale para as frequências lineares f_s e f_N. Portanto, a taxa de amostragem de um sinal contínuo deve ser pelo menos 2 vezes maior do que a máxima frequência do sinal que se deseja amostrar. Por exemplo, se o sinal contínuo no tempo de um evento sob monitora-

mento apresenta frequência máxima (f_N) de 100 Hz, deve-se aplicar uma taxa de amostragem (f_s) de pelo 200 Hz, o que corresponde a uma amostra a cada 1/(200 Hz) = 5 ms.

3.2.2. Transformada Rápida de Fourier

A essência da análise de vibrações é a análise de frequências, ou *análise espectral*, em que o objetivo é determinar as frequências contidas num sinal. A tranformada discreta de Fourier é um dos principais métodos utilizados nesse processo e, por se tratar de uma ferramenta de análise de dados discretos, para uma dada frequência de amostragem (f_s), tem-se que é possível obter, de forma confiável, apenas informações sobre as frequências menores do que $f_s/2$, conforme o teorema de amostragem de Nyquist-Shannon. O teorema diz ainda que, quando essa relação não é respeitada, não é possível efetuar a reconstrução do sinal sem imperfeições (denominadas *aliasing*) (BAZAN, 2015; TOLEDO JÚNIOR, 2018).

A transformada de Fourier de um sinal é uma representação alternativa dos dados desse sinal. Enquanto o sinal está no domínio do tempo, a representação de Fourier está no domínio da frequência. Essa representação alternativa do sinal é chamada de *espectro*.

Seja $x(t)$ o sinal no domínio do tempo, com uma amostragem de tamanho T, $x(n)$ representa os dados discretos, após a aquisição. O teorema de Fourier afirma que um sinal de vibração pode ser representado da seguinte forma (em que $A \in \Re$ é a amplitude da oscilação, ω é sua frequência e ϕ é sua fase inicial):

$$x[n] = A.e^{j.(\omega.n+\phi)} = A[cos(\omega.n+\phi) + j.sin(\omega.n+\phi)] \tag{3.2}$$

Se N dados são coletados durante o período T, a transformada de Fourier normalizada e discreta (DFT) do sinal $x(t)$ pode ser representada como:

$$X[k] = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n).e^{-(2.\pi/N).n.k} \tag{3.3}$$

em que $k = 0, 1, 2, ..., N-1$ é o índice da frequência correspondente ao índice da amostra n.

Para que o sinal e seu espectro de frequência possam ser analisados computacionalmente, o sinal deve ser amostrado, de forma que a transformada seja uma representação discreta. A DFT pode ser utilizada para realizar análise ou síntese de frequência para sinais períodicos e discretos. O algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) é uma implementação da DFT, que pode ser executada com baixo custo computacionais nas unidades de processamento atuais (SILVA, 2013).

O cálculo da FFT demanda a escolha de dois principais parâmetros: a frequência de amostragem (f_s) e o número de pontos ou o número de amostras (N). Esses parâmetros permitem definir o espaçamento entre as amostras do espectro do sinal de tempo contínuo ($\Delta f = f_s/N$), amostrado nas frequências $f_k = (f_s/N)k$ (OPPENHEIN *et al.*, 1999).

O método computacional mais simples e mais conhecido para computar a FFT é o algo-

ritmo *Radix-2* ou *Cooley-Tukey*. A estratégia desse algoritmo é decompor um sinal de N pontos no domínio do tempo em N sinais no domínio do tempo, composto por um único ponto. É importante destacar que N deve ser um número na potência de 2 ($N = 2, 4, ..., 512, 1024, ...$). O algoritmo se inicia preparando a entrada para o somatório, colocando-a convenientemente em ordem. Em seguida, para cada nível do somatório e para cada fator do expoente para a metade do período, calcula-se o fator. Para cada soma deste fator, calcula-se o produto do fator pelo segundo termo da soma. Por fim, calcula-se a soma e em seguida a diferença (CHERNENKO, 2020; STACK OVERFLOW CONTRIBUTORS, 2020).

3.2.3. Vibrações em Áreas de Risco

Uma das causas de rompimento de barragens de rejeitos de mineração é o evento de liquefação, que se manifesta quando a poropressão se eleva consideravelmente e de forma repentina. Sobretudo nas barragens cujo método construtivo é do tipo a montante, método pelo qual as estruturas oferecem menor resistência a eventos sísmicos, o material depositado pode liquefazer-se, ou seja, comportar-se como um líquido denso (DRUMOND, 2018).

Independente da fonte de vibração, natural, como sismos e terremotos, ou artificiais, como trânsito de equipamentos pesados (caminhões, tratores, carregadeira etc.) ou explosões do processo de desmonte de rochas, as barragens de rejeitos de mineração precisam ter uma série de parâmetros monitorados, entre eles, as vibrações.

As vibrações, do tipo transiente ou cíclico, também podem gerar desequilíbrio em taludes, dependendo da magnitude e da duração da ação dinâmica. Se a magnitude das tensões no solo ultrapassarem a tensão resistente, pode haver uma degradação do material próximo ao talude e desestabilizá-lo. Um dos métodos para o cálculo da estabilidade de taludes é o equilíbrio-limite, que considera que as forças que tendem a induzir a ruptura são balanceadas pelos esforços resistentes. Algumas das abordagens utilizadas para analisar a estabilidade de taludes buscam conhecer parâmetros relacionados à aceleração (coeficiente de aceleração crítica, coeficiente de aceleração induzida e coeficiente de aceleração resistiva), cujos valores podem indicar o potencial de colapso da estrutura (SILVA, 2006).

O monitoramento e análise de vibrações em taludes e encostas, para conhecimento dos *parâmetros modais* (modos de vibração, frequências naturais e coeficientes de amortecimento) do sistema, permitem, portanto, validar modelos (por exemplo, modelos gerados pelo Método dos Elementos Finitos), realizar análises dinâmicas de estabilidade e avaliar o índice de segurança da estrutura.

Os métodos para determinação dos parâmetros modais de uma estrutura podem ser divididos entre: aqueles que trabalham no domínio do tempo (Método do Decremento Aleatório, Método de Ibrahim, Identificação Estocástica de Subespaços etc.) e aqueles que trabalham no domínio da frequência (Transformada Rápida de Fourier, Decomposição no Domínio da Frequência etc.). Na aplicação dos métodos baseados no domínio do tempo, a FFT pode

ser utilizada para uma análise prévia e identificação das frequências naturais de uma estrutura (YOSHIDA, 2016).

4. Trabalhos Relacionados

Nesta seção apresenta-se o resultado do levantamento de trabalhos relacionando o problema de monitoramento (que, eventualmente, podem ser aplicados a barragens, e áreas de risco de deslizamentos de terra) ao uso de soluções de redes de sensores sem fio. Outros trabalhos estão relacionados a estratégias para lidar com a limitação de recursos de energia dos nós sensores em redes de sensores sem fio, característica importante em sistemas de monitoramento de áreas de risco.

Os trabalhos de Lynch *et al.* (2003), Lynch *et al.* (2004) e Lynch (2004) buscam avaliar a efficiência energética de um nó sem fio para o monitoramento de saúde de estruturas. Algoritmos de pré-processamento são embarcados no nó sensor: FFT, para determinação das frequências modais, ou algoritmo baseado no modelo AR (*Auto-regressive*), para detecção de danos; apenas os resultados do processamento são transmitidos: frequências modais ou parâmetros do modelo AR; e um comparativo de consumo de energia dos nós, considerando as etapas de processamento e de transmissão é realizado: nós com algoritmos de detecção embarcados e nós transmitindo continuamente os dados brutos dos sensores. As avaliações mostram uma economia no consumo de energia nos nós que realizam o pré-processamento, que podem variar de 50 % a 84 % do consumo de nós que não têm um algoritmo de detecção embarcado. Outra estratégia avaliada para a redução do consumo de energia dos nós sensores foi embarcar um algoritmo de compressão de uma série de dados coletados pelo nó, por exemplo o algoritmo de Huffman. Os dados comprimidos reduzem o tamanho dos pacotes. Isso reflete na redução do tempo de transmissão e, consequentemente, no consumo de energia dos nós, que pode chegar a 61 % em relação à transmissão dos dados sem compressão.

Em seu trabalho, Deepthi *et al.* (2003) propõem um sistema de monitoramento estrutural sem fio, utilizando acelerômetros do tipo MEMS (MMA8452Q) e strain gauges (Wheastone bridge) como sensores. O sistema ainda conta com um microcontrolado ARM (LPC1347), um amplificador LMP8358 e um conversor A/D ADC16S626, de 16 bits. O rádio é um CC2530 e embora o conversor ADC tenha capacidade de amostragem a uma taxa de 50 kHz, os dados foram amostrados a uma taxa de 500 Hz. Ensaios de deflecção estática e teste dinâmico foram realizados, a fim de validar o nó sensor.

Uma relação de projetos (acadêmicos e comerciais) de sensores sem fio e redes de sensores sem fio para o problema de SHM (*Structural Health Monitoring*) pode ser encontrada no trabalho de Lynch e Loh (2006). São apresentadas as principais especificações para os diferentes componentes de um sistema dessa natureza: aquisição de dados (número de canais A/D e suas resoluções, taxas de amostragem, entradas digitais necessárias); sistema de computação embarcado (microcontrolador/processador utilizado, tamanho dos barramentos de dados, frequências de *clock*, tamanhos das memórias de programa e dados); interface de comunicação sem fio (transceptor utilizado, banda de frequência, padrão de comunicação, modulação, alcance, taxa de dados); dimensões dos protótipos ou produto; consumo de energia do sistema;

fonte de energia utilizada.

Com base na compilação de Lynch e Loh (2006), de trabalhos realizados entre de 1998 a 2005, é possível relacionar um conjunto de requisitos para os módulos de um sistema *wireless* de monitoramento de integridade de estruturas. O sistema de aquisição de dados, a arquitetura computacional e o módulo de comunicação sem fio devem apresentar idealmente, segundo o levantamento, os requisitos da Tabela 4.1. Com esses requisitos, é possível monitorar sinais de vibração de baixa frequência, úteis para o monitoramento estrutural global, com uma taxa de amostragem de 240 Hz e frequência máxima do sinal igual a 120 Hz, e sinais de alta frequência, presentes no monitoramento de vibração local, em pontos específicos da estrutura, com frequências de sinal de até 100 kHz. Os sistemas de rádio operavam em diferentes faixas (418 MHz, 433 MHz, 900 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz) e, em geral, utilizavam técnicas de modulação por espalhamento espectral.

Tabela 4.1: Requisitos básicos de um módulo para monitoramento de estruturas com interface de comunicação sem fio.

Sistema de aquisição de dados	
Número de canais A/D	8
Resolução canais A/D	8 a 16 bits
Taxa de amostragem	240 Hz a 200 kHz
Arquitetura computacional	
Tamanho barramento	8 a 32 bits
Frequência de clock	2,1 MHz a 20 MHz
Memória de programa	4 kB a 128 kB
Memória de dados	32 kB a 2 MB
Canais de sem fio	
Alcance outdoor	10 m a 300 m
Taxa de dados	10 kbps a 1,6 Mbps

Lynch (2007) dá destaque para os sistemas *wireless* (sem fio), cujos módulos funcionais que devem compor um projeto de hardware de uma unidade de sensoriamento sem fio para a aplicação de monitoramento da integridade (saúde) de estruturas de engenharia civil, como pontes, são, basicamente: um subsistema de aquisição de dados, contendo uma interface de sensoriamento; um núcleo computacional e uma interface de comunicação sem fio. Segundo o autor, o sistema de aquisição de dados deve ser capaz de coletar dados a uma taxa de amostragem de pelo menos 500 Hz, possuir de 4 a 8 canais analógico-digitais, com resolução de pelo menos 16 bits. A arquitetura computacional deveria ter pelo menos 256 kB de memória para armazenamento e 256 kB de memória de programa, além de uma unidade de processamento com capacidade suficiente para executar algoritmos de análise de dados, como por exemplo uma FFT. Quanto ao módulo de comunicação sem fio, o transceptor escolhido dever ter como características: operar com modulação por espalhamento, para prover confiabilidade aos dados; operar numa banda de frequência não licenciada (ISM); ter a capacidade de alcance de pelo 200 metros em espaço aberto; ter a capacidade de operação com taxa de dados de pelo menos 20

kbps.

Os autores do projeto para validação de um sistema sem fio para o problema de SHM descrito em Wang *et al.* (2007) selecionaram um rádio de baixo custo, com características de baixo consumo de energia (50 mA no modo de transmissão de dados, 30 mA na recepção de dados) e longo alcance (90 m indoor, 300 m outdoor) para a comunicação sem fio (MaxStream 9XCite, operando a 900 MHz). Os nós sensores são compostos por: microcontroladores Atmel AVR ATmega128 de 8 bits e *clock* de 8 MHz, um chip de memória externa Cypress CY62128B, conversores A/D ADS8341 de 16 bits da Texas Instruments. Dois acelerômetros foram utilizados no projeto: um Crossbow CXL02LF1, com RMS (Root Mean Square) *noise floor* 0,5 mg e um Bosh SMB110, com RMS *noise floor* de 6,8 mg. Os nós têm capacidade de armazenamento de até 64000 leituras, com o uso da memória externa. Os dados são pré-processados por algoritmo embarcado que calcula a FFT para as frequências harmônicas de interesse. Com o microcontrolador utilizado, a execução do cálculo de FFT leva cerca de 18 segundos. Um servidor central, a uma amostragem de dados (taxa de requisições aos nós sensores) de 50 Hz é capaz de coletar dados de até 24 nós sensores simultaneamente.

Em termos de efficiência energética dos *End Devices*, Wang *et al.* (2007) selecionaram os elementos de hardware componentes de seu protótipo de sistema de monitoramento de estruturas, considerando o menor consumo necessário para o funcionamento do sistema. Quando ativo, o nó sensor faz a leitura dos dados dos sensores, enviando-os via rede sem fio. Em seguida, coloca-se em modo *Sleep*, até que seja novamente "acordado". Um método para a estimativa de autonomia de energia, baseado no tempo em que o dispositivo permanece ativo e na capacidade da fonte de energia, é apresentado. Para testar o desempenho do sistema e a capacidade de processamento local dos dados, o algoritmo FFT, usando o método Cooley-Turkey foi implementado. O tempo de execução FFT *on board*, de acordo com o trabalho, é de 18 segundos, com uma taxa de amostragem de dados na ordem de 50 Hz. Os testes foram realizados na ponte Geumdang, na Coréia do Sul. Os dados foram comparados com um sistema de aquisição de cabeado, com uma taxa de amostragem de 200 Hz. A máxima taxa de amostragem para o sistema sem fio foi de 70 Hz.

Em Moreno e Barreto (2008), destacam-se a importância do consumo de energia e potência em dispositivos móveis e embarcados e apresentam-se as principais técnicas, estratégias para redução de consumo e uma avaliação do impacto do uso dessas técnicas na diminuição do consumo de energia. Discutem-se técnicas em diferentes níveis: circuito, arquitetura, sistema operacional, compilador, comunicação e aplicação.

Yu *et al.* (2011) apresentam as principais características que tornam críticos os projetos de sistemas de monitoramento de barragens de rejeitos de minério. Os autores mencionam uma série de parâmetros que deveriam ser monitorados nas diferentes fases da vida de uma barragem (nível dos reservatórios, precipitação, linhas de saturação, velocidade e direção do vento, poro-pressão interna exercida pela água). A instalação de um sistema de monitoramento online também é colocado como fundamental, ressaltando-se a necessidade de observação da acurácia

e precisão dos instrumentos de medição (por exemplo, a precisão do medidor de deslocamento deveria ser de 1mm) e transmissão de dados utilizados, assim como na instalação correta dos equipamentos. Um sistema de alarme é mais um item importante no sistema de monitoramento, segundos os autores. Menciona-se sobre o sistema de monitoramento online de uma mina de ouro na cidade de Zhaoyuan, China.

Estudo semelhante foi realizado por Ooi e Wang (2014), com o objetivo de avaliar sensores do tipo MEMS como solução de tamanho reduzido, baixo custo e precisão para monitoramento de áreas de risco de desastres naturais e integridade de estruturas, o monitoramento de vibrações de superfície do solo durante explosões em subsolo são realizadas. Ensaios em laboratório também são realizados com o objetivo de caracterizar o estado do solo na iminência de sofrer um deslizamento de terra. Segundo os autores, acelerômetros MEMS apresentam boa sensibilidade e precisão, além de baixo custo, para uso em aplicações dessa natureza.

Em Taiwan, Ooi *et al.* (2016) desenvolveram sistema similar, utilizando acelerômetros do tipo MEMS, associado a um sensor de movimento e uma Raspberry Pi, para detecção prévia de mudanças na inclinação de uma grande área sujeita a deslizamentos de terra. Um modem 3G foi utilizado para transmissão de até 800 amostras por segundo, permitindo a detecção de pequenos terremotos e vibrações oriundas do tráfego de veículos. Em razão da grande quantidade de dados coletados, a SBC (Single-Board Computer) implementa o protocolo de comunicação MQTT (Message Queue Telemetry Transport) para envio dos dados para uma aplicação na nuvem. Arquitetura similar é utilizada por Hloupis *et al.* (2016) para o desenvolvimento de um sistema de detecção e alerta de deslizamentos nas paredes do Canal de Corinto. O uso de tecnologia de comunicação de curto alcance como Bluetooth foi escolhido em razão do objetivo de uso do sistema apenas para alertas locais, para operadores de sistema mais complexo, que faz uso de técnicas geotécnicas de alta precisão e sistema de varredura por laser, para um sistema de monitoramento espacial.

No trabalho de Ballestrin *et al.* (2017), os autores propuseram, desenvolveram e testaram um método para caracterização e análise de vibração em tempo real, que pode ser aplicado no transporte de cargas sensíveis. Para isso, foram utilizados nós de sensores de uma rede sem fio, realizando a aquisição de dados e calculando a densidade espectral de potência das vibrações. Ao transmitir apenas o resultado dos dois pontos mais significativos de PSD (*Power Spectral Density*) para um nó de controle, houve uma redução de 93,4 % da quantidade de dados transmitidos, permitindo aumentar o tempo de aquisição de dados sem recarregar a bateria. Alternativamente, o uso de interrupções das atividade no acelerômetro para ativar o processador, mantendo-o em um estado de baixa energia na maioria das vezes promove economia de energia.

