

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TRANSFERÊNCIA DE MAIOR VOLUME DE DADOS EM REDES DE SENSORES
SEM FIO DE ALTA LATÊNCIA E BAIXA TAXA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
ESTRATÉGIAS DE SEGMENTAÇÃO E COMPRESSÃO**

MARDEN AMBRÓSIO FAGUNDES

UBERLÂNDIA, MG

2025

MARDEN AMBRÓSIO FAGUNDES

**TRANSFERÊNCIA DE MAIOR VOLUME DE DADOS EM REDES DE SENSORES
SEM FIO DE ALTA LATÊNCIA E BAIXA TAXA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
ESTRATÉGIAS DE SEGMENTAÇÃO E COMPRESSÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Processamento da Informação

Orientador: Dr. Alan Petrônio Pinheiro

UBERLÂNDIA, MG

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

Reitor: Carlos Henrique de Carvalho

Pró-Reitora de Graduação: Waldenor Barros Moraes Filho

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-graduação: Thiago Gonçalves Paluma Rocha

Diretor da Faculdade de Engenharia Elétrica: Sérgio Ferreira de Paula

Coordenador do Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica: Luiz Carlos
Gomes de Freitas

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU

com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F156	Fagundes, Marden Ambrosio, 1978-
2025	Transferência de maior volume de dados em redes de sensores sem fio de alta latência e baixa taxa de transmissão utilizando estratégias de segmentação e compressão [recurso eletrônico] / Marden Ambrosio Fagundes. - 2025.
Orientador: Alan Petrônio Pinheiro.	
Coorientador: Marcelo Barros de Almeida.	
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.	
Modo de acesso: Internet.	
Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.305	
Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.	
1. Engenharia elétrica. I. Pinheiro, Alan Petrônio, 1982-, (Orient.). II. Almeida, Marcelo Barros de, 1972-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.	
CDU: 621.3	

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 805 PPGEELT				
Data:	Dezesseis de Maio de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	14h02	Hora de encerramento:	16h22
Matrícula do Discente:	11922EEL009				
Nome do Discente:	Marden Ambrósio Fagundes				
Título do Trabalho:	Transferência de maior volume de dados em redes de sensores sem fio de alta latência e baixa taxa de transmissão utilizando estratégias de segmentação e compressão				
Área de concentração:	Processamento da Informação				
Linha de pesquisa:	Metodologia e Técnicas da Computação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do Projeto: Alan Petrônio Pinheiro. Título Do Projeto: Solução alternativa inovadora para PAE em regiões de alta densidade populacional e edificações verticais usando sistemas de comunicação IoT. Instituição Parceira, se houver: ANEEL/EMAE. Número do Processo na Instituição Parceira, se houver: 00393-0015/2022. Vigência Do Projeto: 2022-2026.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Daniel Pereira de Carvalho (UFU), Rodrigo Maximiano Antunes de Almeida (UNIFEI) e Marcelo Barros de Almeida (UFU), coorientador do discente.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Marcelo Barros de Almeida, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Maximiano Antunes de Almeida**, Usuário Externo, em 19/05/2025, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Barros de Almeida**, Professor(a) do Magistério Superior, em 19/05/2025, às 12:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Pereira de Carvalho**, Professor(a) do Magistério Superior, em 27/05/2025, às 10:59, 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
https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 6349638 e o código CRC 804C8136.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial minha mãe, pelo apoio e cuidado dedicado a mim desde sempre e pelos valores morais ensinados que foram a base para a minha formação pessoal. Agradeço a minha mulher, pelo companheirismo e constante motivação para continuar seguindo em frente.

Agradeço especialmente aos professores Dr. Alan Petrônio e Dr. Marcelo Barros pela compreensão das dificuldades e pela contribuição em todas as fases da pesquisa, orientando no planejamento e desenvolvimento que foram fundamentais nesta caminhada acadêmica.

Agradeço também, ao coordenador do CEPES – Centro de Estudos, Pesquisas e Projetos Econômicos-sociais e ao Conselho do Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, por incentivarem a minha capacitação e permitirem o meu afastamento.

Pesquisa realizada na:



Universidade Federal de Uberlândia
Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica



LRI - Laboratório de Redes Inteligentes
www.lri.ufu.br

Financiamento e apoio:



Agência Nacional de Energia Elétrica
Programa de Pesquisa e Desenvolvimento

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela Companhia Energética de Brasília por meio do projeto de P&D ANEEL/EMAE nº 00393-0015/2022 intitulado “Solução alternativa inovadora para PAE em regiões de alta densidade populacional e edificações verticais usando sistemas de comunicação IoT”.

RESUMO

Atualmente, as tecnologias de internet das coisas têm sido usadas em diferentes aplicações e contextos em que a comunicação pode ser um aspecto chave. Todavia, sua capacidade de tráfego é limitada. No contexto desta pesquisa, associada a uma aplicação de comunicação em larga escala voltada a avisos em caso de incidentes em barragens em áreas metropolitanas, é importante desenvolver meios para reduzir os impactos desta limitação. Para enfrentar o desafio, este trabalho aborda estratégias de segmentação e compressão com o objetivo de otimizar a transmissão de maiores volumes de dados, tais como formas de onda, através de redes de sensores *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) (Rede de Longo Alcance e Área Ampla) classe A. É proposto um algoritmo eficiente de segmentação de dados, cuja característica principal é realizar uma verificação tardia dos segmentos de dados faltantes após a transmissão de todos os pacotes que, em seguida, retransmite os pacotes faltantes. Além disso, é apresentada a implementação de um algoritmo de compressão de dados baseado no princípio de *Lossless Entropy Compression* (LEC) (Compressão de Entropia sem Perdas) codificada em linguagem C, adequada para ser executada em sistemas de microcontroladores com uma licença permissiva e *bindings* (ligações) para uso na linguagem Python que permite portabilidade e a integração com outras plataformas de desenvolvimento. A escolha da LEC se justifica pela sua capacidade de alcançar maiores taxas de compressão sem perda de informação, característica fundamental para aplicações que exigem fidelidade nos dados transmitidos. Ademais, também foram realizados testes práticos para comprovar a eficácia desta proposta através de um dispositivo eletrônico, com modem padrão *Long Range* (LoRa) (Longo Alcance) e sensor inercial, desenvolvido e construído neste trabalho. Os resultados obtidos demonstram que a combinação das técnicas de segmentação e compressão propostas permitem utilizar redes de sensores idealizadas, inicialmente, para transmitir pouca quantidade de dados, serem utilizadas para transmitir maiores quantidade de dados, sem comprometer a fidelidade dos dados recebidos.

Palavras-chave: rede de sensores sem fio; compressão de dados; LoRaWAN.

ABSTRACT

Currently, Internet of Things technologies have been used in different applications and contexts where communication can be a key aspect. However, their data throughput capacity is limited. In the context of this research—associated with a large-scale communication application aimed at issuing alerts in case of dam incidents in metropolitan areas—it is important to develop means to reduce the impacts of this limitation. To tackle this challenge, this work addresses data segmentation and compression strategies to optimize the transmission of larger amounts of data, such as waveforms, through class A LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) sensor networks. An efficient data segmentation algorithm is proposed, characterized by a late verification of missing data segments after the transmission of all packets, followed by retransmission of the missing packets. Additionally, the implementation of a data compression algorithm based on the principle of Lossless Entropy Compression (LEC) coded in C language is presented, suitable for running in microcontroller systems with a permissive license and bindings for use in Python language, allowing portability and integration with other development platforms. The choice of LEC is justified by its ability to achieve high compression rates without information loss, a fundamental characteristic for applications demanding data fidelity. Furthermore, practical tests were carried out to prove the effectiveness of this proposal through an electronic device, with a Long Range (LoRa) standard modem and inertial sensor, developed and built in this work. The results obtained demonstrate that the combination of the proposed segmentation and compression techniques allows sensor networks, initially designed for low data transmission, to be used for transmitting larger amounts of data without compromising the fidelity of the received data.

Keywords: wireless sensor network; data compression; LoRaWAN.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aplicações da IoT	17
Figura 2 - Estimativa do mercado global de IoT em números de dispositivos conectados (em bilhões)	25
Figura 3 - Cobertura geográfica das redes sem fio	30
Figura 4 - Visão geral simplificada de uma rede Sigfox	31
Figura 5 - Ilustração da variação (aumento) de frequência (<i>up-chirp</i>). A esquerda: gráfico da amplitude de um sinal em função do tempo; A direita: gráfico da frequência em função do tempo.	34
Figura 6 - Ilustração da variação (diminuição) de frequência (<i>down-chirp</i>). A esquerda: gráfico da amplitude de um sinal em função do tempo; A direita: gráfica da frequência em função do tempo.	34
Figura 7 – Camadas do protocolo de rede LoRaWAN.....	36
Figura 8 - Topologia típica de uma rede LoRaWAN	36
Figura 9 - Arquitetura do protocolo de rede do LoRaWAN.....	37
Figura 10 - Visão geral do modo de funcionamento de um ED classe A no LoRaWAN.	39
Figura 11 - Visão simplificada do modo de operação de um ED classe A no LoRaWAN quando a rede (GW, NS e AS) não responde de volta.	39
Figura 12 - Visão simplificada do modo de operação de um ED classe A no LoRaWAN quando a rede (GW, NS e AS) responde de volta na janela RX1.....	39
Figura 13 - Visão simplificada do modo de operação de um ED classe A no LoRaWAN quando a rede (GW, NS e AS) responde de volta na janela RX2.	39
Figura 14 - Diagrama de temporização das janelas de recepção para dispositivos LoRaWAN operando em classe A. Foram utilizados os tempos de 5 e 6 segundos, respectivamente, para <i>Receive Delay 1</i> e <i>Receive Delay 2</i>	45
Figura 15 - Diagrama da máquina de estados para segmentação de dados com confirmação quadro a quadro (UPL_SEGM_ACK).	46
Figura 16 - Diagrama da máquina de estados para segmentação de dados. Estratégia de reconhecimento apenas no final (UPL_SEGM sem reconhecimento).	47
Figura 17 - Comportamento do compressor em função da máxima amplitude das variações de diferenças.....	52
Figura 18 - Conjuntos de funcionalidades de <i>hardware</i> do ED LoRaWAN.....	54