Para validar o sistema proposto, experiências foram realizadas comparando dados com um sistema comercial, onde o erro percentual médio obtido para a amplitude da PSD foi de 41 % para a maior frequência de energia e 45 % para a segunda frequência analisada. Segundo os autores, esses valores altos não invalidam o sistema proposto, uma vez que o erro absoluto médio foi menor que a resolução na identificação das frequências em que os picos ocorreram.

Os autores sugerem alterações, como executar uma calibração do sistema em vez de usar os valores relatados pelo fabricante e desconectar fisicamente o acelerômetro da placa do nó do sensor. A frequência de amostragem utilizada foi de 100 Hz (largura de banda igual a 50 Hz), com tamanho da amostragem igual a 32 leituras (limitada pela capacidade de armazenamento do buffer de leitura do sensor).

Em seu trabalho de dissertação, Castilho (2017) faz uma análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano — barragem de rejeitos de minérios, da Samarco Mineração S.A, localizada no município de Mariana, Estado de Minas Gerais. Parte do estudo foi realizado a partir da análise dos dados de um acelerômetro comercial instalado após o rompimento da barragem, ocorrido em novembro de 2015. Dados de piezômetros pré-instalados, cuja função é monitorar a poropressão da estrutura também foram analisados. As acelerações de pico, as amplitudes de velocidade e respostas em frequência foram identificadas para eventos de desmonte de rochas, sismos naturais, movimentações de massa e tráfego de veículos pesados. Os resultados foram comparados com a Escala de Intensidade Instrumental, proposta pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos, que classifica os níveis de percepção de um tremor e o dano potencial, a partir do percentual de aceleração e amplitude de velocidade de eventos sísmicos. Essa escala define os níveis de intensidade de ***I*** a ***X***, a percepção do tremor, de ***Não sentido*** a ***Extremo***, e o dano potencial de ***Nenhum*** (níveis de ***I*** a ***IV***) a ***Muito forte*** (***X***).

O acelerômetro utilizado para o monitoramento de vibração dos eventos mencionados pode ser configurado para frequências de amostragem de 100 Hz a 200 Hz. Sua resposta em frequência está na faixa de 80 Hz, para uma amostragem de 200 Hz e as amplitudes de aceleração podem ser configuradas para 2 g ou 4 g. O evento que promoveu maior aceleração e que, portanto, classificou a percepção do tremor como ***Leve*** e o nível de intensidade como ***IV***, foi o tráfego de veículos pesados. Os outros eventos ocorridos e monitorados (desmonte, sismo natural e movimentação de massa) apresentaram picos de aceleração que, em alguns casos levaram a alterações nos níveis de poropressão da barragem, no entanto, foram dentro do limite de classificação de nível ***I***, sem indicação de dano potencial.

Ehiagwina *et al.* (2018) dão uma visão geral do estado-da-arte no campo de estudos sobre monitoramento da saúde de estruturas e aponta os principais desafios que têm sido explorados nas pesquisas atuais. Segundo esse levantamento, as principais áreas de estudo seguem no sentido de: promover avanços nos sistemas de aquisição de dados para o problema de SHM; propor novos *frameworks* para detecção, prognóstico e suporte à tomada de decisão; enfrentar os desafios práticos de implantação de sistema de SHM. Neste trabalho destacam-se requerimentos específicos de projeto de nós sensores sem fio para aplicações de monitoramento de integridade de estruturas e de gerenciamento de desastres: agregação de dados; flexibilidade; segurança; capacidade de operação com baixo consumo de energia e altas taxas de dados e conectividade. Também são apresentadas soluções existentes para diferentes aplicações utilizando dispositivos com recursos ULP (*Ultra Low Power*), onde a autonomia de energia do nó sensor

é um requerimento crítico. Dentre os casos de uso citados, encontram-se aplicações de SHM, a agricultura de precisão e os sistemas de transporte.

Na Indonésia, Awaludin e Dhewa (2018) desenvolveram um nó sensor com arquitetura de baixo custo, com acelerômetro e giroscópio para monitoramento de deslizamentos de terra. O hardware composto por uma plataforma Arduino, um módulo MPU-6050 e um Raspberry Pi, além do sensor de temperatura e umidade (DHT11), coleta e processa os dados dos acelerômetros e giroscópios, obtendo os ângulos de rotação do terreno (roll e pitch). Os dados brutos dos acelerômetros também são armazenados em um cartão SD. O Raspberry transmite os dados via TCP/IP para um servidor na Internet. Embora a proposta fosse de um nó sensor de baixo custo, comparado a outros dispositivos no mercado, a arquitetura proposta tem custo relativamente alto se fosse considerado um número grande de ocorrências de deslizamentos, com danos aos nós sensores.

A tecnologia de transmissão dos dados para a Internet, normalmente não tem grande alcance, o que pode inviabilizar a aplicação de monitoramento. Ainda na Indonésia, Sofwan *et al.* (2018) apresentaram um protótipo de sistema de monitoramento composto por acelerômetros, giroscópios, sensores de umidade, de chuva e de vibração. Um módulo MPU-6050 é utilizado para detecção de inclinação, dois sensores FC-28 são utilizados para medir a umidade do solo e um módulo 801S trabalha como detector de vibração. O nó sensor, proposto sob a plataforma Arduino, coleta os dados dos sensores, calcula os valores de inclinação, percentual de umidade do solo, milímetros de chuva, define o nível de vibração e utiliza um algoritmo de Redes Neurais Artificiais para envio de alerta. A comunicação do nó sensor com um servidor foi testada via módulo GSM SIM900 e via transceptor LoRa SX1278, trabalhando na banda de frequência de 433 MHz.

O trabalho de Siddula *et al.* (2018) cita alguns dos principais aspectos do projeto de um sistema de monitoramento do nível de água e gerenciamento de barragens, utilizando sensores e tecnologias de rede LPWAN para Internet das Coisas. O protótipo desenvolvido utiliza sensores ultrassônicos e um microcontrolador ATMEL ATmega2560, de 8 bits e 16 MHz de clock, com arquitetura RISC, com 256 kB de memória *flash*, 8 kB de memória RAM e 4 kB de memória EEPROM. As tecnologias de rede de longo alcance e baixo consumo do estudo foram as redes LoRa e NB-IoT.

No Brasil, um sistema piloto para monitoramento de movimento do solo utilizando acelerômetros MEMS de baixo custo (MPU-6050 e ADXL345) foi proposto e instalado em Itajaí/SC. Cerca de 5 milhões de dados, correlacionando vibração e precipitação, foram coletados e armazenados em um *datalogger* local. Na análise dos dados, percebeu-se maior intensidade na vibração durante os períodos de chuva (LEÃO e SOUZA, 2018).

No projeto de Meireles (2018) é apresentada uma metodologia para desenvolvimento de projetos de redes LPWAN para aplicação em sistemas de monitoramento e alerta em áreas de risco (barragens de rejeitos, deslizamentos de encostas, alagamentos). Os principais requisitos do sistema são levantados e uma análise da comparação entre os resultados de cobertura do

sinal em campo com simulações realizadas usando modelos de predição (Free Space, Hata, Vertical Plane, X3D). Uma rede piloto com tecnologia LoRa® foi implantada no município de Ouro Preto, MG, com dois *gateways* e 3 nós sensores. Um dos nós utilizados foi um Arduino Uno, com um shield Dragino, com transceptor LoRa® e GPS. A plataforma TTN (The Things Network) foi utilizada como Servidor de Rede e a plataforma Cayenne fez o papel de camada de aplicação. Nessa pesquisa, ressaltou-se a necessidade do desenvolvimento de novos dispositivos sensores de baixo custo e baixo consumo de energia para aplicações de monitoramento de risco, frente aos instrumentos comerciais, de custo elevado. O autor também justifica a utilização da tecnologia de rede LPWAN e da banda de frequência não-licenciada ISM para o tráfego de informações do sistema proposto, pelas características de independência de operadora e pela especificidade da aplicação, que necessita de uma rede com baixa taxa de dados e longo alcance de comunicação.

Como desdobramento deste último trabalho mencionado, estão os trabalhos de Meireles *et al.* (2018a) e Meireles *et al.* (2018b). O primeiro apresenta os principais elementos necessários para o projeto de uma aplicação de Internet das Coisas, utilizando plataformas livres. As escolhas, voltadas para componentes de uso livre e gratuito e os detalhes de configuração das camadas de rede também são descritos. O segundo, apresenta detalhes da validação da metodologia para projetos de sistemas de Internet das Coisas para o gerenciamento de áreas de risco. O artigo destaca o potencial das tecnologias de rede LPWAN e o método utilizado para a definição de requisitos de projeto.

Ribeiro e Lameiras (2019), em sua avaliação de acelerômetros do tipo MEMS para SHM, realizam ensaios de vibração com taxas de amostragem de 100 Hz, 200 Hz e 250 Hz. Uma estrutura de alumínio, com três andares, fixada a uma base de concreto é utilizada para avaliar os sensores MPU6050, BMI160, alguns acelerômetros da família MMA e um ADXL335. As medições de vibração foram analisadas e a Densidade de Potência Espectral (PSD) foi calculada. Uma plataforma também foi utilizada para avaliar os acelerômetros. As frequências modais e a taxa de amortecimento foram utilizados como parâmetro para a avaliação do acelerômetro com melhor desempenho nesse tipo da aplicação.

A estabilidade da barragem de terra Boostan, no Irã, é investigada por Seyed-Kolbadi *et al.* (2020). Para medir a resposta da barragem, vários locais sensíveis são instrumentados, para medir póro-pressão, nível da água e taxas de tensão interna usando dispositivos de inspeção, como piezômetros comuns e piezômetros Casagrande, e células de pressão total. Os instrumentos mostraram que, no geral, a condição da barragem do estudo de caso é avaliada como normal. Os autores imaginam que o estudo pode servir de guia em barragens semelhantes para monitoramento da integridade da estrutura .

Hakim *et al.* (2020) propõem um sistema de monitoramento e alerta para deslizamentos de terra, utilizando tecnologia sem fio e conceitos de Internet of Things (IoT). O sistema inclui sensor de umidade do solo, temperatura e a umidade do ar na superfície do solo. Um módulo MPU6050 foi utilizado para detectar movimento e vibração do solo com precisão e resolução

relativamente altas. O sistema computacional que registra os dados dos sensores é um Arduino Mega 2560. Os dados coletados são transmitidos usando o ZigBee para uma unidade receptora equipada com o módulo Wi-Fi ESP8266. Dados e o status do terreno podem ser avaliados por outros pesquisadores e pelo público por meio do aplicativo de celular desenvolvido usando a plataforma Blynk Internet of Things. Um alerta de deslizamento é emitido pelo aplicativo para smartphone, de forma que a população em risco possa recebê-lo.

A Tabela 4.2 apresenta uma síntese dos principais parâmetros relacionados às taxas de amostragem (f_s), as faixas de frequência e amplitudes de vibração reportados em diferentes sistemas de monitoramento em áreas de risco: encostas e taludes, estruturas de engenharia civil (pontes, edifícios e barragens).

Tabela 4.2: Síntese dos requisitos de sistema dos trabalhos relacionados.

Amostragem (f_s)	**Faixa de Frequência**	**Amplitude**	**Aplicação**	**Referência**
1024 amostras a 30 Hz 4096 amostras a 320 Hz 8192 amostras a 976 Hz	2 Hz a 20 Hz	0,2 g	SHM	Lynch, 2002
1024 amostras 2048 amostras 4096 amostras	0,25 Hz a 3 Hz	1,9 mm	SHM	Lynch, 2003
500 Hz	0 a 250 Hz	-	SHM	Deepthi, 2003
4096 amostras	-	-	SHM	Lynch, 2006
4096 amostras a 70 Hz 4096 amostras a 100 Hz	0 Hz a 50 Hz	-	SHM	Wang, 2007
10 kHz	6 a 128 Hz	0,5 g	Encostas, Taludes	Oi e Wang, 2014
2 Hz	-	-	Encostas, Taludes	Hloupis, 2016
500 Hz	0 Hz a 250 Hz	-1 g a 1 g	Encostas, Taludes	Oi et al, 2016
-	0 Hz a 28 Hz	0,2 g a 0,4 g	Barragem	Paiva, 2016
32 amostras a 100 Hz	7 Hz a 15 Hz	0,25 g a 0,5 g	Transporte	Ballestrin et al, 2017
200 Hz	80 Hz	0,0017 g a 1,24 g	Barragem	Castilho, 2017
40 Hz	0 Hz a 20 Hz	-	SHM Monitoramento Ambiental Gerenciamento de Desastres	Ehiagwina, 2018
1/60 Hz	-	-	Encostas, Taludes	Awaludin e Dhewa, 2018
1600 Hz 550 Hz	0,5 Hz a 800 Hz 0,5 a 275 Hz	-3 g a 3 g	Encostas, Taludes	Leão e Souza, 2018
200 Hz 250 Hz 100 Hz	0 a 100 Hz 0 a 125 Hz 0 a 50 Hz	-2 g a 2 g	SHM	Ribeiro e Lameiras, 2019

Percebe-se que os requisitos de amostragem de dados de vibração variam conforme o tipo de evento que se deseja monitorar. Em grandes estruturas de engenharia, como pontes, se o interesse é realizar um monitoramento de vibração global da estrutura, as taxas de amostragem de dados podem ser mais baixas, na ordem de 30 a 200 Hz. Consequentemente, as faixas de frequência de vibração que podem ser observadas são menores. Para o exemplo, na ordem de 15 Hz a 100 Hz. Para um monitoramento mais localizado, em pontos específicos de uma grandes estrutura, necessita-se de um sistema com maior capacidade de amostragem de dados, de forma que quaisquer eventos de vibração possam ser detectados, principalmente aqueles com picos de vibração mais elevados. Neste caso, os requisitos de amostragem podem ser da ordem de 10 kHz.

Em barragens, em geral os eventos de vibração ocorrem em faixas de frequência e am-

plitudes mais baixas. Na literatura, foram encontradas faixas de frequência de vibração entre 6 Hz e 128 Hz, com amplitudes variando de 1,7 mg a 1,24 g. Essas taxas implicam em requisitos mais baixos de taxa de amostragem (menores do que 200 Hz) e maior sensibilidade dos sensores.

Em encostas e taludes, de forma complementar ou em alternativa ao monitoramento de vibrações, pode-se instrumentar o sistema com inclinômetros. Acelerômetros também podem ser utilizados para o monitoramento de alterações na inclinação da estrutura. Neste caso, a frequência com que os dados são coletados é menor, podendo ser realizada a cada 1 minuto, por exemplo. Sendo importante monitorar as vibrações, as taxas de amostragem dos sistemas podem variar entre 100 Hz e 1,6 kHz, com faixas de frequência e amplitudes variando entre 0,5 Hz a 275 Hz, e entre -3 g a +3 g, respectivamente.

5. Materiais e Métodos

A maior parte do desenvolvimento deste trabalho (desenvolvimento do protótipo, implantação da rede de Internet das Coisas, e ensaios de vibração), foi realizada no Laboratório de Tecnologias Industriais, do Departamento de Engenharia de Controle e Automação, no prédio dos laboratórios da Escola de Minas, dentro da área do Campus Morro do Cruzeiro, na Universidade Federal de Ouro Preto.

A área de estudo deste trabalho envolve ainda, parte da zona urbana do município de Ouro Preto, que está situada na região central-sul do estado de Minas Gerais e possui uma área aproximada de 1245800 m^2 e uma população aproximada de 74588 pessoas, segundo o IBGE. A cidade surgiu no ciclo do ouro, sendo descoberta pelos bandeirantes por volta de 1698. O conjunto de arraiais deram origam à Vila Rica, em 08 de Julho de 1711. Desde o início de sua ocupação e no auge da exploração do ouro, o município passou por diversas modificações de ordem geotécnica por conta das atividades de mineração. Essa ocupação desordenada, o histórico minerador, as formações rochosas do município e seu alto índice pluviométrico tornam a cidade uma área de potenciais riscos de deslocamentos de terra. Além disso, o trânsito pesado de veículos, associado à pavimentação rústica de boa parte do centro histórico, promovem altos níveis de vibrações que podem originar danos ao acervo histórico de edifícios e pontes históricos. Essas e outras características tornam o município de Ouro Preto um lugar ideal para estudos relacionados ao monitoramento de vibrações em diferentes áreas de risco (MEIRELES, 2018; RESENDE, 2011).

5.1. Requisitos do Sistema

A determinação do parâmetros de vibração e taxas de amostragem dos nós sensores para o monitoramento de vibração das áreas de interesse foi realizada a partir dos requisitos descritos na literatura. Dados dos estudos relacionados ao monitoramento de vibração em barragens de terra ou de concreto, monitoramento de vibração em estruturas de engenharia civil, como pontes, edifícios e monitoramento de vibração em encostas foram utilizados. Buscou-se obter parâmetros comuns de vibração para as diferentes áreas de risco, de forma que o sistema de monitoramento proposto fosse analisado. A análise dos trabalhos descritos na Seção 4 permitiram gerar a Tabela 5.1, que apresenta os requisitos básicos de vibração para um sistema de monitoramento de áreas de risco.

Além dos requisitos mencionados, é importante que o sistema ofereça: baixo consumo de energia, alta cobertura em área urbana, boa sensibilidade, escalabilidade e segurança (criptografia, por exemplo) (MEIRELES, 2018).

Tabela 5.1: Requisitos básicos de um sistema sem fio para monitoramento de áreas de risco.

Sistema de aquisição de dados	
Resolução canais A/D	16 bits
Taxa de amostragem	até 1 kHz
Arquitetura computacional	
Tamanho barramento	8 a 32 bits
Memória de programa	mínimo de 4 kB
Memória de dados	mínimo de 32 kB
Canais de rádio sem fio	
Alcance outdoor	entre 290 m e 1640 m
Taxa de dados	maior do que 5 kbps

5.2. Protótipo do Nó Sensor

5.2.1. O Módulo Sensor MPU6050

Para desenvolver o protótipo do nó sensor (*End device*), foi selecionado o módulo sensor MPU-6050, que oferece ao usuário uma gama de configurações relacionadas a operações em modo de baixo consumo de energia e atende aos requisitos de taxa de amostragem do estudo: até 1000 Hz.