Figura 19 - Representação tridimensional da PCI com componentes eletrônicos do ED LoRaWAN desenvolvido	59
Figura 20 - Diagrama do circuito eletrônico do ED LoRaWAN.....	60
Figura 21 - Orientação do sensor inercial do ED fixado no <i>mini vibration shaker</i> através da PCI do ED e o suporte de montagem.....	62
Figura 22 - Foto do sistema de testes do ED LoRaWAN.....	65
Figura 23 - Painel frontal do programa em LabView para configurar os parâmetros do gerador de sinal NI 9269.....	67
Figura 24 - União das amostras dos sinais de aceleração capturadas pelo sensor inercial em diferentes escalas. Estão agrupadas em 4 segmentos, um para cada escala: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$	69
Figura 25 - União das diferenças entre amostras sucessivas dos sinais de aceleração por eixo capturadas pelo sensor inercial em diferentes escalas. Estão agrupadas em 4 segmentos, um para cada escala: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$. O primeiro delta de cada seguimento é o valor central do sensor, neste caso, zero.....	70
Figura 26 - Taxas de compressão CR obtidas para cada escala do sensor.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre o R_b e DR, SF e BW	35
Tabela 2 - Comparativo das taxas de compressão dos algoritmos LEC e ALDC.....	42
Tabela 3 - Códigos comprimidos (códigos finais) e tamanhos para cada faixa de deltas com exemplos.....	50
Tabela 4 - Códigos decimais do sensor inercial ACCEL representando alguns valores do sinal de aceleração para cada faixa.	70
Tabela 5 - Parâmetros estatísticos da taxa de compressão CR para cada faixa do sensor.....	73
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos dos dados originais de cada eixo do acelerômetro para cada escala.	73
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos das diferenças de amostras sucessivas dos dados de cada eixo do acelerômetro para cada escala.	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project (Projeto de Parceria de Terceira Geração)
ACK	Acknowledgment (Confirmação)
ADC	Analog to Digital Converter (Conversor Analógico para Digital)
ALDC	Adaptive Lossless Data Compression (Compressão de Dados Sem Perdas Adaptativa)
AS	Application Server (Servidor de Aplicações)
BLE	Bluetooth Low Energy (BLE) (Bluetooth de Baixa Energia)
BW	Bandwidth (Largura de Banda)
comp_size	Compressed Size (Tamanho Comprimido)
CAGR	Compound Annual Growth Rate (Taxa de Crescimento Anual Composta)
CSS	Chirp Spread Spectrum (Espectro Espalhado por Chirp)
CR	Compression Rate (Taxa de Compressão)
CRave	Average Compression Rate (Taxa de Compressão Média)
CRmax	Maximum Compression Rate (Taxa de Compressão Máxima)
CRmin	Minimum Compression Rate (Taxa de Compressão Mínima)
CRstd	Standard Deviation of Compression Rate (Desvio Padrão da Taxa de Compressão)
DR	Data Rate (Taxa de Dados)
DHC	Delta/Huffman Compressor (Compressor de Deltas e Huffman)
ED	End Device (Dispositivo Final)
eMTC	enhanced Machine Type Communication (Comunicação de Tipo de Máquina Aprimorada)
Ethernet	Padrão de rede 1
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações)
FAN	Field Area Network (Rede de Área de Campo)
FEC	Forward Error Correction (Correção de Erro para Frente)
FSK	Frequency Shift Keying (Chaveamento por Deslocamento de Frequência)
GW	Gateway (estaçao base concentradora e conversora entre tipos de redes)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

IETF	Internet Engineering Task Force (Força-Tarefa de Engenharia de Internet)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
IP	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Industrial, Científico e Médico)
ITU	International Telecommunication Union (União Internacional de Telecomunicações)
LEC	Lossless Entropy Compression (Compressão de Entropia sem Perdas)
Li/SOCl ₂	Lithium thionyl chloride (Li/SOCl ₂) (Cloreto de Tionila de Lítio)
LoRa	Long Range (Longo Alcance)
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network (Rede de Longo Alcance e Área Amplia)
LPWAN	Low Power Wide Area Network (Rede de Longo Alcance e Baixa Potência)
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network (Rede Pessoal Sem Fio de Baixa Taxa)
LTE	Long Term Evolution (Evolução a Longo Prazo)
LTE-M	Long Term Evolution for Machines (Evolução a Longo Prazo para Máquinas)
MAC	Media Access Control (Controle de Acesso ao Meio)
MCU	Microcontroller Unit (Unidade de Microcontrolador)
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems (Sistemas Micro-Eletro-Mecânicos)
MIC	Message Integrity Code (Código de Integridade da Mensagem)
NB-IoT	Narrowband Internet of Things (Internet das Coisas de Banda Estreita)
NFC	Near Field Communication (Comunicação de Campo Próximo)
NS	Network Server (Servidor de Rede)
orig_size	Original Size (Tamanho Original)
PHY	Physical Layer (Camada Física)
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programável)
RD1	Receive Delay 1 (Atraso de Recepção 1)
RD2	Receive Delay 2 (Atraso de Recepção 2)
RX1	Receive Window 1 (Janela de Recepção 1)
RX2	Receive Window 2 (Janela de Recepção 2)
RF	Radio Frequency (Frequência de Rádio)

RSALBTT	Redes de Sensores com Alta Latência e Baixa Taxa de Transmissão
RSSI	Received Signal Strength Indication (Indicação de Força do Sinal Recebido)
RTC	Real Time Clock (Relógio de Tempo Real)
RX	Reception (Recepção)
SF	Spreading Factor (Fator de Espalhamento)
SS	Spreading Spectrum (Espalhamento de Espectro)
SNR	Signal-to-noise ratio (Relação Sinal-Ruído)
TCP	Transmission Control Protocol (Protocolo de Controle de Transmissão)
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillator (Oscilador de Cristal Compensado por Temperatura)
TX	Transmission (Transmissão)
UNB	Ultra Narrow Band (Banda Ultra Estreita)
UPL_BEG	Upload Begin (Início do Envio)
UPL_END	Upload End (Fim do Envio)
UPL_SEGM	Upload Segment (Segmento de Envio)
UPL_SEGM_ACK	Upload Segment Acknowledgment (Confirmação do Segmento de Envio)
Wi-SUN	Wireless Smart Utility Network (Rede de Utilidade Inteligente Sem Fio)
WPAN	Wireless Personal Area Network (Rede Pessoal Sem Fio)
WLAN	Wireless Local Area Network (Rede Local Sem Fio)
WNAN	Wireless Neighborhood Area Network (Rede de Área de Vizinhança Sem Fio)
WSL	Windows Subsystem for Linux (Subsistema do Windows para Linux)
WSN	Wireless Sensor Network (Rede de Sensores Sem Fio)
WWAN	Wireless Wide Area Network (Rede de Área Ampla Sem Fio)

SUMÁRIO

1	CONTEXTO DA PESQUISA.....	16
2	INTRODUÇÃO.....	17
2.1	OBJETIVOS	20
2.1.1	Objetivo geral.....	20
2.1.2	Objetivos específicos	20
2.2	JUSTIFICATIVA	21
2.3	CONTRIBUIÇÕES	22
2.4	ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	22
3	A seção 1, CONTEXTO DA PESQUISA.....	22
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
4.1	CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....	24
4.2	LORA.....	32
4.3	LORAWAN	35
4.4	TRABALHOS RELACIONADOS.....	40
5	ESTRATÉGIAS DE SEGMENTAÇÃO DE DADOS EM LORAWAN	44
6	COMPACTAÇÃO DE DADOS DE SENsoRES SEM FIO	49
7	DISPOSITIVO ED LORAWAN	53
7.1	MÓDULO LORA	56
7.2	SENSOR INERCIAL	56
7.3	MICROCONTROLADOR	57
7.4	ALIMENTAÇÃO	58
7.5	PCI E DIAGRAMA	58
8	MATERIAIS E MÉTODOS	61
8.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	62
8.3	COLETA DE DADOS.....	63

8.4	ANÁLISE DOS DADOS	63
8.5	MATERIAIS E AMBIENTE.....	64
8.5.1	Dispositivo Sensor LoRaWAN.....	64
8.5.2	Osciloscópio	64
8.5.3	Gerador de forma de ondas	64
8.5.4	Mini Vibration Shaker	64
8.5.5	Computador	65
8.5.6	Gateway LoRaWAN.....	65
8.5.7	Montagem do sistema	65
8.6	PROGRAMAS E FERRAMENTAS.....	66
8.6.1	Python	66
8.6.2	VSCODE.....	66
8.6.3	STM32CubeIDE	66
8.6.4	NI LabView	66
8.6.5	Firmware do ED LoRaWAN	67
8.6.6	Programa servidor no computador.....	68
9	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	69
10	CONCLUSÃO.....	75
10.1	TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	77

1 CONTEXTO DA PESQUISA

Atualmente, o Brasil conta com milhares de barragens de água das quais, algumas delas, estão próximas (ou até dentro) de áreas urbanas. Experiências passadas, como o incidente em Brumadinho e Mariana (MG), revelaram que dispor de tecnologias rápidas e eficazes de comunicação tem grande potencial para salvar vidas. O mais conhecido é o sistema de sirenes, que tem alcance bem limitado e custo alto. Em um país tão grande quanto o Brasil e com tantas barragens, criar mecanismos de proteção à população de acidentes como os mencionados tem grande impacto social.