O MPU-6050 é um circuito desenvolvido pela InvenSense, para utilização no desenvolvimento de projetos: para aplicações que envolvam comandos por gestos; que permitam o controle e interação com jogos e aplicações de realidade aumentada; que deem a um dispositivo a capacidade de controle de estabilidade de imagens; de sistemas de navegação veicular; implementem wearables; que demandem detecção e rastreamento de movimentos. O circuito é composto por: um acelerômetro de 3 eixos, um giroscópio de 3 eixos e um sensor de temperatura. Possui ainda um Digital Motion Processor (DMP) integrado, que pode ser utilizado em aplicações que demandem o processamento de algoritmos de reconhecimento de gestos e suporte a 3D MotionProcessing (INVENSENSE, 2013). A pinagem e orientação podem ser vista na Figura 5.1.

As principais especificações técnicas do MPU-6050 são apresentadas na Tabela 5.2, mas uma característica que se destaca em relação torná-lo mais otimizado para a aplicação de interesse, é que esse circuito permite que sua amostragem de dados possa ser definida pelo usuário. O conjunto de dados coletado em cada amostragem engloba os dados dos 3 eixos do giroscópio, dados dos 3 eixos do acelerômetro, e leitura do sensor de temperatura. As faixas de leitura dos sensores (giroscópio e acelerômetro) também podem ser definidas pelo usuário. Essas configurações são realizadas a partir da definição dos parâmetros associados aos registradores do circuito. Por exemplo, definir o valor do parâmetro AFS-SEL igual a 0 (zero), configura a sensibilidade do acelerômetro para a faixa de -2g a +2g.

No contexto do desenvolvimento de dispositivos móveis com características de eficiência energética, apresentar um grande número de recursos pode significar uma redução da

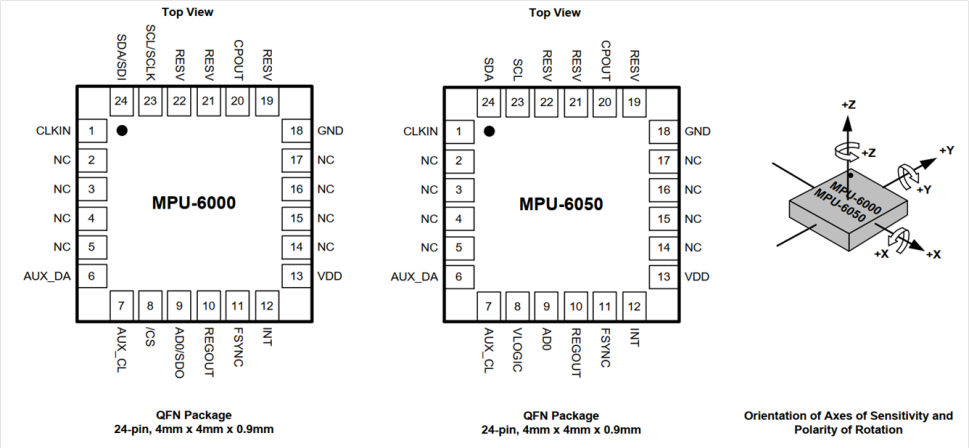


Figura 5.1: Vista de topo e orientação MPU-6050. Fonte: (INVENSENSE, 2013)

Tabela 5.2: Principais recursos da placa MPU-6050.

Sensor	**Recurso**
Giroscópio	- Saídas digitais X, Y, Z, com faixas programáveis: 250, 500, 1000 e 2000º/segundos. - Conversores ADC de 16 bits para amostragem das variações angulares. - Filtro "passa-baixa" programável. - Corrente de operação: 3,6 mA. - Corrente em Standby: 5 μA.
Acelerômetro	- Saídas digitais X, Y, Z, com faixas programáveis: 2 g, 4 g, 8 g e 16 g. - Conversores ADC de 16 bits para amostragem simultânea dos 3 eixos. - Detecção de orientação e sinal. - Corrente de operação: 500 μA. - Corrente no modo Low Power: 10 μA a 1,25 Hz, 20 μA a 5 Hz, 60 μA a 20 Hz, 110 μA a 40 Hz.
Recursos adicionais	- Interface I2C auxiliar para leitura de dados de sensores externos (ex. magnetômetro). - Recurso MotionFusion utilizando o Digital Motion Processing (DMP) e um magnetômetro externo. Com suporte com suporte à tecnologia 3D MotionProcessing e processamento de algoritmos de reconhecimento de gestos. - Consumo nominal de 3,9 mA, quando sensores e processador DMP estão desabilitados. - Buffer de 1024 bytes para armazenamento dos dados de leitura dos sensores, útil principalmente, no modo de baixo consumo de energia. - Filtros digitais programáveis para todos os sensores. - Fast Mode I2C de 400 kHz, para comunicação com todos os registradores. - Faixa de tensão VDD, entre 2,375 V e 3,46 V.

autonomia da fonte de energia do sistema ao qual esse circuito é integrado. Com a placa de sensores MPU-6050, se a aplicação requer que todo o sistema tenha o menor consumo possível

de energia, pode-se desabilitar os recursos que não são necessários. Por exemplo, se apenas os dados do acelerômetro serão úteis para a aplicação, o circuito DMP e o giroscópio podem ser desabilitados, levando o consumo para valores na ordem de grandeza de μA (microamperes).

O módulo sensor é composto por um giroscópio de 3 eixos, que pode operar a uma taxa de amostragem de até 8 kHz e um acelerômetro, também de 3 eixos, que pode operar a uma taxa de amostragem de até 1 kHz. Todos os parâmetros configuráveis pelo usuário, como o índice de sensibilidade, configurações de calibração, filtros, taxas de saída e faixas de operação podem ser encontradas em sua folha de dados(INVENSENSE, 2013). A Tabela 5.3 apresenta as principais características elétricas do MPU, para cada um dos modos de operação disponíveis.

Tabela 5.3: Características elétricas do MPU-6050.

Parâmetro	**Condições**	**Mínimo**	**Valores**	**Máximo**	**Unidades**
VDD POWER SUPPLY					
Tensão de Operação		2,375		3,46	V
Corrente Normal de Operação	Giroscópio + Acelerômetro + DMP		3,9		mA
	Gir. + Acel. (DMP desabilitado)		3,8		mA
	Gir. + DMP (Acel. desab.)		3,7		mA
	Gir. (DMP e Acel. desab.)		3,6		mA
	Acel. (DMP e Gir. desab.)		500		μA
Corrente para o Acelerômetro em Modo Low Power	Taxa de atualização de 1,25 Hz		10		μA
	Taxa de atualização de 5 Hz		20		μA
	Taxa de atualização de 20 Hz		70		μA
	Taxa de atualização de 40 Hz		140		μA
VLOGIC REFERENCE VOLTAGE					
Faixa de Tensão	VLOGIC <= VDD	1,71		VDD	V
	Corrente normal de operação		100		μA

Para o processamento dos dados coletados do circuito de sensoriamento, necessita-se de um segundo elemento, um microcontrolador. A arquitetura básica da família de placas da InvenSense (como o MPU-6050) tem uma interface de comunicação, via I2C, para entrega dos dados coletados de seus sensores (giroscópios, acelerômetros e sensor de temperatura).

5.2.2. O Módulo de Processamento ESP32

A Unidade Central de Processamento que faz interface com a placa MPU-6050 neste projeto é um ESP32, desenvolvido pela Expressif. Tem como principais características: microprocessadores Xtensa single/dual-core 32-bits LX6, arquitetura RISC, com capacidade de até 600 MIPS; 448 kB de memória ROM; 520 kB de memória SRAM; 16 kB SRAM no modo RTC (modo de economia de energia); possui oscilador interno de 8 MHz, com calibração; 34 GPIOs programáveis; até 18 canais ADC de 12 bits; 2 interfaces I2C; 4 interfaces SPI; 3 interfaces UART; criptografia em hardware (AES, Hash SHA-2, RSA, ECC), entre outros recursos (Figura 5.2). O circuito integra interfaces de comunicação sem fio Wi-Fi e Bluetooth (2,4 GHz). Por ter sido projetada com uma variedade de recursos e modos de operação de baixo consumo de energia, além de ter embarcadas as principais tecnologias de comunicação sem fio, é uma solução voltada para aplicações de Internet das Coisas, projeto de dispositivos móveis e *wearables*.

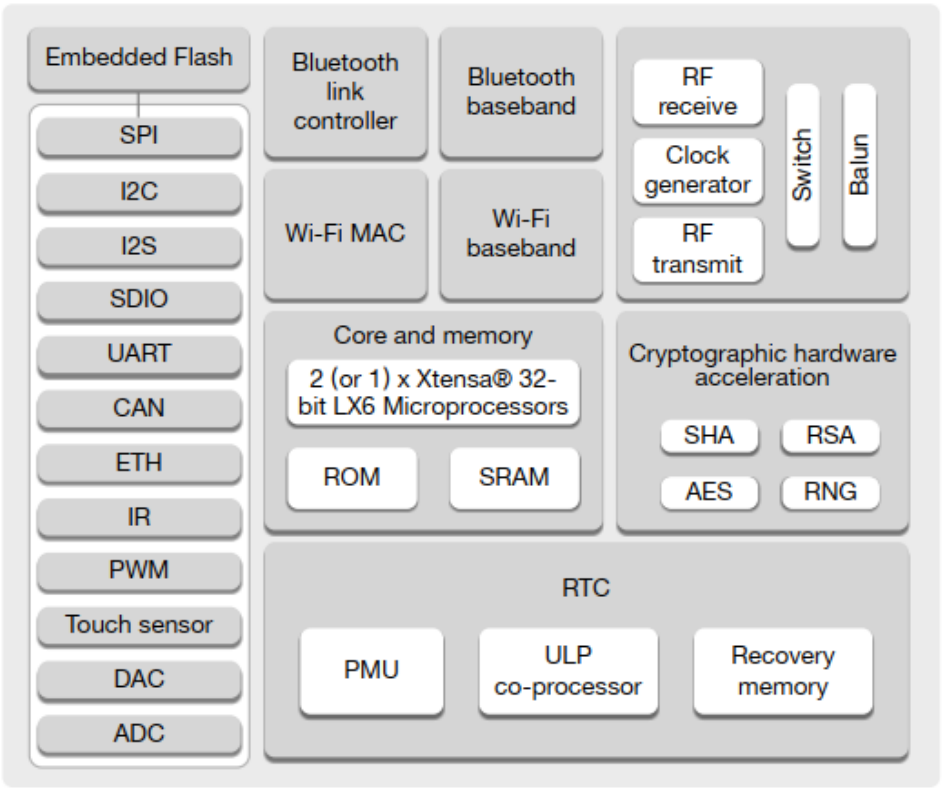


Figura 5.2: Diagrama de Blocos Funcionais ESP32. Fonte: ESPRESSIF SYSTEMS (2019).

No contexto de economia de energia, o ESP32 apresenta os seguintes modos de operação, cujos respectivos consumos são apresentados na Tabela 5.4: *Active mode*, no qual o *chip* de rádio está ligado, podendo receber e transmitir dados; *Modem-sleep mode*, no qual a CPU fica ativa e o *clock* é configurável, mas o transceptor Wi-Fi/Bluetooth fica desligado; *Light-sleep mode*, onde a CPU é pausada, memória e periféricos RTC, assim como o co-processador ULP

ficam ativos e quaisquer eventos podem acordar a CPU; *Deep-sleep mode*, em que somente a memória e periféricos RTC ficam ativos e quaisquer dados que devam ser transmitidos via radio ficam armazenados na memória RTC, mas o co-processador ULP fica funcinal; *Hibernation mode*, em que o oscilador interno de 8 MHz e o ULP co-processor ficam desabilitados, assim como a memória do RTC, ficando apenas o timer do RTC e alguns GPIOs ativos. O *timer* ou os GIOS RTC podem acordar o chip da hibernação.

Tabela 5.4: Consumo de corrente por Modo de Energia do ESP32.

Power mode	**Description**			**Power consumption**
Modem-Sleep	The CPU is powered on	240 MHz	Dual-core chip	30 mA $\sim$ 68mA
			Single-core chip	N/A
		160 MHz	Dual-core chip	27 mA $\sim$ 44 mA
			Single-core chip	27 mA $\sim$ 34 mA
		80 MHz	Dual-core chip(s)	20 mA $\sim$ 31 mA
			Single-core chip	20 mA $\sim$ 25 mA
Light-Sleep	-			0,8 mA
Deep-Sleep	The ULP co-processor is powered on.			150 μA
	ULP sensor-monitored pattern			100 μA @1% duty
	RTC timer + RTC memory			10 μA
Hibernation	RTC timer only			5 μA
Power off	CHIP_PU is set to low level, the chip is powered off.			0,1 μA

5.2.3. O Transceptor SX1276

Em termos de hardware para o desenvolvimento do nó sensor com interface de rádio para redes LPWAN, o último componente é o transceptor, responsável pelo envio dos dados dos sensores para os concentradores (*gateways*), que tornam esses dados disponíveis para os servidores de rede (dentro da arquitetura global da rede LPWAN).

Para a implementação da interface de comunicação sem fio LPWAN no "End Device", utilizou-se um chip da família SX1276[1], desenvolvido pela Semtech[2]. Outros fabricantes, como a Microchip[3], com seus chips da família RN (como o RN2483, que trabalha com padrões de frequência europeias, de 433 MHz e 868 MHz e o RN2903, que trabalha com frequência de 915 MHz, padrão Norte-americano) também tem as especificações LoRa® implementadas em seus modems.

A Tabela 5.5 apresenta as taxas absolutas máximas, às quais o circuito não deve ficar submetido por um logo período de tempo, para evitar danos permanentes. A Tabela 5.6 apresenta as faixas de operação do transceptor; e as especificações de consumo de corrente, nos seus diferentes modos de consumo de energia. Na Tabela 5.7 são apresentados os valores de consumo nominal de corrente pelo transceptor, em cada um dos seus modos de operação.

[1] `https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276`
[2] `https://www.semtech.com/`
[3] `https://www.microchip.com/`

Tabela 5.5: Taxas Máxima Absolutas (*Absolute Maximum Ratings*) da família SX127x.

Representação	Descrição	Mínimo	Máximo	Unidade
VDDma	Supply Voltage	-0,5	3,9	V
Tma	Temperature	-55	+115	ºC
Tj	Junction temperature	-	+125	ºC
Pma	RF Input Level	-	+10	dBm

Tabela 5.6: Faixas de operação da família SX127x.

Representação	Descrição	Mínimo	Máximo	Unidade
VDDop	Supply Voltage	1,8	3,7	V
Top	Operational temperature range	-40	+85	ºC
Clop	Load capacitance on digital ports	-	+25	ºC
ML	RF Input Level	-	+10	dBm

Tabela 5.7: Especificações de Consumo de Energia da família SX127x.

Representação	Descrição	Condições	Mín.	Típico	Máx.	Unid.
IDDSL	Sleep mode	-	-	0,2	1	μA
IDDIDLE	Idle mode	RC osc. enabled	-	1,5	-	μA
IDDST	Standby mode	Crystal osc. enabled	-	1,6	1,8	mA
IDDFS	Systhesizer mode	FSRx	-	5,8	-	mA
IDDR	Receive mode	LnaBoost Off, band 1 LnaBoost Off, band 1 Bands 2 & 3	- - -	10,8 11,3 12,0	- - -	mA
IDDT	Transmit mode with impedance matching	RFOP = +20 dBm, on PA_BOOST RFOP = +20 dBm, on PA_BOOST RFOP = +20 dBm, on PA_BOOST RFOP = +20 dBm, on PA_BOOST	- - - -	120 87 29 20	- - - -	mA

A integração dos três principais elementos descritos até o momento, considerando suas especificações técnicas de sensoriamento, capacidade de armazenamento, capacidade de processamento, interfaces de comunicação e de consumo de energia, atendem ao propósito deste trabalho: desenvolver um sistema de monitoramento para áreas de risco, utilizando nós sensores de baixo custo e baixa consumo de energia, com interface de comunicação com redes LPWAN.

Atualmente há, no mercado, uma série de kits de desenvolvimento de relativo baixo custo, com todos os recursos integrados num só circuito. Em geral, essas placas podem ser utilizadas para o desenvolvimento de protótipos, que oferecem aos desenvolvedores e fabricantes, a possibilidade de implementar provas de conceito e avaliar se seu produto idealizado terá, de fato, o comportamento esperado para o que foi projetado. Dessa forma, ganha-se em tempo de prototipagem e pode-se implementar as atualizações e otimizações no projeto original, antes do

investimento no produto, efetivamente. Seguindo nessa linha, também optou-se por fazer uso de um desses kits de desenvolvimento disponíveis no mercado, pelo custo e pela facilidade de implementação dos componentes da rede, conforme descrito na próxima seção.

5.3. Configuração da Rede LPWAN

Nesta seção são apresentados os elementos que compõem a rede implementada. De acordo com as arquitetura básica de um rede LoRaWAN, os elementos necessários são: dispositivos finais (nós sensores, também chamados de *End Devices*); nós concentradores (*Gateways*), que fazem a ponte entre os *End Devices* e os os Servidores de Rede; os Servidores de Rede (*Network Servers*), que gerenciam toda a rede LoRaWAN e se responsabiliza pela entrega dos dados enviados pelos nós sensores às aplicações que os recebem como entrada e, por fim, os Servidores de Aplicação (*Application Servers*), que de fato fazem uso dos dados, para um monitoramento e/ou tomada de decisão.

A arquitetura de rede proposta na Figura 5.3 é constituída por: nós sensores de vibração, *End-devices*; dispositivos concentradores (*gateways*), que gerenciam os nós sensores sob sua cobertura, retransmitindo os dados para a próxima camada; Servidores de Rede, responsáveis por gerenciar os pacotes de dados recebido dos gateways, encaminhando-os para a camada de Aplicação; camada de Aplicação, em que os dados podem ser analisados e entregues como serviços aos clientes.

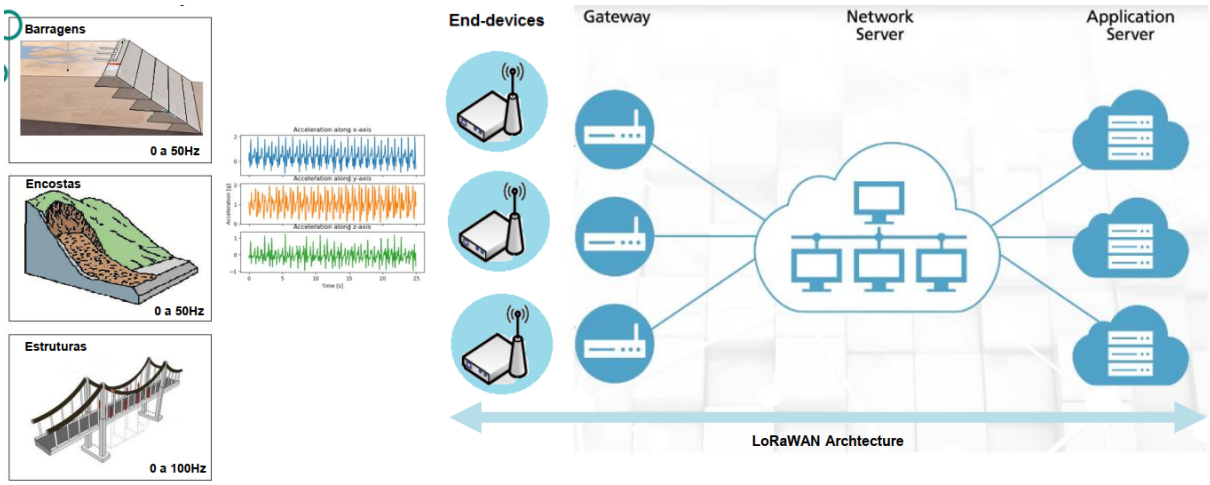


Figura 5.3: Arquitetura da rede LPWAN para monitoramento de vibração em áreas de risco.

5.3.1. O Servidor de Rede

Existe uma série de provedores de serviço de gerenciamento de redes LoRa, que correspondem à arquitetura LoRAWAN aos Servidores de Rede. Os mais conhecidos, em razão

de serem projetos abertos, com grande comunidade ou por serem os mais adotados comercialmente são: The Things Network (`https://www.thethingsnetwork.org/`), ChipStack (`https://www.chirpstack.io/`), ResIOT (`https://www.resiot.io/en/`), Loriot (`https://www.loriot.io/index.html#loriot-network-server`), entre outros.

Para este projeto, o Servidor de Rede utilizado foi o Loriot, em razão da facilidade de configuração dos dispositivos, da rede e integração com a camada de aplicação. Além disso, o provedor oferece uma versão gratuita limitada, com capacidade para até 10 dispositivos por gateway e servidores disponíveis em diversas partes do mundo, incluindo o Brasil, o que atende aos requisitos do sistema proposto.

5.3.2. Plataforma Cayenne

A plataforma Cayenne, desenvolvida pela myDevices, permite o desenvolvimento de aplicações (Figura 5.4) para projetos de Internet das Coisas. Como recursos, a plataforma oferece: a possibilidade de implementação de *dashboards* personalizados; a possibilidade de controlar remotamente os dispositivos integrados a ela; configurações de alarmes e eventos; e suporte à pilha de protocolos LoRaWAN™ (CAYENNE, 2019). A plataforma ainda dá suporte a uma variedade de dispositivos de hardware, como Raspberry Pi, Arduino, ESP8266 e dispositivos comerciais com tecnologia LoRa. Para desenvolvedores, a plataforma oferece uma API, para aplicações *RESTfull*. Como dá suporte ao Arduino, bibliotecas existentes facilitam o processo de desenvolvimento de soluções específicas para a aplicação desejada.

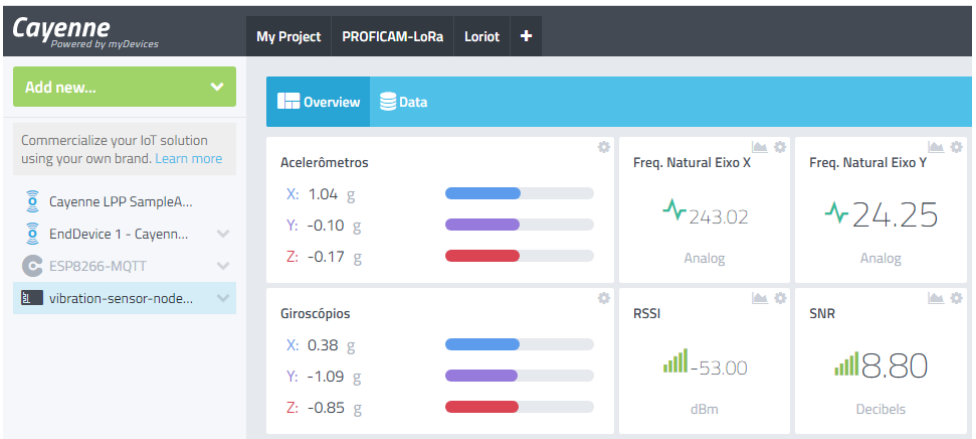


Figura 5.4: Exemplo de aplicação na plataforma Cayenne. Fonte: autor.

Integração do Servidor de Rede com a Camada de Aplicação

Para tornar disponíveis os dados dos nós sensores registrados, é necessário integrar o servidor de rede (Loriot) com a plataforma de aplicação (Cayenne). Essa etapa é realizada

selecionando-se a aplicação criada e, na seção **Output**, escolhendo-se **Add new output**. Dentre as opções disponíveis, neste trabalho a solução escolhida foi **myDevices Cayenne**.

A visualização dos dados dos sensores enviados pelo *End-device*, depende da adição, na plataforma Cayenne, de um dispositivo registrado na plataforma Loriot (Figura 5.5). O device utilizado corresponde à tecnologia **LoRa** e à plataforma **Loriot**. O nó sensor envia os dados utilizando o formato **Cayenne LPP**[4]. Portanto, este deve ser o dispositivo escolhido.

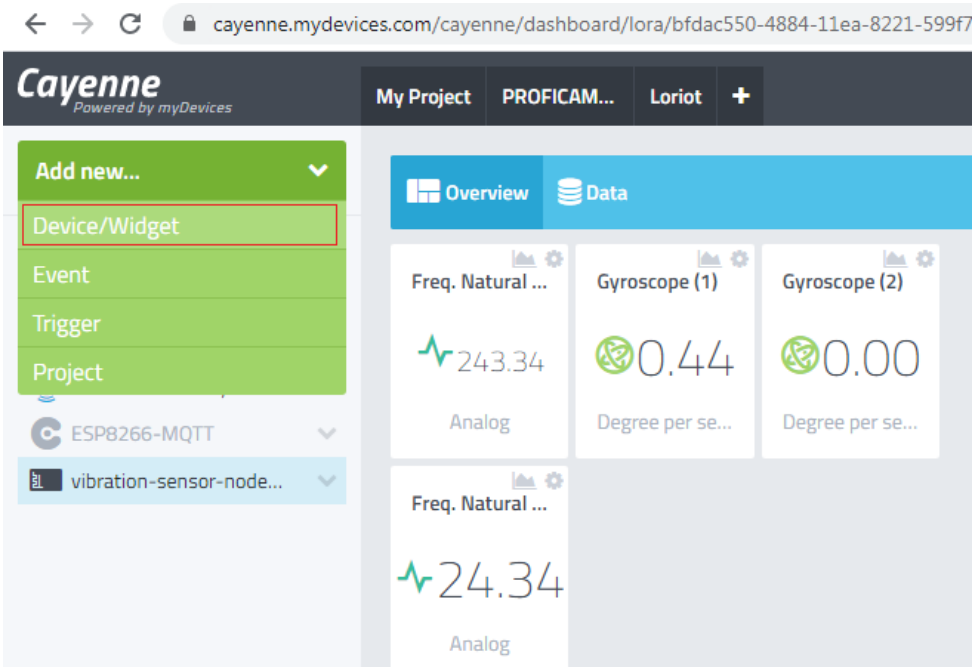


Figura 5.5: Adicionando um dispositivo na plataforma de aplicação Cayenne.

De forma similar à plataforma Loriot, é necessário informar os parâmetros de configuração do dispositivo. Os principais são: **DevEUI**, **Loriot Server**, **Loriot App ID** (gerado pela plataforma Loriot) e **Loriot Tokens** (também gerado pela plataforma Loriot, na seção **Access Tokens** da aplicação[5].

5.3.3. O Nó Concentrador: Gateway

O equipamento concentrador (*Gateway*) LoRa utilizado foi o MultiTech Conduit® IP67 Base Station (Figura 5.6). O dispositivo trabalha com bandas ISM de 869 MHz e 915 MHz e possui proteção contra intempéries (umidade, chuva, sol, poeira e vento). Permite a implantação de redes privadas e públicas e oferece opções de *backhaul* para tecnologias celular 3G, 4G-LTE e Ethernet. Pode ser instalado em uma torre de telecomunicações existente, com suporte individual ou de parede, e deve ser alimentando por um injetor PoE (*Power over Ethernet*). O

[4]Cayenne Low Power Payload: API que define diferentes formatos para envio de dados numa rede LoRaWAN (`https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/#lora-cayenne-low-power-payload`).

[5]`https://us1.loriot.io/application/BE7E0628/accesstokens`

modelo escolhido embarca uma distribuição Linux baseada no projeto Yocto[6] 1.6, Kernel 3.12, com suporte a diversos pacotes (SQLite, Ligttpd, BusyBox) e linguagens de programação (Java, Ruby, Perl, Python, C/C++, PHP, C# e JavaScript) (MULTI-TECH SYSTEMS, 2017).

Figura 5.6: Concentrador LoRaWAN MultiTech Conduit IP67. Fonte: (MULTI-TECH SYSTEMS, 2019)

Registro do *Gateway* no Servidor de Rede Loriot

Na seção **Register** da plataforma Loriot, uma lista de equipamentos compatíveis se encontra disponível. Dentre eles, a opção **Multitech Conduit IP67** deve ser selecionada. Em seguida, opcionalmente, pode-se selecionar a versão do rádio instalado no gateway (LoRa mCard, LoRa mCard 1.5, LoRa mCard 2.1)[7]. O MAC Address do equipamento deve ser informado. Coordenadas (latitude e longitude), informando a localização geográfica do equipamento também podem ser incluídas.

Os principais parâmetros de configuração de rede do gateway precisam ser definidos: **Region**, **Tx Gain**, **Channel Plans**. Nesta aplicação, foram escolhidos, respectivamente: **US902-928**, **1** e **US915_Default**. Embora a ANATEL defina, para o Brasil, as mesmas faixas de frequência da Austrália, os parâmetro regionais dos Estados Unidos podem ser utilizados, se observadas as restrições às frequências já utilizadas, dentro da faixa de 902 a 928 MHz. O nome do gateway, aqui definido como **sa1-mtcdt-lora-gtwy-campus**, também pode ser alterado conforme desejado. Por fim, na seção **Software** encontram-se disponíveis as instruções de instalação do software que deve rodar no gateway.

Uma vez corretamente instalado o software endereçador de pacotes, o *gateway* registrado passa para o estado *Online* na plataforma Loriot.

[6]Projeto *Open Source* voltado para sistemas embarcados: `https://www.yoctoproject.org/`

[7]Para verificar qual é a versão do mCard, deve-se acessar o console do equipamento, via SSH e executar o comando a seguir: 'root@mtcdt:# mts-io-sysfs show apX/hw-version', onde o X corresponde ao número do cartão.

5.3.4. O Nó Sensor: End Device

Os principais critérios utilizados para o uso de um kit de desenvolvimento para este projeto foram: o baixo custo do produto; a presença dos principais elementos necessários para a implementação do nó sensor, uma vez que sua integração com o circuito sensor é facilitada pela presença da interface I2C (Inter-Integrated Circuit)[8]; a facilidade de programação do software embarcado, tanto no nó sensor, quanto no nó concentrador; a variedade de parâmetros que podem ser ajustados para melhorar a coleta e transmissão de dados e para promover um consumo de energia mais adequado à aplicação.

A placa de desenvolvimento utilizada para a implementação do nó sensor foi a ESP32 LoRa, desenvolvida pela Heltec. Como sugere o nome, o Heltec WiFi LoRa 32 possui um conjunto ESP32, integrado com um transceptor LoRa®. O chip que implementa parte da pilha LoRaWAN é o SX1276, desenvolvido pela Semtech. O hardware possui uma série de entradas e saídas de propósito geral (34 GPIO). Sua interface de comunicação com o processador é a I2C. Por esse motivo, para a utilização do módulo sensor MPU-6050, que também se comunica com o processador via I2C , é preciso ficar atento às definições dos pinos do circuito no firmware. O *display* OLED, integrado à placa, pode ser desabilitado com vistas a promover economia de energia do *End Device*. O protótipo de nó sensor de vibração utilizando um módulo MPU-6050 e um kit Heltec ESP32 LoRa é apresentado na Figura 5.7.

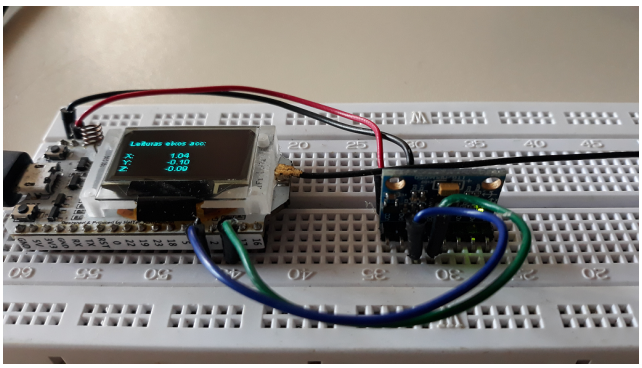


Figura 5.7: Protótipo do nó sensor de vibração.

Registro do Nó Sensor na Plataforma Loriot

Para registrar o *End-device*, que corresponde ao nó sensor de vibração, é necessário selecionar a aplicação e escolher a opção de menu **Enroll Device**. Em seguida, escolhe-se a versão do protocolo LoRaWAN utilizada (1.0.x, 1.1.x)[9]. É importante observar qual a versão da especificação do protocolo LoRaWAN está sendo implementada no código ou nas bibliotecas

[8]Especificação oficial mais recente, versão 6: `https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf`

[9]Todas as especificações do protocolo LoRaWAN são disponibilizadas pela Lora-Alliance no site https://lora-alliance.org/resource-hub.

utilizadas pelo dispositivo sensor para a correta integração com o gateway e a plataforma de gerenciamento da rede.

A plataforma Loriot disponibiliza opções adicionais de matrícula de um dispositivo, além dos modos de autenticação OTAA (Over the Air Activation) e ABP (Activation By Personalisation). Em geral, um dispositivo LoRa vem de fábrica com um identificador único (**DevEUI**) e é essa identificação única que deve ser utilizada para seu registros nos servidores de rede LoRaWAN. As opções de registro *Generating all parameters except DevEUI* e *Generating all parameters*, podem ser interessantes para usuários que pretendam implementar redes privadas e/ou estejam desenvolvendo seus próprios dispositivos de hardware. No entanto, é necessário atentar-se para a necessidade de atualização dos parâmetros **NwkSKEY** e **AppSKEY** no código do dispositivo. Neste trabalho, utilizou-se a autenticação pelo método ABP. Preenchidos os campos **DevEUI**, **NwkSKEY**, **AppSKEY**, **AppEUI**, basta confirmar para que o dispositivo seja registrado.

5.4. Avaliação do Sistema

Com o objetivo de avaliação do projeto desenvolvido, alguns cenários de testes foram propostos. O propósito foi verificar o comportamento do nó sensor LoRa em relação à sua eficiência em termos de entrega dos dados dos sensores à rede implementada e ao consumo de energia. As estratégias envolvem diferentes taxas de transmissão e tamanho de pacotes transmitidos pelo *End Device*, bem como a utilização de pré-processamento *on board* dos dados dos sensores, antes da transmissão. Conforme descrito no Capítulo 4, estratégias em que o nó sensor permanece menos tempo transmitindo podem gerar uma economia de energia para os nós, na ordem de 50 a 84 %, comparado a estratégias em que os nós enviam mensagens maiores, que tomam maior tempo de transmissão (LYNCH *et al.*, 2004; LYNCH, 2004; LYNCH *et al.*, 2003). A economia de energia dos nós é um dos requisitos para sistemas de monitoramento e alerta em áreas de risco, segundo Meireles (2018) e, portanto, também deve ser levada em conta no projeto de um sistema de monitoramento de áreas de risco. Os experimentos de laboratório e de campo tiveram o objetivo de verificar a capacidade do sistema de monitorar vibrações nas áreas de risco de interesse.

5.4.1. Estratégias de Coleta e Transmissão de Dados

Dentre os objetivos deste trabalho, estão: avaliar o consumo de energia do nó sensor em cada estratégia de coleta e transmissão, e verificar a compatibilidade do sistema para monitorar vibrações em áreas de risco. As estratégias de coleta e transmissão foram implementadas com base na ideia de que, quanto maior o tempo de transmissão, maior o consumo de energia dos nós. Isso sugere fazer uso máximo dos recursos de economia de energia dos elementos do nó sensor.

Como uma primeira estratégia (E1), o nó sensor teve como firmware a seguinte sequência de passos:

1. Fazer a leitura dos dados do sensor de vibração (saídas X, Y, Z dos acelerômetros), num intervalo predefinido;

2. Transmitir os dados coletados à rede, assim que estiverem disponíveis;

3. Colocar o nó no modo de economia de energia, desabilitando o máximo de recursos do sistema, até que o próximo momento de transmissão seja atingido.

Numa segunda estratégia (E2), o firmware do *End Device* deve realizar um maior número de coletas dos dados dos sensores, em intervalos predefinidos, de forma a construir um pacote de dados maior, dentro do limite máximo do pacote que a rede permite. Ao término da construção de um pacote, os dados brutos são enviados à rede. O objetivo com essa estratégia foi observar o comportamento do consumo de energia do nó quando o sistema consome a maior parte do tempo no processo de leitura dos sensores e no processo de transmissão via rádio frequência.

Num terceiro cenário (E3), considerou-se realizar uma série de leituras dos sensores, cujo limite do tamanho da amostragem é definido pela banda de frequência que se deseja que o sistema detecte (conforme os requisitos das aplicações) e utilizar um algoritmo de pré-processamento dos dados dessas leituras, antes do envio. Portanto, o procedimento foi:

1. Fazer uma série de leituras dos sensores, em intervalos predefinidos, empacotando-as até um tamanho máximo permitido (dentro do limite da rede);

2. Realizar o pré-processamento desses dados, utilizando uma implementação da Transformada Rápida de Fourier (FFT), para obter a frequência modal e magnitude do sinal;

3. Enviar apena frequência de maior magnitude do sinal para a rede;

4. Colocar o nó no modo de economia de energia, desabilitando o máximo de recursos do sistema, até que o próximo momento de leitura e pré-processamento seja atingido.