Neste sentido, um projeto que visa desenvolver e otimizar tecnologias de (tele)comunicação para transmitir dados com mensagens de alerta, como preconiza o Plano de Ação de Emergência (PAE), especialmente para áreas com elevada densidade populacional urbana, é bastante relevante. Especialmente em um contexto de internet das coisas (IoT) que tem sido extensivamente fomentado justamente por seu baixo custo e grande alcance. Contudo, apresentam como grande limitação baixa transferências de dados.

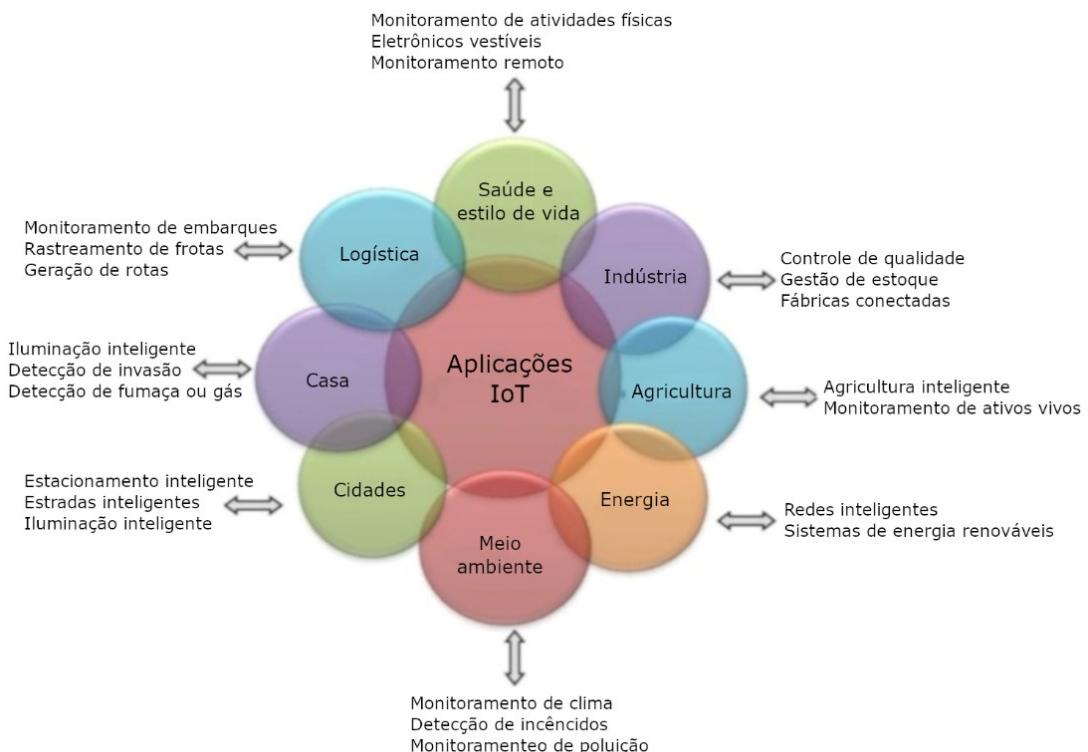
Para este contexto, esta pesquisa pretende empregar as inovações tecnológicas de IoT e soluções condizentes com o cenário das áreas afetadas, promovendo meios tecnológicos possibilitem o uso futuro desta tecnologia para aplicações de comunicação voltadas ao aviso de populações em caso de incidentes com barragens. Com isto, contribuir para o sucesso do envio de mensagens de orientação de forma mais assertivas e adequadas, conforme propósito dos objetivos do PAE. Para tanto, há de se desenvolver meios que permitam um maior volume de informações nestas tecnologias, que como esclarecido, ainda são limitadas por sua baixa transmissão de dados.

Ainda, embora o foco deste trabalho seja voltado a este contexto desenhado, vale ressaltar que tais desenvolvemos podem ser igualmente aplicados a inúmeros outros cenários e aplicações dos mais diversos possíveis, que exigem uma comunicação mais rápida e com maior largura de dados. Ainda, cabe destacar que esta pesquisa não tem como objetivo final o desenvolvimento de um dispositivo de comunicação em si, mas apenas a operacionalização tecnológica para isto através de tecnologias IoT.

2 INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio para a *Internet of Things* (IoT) (Internet das Coisas) têm se tornado cada vez mais comuns na indústria, agricultura, saúde, automação residencial, redes elétricas inteligentes e em muitas outras áreas conforme ilustrado na Figura 1 (Gada; Sayed, 2021; Gupta; Tanwar; Gupta, 2022; Pattar et al., 2018; Rana; Singh; Singh, 2021; Wang et al., 2021). Um dos protocolos utilizados atualmente para essas redes é o *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN¹) (Rede de Longo Alcance e Área Ampla), que é uma tecnologia de comunicação de longo alcance, baixa potência e baixa taxa de dados (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a).

Figura 1 - Aplicações da IoT



Fonte: Adaptado de (Rana; Singh; Singh, 2021)

Uma das principais vantagens do protocolo LoRaWAN é a sua capacidade de permitir a conectividade de muitos dispositivos em ampla área de cobertura com um único *gateway* (GW) (estação base concentradora e conversora entre tipos de redes). Isso significa que centenas de dispositivos podem ser conectados a uma única estação base (Van Den Abeele et al., 2017), o que torna o custo de implementação da rede muito baixo em comparação com

¹ LoRaWAN e LoRa Alliance são marcas registradas pela LoRa Alliance.

outras tecnologias. Além disso, a tecnologia LoRaWAN permite que os *End Device* (ED) (Dispositivo Final) operem com baterias por longos períodos, o que significa que elas podem durar anos antes de precisarem ser substituídas (Morin et al., 2017; Rana; Singh; Singh, 2021).

Outra vantagem do LoRaWAN é a sua capacidade de operar em áreas remotas e de difícil acesso, como áreas rurais, florestas e áreas de mineração. Isso é possível graças ao longo alcance e à capacidade de penetração em obstáculos físicos, como edifícios e árvores (Morin et al., 2017; Seye et al., 2018).

Em termos de custos totais de implantação e manutenção, o LoRaWAN é geralmente mais barato do que outras tecnologias sem fio, como a rede celular e a rede de satélite (Akram; Lakshmana, 2023).

Em resumo, o protocolo LoRaWAN é uma tecnologia sem fio de baixo consumo de energia e longo alcance que é ideal para aplicações IoT que envolvem sensores e dispositivos de baixa potência. Ela é capaz de fornecer conectividade confiável e robusta em áreas remotas e de difícil acesso. Seus principais benefícios são a baixa complexidade de implantação, baixo custo de implementação e longa duração da bateria dos dispositivos (Casals et al., 2017; Ismail et al., 2018; LoRa Alliance, 2022; Morin et al., 2017).

No entanto, existem algumas desvantagens no uso do protocolo LoRaWAN. Uma delas é a baixa taxa de dados que a tecnologia LoRa permite, variando entre 250 bps e 21,9 Kbps em função dos *Spreading Factor* (SF) (Fator de Espalhamento) e *bandwidth* (BW) (Largura de Banda) configurados (Committee, 2018, 2022). Isso significa que a transferência de grandes quantidades de dados, como imagens de alta resolução ou até mesmo de sensores que geram formas de onda, não é possível ou recomendado com essa tecnologia. Neste cenário, os ED ficariam muito tempo ativados, em modo de transmissão, enviando pacotes de *uplink*, o que levaria a dois problemas. O primeiro seria o aumento do consumo de energia do ED. O segundo seria o tráfego excessivo na rede, gerando erros e a necessidade de elevar o número de retransmissões destes pacotes do ED ao GW (Casals et al., 2017; Morin et al., 2017). Este segundo problema, só pioraria com a já limitada largura de banda disponível na faixa *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) (Industrial, Científico e Médico) que, sozinha, já pode levar a problemas de congestionamento da rede em áreas densamente povoadas (Committee, 2018, 2022; Hardesty, 2023; Morin et al., 2017). Ademais, a falta de cobertura através de uma infraestrutura pública LoRaWAN é ainda um problema recorrente em várias cidades. Felizmente isso pode ser contornado com o emprego de gateways privados (LoRa Alliance, 2022).

Ainda no viés das desvantagens referente ao consumo do ED, a capacidade limitada das baterias restringe a energia disponível para eles. Em locais de difícil acesso e devido à implantação em larga escala, recarregar ou substituir baterias de maneira econômica pode não ser viável. Para economizar energia, é essencial reduzir o volume de dados trocados entre os ED e o GW, especialmente os transmitidos do ED (*uplink*) em relação aos recebidos por ele (*downlink*), já que o módulo de comunicação por rádio, parte integrante de um ED, consome a maior parte da energia nesses dispositivos quando está realizando comunicação *uplink*. Nesta situação, diminuir a quantidade de retransmissões e comprimir dados tornam-se de extrema importância (Casals et al., 2017; Kolo et al., 2015; Morin et al., 2017; Rana; Singh; Singh, 2021).

Muitos estudos e pesquisas tem sido feito para comparar a performance dos algoritmos de compressão em redes de sensores sem fio, que são mencionados em detalhes na seção 3.4, TRABALHOS RELACIONADOS, desta dissertação. Resumidamente, eles indicam que um dos fatores essenciais na seleção do tipo de algoritmo é a capacidade de equilibrar a eficiência da compressão com o consumo de energia e os recursos limitados de processamento e de memória dos ED. Não menos importante, deve-se considerar a complexidade da implementação e a compatibilidade com os protocolos de comunicação utilizados na rede. Escolher o algoritmo certo pode otimizar o desempenho da rede, prolongar a vida útil das baterias dos dispositivos e garantir a integridade e a confiabilidade dos dados transmitidos. Portanto, a decisão sobre qual algoritmo de compressão utilizar deve ser baseada nos requisitos específicos da aplicação e das características da rede de sensores sem fio. Finalmente, a confiabilidade exigida por algumas aplicações demanda que os dados obtidos pelos ED não possam ser corrompidos pelo processo de compressão (Ketshabetswe et al., 2021; Kolo et al., 2015; Saidani; Jianwen; Mansouri, 2020).

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal fornecer uma contribuição no campo das estratégias de segmentação e transmissão no protocolo de comunicação durante o *uplink* e no campo da compressão sem perdas de dados, em redes de sensores sem fio de baixa latência e baixa taxa de transmissão. A intenção é permitir que essas redes, que originalmente foram projetadas e são amplamente utilizadas para transmitir quantidades limitadas de dados, sejam capazes de enviar um volume maior de dados através da redução do número de pacotes retransmitidos e da quantidade de dados trafegados devido ao algoritmo de compressão sem perdas.

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar e propor uso de redes de sensores com alta latência e baixa taxa de transmissão (RSALBTT), como a LoRaWAN, para enviar uma quantidade maior de dados para o qual este tipo de rede foi concebido, propondo o uso de estratégias de segmentação e transmissão de dados no protocolo de comunicação e, também, a compactação de dados factível para dispositivos sensores sem fio alimentados com baterias. Especificamente, tornar mais viável o uso desta tecnologia para aplicações de comunicação em massa para que possam ser futuramente usadas, dentre outras aplicações gerais, em aviso de incidentes em barragens para populações metropolitanas.

2.1.2 Objetivos específicos

Contextualizar os cenários de usos comuns de redes de sensores sem fio com alta latência e baixa taxa de transmissão, analisando os pontos fortes e fracos para dispositivos alimentados por baterias.

Analizar estratégias utilizadas em outros tipos de redes com potencial para serem empregadas de forma viável em RSALBTT.

Implementar a estratégia de segmentação e transmissão de dados no protocolo de comunicação e, também, a compactação de dados.

Desenvolver e montar o circuito eletrônico e *firmware* embarcado, em linguagem C, de um sensor sem fio LoRaWAN classe A, alimentado por bateria, para servir de plataforma de testes para o algoritmo de segmentação e compressão, com domínio das diversas camadas do projeto. Nos dispositivos classe A, cada *uplink* (transmissão para o *gateway*) é seguida por duas janelas de *downlink* (recepção do *gateway*). O momento de transmissão é agendado pelo próprio dispositivo. Esta operação classe A é a mais eficiente em termos de energia para dispositivos na tecnologia LoRaWAN. Comunicações *downlink* do servidor em outros momentos terão que aguardar até o próximo *uplink* agendado (Committee, 2018).

Realizar testes práticos com o sensor em uma rede LoRaWAN para validar as implementações, gerar dados para serem analisados e apresentar os resultados.

2.2 JUSTIFICATIVA

Redes de sensores com alta latência e baixa taxa de transmissão são geralmente utilizadas para envio esporádico de pequenas quantidades de dados. Esse é o caso típico para monitoramento de dados de sensores (Ketshabetswe et al., 2019; Obaidat; Misra, 2014; Rault; Bouabdallah; Challal, 2014; Zijie et al., 2023). É comum enviar apenas algumas dezenas de bytes por dia, normalmente o suficiente para a maioria das aplicações (Committee, 2018, 2022; Hardesty, 2023; LoRa Alliance, 2022). No entanto, pode ser necessário enviar uma quantidade maior de dados, como arquivos de *log* (registro) ou *waveforms* (formas de onda), que podem chegar a algumas dezenas de quilobytes. Nessas situações, o ideal seria utilizar redes de dados com maior capacidade de transmissão e menor latência, como o LTE-M, derivada da LTE que foi originalmente criada como padrão para transferência de dados em alta velocidade entre telefones móveis e baseada nas tecnologias de rede GSM/UMTS (Al-Fuqaha et al., 2015; Flore, 2016). Porém, este tipo de rede, apesar de amplamente utilizada, não é onipresente, ou seja, não está disponível em todos os locais e a implantação de uma infraestrutura não é viável em locais sem demandas muito altas em diversos tipos de aplicação além das redes de sensores, tais como telefonia celular. Além disso, usar dispositivos LTE-M entraria em conflito com a vida útil desejada da bateria ou mesmo com a necessidade de desenvolver um novo *hardware* (dispositivo eletrônico) por se tratar de dispositivos com maior consumo quando fazendo uso da rede (3GPP, 2015; Casals et al., 2017; Committee, 2022; Rana; Singh; Singh, 2021; Rohde and Schwarz GmbH, 2016; SEMTECH, 2024; Yuksel; Fidan, 2021).

Dispositivos sensores LoRaWAN classe A podem aumentar ainda mais esse desafio, pois os dados do *gateway* só serão entregues ao sensor durante as janelas de recepção deste, após o envio de um quadro pelo sensor (Committee, 2018, 2022). Isso torna difícil criar estratégias de segmentação e transmissão para grandes quantidades de dados, aumentando o tempo de comunicação e potencialmente gerando uma grande quantidade de retransmissões.

Portanto, este trabalho visa abordar esses desafios, propondo soluções que permitam o envio eficiente de maiores volumes de dados em redes de sensores de baixa latência e baixa taxa de transmissão. Através da implementação de uma estratégia de segmentação e retransmissão tardia de pacotes perdidos, e da aplicação de algoritmo de compressão sem perdas, espera-se reduzir significativamente o número de retransmissões e a quantidade de dados trafegados. Isso não apenas aumentará a eficiência da comunicação, mas também permitirá que essas redes, originalmente projetadas para o envio de pequenas quantidades de

dados, suportem novas aplicações que demandam maiores volumes de dados mantendo a viabilidade econômica e as restrições energéticas.

2.3 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho discute estratégias de segmentação e compressão de dados para enviar formas de onda por meio de redes de sensores LoRaWAN classe A que operam com fator de espalhamento 12 (*spread factor* 12 ou SF12) na região LA915A (Everynet, 2022) (variante AU915-928 (Committee, 2022)). A escolha do SF12 é devida ao requisito do projeto em priorizar o alcance de maiores distância em relação a obtenção de maiores taxas de transmissão.

Também é implementado um algoritmo de segmentação e compressão com baixo custo computacional, adequado para ser executado em microcontroladores alimentados com bateria em dispositivos sensores sem fio. Baseado no princípio *Lossless Entropy Compression* (LEC) (Compressão de Entropia sem Perdas) (Kolo et al., 2012, 2015), são propostas melhorias no trabalho original além de uma implementação em C pública, algo até então inexistente. Para simplificar a implementação de serviços em nuvem, um *binding* em Python também é tornado público para uso, assim como exemplos de aplicação (Fagundes; Almeida, 2022).

Durante a pesquisa, também foi desenvolvido para melhor controle dos parâmetros dos testes, um *hardware* de um dispositivo sensor microcontrolado com modem LoRaWAN, sensor inercial e alimentado com bateria.

Finalmente, foram gerados dados e resultados através de testes práticos para validação do que foi proposto.

2.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A seção 1, CONTEXTO DA PESQUISA e seção 2, INTRODUÇÃO, apresentam o contexto no qual se insere o tema deste trabalho, bem como sua importância e relevância para a área desta pesquisa, a escolha da tecnologia LoRaWAN e como a abordagem desta dissertação contribui para os estudos já realizados. Também são definidas os objetivos, a justificativa e as contribuições deste trabalho.

Na seção 3, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, são analisadas em detalhes a importância e relevância atuais e perspectivas de crescimento da IoT. As definições e conceitos referentes a IoT são abordadas, juntamente com os de redes sem fio, redes de sensores, redes de área ampla e baixa potência e quais características tornam LoRaWAN uma das opções

preferidas frente as outras para atender as demandas de IoT. Depois, são definidos os princípios de funcionamento da camada física LoRa², as especificações LoRaWAN e os aspectos regionais AU915. Além disso, é apresentado o resultado da revisão da literatura referente aos trabalhos relacionados identificando a contribuição desta dissertação.

Na seção 4, ESTRATÉGIAS DE SEGMENTAÇÃO DE DADOS EM LORAWAN, inicia-se a contribuição desenvolvida neste trabalho onde é discutido o problema de segmentação de dados de aplicação, que geralmente é ignorado na literatura, visto que não é um caso de uso típico do LoRaWAN e é apresentada e implementada uma proposta que faz a retransmissão tardia dos segmentos de dados perdidos.

Em seguida, na seção 5, COMPACTAÇÃO DE DADOS DE SENSORES, é apresentada uma implementação da estratégia de compressão originalmente definida em (Marcelloni; Vecchio, 2009b). Melhorias e contribuições para o algoritmo original também são discutidas, assim como as implementações alternativas e suas implicações no campo.

Na seção 6, DISPOSITIVO ED LORAWAN, são apresentadas as partes do *hardware* desenvolvido e suas principais características.

Na seção 7, MATERIAIS E MÉTODOS, a metodologia e todo o escopo dos testes realizado é definida juntamente com um roteiro de testes. Também será explicado como os dados colhidos foram analisados. Por fim, toda a infraestrutura utilizada para realização dos testes é exposta e detalhada.

Finalmente, resultados experimentais em LoRaWAN são apresentados e discutidos na seção 8, RESULTADOS EXPERIMENTAIS, e conclusões das análises podem ser encontradas na seção 9, CONCLUSÃO.