Se por um lado os nós sensores precisam atender aos requisitos de economia de energia, por outro, as taxas de amostragem do nó sensor e as taxas de entrega de dados à rede têm que atender aos requisitos de cada uma das diferentes aplicações de monitoramento em áreas de risco. Nesse caso, o importante é obter as melhores taxas de amostragem do sistema em cada uma das estratégias de coleta e transmissão, e o principal recurso utilizado foi o multiprocessamento, que permite controlar melhor os tempos de execução das principais tarefas: amostragem do sinal, pré-processamento e transmissão de dados. As estratégias E1, E2 e E3, com multiprocessamento, não fazem uso dos recurso de economia de energia.

Os firmwares foram implementados com auxílio da IDE (Integrated Development Environment) do Arduino[10]. Além do ambiente de desenvolvimento, foi necessário fazer uso

[10]Plataforma *Open Source* para desenvolvimento de protótipos eletrônicos `https://www.arduino.cc`

das bibliotecas desenvolvidas para o microcontrolador ESP32 (Arduino core for the ESP32: `https://github.com/espressif/arduino-esp32`) e da biblioteca desenvolvida pela IBM (LMiC: `https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic`), para a implementação do protocolo LoRaWAN. Para as versões dos firmwares que fazem um pré-processamento dos dados dos sensores, antes do envio ao concentrador, foi utilizada uma implementação da Transformada Rápida de Fourier (`https://github.com/kosme/arduinoFFT`). As versões que exploram o recurso de multiprocessamento do microcontrolador fazem uso do FreeRTOS[11], via biblioteca padrão (`https://github.com/feilipu/Arduino_FreeRTOS_Library`).

5.4.2. Experimentos de Laboratório e em Campo

Com o propósito de avaliar a sensibilidade do nó sensor e do sistema para a detecção de eventos relacionados a vibrações, foram realizados alguns ensaios em laboratório e em pontos de interesse, dentro da área de cobertura da rede, com o auxílio de uma fonte de vibração sonora. Os experimentos em laboratório utilizaram uma estrutura metálica que compõe uma esteira para projetos de automação. A estrutura utilizada é similar às encontradas na literatura (LYNCH *et al.*, 2002; RIBEIRO e LAMEIRAS, 2019; WANG *et al.*, 2007), originalmente projetada para um elevador em escala de laboratório. O protótipo do nó sensor e um acelerômetro comercial, cabeado, utilizado como referência, foram fixados fixados no topo da estrutura, conforme a Figura 5.8. Em todos os ensaios, os dados do acelerômetro de referência foram armazenados em arquivo, ao mesmo tempo em que os dados do nó sensor foram enviados para a plataforma da aplicação, via rede LoRa.

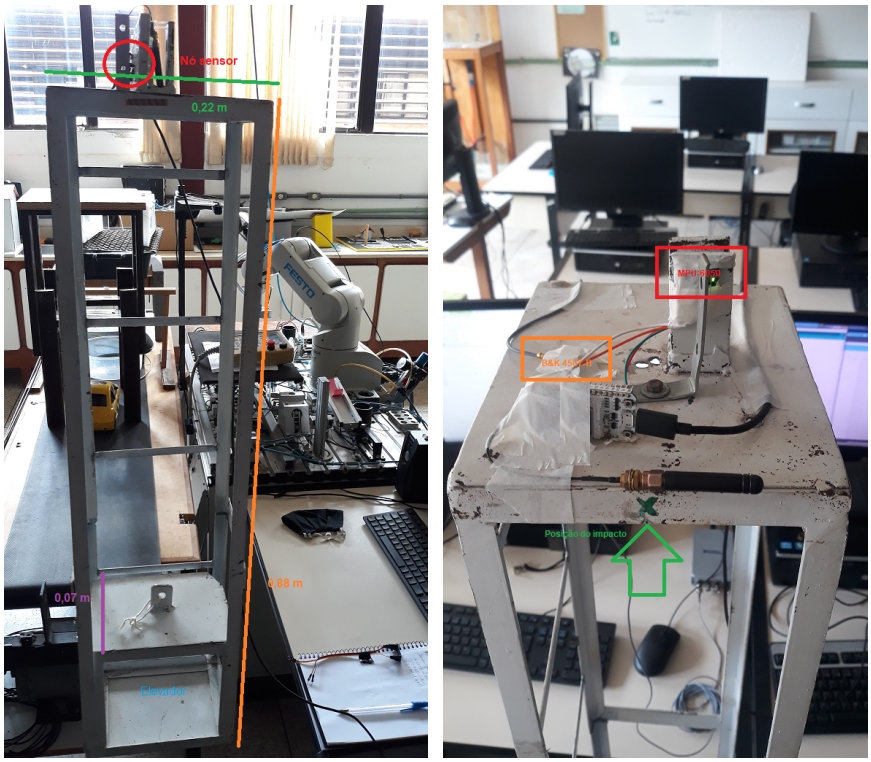
Como fonte de vibração sonora, utilizou-se o aplicativo *FrequencyGenerator Pro* (Figura 5.9), que permite a geração de sinais com diferentes tipos de onda (senoidais, quadradas, triangulares), em faixas de frequência que podem ser configuradas de 1 Hz a 22 kHz.

Ainda em laboratório, foram realizados dois ensaios diferentes, com cada uma das estratégias de coleta e transmissão de dados. O primeiro deles, aproveitando-se da mesma estrutura metálica onde se encontra um elevador em escala de laboratório; e o segundo, aproveitando-se de uma estrutura em madeira, também utilizada para fins didáticos em laboratório.

Estando posicionados na parte superior da estrutura metálica, o acelerômetro de referência, o nó sensor, e a fonte de vibração, iniciou-se a aquisição de dados, de forma simultânea. Nesse experimento, num primeiro momento, o elevador foi deslocado, manualmente, do "térreo"ao último andar, retornando ao "térreo". Num segundo momento, o deslocamento foi repetido, no entanto, o elevador realizou uma parada de aproximadamente 1 segundo em cada andar, tanto na subida, quanto na descida.

Por se tratar de um artefato utilizado para fins didáticos, como suporte temporário para diferentes montagens, a estrutura de madeira é um objeto que apresenta diversas folgas mecânicas. Portanto, seus elementos não são perfeitamente fixados e as dimensões de cada peça não

[11] Sistema de tempo real para microcontroladores: `https://www.freertos.org/`



(a) (b)

Figura 5.8: Estrutura metálica com elevador em escala de laboratório (a), com destaque para o posicionamento do nó sensor e do acelerômetro de referência (b).

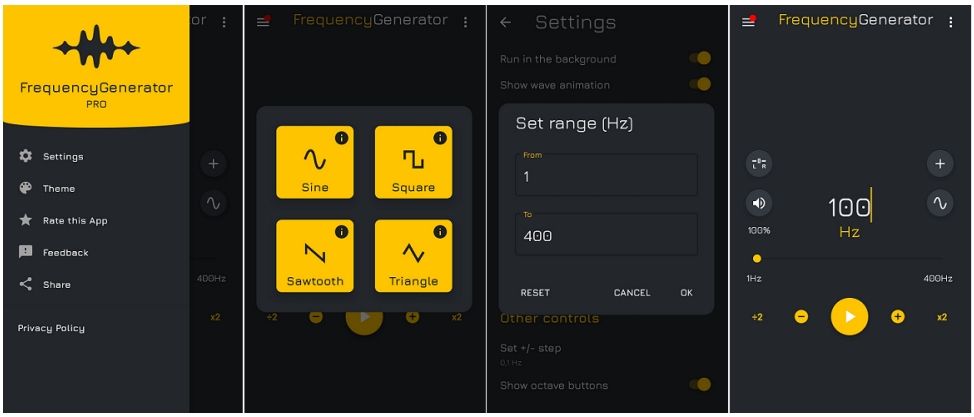


Figura 5.9: Fonte de vibração: FrequencyGenerator Pro.

são precisas. Isso faz com que ele possa ser retirado facilmente da sua posição de equilíbrio. Essa característica possibilitou a realização de um ensaio de vibração.

O nó sensor e o acelerômetro de referência foram posicionandos na parte superior da estrutura, que foi mantida em equilíbrio. Em dado momento, durante a realização do experimento, uma força é aplicada na posição destacada em amarelo (Figura 5.10), deixando a estrutura fora de equilíbrio. Na sequência, a aplicação da força é cessada e a estrutura vibra, voltando à sua posição de equilíbrio. Essa vibração foi monitorada para os três cenários de coleta e transmissão de dados (E1, E2 e E3).

(a) (b)

Figura 5.10: Estrutura em madeira utilizada para ensaio de vibração (a), com destaque para o posicionamento do nó sensor, do acelerômetro de referência e da fonte de vibração (b).

O acelerômetro piezoelétrico comercial, utilizado para fins de comparação e referência para o sistema sem fio desenvolvido, foi o Brüel & Kjaer, modelo DeltaTron 4507 B, cuja faixa de frequência de operação é de 0,3 Hz a 6 kHz, com sensibilidade de 9,8 mV/g $\pm$5%. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o modelo NI cDAQ-9171, com o módulo de entrada de som e vibração da série C, modelo NI 9234, desenvolvido pela National Instruments[12], cuja taxa de amostragem pode chegar a 51,2 mil amostras por segundo, para cada canal. O conjunto sensor e sistema de aquisição de dados é apresentado na Figura 5.11. O software utilizado para coleta e análise dos dados do acelerômetro foi o Labview, versão 20.0, 32 bits, também da National Instruments.

Os procedimentos realizados com o conjunto mencionado foram os seguintes:

- Uma frequência de vibração sonora foi selecionada para a fonte de vibração (85 Hz, 95 Hz, 100 Hz, ou 150 Hz);
- As estruturas foram monitoradas até chegarem ao equilíbrio: espectro de frequência do acelerômetro comercial e dados do nó sensor sem fio apresentando a frequência de pico igual à frequência da fonte de vibração;
- Um evento foi provocado (impacto, movimento do elevador ou desequilíbrio) na estrutura

[12]National Instruments: https://www.ni.com/pt-br.html

Figura 5.11: Sistema de aquisição de referência: NI cDAQ-9171, NI 9234 e B&K 4507-B.

monitorada;

- Os dados continuaram a ser registrados até o retomada do equilíbrio;
- Os gráficos dos dados coletados pelo acelerômetro comercial e pelo nó sensor sem fio foram plotados e confrontados, de forma a avaliar se o evento foi detectado.

O acelerômetro DeltaTron 4507-B é uniaxial, ou seja, detecta as vibrações em relação a um único eixo (Z), diferente do módulo sensor MPU-6050, utilizado no desenvolvimento do protótipo do nó sensor, que é triaxial, medindo as acelerações referentes aos eixos X, Y e Z. Em razão disso, para efeito de comparação com o acelerômetro 4507-B, o posicionamento do MPU-6050 nas estruturas utilizadas nos experimentos foi feito de maneira que apenas as acelerações do seu eixo X fossem consideradas.

Para os ensaios de campo, foram selecionados pontos de interesse dentro e fora do Campus da Universidade Federal de Ouro Preto, dentro da área de cobertura da rede implementada. A Figura 5.12 apresenta um mapa, com as localizações do *gateway* e dos dois pontos monitorados: o Laboratório de Química Industrial, ponto dentro do Campus da UFOP, sem visada direta, a pouco mais 500 metros do *gateway* e a Igreja de São Francisco de Paula, a aproximadamente 1,7 km de distância, com visada direta.

Uma vez posicionado, o nó sensor foi monitorado. Em campo, o nó sensor foi alimentado por uma bateria do tipo Li-ion, de 3,7 V, 5000 mAh e 18,5 Wh. Os ensaios consistiram, basicamente, em verificar a sensibilidade do sistema às vibrações geradas pela fonte de vibração sonora.

Figura 5.12: Mapa da rede, com localização do *gateway* e dos 2 pontos monitorados (Laboratório de Química e Igreja de São Francisco de Paula).

5.4.3. Avaliação do Consumo de Energia dos Nós Sensores

A metodologia utilizada para avaliação do consumo de energia dos nós sensores foi baseada na comparação entre valores estimados e valores medidos em laboratório. A estimativa de consumo foi realizada a partir da construção de tabelas com as definições nominais de consumo informadas pelos fabricantes dos componentes utilizados.

A análise do consumo de energia dos dieferentes cenários propostos foi realizada com base nos valores de consumo nominal, descritos nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10. As medições de consumo de corrente do nó sensor nas operações de coleta, processamento e envio de dados foram realizadas em laboratório, com auxílio de um multímetro, conforme descrito na Seção 6.2.

Tabela 5.8: Síntese Modos de Energia x Consumos de Corrente (MPU-6050).

Modo de Energia	**Corrente (mA)**
Modo Normal (apenas Acelerômetro)	0,5
Modo LP a 1,25 Hz	0,01
Modo LP a 5 Hz	0,02
Modo LP a 20 Hz	0,07
Modo LP a 40 Hz	0,14

Tabela 5.9: Síntese Modos de Energia x Consumos de Corrente (ESP32).

Modo de Energia	**Corrente (mA)**
Modo Normal	31
Modo Modem-sleep	31
Modo Light-sleep	0,8
Modo Deep-sleep	0,15
Hibernação	0,005

Tabela 5.10: Síntese Modo de Energia x Consumo de Corrente (SX1276).

Modo de Energia	**Corrente (mA)**
Modo Normal	130
Modo Sleep	0,01
Modo Idle	0,02
Modo Standby	0,07

6. Resultados e Discussão

O sistema de monitoramento de vibração para áreas de risco foi desenvolvido conforme descrito no capítulo anterior, sendo composto pelo protótipo do nó sensor, por *gateways* comerciais, pela plataforma de rede Loriot e pela plataforma de aplicação Cayenne.

A rede de testes utilizada neste trabalho é a mesma descrita por Meireles (2018), com a diferença de que apenas um dos concentradores (*gateways*) LoRaWAN estava operacional. Sendo assim, apenas um *gateway* foi instalado num dos prédios dos laboratórios da Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro, UFOP e alguns dos pontos dentro de sua área de cobertura foram monitorados, em relação à vibração.

Três diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados foram implementadas no firmware do protótipo, com o objetivo de avaliar seu impacto na aplicabilidade do sistema e no consumo de energia do nó sensor. Os ensaios de laboratório e as medições de consumo foram realizados com cada uma dessas estratégias. O fator de espalhamento espectral e a largura de banda utilizados na configuração da rede LoRa foram: SF7 e BW125, respectivamente. De acordo com os parâmetros regionais US902-928 (Tabela 2.3), com esses valores, é possível alcançar uma taxa de dados de até 5470 bps, transmitindo pacotes (*payloads*) com até 222 bytes. Esse é o tamanho máximo do *payload* da aplicação, para uma mensagem de *uplink* no protocolo LoRaWAN, cujo tamanho mínimo de cabeçalho (*overhead*) é de 13 bytes (AUGUSTIN *et al.*, 2016).

Na primeira estratégia, o nó sensor envia continuamente a última leitura dos dados dos sensores (valores dos acelerômetros e dos giroscópios). Na segunda estratégia, o nó sensor efetua N leituras, antes de transmiti-las ao gateway. A terceira estratégia efetua 2^N leituras e executa a transformada rápida de Fourier (FFT), enviando um pacote com a frequência modal e, opcionalmente, sua amplitude. O menor intervalo de transmissão que pode ser configurado com a utilização da biblioteca LMiC (Seção 5.4.1), que implementa o protocolo LoRaWAN no *End Device*, é de 1 segundo (1 Hz).

As características de LoRa/LoRaWAN, como ciclo de trabalho (*duty cycle*) e tempo de transmissão (*time on air*), associados aos parâmetros SF, BW e CR (descritos na Seção 2.2), limitam as taxas máximas de amostragem do sistema para o monitoramento de áreas de risco. Como exemplo, a transmissão de um *payload* de 6 bytes, com SF7 e BW125, demanda um tempo de transmissão (*time on air*) de 51,5 ms, com um ciclo de trabalho de 1 %, o que significa que o transceptor precisa aguardar um intervalo de 5,1 s para transmitir uma nova mensagem. Os mesmos 6 bytes, com parâmetros SF8 e BW125 têm tempo de transmissão igual a 102,9 ms, implicando em um intervalo igual a 10,3 s para uma nova transmissão.

Os melhores desempenhos obtidos para cada uma das 3 estratégias são descritos a seguir:

- Estratégia 1 (E1): as leituras dos acelerômetros são realizadas a cada 3 segundos, enquanto as entregas às plataformas de rede e aplicações ocorrem em intervalos de aproximadamente 3,5 segundos.

- Estratégia 2 (E2): 1 leitura dos acelerômetros é realizada a cada intervalo de 0,5 segundo, totalizando 6 leituras, ao fim de 3 segundos; as entregas às plataformas ocorrem em intervalos próximos dos 3,5 segundos.

- Estratégia 3 (E3): até 1024 pontos são amostrados e a FFT calculada, dentro de intervalos de 3 segundos. A frequência de maior magnitude é transmitida em intervalos de aproximadamente 3,5 segundos. Embora não seja obrigatório para a maioria das aplicações, caso necessário, é possível transmitir também o valor da magnitude da frequência.

Os intervalos de leitura dos sensores e de entrega dos dados às plataformas da rede permitiram portanto, na prática, a obtenção das seguintes taxas de amostragem do sistema de monitoramento de vibração: $1/3,5$ (1 leitura a cada 3 s e 1 entrega a cada 3,5 s) $= 0,29$ Hz para a primeira estratégia; $6/3,5$ (6 leituras a cada 3 s e 1 entrega a cada 3,5 s) $= 1,71$ Hz para a segunda estratégia e $1024/3,5$ (1024 leituras a cada 3 s, cálculo da FFT, e entrega a cada 3,5 s) $= 292,5$ Hz para a terceira estratégia.

A Tabela 6.1 apresenta, com base nas taxas de amostragem obtidas para o sistema em cada uma das estratégias de coleta e transmissão, possíveis aplicações de monitoramento de áreas de risco. Os valores apresentados refletem o tempo médio de entrega das mensagens pelo nó sensor (3,5 s). Contudo, esse tempo pode ser muito próximo dos 3 s, tornando possível obtenção de taxas de amostragem um pouco melhores (próximas de: 0,33 Hz para E1, 2 Hz para E2, e de 340 Hz para E3), permitindo, por consequência, monitorar faixas de frequências proporcionalmente maiores.

Tabela 6.1: Possíveis aplicações para as diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados.