² LoRa é uma marca comercial utilizada pela Semtech Corporation e suas subsidiárias.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

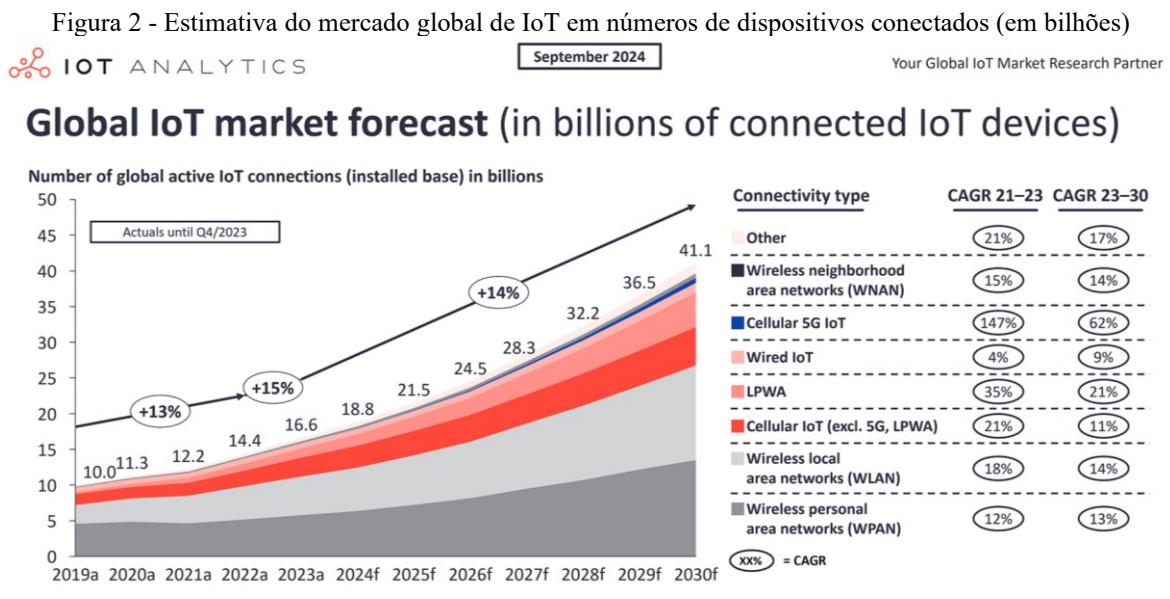
Nesta seção, a subseção 3.1 contextualiza o trabalho no âmbito das tecnologias envolvidas, citando as pesquisas e estudos existentes, começando com a ênfase na relevância mercadológica histórica e nas demandas projetadas para o futuro e, depois, estabelecendo uma base conceitual sobre as tecnologias abordadas, iniciando com Internet das Coisas e passando pelo caminho das Redes sem Fio, Redes de Sensores sem Fio, Rede de Área Ampla e Baixa Potência, afunilando estes grupos até chegar nas subseções específicas 3.2, para LoRa, e 3.3 para LoRaWAN, justificando a escolha delas. Por fim, na subseção 3.4, são abordados os trabalhos relacionados relevantes, focando na explicação dos estudos e pesquisas já realizados sobre algoritmos de compactação, indicando a importância deles para este trabalho.

3.1 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

A *Internet of Things* (IoT) (Internet das Coisas) pode ser definida como uma rede de dispositivos físicos, embarcados com programas, sensores ou atuadores, conectados à Internet, que conseguem perceber ou atuar no ambiente em torno, em qualquer momento e lugar, sendo capazes de coletar e compartilhar dados de maneira contínua uns com os outros (Gupta; Tanwar; Gupta, 2022). É uma tecnologia que transforma a maneira como os seres humanos obtém informações e interagem com o meio em diversas situações, tais como, monitoramento ambiental, gestão de frota, casas conectadas, automação industrial, redes de energia inteligentes, cuidados com a saúde dentre outras. Ela é uma abstração do mundo físico no virtual ou digital com a intenção de melhorar a qualidade de vida com pouca ou nenhuma intervenção humana.

Uma pesquisa de mercado realizada pela ABI (ABI Research, 2013), mostrou que existiam mais de 10 bilhões de dispositivos IoT conectados em 2013. Conforme o relatório “State of IoT Summer 2024” da IoT Analytics (Sinha, 2024), havia 16,6 bilhões de dispositivos IoT conectados em 2023, marcando um crescimento de 15% em relação a 2022. A IoT Analytics projeta que esse número aumentará para 18,8 bilhões até o fim de 2024 e de mais de 40 bilhões em 2030, conforme pode ser visto na Figura 2. Nesta pesquisa, não foram considerados computadores, laptops, telefones fixos, celulares ou tablets de consumidores. São contados apenas nós (dispositivos) ativos ou *gateways* que concentram os sensores finais, e não cada elemento sensor ou atuador individualmente. Na Figura 2, a *Wireless Neighborhood Area Network* (WNAN) (Rede de Área de Vizinhança Sem Fio) incluem as redes *mesh* (malha) de

longo alcance, como *Wireless Smart Utility Network* (Wi-SUN) (Rede de Utilidade Inteligente Sem Fio). As Celulares incluem as 2G, 3G, 4G e 5G. As redes cabeadas incluem *ethernet* e *fieldbuses* (barramentos industriais de campo) utilizadas nas conexões dos *Programmable Logic Controller* (PLC) (Controlador Lógico Programável) ou módulos de Entrada e Saída (E/S). As *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) (Rede de Área Ampla e Baixa Potência) incluem as redes de baixa potência licenciadas e não licenciadas. As *Wireless Local Area Network* (WLAN) (Rede Local Sem Fio) incluem Wi-Fi e protocolos relacionados. As *Wireless Personal Area Network* (WPAN) (Rede Pessoal Sem Fio) incluem Bluetooth, Zigbee, Z-Wave ou similar. E “Outros” incluem satélite e redes proprietárias não classificadas de qualquer alcance.



Pode-se destacar na Figura 2 que o número de conexões utilizando redes sem fio, para dispositivos IoT, é muito maior do que as cabeadas (*Wired IoT*), e as *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) (Taxa de Crescimento Anual Composta) atuais e projetadas mostram que esta relação será amplificada até 2030.

A IoT cresceu intensamente na última década e continuará aumentando rapidamente, conectando bilhões de dispositivos à Internet, graças, justamente, ao desenvolvimento de novas tecnologias sem fio mais acessíveis e, também, aos sensores e dispositivos digitais com processamento embarcado de baixo consumo de energia com custos e tamanhos cada vez menores.

As *Wireless Networks* (WN) (Redes Sem Fio) são preferidas em relação às redes com fio para IoT devido à sua flexibilidade, escalabilidade e relação custo-benefício (Tyagi, 2022). Instalar um dispositivo sem fio em um local remoto ou de difícil acesso é muitas vezes mais barato e mais fácil do que instalar um cabeado. Apesar do custo dos componentes eletrônicos de um transceptor sem fio ser maior do que o de um sistema com fio, o **custo total geral** dos componentes, instalação e manutenção de um sistema sem fio é menor do que o de um sistema com fio (Papadimitriou et al., 2002). As redes sem fio permitem implantar dispositivos em uma grande área de forma rápida, eficiente e sem a limitação da posição fixa dos pontos de conexão de uma rede cabeada. As redes sem fio também permitem mobilidade. Um dispositivo pode ser movido livremente dentro do alcance da rede, além de poder ser acessada remotamente com uma conexão sem fio. É relativamente simples aumentar a rede ou reposicionar os dispositivos usando vários extensores de alcance ou dispositivos repetidores sem as restrições de cabeamento físico (Pahlavan; Levesque, 2005). Em estruturas físicas já construídas sem redes, as redes sem fio podem ser a única alternativa onde a instalação de cabos de rede é proibida ou muito custosa. Um nó, com comunicação sem fio implementada, pode ser integrado diretamente a uma rede sem fio já existente. As redes sem fio eliminam os custos associados as falhas de cabos e substituição de cabos, reduzindo o tempo de inatividade da rede e as despesas de manutenção. Além disso, o tempo de instalação reduzido e os custos menores de material contribuem para uma economia geral nos custos de implantação da rede sem fio (Papadimitriou et al., 2002).

Os estados das “coisas”, sob o aspecto da IoT, podem ser descritos em termos das quantidades físicas que os representam. Portanto, dispositivos com elementos sensores e atuadores, ou simplesmente *end nodes* (dispositivos finais da rede) devem ser utilizados para, respectivamente, obter dados e atuar sobre estas variáveis físicas (Zijie et al., 2023). Neste contexto, surgem as *Wireless Sensor Network* (WSN) (Rede de Sensores Sem Fio) como uma junção interdisciplinar de campos de pesquisas e tecnologias para estudar e desenvolver dispositivos ou sistemas de monitoramento e controle de variáveis físicas utilizando comunicação sem fio que atendam aos requisitos da IoT.

A demanda pela implantação de quantidades massivas de *end nodes* impõe as seguintes características a eles (Zijie et al., 2023):

- a) baixo custo. O menor aumento de custo gera um impacto significativo no montante final devido à alta escala deste tipo de rede;
- b) facilidade instalação e utilização para reduzir custos com instaladores e operadores ou usuários;

- c) alta durabilidade da bateria. A depender da aplicação, as baterias devem durar por dias a vários anos ou até décadas. Alguns casos utilizam baterias recarregáveis, outros apenas baterias primárias. De qualquer forma, trocas recorrentes de baterias descarregadas seriam inviáveis economicamente e ambientalmente;
- d) comunicação confiável e estável. A maioria dos ambientes apresentam muita interferência e ruídos eletromagnéticos. Isto, somado a restrita quantidade de energia e poucos recursos de comunicação disponíveis, limitam o alcance e taxa de transmissão do *end node* exigindo o uso de arquiteturas de redes, meios de acesso e protocolos inteligentes e de baixíssimo consumo de energia;

Portanto, dispositivos de baixo custo, com tecnologias de processamento de dados e comunicação sem fio, capazes de sentir e atuar no ambiente no qual estão inseridos são a base para a construção das WSN (Gupta; Madan, 2023; Zijie et al., 2023).

Estudos foram feitos para determinar os requisitos específicos dos vários tipos de aplicações nos quais são utilizadas as WSN em (Rault; Bouabdallah; Challal, 2014). O funcionamento por longos períodos, de forma autônoma, dos dispositivos das WSNs é um requisito comum e muito desejado. No entanto, ele é diretamente conflitante com os escassos recursos de energia das baterias dos *end nodes*, o que impacta na vida útil da rede. Isto é claramente percebido em aplicações de monitoramento de estruturas, agricultura de precisão, monitoramento de sistemas de transportes nos quais nem sempre é possível trocar as baterias ou recarregá-las devido ao seu número, custo de manutenção e inacessibilidade de acordo com os estudos. Mesmo em aplicações, por exemplo, de saúde, que podem tolerar substituição da bateria, trocas recorrentes prejudicam a experiência do usuário e dificultam a ampla utilização (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a).

As tecnologias de radiofrequência (RF), como WLAN padrão IEEE 802.11, Bluetooth padrão IEEE 802.15.1 e *Near Field Communication* (NFC) (Comunicação de Campo Próximo), possuem um alcance de comunicação limitado. WLAN é amplamente utilizado para conectar dispositivos em rede local sem fio em alta velocidade. Bluetooth é ideal para dispositivos próximos, como fones de ouvido e smartphones, enquanto o NFC é adequado para pagamentos e troca rápida de informações entre dispositivos a poucos centímetros de distância. Elas não têm o alcance que muitas aplicações IoT exigem.

As redes celulares como 2G, 3G, 4G e 5G, para aplicações de longo alcance, muitas vezes sofrem com a baixa duração da bateria e podem ter lacunas na cobertura. As tecnologias celulares para o mercado consumidor em massa, também são frequentemente descontinuadas. Como muitos dispositivos IoT são implantados por 10 anos ou mais, descontinuar a cobertura

celular não é uma opção viável. Por terem sido inicialmente projetadas para transmissão de voz e dados e não sensorialmente IoT, elas apresentam desempenho abaixo do esperado para redes de sensores sem fio de baixo consumo de energia e baixo custo (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a).

As tecnologias de *mesh* (malha), como Zigbee padrão IEEE 802.15.4, são mais adequadas para média distância, cobrindo apenas algumas centenas de metros, como casas inteligentes ou edifícios inteligentes (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a). Elas têm baixa taxas de dados e são pouco eficientes em termos de consumo de energia dos *end devices* e da quantidade significativa de elementos coordenadores de rede necessários para esta topologia *mesh*.

O IEEE 802.15.4 define a operação de uma *Low Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN) (Rede Pessoal Sem Fio de Baixa Taxa). Ele especifica a camada física e o controle de acesso à mídia para essas redes. O foco é em comunicação de baixo custo e baixa velocidade entre dispositivos próximos, com consumo mínimo de energia. Na emenda IEEE 802.15.4g, são abordados os requisitos de redes de baixa taxa de dados e sem fio para medição inteligente de serviços de utilidade pública tais como eletricidade, água e gás, conhecidos como *smart grids*, e são definidas camadas físicas alternativas, bem como apenas as modificações no *Media Access Control* (MAC) (Controle de Acesso ao Meio) necessárias para suportar a implementação destas redes (802.15 WG, 2012).

Neste contexto, foi desenvolvida a tecnologia *Wireless Smart Utility Networks* (Wi-SUN) (Redes Inteligentes de Utilidade Sem Fio) baseada em alguns padrões, dentre eles o IEEE 802.15.4g para a camada física. Ela foi elaborada para ser uma Field Area Network (FAN) (Rede de Área de Campo) de baixa potência, com topologia em malha (Astudillo León et al., 2023).

Mesmo com o aumento de área de cobertura proporcionado pela emenda IEEE 802.15.4g, as Wi-SUN possuem menor alcance se comparados ao LoRa. Enquanto, o primeiro pode alcançar até 800 metros em áreas rurais e 7 Km ao ar livre, o último pode alcançar distâncias de 5 Km em áreas urbanas e até 15 Km em áreas rurais em detrimento de menor taxa de dados (Astudillo León et al., 2023). Além disso, a cobertura adequada é atingida com o aumento da quantidade de dispositivos finais e coordenadores para atingir a densidade suficiente que a topologia *mesh* deste tipo de rede necessita. Isto pode trazer maior complexidade de implementação e gerenciamento. Ademais, a infraestrutura pode ser mais cara devido a necessidade dos nós de repetição e maior densidade da rede para garantir a confiabilidade. (Astudillo León et al., 2023; Win-SUN Alliance, 2024).

Embora Bluetooth, Zigbee e Wi-Fi sejam adequados para conectividade IoT de nível consumidor, muitas aplicações de IoT, por exemplo, em áreas industriais e comerciais, não são atendidas de forma econômica onde um grande número de dispositivos de baixa potência em uma ampla área precisa ser suportado. Essas limitações tornam essas tecnologias inadequadas para aplicações de IoT que requerem comunicação a distâncias maiores, como em cenários industriais ou cidades inteligentes.

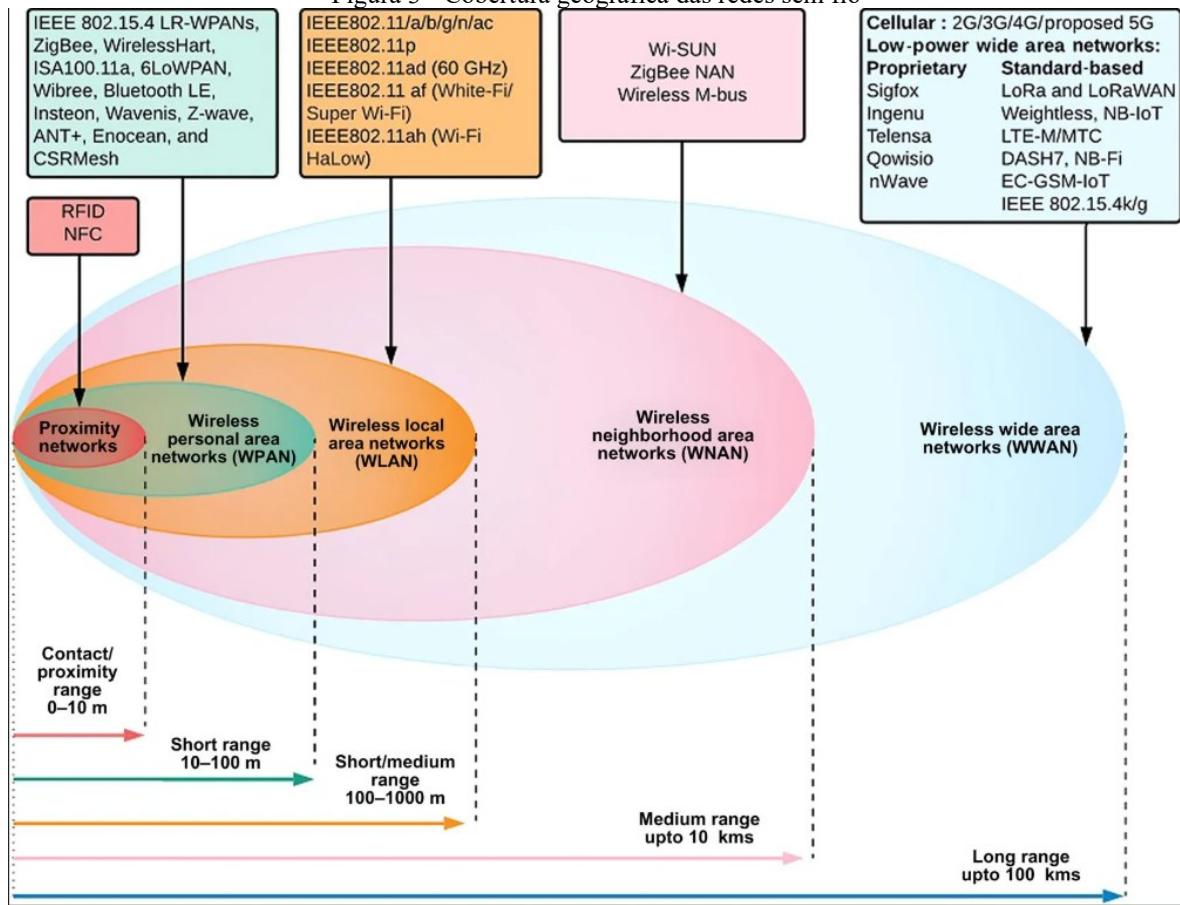
Neste âmbito, tecnologias, classificadas como *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) (Rede de Área Ampla e Baixa Potência), entraram no escopo de desenvolvimento de diversos grupos e organizações, tais como *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) (Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações), *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) (Projeto de Parceria de Terceira Geração) e *Internet Engineering Task Force* (IETF) (Força-Tarefa de Engenharia de Internet) para padrões de rede abertos.

Além deles, outros grupos ou empresas trabalharam em padrões proprietários como LoRa Alliance, Weightless SIG e a DASH7 Alliance (Khan; Yuce, 2019). Todos eles buscam, no contexto de áreas geográficas extensas com demanda de implantação de grandes quantidades de nós, atender as demandas de baixo consumo de energia elétrica, transmitir pequenos pacotes de dados com baixa taxa de transmissão e que operem, durante muito tempo, sem manutenção ou, até mesmo, serem descartáveis.

Em termos de área de cobertura, as LPWAN são classificadas como *Wireless Wide Area Network* (WWAN) (Rede de Área Ampla Sem Fio) conforme ilustrado na Figura 3 compreendendo distâncias entre 10 e 100 Km.

Além dos outros requisitos, este segmento da IoT, para cobrir grandes distâncias e baixo consumo de energia, é muito sensível aos custos. Isto é, ao mesmo tempo, a causa e a justificativa como mostram as estimativas de que ele é o segundo maior grupo de dispositivos conectados à Internet (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a; Sinha, 2024), abrangendo soluções proprietárias e padronizadas por normas.

Figura 3 - Cobertura geográfica das redes sem fio



Fonte: (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a)

Ao contrário das tecnologias sem fio mencionadas anteriormente, o LPWAN fornece conectividade mais ampla, possui protocolos mais eficiente em termos de consumo de energia (Rana; Singh; Singh, 2021), permitindo que mais aplicações IoT sensíveis ao custo sejam implantadas. No entanto, uma grande desvantagem é a quantidade de dados que podem ser transmitidos (Anedda et al., 2018).