Estratégia	**Taxas de Amostragem (Hz)**	**Faixas de Frequência (Hz)**	**Aplicações de Monitoramento**
E1	0,29	0 a 0,145	barragens, encostas
E2	1,71	0 a 0,85	barragens, encostas, SHM
E3	292,5	0 a 146,25	barragens, encostas, SHM

A princípio, as 3 estratégias podem ser utilizadas para as principais aplicações de monitoramento de áreas de risco. Como apresentado na Seção 4, mesmo com baixas taxas de amostragem (E1 e E2), é possível implementar sistemas de monitoramento capazes de coletar dados de vibração e/ou inclinação, suficientes para uma análise do comportamento de barragens e encostas, em complementação às inspeções visuais. No monitoramento da integridade de estruturas, as taxas de amostragem desejadas e, consequentemente, as faixas de vibração que devem ser monitoradas, estão diretamente relacionadas ao aspecto global ou local do monitoramento. Se o interesse é a análise do comportamento global de estruturas de grande porte, taxas de amostragem menores podem ser aplicadas (E2). Caso contrário, se o interesse for analisar o comportamento local de vibração de uma estrutura, é necessário aplicar taxas de amostragem maiores, em razão das vibrações presentes apresentarem valores médios mais elevados. Nesse caso, a estratégia 3 (E3) seria mais indicada.

Cabe mencionar que o MPU-6050, utilizado no desenvolvimento do nó sensor sem fio, é capaz de realizar as leituras das acelerações dos seus 3 eixos de forma simultânea, na taxa de amostragem máxima definida na etapa de configuração. A entrega ao sistema, dos valores de aceleração dos 3 eixos pelas estratégias E1 e E2, implica em uma informação que ocupa ao menos 6 bytes do *payload*. Se apenas um eixo for considerado como referência no monitoramento de vibrações, por exemplo, apenas o eixo X, a diminuição do tamanho da informação a ser transmitida pode refletir nas taxas máximas das estratégias E1 e E2 de coleta e transmissão. Com E2, por exemplo, diminuir o tamanho da informação por 3, permitiria entregar mais leituras para um mesmo tamanho de *payload*, refletindo numa frequência do sistema até aproximadamente 3 vezes maior, com consequente aumento da capacidade do sistema para monitoramento de vibrações em aplicações de integridade de estruturas.

6.1. Ensaios de Vibração em Laboratório e Testes de Campo

Com a fonte de vibração sonora fixada ao topo da estrutura metálica e configurada com as frequências 85 Hz, 95 Hz, 100 Hz e 150 Hz, as respostas da estrutura às excitações foram monitoradas, de forma simultânea, pelo nó sensor e pelo acelerômetro de referência (Figuras 6.1 e 6.2).

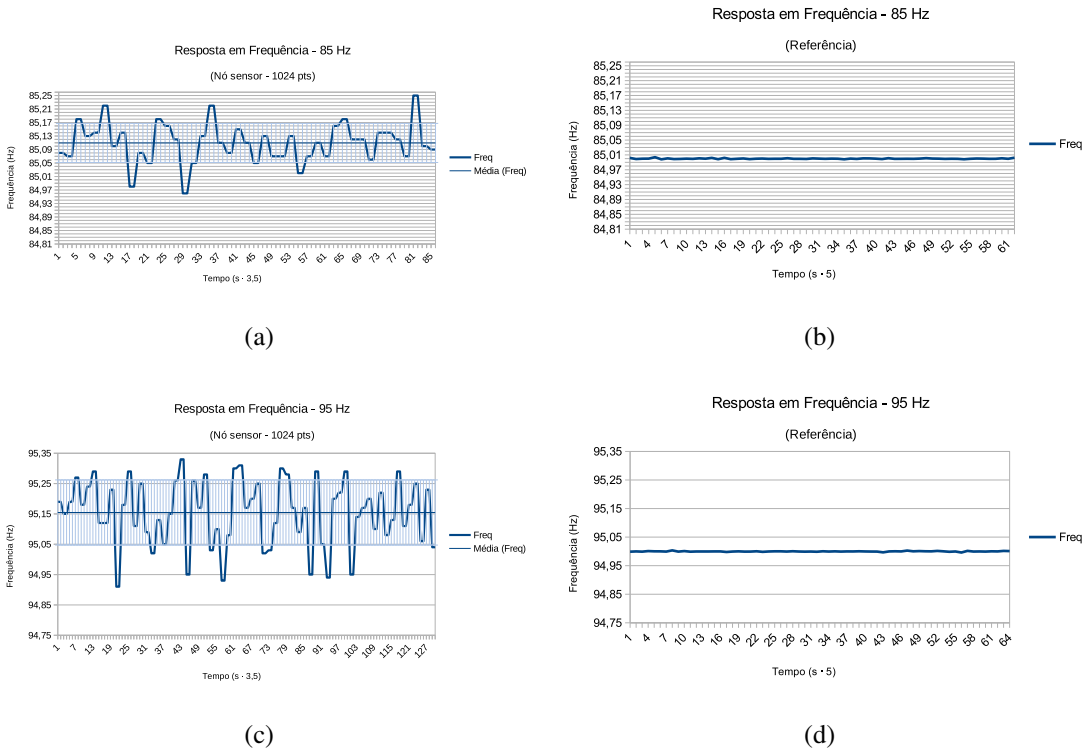


Figura 6.1: Respostas em frequência para 85 Hz e 95 Hz, com o nó sensor, (a) e (c), e com o acelerômetro de referência, (b) e (d), respectivamente.

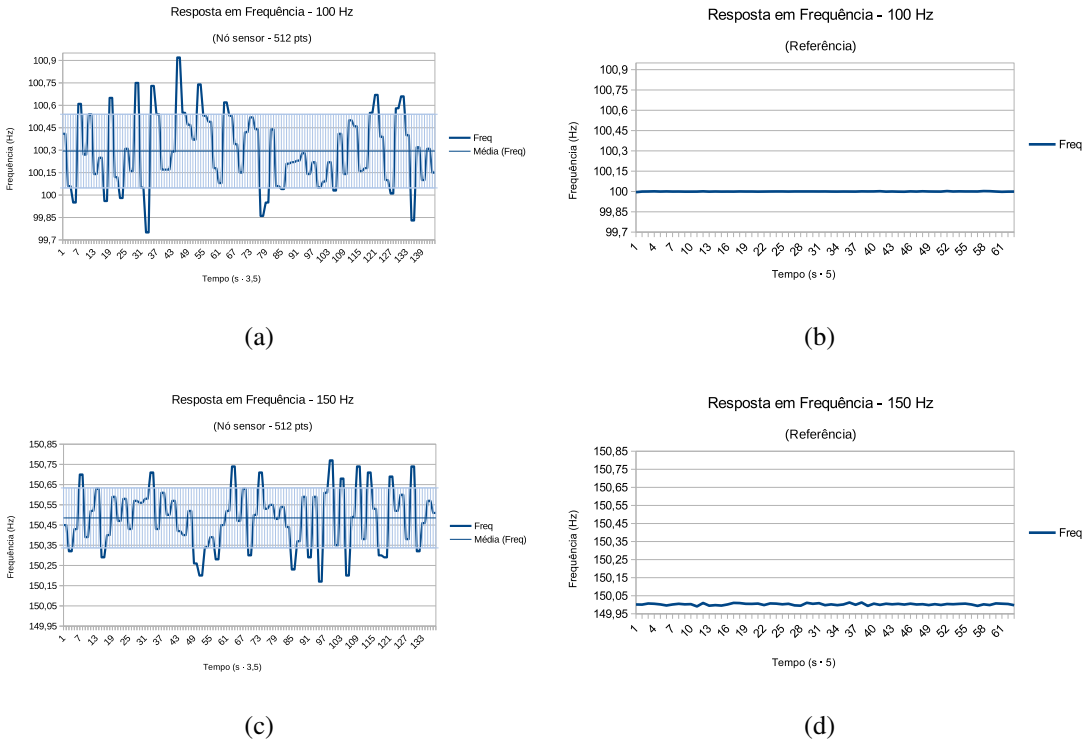


Figura 6.2: Respostas em frequência para 100 Hz e 150 Hz, com o nó sensor, (a) e (c), e com o acelerômetro de referência, (b) e (d), respectivamente.

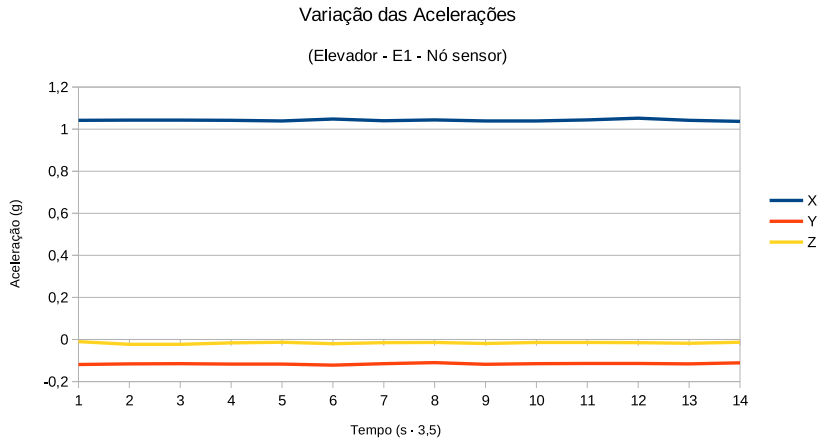
Para frequências mais baixas de vibração, é necessário realizar um número de amostras maior, para que a resposta do sistema seja mais precisa. O número de pontos (amostras), no cálculo da FFT, está relacionado à resolução, e consequentemente à precisão do resultado da análise do sinal. Como exemplo, o menor número de pontos capaz de garantir a melhor resposta do sistema para a frequência de 85 Hz de excitação foi igual a 1024. Para frequências de excitação maiores, 100 Hz ou 150 Hz, um número menor de amostras (512 pontos) pode ser utilizado.

É importante ressaltar que a fonte de excitação é um gerador de ondas sonoras, o que pode gerar um nível de vibração insuficiente para ser detectada pelo sistema, em frequências mais baixas. Por isso, não foram avalidas frequências menores do que 85 Hz.

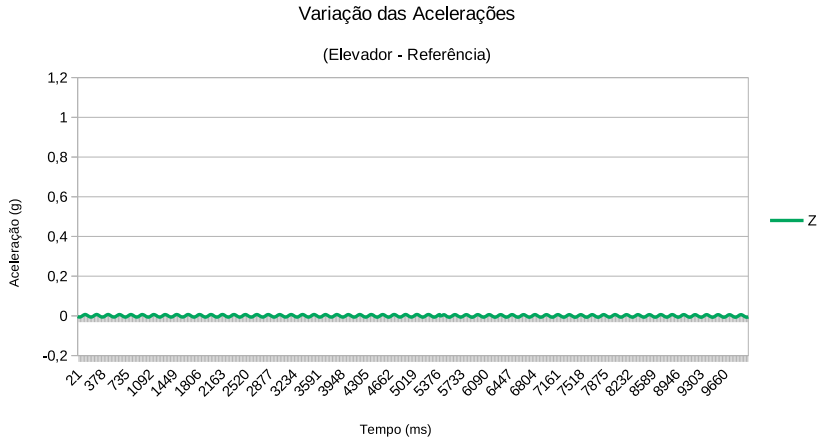
Uma vez validada a sensibilidade do sistema quanto à faixa de frequência da fonte de vibração, os experimentos propostos foram realizados, com o nó sensor, o acelerômetro comercial e a fonte de excitação fixados no topo das estruturas, nas frequências de 150 Hz e 100 Hz. Esses valores foram escolhidos em razão de terem sido aqueles cujas frequências apresentaram melhor desempenho, em termos de equilíbrio das estruturas e respostas do sistema. Variações bruscas no equilíbrio indicam a ocorrência de um evento.

A caracterização dos eventos de deslocamento do elevador na estrutura metálica e do desequilíbrio na estrutura de madeira não se mostrou completamente efetiva, uma vez que as excitações, e consequentemente as vibrações, não puderam ser precisamente repetidas. Além disso, na maioria dos casos, eventuais vibrações ocorridas em razão de atrito entre as paredes

do elevador e a estrutura não foram perceptíveis, como mostra a Figura 6.3. Dessa forma, a frequência exata correspondente ao evento não é completamente determinada.



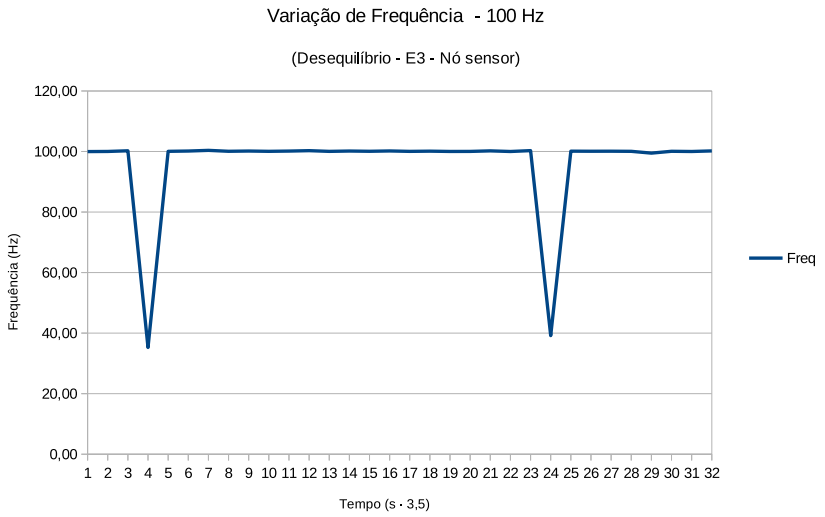
(a)



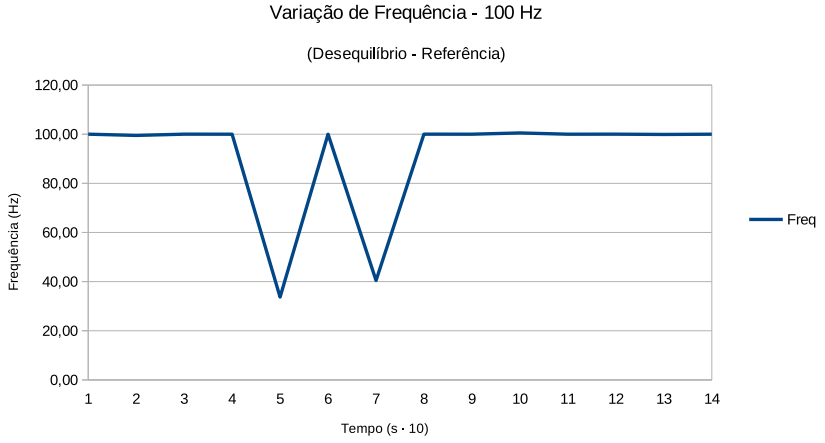
(b)

Figura 6.3: Acelerações obtidas durante o deslocamento do elevador pelo nó sensor, usando a estretégia E1 (a) e pelo acelerômetro de referência (b).

No entanto, é possível observar que a variação da frequência e seu comportamento durante o evento de desequilíbrio é relativamente característico. As respostas em frequência do ensaio de desequilíbrio da estrutura de madeira, usando a estratégia E3, capturadas pelo nó sensor e pelo acelerômetro de referência, apresentadas na Figura 6.4, indicam que o desequilíbrio promove uma queda na frequência de vibração, que fica em torno de 33 Hz e 40 Hz.



(a)



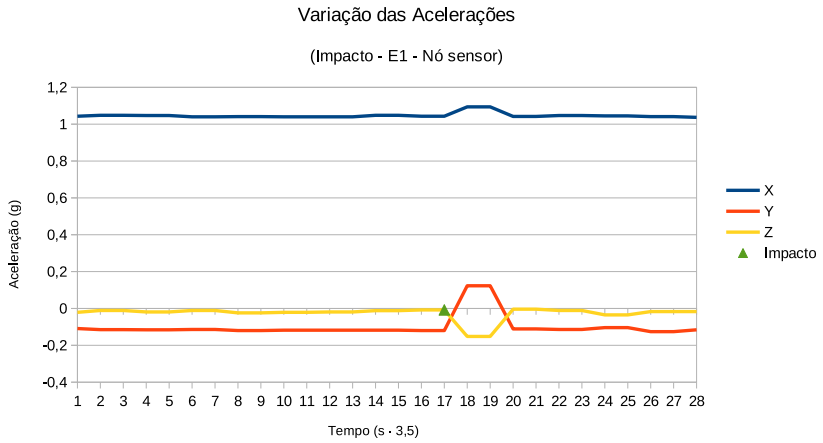
(b)

Figura 6.4: Respostas em frequência para o desequilíbrio da estrutura de madeira com excitação de 100 Hz: nó sensor, com estratégia E3 (a) e acelerômetro de referência (b).

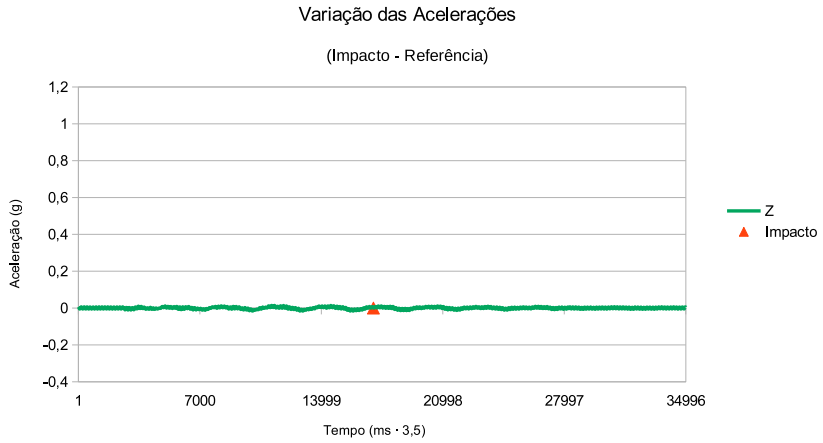
As estratégias E1 e E2 entregam os dados brutos coletados pelo nó sensor, portanto, as medições dos acelerômetros. O *setup* com o acelerômetro comercial também possibitita obter, tanto as acelerações, quanto os resultados da análise espectral. A estratégia E3 permite uma comparação direta da variação de frequência dos dois sistemas. Essa comparação entre as acelerações obtidas com o nó sensor e com o acelerômetro de referência não é tão clara. Ainda assim, é possível buscar caracterizar um evento a partir da análise das vibrações.