Dentre os padrões presentes na LPWAN, Sigfox e LoRa são duas tecnologias de comunicação sem fio que se destacam por operarem em bandas de frequência *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) (Industrial, Científico e Médico), que são bandas de frequência não licenciadas, permitindo a comunicação sem a necessidade de licenças específicas (Committee, 2018; Sigfox, 2024). Isto é uma vantagem significativa em relação aos padrões *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT) (Internet das Coisas de Banda Estreita) e *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) (Evolução a Longo Prazo para Máquinas) que são ambos padrões da 3GPP que operam no espectro licenciado (Flore, 2016).

Embora o NB-IoT e LTE-M possam oferecer taxas de dados mais altas e menor latência, os benefícios do LoRaWAN em termos de custo, escalabilidade e flexibilidade de implantação fazem dele a escolha preferida para muitas aplicações de IoT. Enquanto o protocolo LoRaWAN

é um padrão de baixa potência projetado para LPWAN, com uma vida útil de bateria comprovada em campo de 10 a mais de 15 anos, o NB-IoT e LTE-M se baseiam no complexo protocolo 3GPP ajustado para LPWAN, que não alcançam desempenho de bateria necessário em diversos casos. Em termos de estrutura de negócios, LoRaWAN apresenta maior flexibilidade por permitir implantações tanto em redes públicas quanto privadas, enquanto NB-IoT e LTE-M permitem apenas redes privadas (LORA ALLIANCE, 2022; MORIN et al., 2017).

Sigfox é uma solução proprietária LPWAN, de baixo custo e energia, para conectar massivamente dispositivos sensores. Atualmente, pertence ao provedor e integrador UnaBiz³ (Sigfox, 2024). Ela foi concebida para transmitir mensagens leves (12 bytes, excluindo cabeçalhos de payload). Basicamente, os elementos das redes são os mostrados na Figura 4. O ciclo de vida de uma mensagem Sigfox consiste em acordar o dispositivo, transmitir a mensagem usando sua antena de rádio que opera nas bandas de frequências de 868 MHz na Europa ou 915 MHz no Estados Unidos da América utilizando tecnologia *Ultra Narrow Band* (UNB) (Banda Ultra Estreita). Após isto, múltiplas estações rádio base dedicadas receberão a mensagem. As estações base enviam a mensagem para a nuvem Sigfox e esta envia a mensagem para a camada de aplicação. Estações bases são compostas por três elementos principais:

- a) Uma antena, para receber mensagens pelo ar, geralmente implantada em pontos altos ou torres;
- b) Um amplificador de baixo ruído, para amplificar o sinal e filtrar o ruído;
- c) Um ponto de acesso, que entende as mensagens da tecnologia Sigfox e as envia para nuvem.



Fonte: (Sigfox, 2024)

³ No Brasil, o acesso a infraestrutura (antenas, pontos de acesso, nuvem etc) está disponível através do pagamento de assinatura ao provedor de conectividade **WND Brasil**.

As taxas disponíveis são 100 b/s para uma largura de banda de 100 Hz e 1000 b/s para uma largura de canal de 1 kHz na Europa e 600 b/s nos EUA. Com uma sensibilidade de -140 dBm, seu alcance anunciado é de cerca de 40 km. Dispositivos Sigfox podem transmitir até 140 mensagens por dia para a estação base. A regulamentação do ETSI impõe uma limitação de capacidade, o que leva a um ciclo de trabalho máximo de 0,1% ou 1% em 863 - 870 MHz dependendo da sub-banda selecionada (Morin et al., 2017) . Note que 140 mensagens por dia correspondem à limitação de ciclo de trabalho de 1% com uma implementação Sigfox de 100 b/s. Essa abordagem permite a comunicação em longas distâncias com baixa potência e alta resistência a interferências.

O protocolo Sigfox garante a longa duração das baterias, pouca ou nenhuma configuração para entrada dos dispositivos na rede e baixíssimo custo geral para enviar pequenas mensagens ou notificações, permitindo que, também, possa ser utilizado como uma solução complementar para outros tipos de redes.

Em comparação ao Sigfox, o padrão LoRa permite taxas de dados mais altas e tamanhos de payload maiores, o que é útil para aplicações que requerem mais dados. Além disso, ele permite a criação de redes privadas, trazendo melhor controle sobre a gestão de rede e infraestrutura, sendo que no SigFox, a rede é gerenciada pelos operadores em cada país ou região (Committee, 2018; Hardesty, 2023; Ketshabetswe et al., 2019; Sigfox, 2024). Por fim, o LoRa, juntamente com LoRaWAN são padrões abertos e possuem uma grande comunidade de suporte e desenvolvimento, além da LoRa Alliance que é uma organização com muitos membros e parceiros (LoRa Alliance, 2022).

Pelos motivos expostos anteriormente, e, aprofundados nas subseções seguintes, os padrões LoRa e LoRaWAN foram escolhidos para serem o foco deste trabalho e são discutidos nas próximas seções.

3.2 LORA

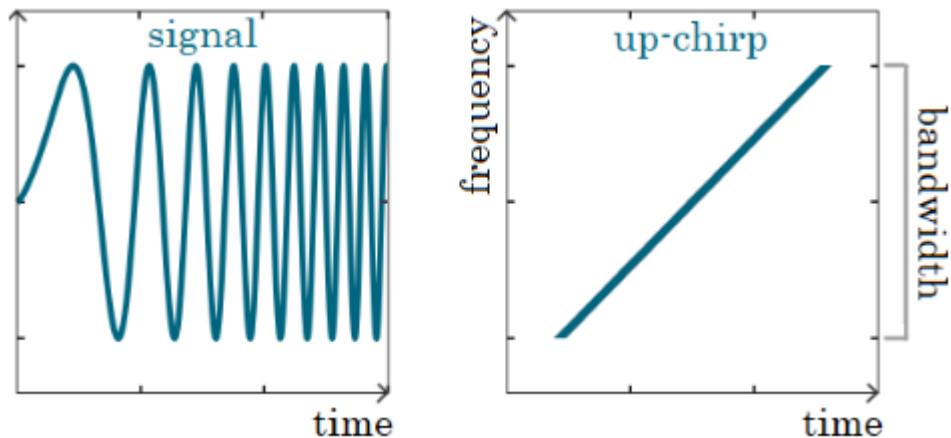
O LoRa surgiu nos últimos anos como uma tecnologia de camada física (PHY) sem fio que oferece comunicação de longo alcance para dispositivos de Internet das Coisas (IoT) de baixa potência. A arquitetura LoRaWAN adiciona as camadas de *Media Access Control* (MAC) (Controle de Acesso ao Meio) e de aplicação, e define uma topologia estrela de estrelas adequada para muitas e diversas aplicações de IoT.

Muitas redes sem fio legadas utilizam a modulação por *Frequency Shift Keying* (FSK) (Chaveamento por Deslocamento de Frequência) por ser muito eficiente em consumo de energia. LoRa é baseado na modulação por *Chirp Spread Spectrum* (CSS) (Espectro Espalhado por Chirp), que mantém as características de baixo consumo de energia da modulação FSK, mas aumenta substancialmente o alcance da comunicação. O CSS tem sido usado em comunicações militares há muitos anos devido a capacidade de alcançar longas distâncias e ter robustez contra interferências (Secgin, 2023). O LoRa foi a primeira aplicação CSS de baixo custo para uso comercial disponível no mercado. Ela foi desenvolvida pela empresa francesa Cycleo, que depois, em 2012, foi adquirida pela Semtech Corporation.

LoRa é uma tecnologia que modula o sinal portador da banda ISM sub-GHz utilizando uma técnica CSS proprietária que oferece um equilíbrio entre sensibilidade do receptor e *Data Rate* (DR) (Taxa de Dados) do transmissor, operando com um bandwidth (BW) (Largura de Banda) fixa de 125 kHz ou 500 kHz para *uplink* (subida) e 500 kHz para *downlink* (descida). Além disso, LoRa utiliza seis *Spreading Factor* (SF) (Fator de Espalhamento) ortogonais, SF7 a SF12 (Committee, 2022), permitindo que a rede otimize de forma adaptativa os níveis de potência e DR dos *end nodes* ou *end devices* (ED) (dispositivo nó final de rede) conectados para preservar a vida útil da bateria, pois os ED próximos a um *gateway* podem transmitir dados com um SF baixo, necessitando de pouca performance do canal. Em contrapartida, os ED distantes do *gateway* precisam usar um SF maior para aumentar a sensibilidade de recepção, embora resulte em uma DR menor (Khan; Yuce, 2019; Rana; Singh; Singh, 2021; SEMTECH, 2024). Dito de outra forma, o SF é um parâmetro que controla quão espalhado no tempo cada bit de dados é codificado, utilizando mais símbolos para SF maiores. Cada símbolo LoRa é composto de 2^{SF} chirps.

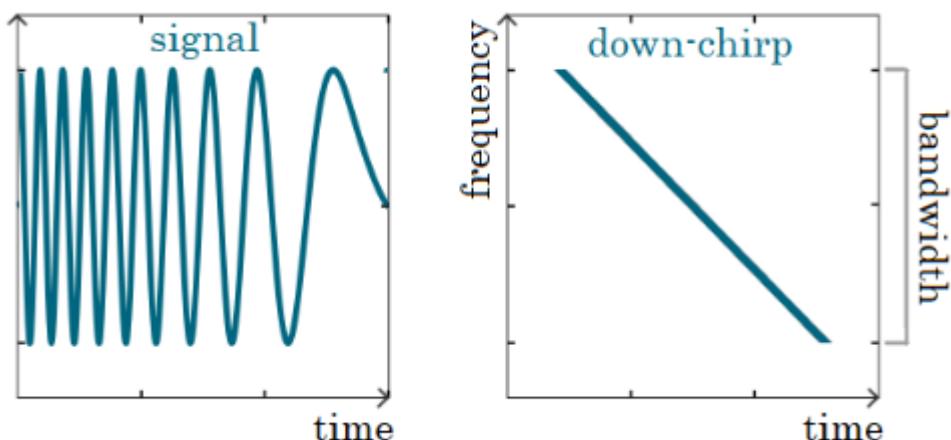
A base da técnica CSS é o *chirp*. Ele pode ser definido como um sinal no qual a frequência aumenta (*up-chirp*) ou diminui (*down-chirp*) linearmente com o tempo conforme mostrado nas Figura 5 e Figura 6 de acordo com a BW e SF (LoRa Alliance, 2022; SEMTECH, 2024)., onde SF representa o fator de espalhamento correspondente.