A Figura 6.5) exemplifica o comportamento dos acelerômetros durante um período de monitoramento (com E1), em que ocorre um impacto na estrutura metálica. Num estado de equilíbrio, a vibração no nó sensor permanece, praticamente constante nos seus 3 eixos (X, Y e Z), enquanto as vibrações no acelerômetro de referência têm comportamento que se assemelha a uma senoide, correspondendo à frequência da fonte de vibração. Na ocorrência do

impacto, os eixos do acelerômetro do nó sensor sofrem uma variação brusca, enquanto o sinal do acelerômetro de referência altera sua forma original de equilíbrio.



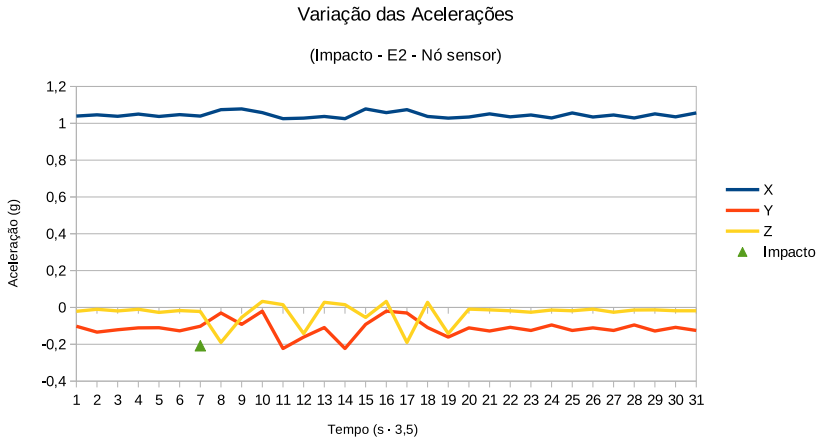
(a)



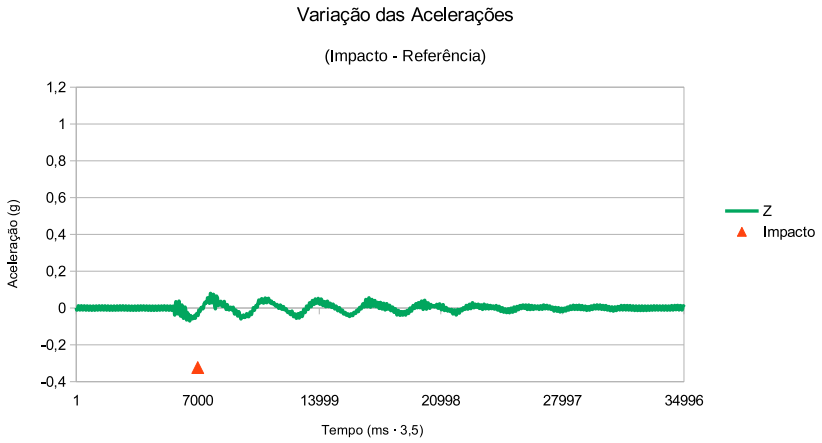
(b)

Figura 6.5: Acelerações obtidas durante período com ocorrência de impacto na estrutura metálica pelo nó sensor utilizando E1 (a) e pelo acelerômetro de referência (b).

Utilizando a estratégia E2, o comportamento do nó sensor e do acelerômetro de referência é similar, como pode ser observado na Figura 6.6.



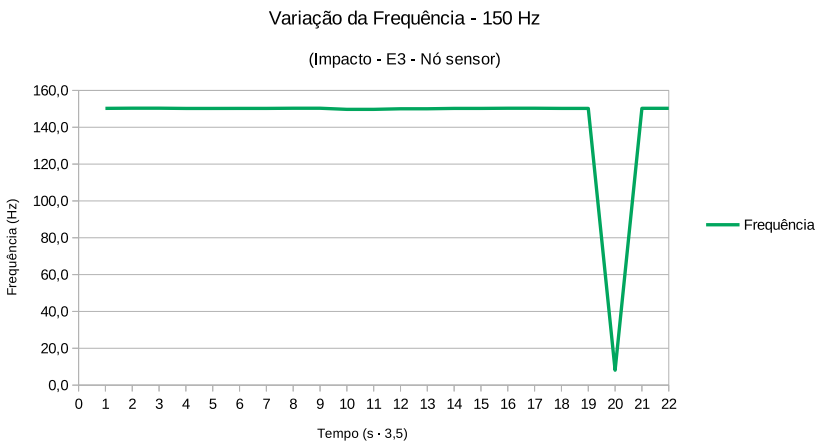
(a)



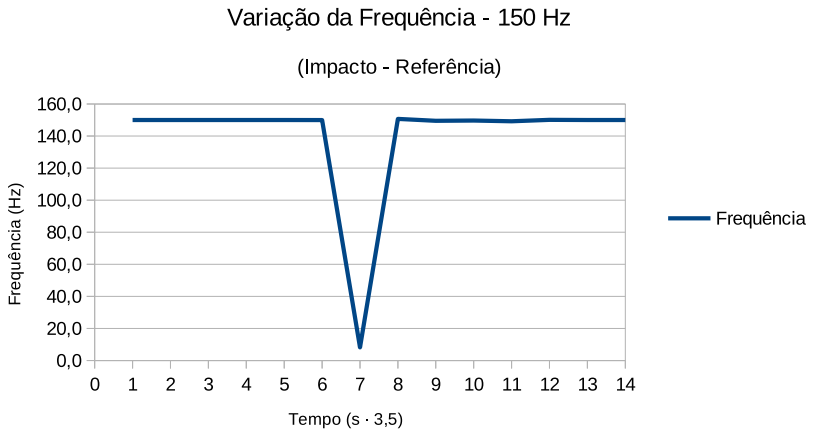
(b)

Figura 6.6: Acelerações obtidas durante período com ocorrência de impacto na estrutura metálica pelo nó sensor utilizando E2 (a) e pelo acelerômetro de referência (b).

O impacto produzido na estrutura metálica pode ser melhor caracterizado pela variação de frequência. Observa-se que, estando a estrutura excitada com uma frequência de 150 Hz, o impacto promove sua queda para algo em torno de 8 Hz. O experimento, realizado repetidas vezes, gerou comportamento similar e demonstra que o sistema proposto é capaz de detectar o esse tipo de evento, conforme vê-se na Figura 6.7.



(a)



(b)

Figura 6.7: Respostas em frequência nó sensor utilizando E3 (a) e do acelerômetro de referência (b), com impacto e usando emissão sonora a 150 Hz.

Em campo, como mencionado anteriormente, foram selecionados dois pontos de interesse, dentro da área de cobertura do *gateway*, um com visada direta e outro sem visada direta. Essa seleção foi baseada no trabalho de Meireles (2018). O nó sensor foi instalado com bateria e acoplado à fonte de vibração sonora, operando na frequência de 100 Hz, por cerca de 5 minutos, conforme as Figuras 6.8 e 6.9.

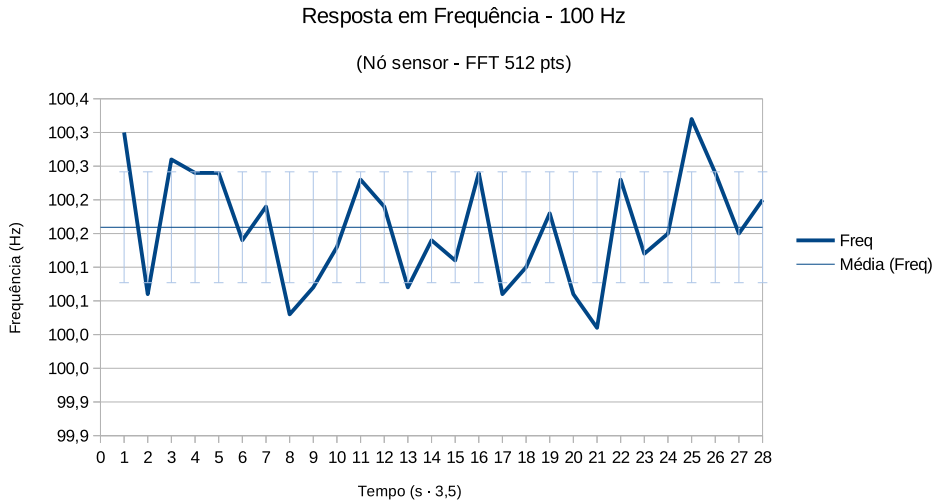


Figura 6.8: Resposta em frequência para emissão sonora de 100 Hz, próximo ao Laboratório de Química, Campus Morro do Cruzeiro.

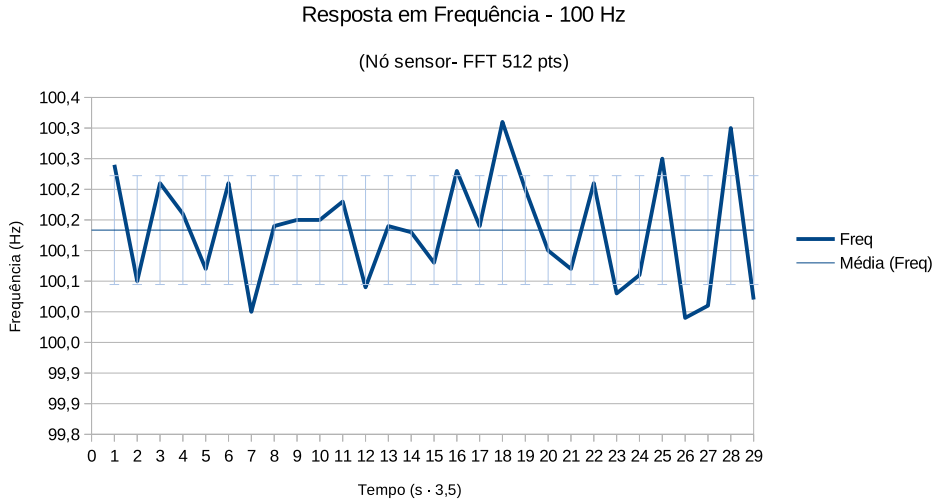


Figura 6.9: Resposta em frequência para emissão sonora de 100 Hz, na Igreja de São Francisco de Paula, Centro.

No primeiro ponto selecionado (Laboratório de Química), sem visada direta e a cerca de 536 metros de distância do *gateway*, o nó sensor apresentou intensidade de sinal (RSSI) entre -105 e -111 dBm e relação sinal-ruído (SNR) entre 2 e 6,5 dB. O valor médio de vibração detectado pelo nó sensor foi de 100,159 Hz, com desvio padrão de 0,083 Hz. No segundo ponto (Igreja de São Francisco), a cerca de 1,7 km do *gateway* e com visada direta, o nó sensor apresentou intensidade de sinal (RSSI) entre -112 e -117 dBm e relação sinal-ruído (SNR) entre -4 e -6,5 dB, com valor médio de vibração detectado pelo nó sensor igual a 100,133 Hz, com desvio padrão de 0,088 Hz.

6.2. Avaliação de Consumo de Energia

As medições de consumo do nó sensor, nas estratégias E1, E2 e E3, foram realizadas com auxílio apenas do multímetro, como amperímetro, com adaptação do cabo de alimentação USB. Os valores medidos foram: cerca de 72 mA a 83 mA, quando o nó não estava transmitindo e entre 110 mA e 122 mA, quando transmitindo.

Nas observações em laboratório, não foi possível estabelecer o período exato de tempo em que, ora o sensor estava ativo, ora a CPU estava ativa, ou ambos. Portanto, considerou-se, por exemplo, no tempo observado de aproximamente 3,5 segundos, um consumo médio de 80 mA para a estratégia E1, atribuído aos processos de leitura e processamento dos dados dos sensores. No restante do tempo observado até o próximo ciclo, o consumo foi atribuído ao transceptor.

A Tabela 6.2 apresenta os valores de consumo nominal do sensor, da unidade de processamento e do *chip* de rádio, no modo normal e no modo de mais baixo consumo de energia. Os orçamentos de consumo do nó sensor podem ser calculados pela carga total de cada modo de operação, multiplicada pela corrente consumida naquele modo de operação. Os tempos de leitura de uma medida de aceleração pelo nó sensor, de processamento da FFT para N amostras e de transmissão dos pacotes em cada uma das estratégias foram medidos calculados: em média 936 μs, para uma leitura das acelerações dos 3 eixos do sensor; cerca de 31,5 ms, para o cálculo da FFT, para 1024 pontos; e cerca de 1 μs, para a transmissão do menor *payload* (4 bytes). As Tabelas 6.3, 6.4 e 6.5 apresentam os resultados para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 6.2: Valores nominais de consumo nos modos normal e de baixo consumo

Valores Nominais		
Componente	**Consumo Modo Normal (mA)**	**Baixo Consumo (mA)**
Sensor	0,5	0,01
CPU	31	0,005
Transceptor	130	0,01

Tabela 6.3: Orçamento de consumo para E1.

Modo	TME (ms)	Corrente (mA)		Corrente x TME (mA x s)
		Por dispositivo	Total no Modo	
Economia de Energia				
MCU (Sleep)	3499,063	0,005	0,025	87,476575
Sensor (Off)		0,01		
Transceptor (Off)		0,01		
Amostragem				
MCU (Normal)	0,936	31	31,51	29,49336
Sensor (On)		0,5		
Transceptor (Off)		0,01		
Transmissão				
MCU (Normal)	0,001	31	161,01	0,16101
Sensor (Off)		0,01		
Transceptor (On)		130		
Total	**3500**	**-**	**-**	**117,1**

Tabela 6.4: Orçamento de consumo para E2.

Modo	TME (ms)	Corrente (mA)		Corrente x TME (mA x s)
		Por dispositivo	Total no Modo	
Economia de Energia				
MCU (Sleep)	3494,474	0,005	0,025	87,36185
Sensor (Off)		0,01		
Transceptor (Off)		0,01		
Amostragem				
MCU (Normal)	5,52	31	31,51	173,9352
Sensor (On)		0,5		
Transceptor (Off)		0,01		
Transmissão				
MCU (Normal)	0,006	31	161,01	0,96606
Sensor (Off)		0,01		
Transceptor (On)		130		
Total	**3500**	**-**	**-**	**262,3**

Utilizando a estratégia E1, a média de corrente é dada por 117,1 mAs /3,5 ms = 33,4 mA, com pico de corrente igual a 130 mA. Com essa média de consumo, uma bateria de íons de Lítio com capacidade de 5000 mAh, teria tempo de vida médio de 6 dias.

Com a estratégia E2, a média de corrente é dada por 262,3 mAs /3,5 s = 74,9 mA. Com essa média de consumo, uma bateria de íons de Lítio com capacidade de 5000 mAh, teria tempo de vida médio de 3 dias.

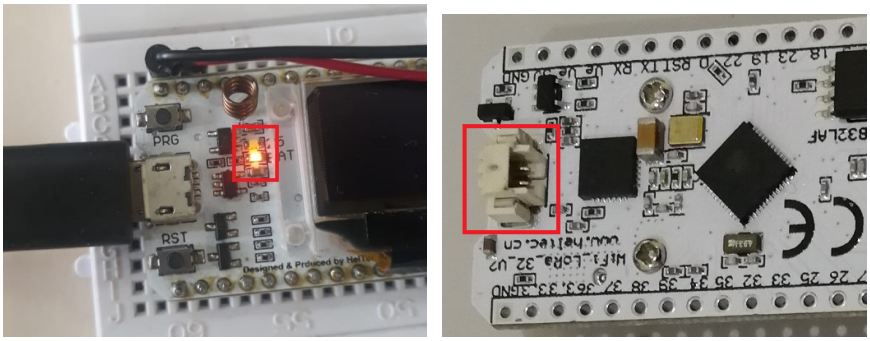
Tabela 6.5: Orçamento de consumo para E3.

Modo	TME (ms)	Corrente (mA)		Corrente x TME (mA x s)
		Por dispositivo	Total no Modo	
Economia de Energia				
MCU (Sleep)	2525,699	0,005	0,025	63,142475
Sensor (Off)		0,01		
Transceptor (Off)		0,01		
Amostragem				
MCU (Normal)	942,08	31	31,51	29684,9408
Sensor (On)		0,5		
Transceptor (Off)		0,01		
Processamento				
MCU (Normal)	32,22	31	31,02	1015,2522
Sensor (Off)		0,01		
Transceptor (Off)		0,01		
Transmissão				
MCU (Normal)	0,001	31	161,01	0,16101
Sensor (Off)		0,01		
Transceptor (On)		130		
Total	**3500**	**-**	**-**	**30763,5**

O consumo elevado observado na estimativa com a estratégia 3, está relacionado aos tempos maiores de leitura dos sensores, em razão do número de amostragens e do processamento da FFT, considerando um número de pontos igual a 1024. Se reduzirmos o número de amostras à metade, por exemplo, os consumos nas etapas de amostragem e processamento caem proporcionalmente, promovendo maior autonomia de bateria.

Embora o microcontrolador utilizado possua modos de economia de energia, que podem consumir correntes na ordem de microamperes (*Deep Sleep Mode*: 10 μA; *Hibernation Mode*: consumo de 2,5 μA), o kit de desenvolvimento utilizado neste projeto possui limitações. Os circuitos periféricos e componentes da placa continuam drenando corrente do sistema, mesmo em modos de maior economia.

Um projeto com circuito personalizado, com a eliminação de componentes, como o LED que compõe o circuito de alimentação da placa, pode reduzir o consumo a poucos mA, no modo *Deep Sleep*. Alimentar a placa com uma bateria externa de Lithium (3,7 V), através do conector SH1.25 x 2, também pode contribuir para a redução no consumo, porque necessita de menos componentes periféricos, comparado à interface USB (Figura 6.10).



(a) (b)

Figura 6.10: Detalhes que afetam a economia de energia: (a) LED removido para diminuição de consumo da placa. (b) Conector para alimentação externa.

Uma quarta estratégia poderia ser implementada, tomando-se como *trigger* as alterações na medições das acelerações. Dessa forma, os envios de dados deixariam de ser periódicos e, teoricamente, seria possível atingir a máxima economia de energia.

7. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento de um protótipo de um nó sensor de vibração com interface LPWAN, com o intuito de verificar sua aplicabilidade no monitoramento de áreas de risco. Um levantamento bibliográfico relacionado ao monitoramento de encostas, monitoramento de barragens e monitoramento da integri-dade de estruturas foi realizado e os principais parâmetros de vibração e taxas de amostragemforam determinados.

O protótipo foi desenvolvido utilizando sensor do tipo MEMS e placa de desenvolvimento de aplicações de Internet das Coisas, com interface de comunicação LoRa. A integração do nó sensor com os principais elementos da rede LPWAN utilizada permitiram a transmissão de baixas taxas de dados, com entregas em torno de 3,5 segundos. Um único gateway permitiu alcançar cobertura próxima de 2 km, em linha de visada direta.

As diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados de vibração implementadas permitiram obter taxas de amostragem compatíveis com as definidas na literatura, para aplicações de monitoramento de encostas, barragens e estruturas de engenharia civil. O equilíbrio entre a necessidade de uma maior taxa de dados e a entrega de uma mensagem processada localmente é que define a melhor estratégia de coleta e transmissão de dados.

Com a estratégia E1, que coleta os dados dos acelerômetros e os transmite assim que disponíveis, a máxima taxa de amostragem obtida foi de 0,29 Hz, podendo-se alcançar próximo de 0,33 Hz. Essas taxas máximas são indicadas para aplicações que demandam intervalos maiores de monitoramento, como encostas e barragens, auxiliando as inspeções visuais.

A estratégia E2, que busca coletar um maior número de dados antes da transmissão, permitiu alcançar taxas próximas de 2 Hz, que podem ser aplicadas no monitoramento de integridade de estruturas, quando o interesse é o monitoramento do comportamento global de uma estrutura de grande porte, em as frequências naturais são menores.

A terceira estratégia implementada (E3) realiza um pré-processamento dos dados de vibração, transmitindo para a camada de aplicação apenas o resultado desse processamento. Essa estratégia garantiu taxa de amostragem máxima em torno de 290-300 Hz, o que aumenta as possibilidade de uso do nó sensor em aplicações de monitoramento de integridade de estruturas.

A fonte de vibração utilizada neste trabalho foi uma fonte de vibração sonora, que não é a mais indicada para ensaios de vibração mecânica. A utilização de excitadores de vibração mecânica, como *shakers* e mesas vibratórias permitiriam a realização de ensaios de vibração mais específicos para avaliação da capacidade do sistema para o monitoramento de integridade de estruturas.

Limitações do hardware utilizado, como o consumo elevado da placa de desenvolvimento, e o foco na obtenção das maiores taxas de amostragem do sistema, não permitiram alcançar um nível elevado de economia de energia. Um projeto de hardware personalizado, contendo apenas os recursos necessários e fazendo uso de todos os *setups* disponíveis de economia de energia, permitiria alcançar consumos de energia na ordem de microamperes.

A implementação de estratégias de software utilizando o acelerômetro como *trigger*, ou seja, mantendo os componentes de hardware nos modos mais econômicos de operação (*sleep*, *power off* etc.), até que um evento de vibração dispare os modos de operação de maior consumo, como processamento e transmissão de dados, possibilitaria obter a melhor economia de energia, desejável para aplicações que requerem o uso de baterias.

Referências Bibliográficas

ADELANTADO, F., VILAJOSANA, X., TUSET-PEIRO, P., MARTINEZ, B., MELIA-SEGUI, J., WATTEYNE, T. "Understanding the Limits of LoRaWAN", *ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8030482>. Acesso em: 04 dez. 2019.

ANATEL. "Resolução n. 680, 27 de Junho de 2017." 2019a. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acesso em: 04 dez. 2019.

ANATEL. "Ato n. 14448, de 04 de dezembro de 2017". 2019b. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2017/1139-ato-14448>. Acesso em: 04 dez. 2019.

AUGUSTIN, A., YI, J., CLAUSEN, T., TOWNSLEY, W. M. "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things", *Sensors*, v. 16, pp. 1466, 2016. doi: 10.3390/s16091466.

AWALUDIN, L., DHEWA, O. A. "Low Cost Sensor Node Device for Monitoring Landslides", *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, v. 8, pp. 201–210, 2018. ISSN: 2460-7681. doi: http://dx.doi.org/10.22146/ijeis.39682. Disponível em: <https://jurnal.ugm.ac.id/ijeis/article/view/39682>.

BALLESTRIN, R., BENDER, R., BRUSAMARELLO, V., MÜLLER, I. "Low cost wireless sensor network for vibration detection", *2017 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, pp. 1–6, 2017. doi: 10.1109/INSCIT.2017.8103518.

BAZAN, H. W. D. *Um modelo de estaca para análise de vibrações.* Mestrado em engenharia civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.

BEZERRA, L. T. V. *Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN.* Tese de Mestrado, Universidade Federal de do Rio Grande do Norte, 2019. Mestrado em Engenharia Civil.

BOR, M., VIDLER, J., ROEDIG, U. "LoRa for the Internet of Things". Em: *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, EWSN '16, p. 361–366, USA, 2016. Junction Publishing. ISBN: 9780994988607.

CARDOZO, F. A. C., CORDOVA, D. P. "Breves Considerações sobre Barragens de Rejeito da Mineração", *Conselho em Revista - CREA-RS*, v. 129, pp. 42–43, 2019.

CASTILHO, B. *Análise de gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano.* Mestrado em engenharia geotécnica, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

CAYENNE. "Cayenne Docs". 2019. Disponível em: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/>. Acesso em: 04 dez. 2019.

CHERNENKO, S. "Fast Fourier transform - FFT". 2020. Disponível em: <http://www.librow.com/articles/article-10>. Acesso em: 17 ago. 2020.

DEEPTHI, T. M., VENKATARAGHAVAN, K. S., SARAVANAN, U., KAMAKOTI, V. "Developement and benchmarking of new wireless sensors for structural health monitoring". 2003. Disponível em: <https://www.academia.edu/25766467/DEVELOPMENT_AND_BENCHMARKING_OF_NEW_WIRELESS_SENSORS_FOR_STRUCTURAL_HEALTH_MONITORING>.

DING, W. "The Design and Implementation of Dam Safety Monitoring Routing Algorithm Based on Wireless Data Transmission Technology", *International Journal of Simulation. Sistems, Science and Technology*, v. 16, pp. 26.1–26.5, 2015. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/b1f1/82dd511466e053983aa70f7004ec07b98ff1.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2019.

DRUMOND, L. B. *Análise de vibrações e desenvolvimento de poropressão em rejeito de mineração*. Graduação em engenharia de minas, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2018. Monografia.

EHIAGWINA, F., KEHINDE, O., IROMINI, N., SIQUIDI, N. A., PUNETHA, D. "Ultra-Low Power Wireless Sensor Networks: Overview of Applications, Design Requirements and Challenges", *ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, v. 1, n. 2, pp. 331–345, 2018.

ESPRESSIF SYSTEMS. “ESP Series Datasheet v. 3.2”. 2019. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2019.

FRUCI, CHRIS. “LPWAN for IoT sensors.” 2019. Disponível em: <https://radiobridge.com/blog/lpwan-for-iot-sensors>. Acesso em: 21 set. 2020.

GARCIA, P., KLEINSCHMIDT, J. “Tecnologias Emergentes de Conectividade na IoT: Estudo de Redes LPWAN”, *XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBrT2017*, 2017. doi: 10.14209/sbrt.2017.141.

GONZALEZ, J., GUPTA, S., LOH, K. “Structural Health Monitoring: Technological Advances to Practical Implementations”. Em: *Proceedings of The IEEE*, v. 104, 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7515293>. Acesso em: 04 dez. 2019.

HAKIM, W. M. A., RAMLI, A. F., BASARUDIN, H., ABU, M. A., AHMAD, I. “WSN and IoT Based Landslide Monitoring System”, *Test Engineering and Management*, v. 83, pp. 10926 – 10932, 2020.

HLOUPIS, G., LEOUSSIS, C., PAGOUNIS, V., TSAKIRI, M., VASSILAKIS, E., ZACHARIS, V. “Development of a Wireless Sensor Network System as basis for Early Warning in Slope Monitoring of the Corinth Canal”. Em: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Vienna, 2016. Disponível em: <http://users.uoa.gr/~evasilak/pages/pdfs/75JISDM_2016_Vienna.pdf>.

INVENSENSE. “MPU-6000 and MPU-6050 - Product Specification - Revision 3.4”. 2013. Disponível em: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2019.

ISMAIL, D., RAHMAN, M., SAIFULLAH, A. “Low-Power Wide-Area Networks: Opportunities, Challenges, and Directions”. Em: *Proceedings of the Workshop Program of the 19th International Conference on Distributed Computing and Networking*, Workshops ICDCN ’18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery. ISBN: 9781450363976. doi: 10.1145/3170521.3170529. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3170521.3170529>.

KABALCI, Y., ALI, M. “Emerging LPWAN Technologies for Smart Environments: An Outlook”. Em: *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, pp. 24–29, June 2019. doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778626.

LEÃO, J., SOUZA, P. "Sistema Inteligente de Monitoramento de Deslizamento de Solos", *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 7, pp. 508, 2018. doi: 10.19177/rgsa.v7e02018508-524.

LORA ALLIANCE MARKETING WORKGROUP. "LoRaWAN. What is it? - A technical overview of LoRa and LoRaWAN". 2015. Disponível em: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2019.

LORA ALLIANCE MARKETING WORKGROUP. "LoRaWAN 1.1 Regional Parameters". 2017. Disponível em: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2020.

LYNCH, J., SUNDARARAJAN, A., LAW, K., KIREMIDJIAN, A., CARRYER, E. "Embedding damage detection algorithms in a wireless sensing unit for operational power efficiency", *Smart Materials and Structures*, v. 13, pp. 800–810, 2004.

LYNCH, J. "Overview of Wireless Sensors for Real-Time Health Monitoring of Civil Structures", *Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Control and Monitoring*, 2004.

LYNCH, J., LAW, K., KIREMIDJIAN, A., CARRYER, E., FARRAR, C., ALLEN, D., NADLER, B., WAIT, J. "Laboratory and Field Validation of a Wireless Sensing Unit Design for Structural Monitoring", *Proceedings of the US-Korea Workshop on Smart Structural Systems*, 2002.

LYNCH, J. P., LOH, K. J. "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Network for Structural Health Monitoring", *The Shock and Vibration Digest*, v. 38, n. 2, pp. 31–128, 2006.

LYNCH, J. P., SUNDARARAJAN, A., LAW, K., KIREMIDJIAN, A., CARRYER, E. "Power-Efficient Data Management for a Wireless Structural Monitoring System", *Proceedings of the 3th International Workshop on Structural Control and Monitoring*, 2003.

LYNCH, J. P., FARRAR, C. R., MICHAELS, J. E. "Structural Health Monitoring: Technological Advances to Practical Implementations". Em: *Proceedings of The IEEE*, v. 104, 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7515293>. Acesso em: 04 dez. 2019.

LYNCH, J. P. "An overview of wireless structural health monitoring for civil structures", *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365, n. 1851, pp. 345–372, 2007. doi: 10.1098/rsta.2006.1932.

Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.2006.1932>.

MEIRELES, L., UZEDA, L., RÊGO SEGUNDO, A. K. "Coisas para se saber sobre a Internet das Coisas - Um Guia Pratico", *XXXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBrT2018*, pp. 16–19, 2018a. doi: 10.14209/sbrt.2018.49.

MEIRELES, L., UZEDA, L., RÊGO SEGUNDO, A. K. "Projeto e Implantação de Rede de Internet das Coisas em Regiões Montanhosas", *XXXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBrT2018*, pp. 16–19, 2018b. doi: 10.14209/sbrt.2018.49.

MEIRELES, L. V. *Projeto de uma rede de internet das coisas para monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco.* Mestrado em instrumentação, controle e automação de processos de mineração, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F., MEYER, F. "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment", *ICT Express*, v. 5, n. 1, pp. 1 – 7, 2019. ISSN: 2405-9595. doi: https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>.

MORENO, E., BARRETO, R. "Técnicas para Diminuir o Consumo de Energia em Sistemas Embarcados". Em: *Anais do XXVIII Congresso da SBC. JAI-Jornadas de Atualização em Informática*, Belém do Pará, 2008. SBC. Disponível em: <http://www2.sbc.org.br/csbc2008/pdf/arq0060.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2019.

MORENO-GOMEZ, A., PÉREZ-RAMÍREZ, C., DOMINGUEZ GONZALEZ, A., VALTIERRA-RODRIGUEZ, M., OMAR, C., AMEZQUITA-SANCHEZ, J. "Sensors Used in Structural Health Monitoring", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017. doi: 10.1007/s11831-017-9217-4.

MULTI-TECH SYSTEMS. "Conduit® Base Station IP67 Getting Started Guide for Versions 1.5 and 2.1". 2019. Disponível em: <https://www.multitech.com/documents/publications/manuals/S000665.pdf>.

MULTI-TECH SYSTEMS. "IP67 Conduit for Outdoor LoRa Deployments". 2017. Disponível em: <https://www.multitech.com/documents/publications/data-sheets/86002197.pdf>.

OOI, G. L., WANG, Y.-H. "Applying MEMS accelerometers to measure ground vibration and characterize landslide initiation features in laboratory flume test". Em: *Geo-*

Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability, pp. 2019–2028, 2014.

OOI, G. L., TAN, P. S., LIN, M.-L., WANG, K.-L., ZHANG, Q., WANG, Y.-H. "Near real-time landslide monitoring with the smart soil particles", *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, v. 2, pp. 1031–1034, 2016. doi: 10.3208/jgssp.HKG-05.

OPPENHEIN, A. V., SCHAFE, R. W., BUCK, J. R. *Discrete-time signal processing*. Upper Saddle River, New Jersey, USA, Prentice Hall, 1999.

PRANDONI, M., VETTERLI, P. "Signal Processing for Communications". 2008. Disponível em: <https://www.sp4comm.org/docs/sp4comm_corrected.pdf>.

QADIR, Q. M., RASHID, T. A., AL-SALIHI, N. K., ISMAEL, B., KIST, A. A., ZHANG, Z. "Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs", *IEEE Access*, v. 6, pp. 77454–77473, 2018. ISSN: 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883151.

RAZA, U., KULKARNI, P., SOORIYABANDARA, M. "Low Power Wide Area Networks: An Overview", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, pp. 855–873, Secondquarter 2017. ISSN: 1553-877X. doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.

RESENDE, L. M. D. *Análise do risco de danos por vibração mecânica nos monumentos setecentistas do Caminho Tronco de Ouro Preto.* Mestrado em engenharia de materiais - redemat, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

RIBEIRO, R. R., LAMEIRAS, R. D. M. "Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures", *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 16, 2019. ISSN: 1679-7825. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-78252019000700704&nrm=iso>. Acesso em: 12 dez. 2019.

SANCHEZ-IBORRA, R., CANO, M.-D. "State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services", *Sensors*, v. 16, pp. 708, 05 2016. doi: 10.3390/s16050708.

SEMTECH CORPORATION. "Understanding the LoRa Adaptive Data Rate". 2013. Disponível em: <https://bit.ly/3iceqZT>. Acesso em: 30 set. 2020.

SEYED-KOLBADI, S., HARIRI-ARDEBILI, M., MIRTAHERI, M., POURKAMALI-ANARAKI, F. "Instrumented Health Monitoring of an Earth Dam", *Infrastructures*, v. 5, n. 3, pp. 26, 2020.

SIDDULA, S. S., BABU, P., JAIN, P. C. "Water Level Monitoring and Management of Dams using IoT". Em: *2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart*

Innovation and Usages (IoT-SIU), pp. 1–5, Feb 2018. doi: 10.1109/IoT-SIU.2018.8519843.

SILVA, D. H. D. J. *Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradores hidrelétricas*. Mestrado em engeharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, F. T. D. *Vibrações em encostas produzidas por tráfego de veículos*. Mestrado em ciências em engenharia civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Escola de Engenharia de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco, 2006. Dissertação.

SINHA, R. S., WEI, Y., HWANG, S.-H. "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT", *ICT Express*, v. 3, n. 1, pp. 14 – 21, 2017. ISSN: 2405-9595. doi: https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>.

SOFWAN, A., SUMARDI, IRSYAD, M., NAJIB. "Measurement Design of Sensor Node for Landslide Disarter Early Warning System", *2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI)*, 2018.

STACK OVERFLOW CONTRIBUTORS. "Learning algorithm". 2020. Disponível em: <https://riptutorial.com/ebook/algorithm>. Acesso em: 17 ago. 2020.

THALES GROUP. "Low Power Wide Area Technology". 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2ZUeR52>. Acesso em: 21 set. 2020.

THOMSON, W. T. *Teoria da vibração com aplicações/William T. Thomson; tradução de Cássio Sigaud*. Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda., 1978.

TOLEDO JÚNIOR, E. G. *Acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural.* Mestrado em engenharia civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018. Dissertação.

UNESCO. "Gestão de riscos de desastres para o Patrimônio Mundial. – Brasília: UNESCO, Iphan. il. – (Manual de referência do patrimônio mundial)". 2015.

VEIGA, R. "The Things Network - Tutorial". 2019. Disponível em: <https://docplayer.com.br/150308187-The-things-network-the-things-network.html#show_full_text>. Acesso em: 04 dez. 2019.

WANG, Y., LYNCH, J. P., LAW, K. H. "A wireless structural health monitoring system with multithreaded sensing devices: design and validation", *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 3, n. 2, pp. 103–120, 2007. doi: 10.1080/15732470600590820. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15732470600590820>. Acesso em: 04 dez. 2019.

YOSHIDA, L. M. *Estudo comparativo de técnicas de identificação modal no domínio do tempo aplicadas a estruturas de engenharia civil.* Mestrado em engenharia civil, construção metálica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016. Dissertação.

YOUSUF, A., ROCHESTER, E., OUSAT, B., GHADERI, M. "Throughput, Coverage and Scalability of LoRa LPWAN for Internet of Things", *Em: IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, pp. 1–10, 2018. doi: 10.1109/IWQoS.2018.8624157.

YU, G.-M., SONG, C.-W., ZOU, J.-B., WU, Y.-X., PAN, Y.-Z., LI, L., LI, R., WANG, P.-S., WANG, Y.-L. "Applications of online monitoring technology for tailings dam on digital mine", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 21, pp. s604–s609, 2011. ISSN: 1003-6326. doi: https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61648-3. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632612616483>. Acesso em: 04 dez. 2019.

ZHU, L., FU, Y., CHOW, R., SPENCER, B., PARK, J., MECHITOV, K. "Development of a High-Sensitivity Wireless Accelerometer for Structural Health Monitoring", *Sensors*, v. 18, n. 1, pp. 262, 2018.