Figura 5 - Ilustração da variação (aumento) de frequência (*up-chirp*). A esquerda: gráfico da amplitude de um sinal em função do tempo; A direita: gráfica da frequência em função do tempo.



Fonte: (Tulka, 2022)

Figura 6 - Ilustração da variação (diminuição) de frequência (*down-chirp*). A esquerda: gráfico da amplitude de um sinal em função do tempo; A direita: gráfica da frequência em função do tempo.



Fonte: (Tulka, 2022)

Os modems LoRa também utilizam *Forward Error Correction* (FEC) (Correção de Erro para Frente), adicionando alguns bits à mensagem transmitida. Isto propicia recuperação contra perda de dados na camada LoRa. Ele é implementado através das taxas de codificação (CRs), de 4/5 a 4/8, denominadas de CR = 1 a CR = 4, respectivamente (Casals et al., 2017). Elas indicam, por exemplo, no caso 4/5, que na mensagem existem 4 bits úteis do total de 5, sendo um bit redundante adicionado para tentar corrigir possíveis erros de transmissão.

O *bit rate* (taxa de bits) R_b de transmissão dependerá da BW do canal e do SF os quais definem o DR de acordo os parâmetros regionais definidos pela LoRaWAN (Committee, 2022; LoRa Alliance, 2022). Na tabela abaixo, tem-se os DR e a relação entre os *bit rates* R_b em função dos SF e BW.

Tabela 1 - Relação entre o R_b e DR, SF e BW

DR	SF	BW	R_b
0	SF12	125 KHz	250
1	SF11	125 KHz	440
2	SF10	125 KHz	980
3	SF9	125 KHz	1760
4	SF8	125 KHz	3125
5	SF7	125 KHz	5470
6	SF8	500 KHz	12500
8	SF12	500 KHz	980
9	SF11	500 KHz	1760
10	SF10	500 KHz	3900
11	SF9	500 KHz	7000
12	SF8	500 KHz	12500
13	SF7	500 KHz	21900

Fonte: Adaptado de (Committee, 2018)

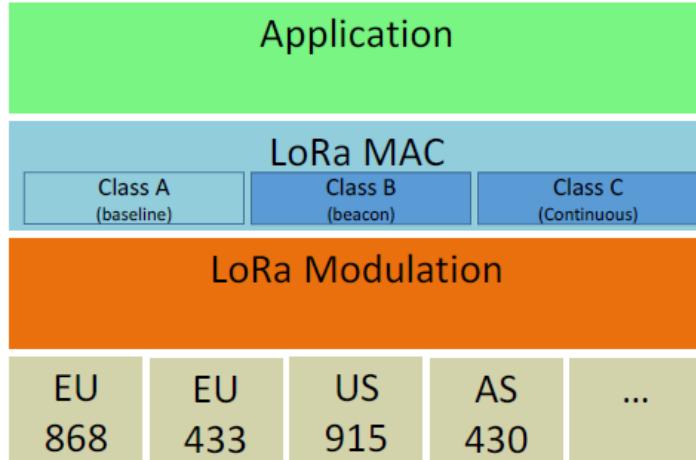
Adicionalmente, a tecnologia LoRa de 2,4 GHz (globalmente livre de licença), permite que os ED não necessitem ser desenvolvidos especificamente para cada banda de frequência sub-GHz das diversas regiões existentes. Estudos feitos por (Janssen et al., 2020) mostram um alcance máximo de 133 km em espaço livre, 74 m em ambiente interno e 443 m em contexto urbano, com a taxa de dados variando entre 0,595 kbps e 253,91 kbps. Devido à largura de banda configurável e taxas de dados mais baixas, o LoRa 2.4 GHz supera outras tecnologias na banda de 2,4 GHz em termos de alcance de comunicação.

3.3 LORAWAN

O LoRaWAN é um protocolo de rede que especifica a camada *Media Access Control* (MAC) (Controle de Acesso ao Meio) (Figura 7) da pilha e utiliza como *Physical Layer* (PHY) (Camada Física) a modulação LoRa. Ele opera na banda *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) (Industrial, Científico e Médico). No Brasil utiliza o canal de frequência 915 MHz. A tecnologia LoRaWAN é capaz de fornecer conectividade de longo alcance, até 10 km em áreas rurais e até 2 km em áreas urbanas, com baixo consumo de energia, o que a torna ideal para

aplicações IoT que envolvem sensores e dispositivos de baixa potência (Committee, 2022; Morin et al., 2017; Seye et al., 2018).

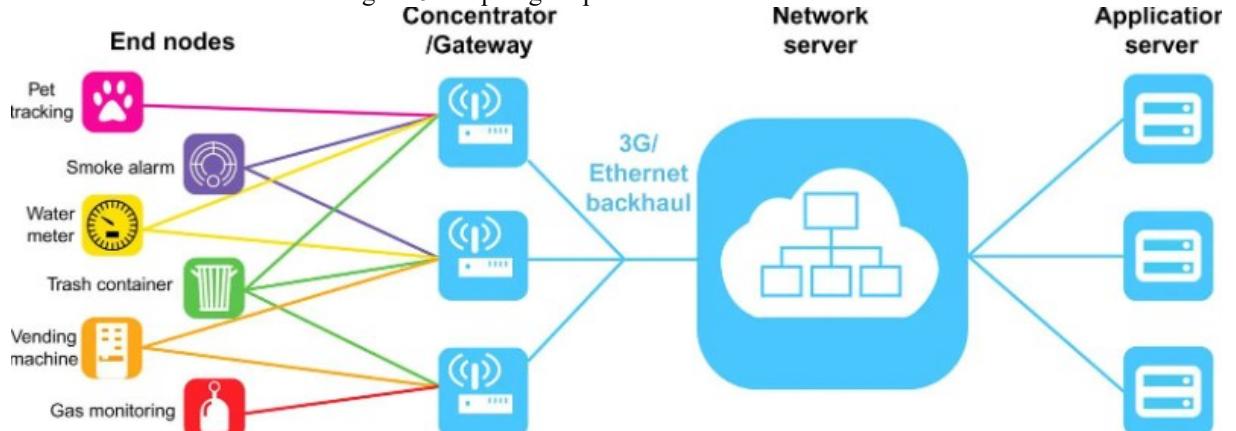
Figura 7 - Camadas do protocolo de rede LoRaWAN



Fonte: (Committee, 2018)

Uma rede LoRaWAN é baseada na topologia estrela de estrelas composta por três elementos principais: os *end nodes* (dispositivos nós finais de rede) ou simplesmente, *end devices* (ED); os *gateways* (GW) (estações base concentradoras e conversoras entre tipos de redes); e o *central network server* (servidor de rede central), ou apenas, *Network Server* (NS) (Servidor de Rede) conforme ilustrado na Figura 8, que mostra a topologia típica de uma rede LoRaWAN (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a, 2020b; Casals et al., 2017).

Figura 8 - Topologia típica de uma rede LoRaWAN

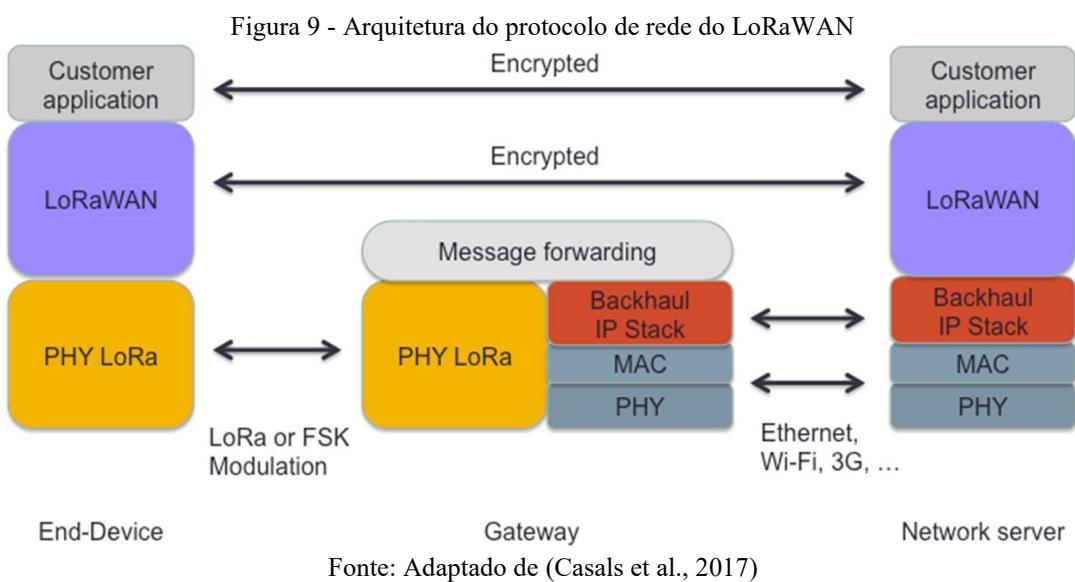


Fonte: Adaptado de (Askhedkar; Chaudhari; Zennaro, 2020a)

Os ED, que podem ser sensores, atuadores ou qualquer outro dispositivo IoT, recebem comandos para atuar no ambiente ou enviam dados para uma ou várias GW por meio de comunicação sem fio, tipicamente, LoRa. Os GW são responsáveis por receber os dados dos ED e encaminhá-los para o NS através de meios do tipo *backhaul*, tais como celular 3G, 4G ou 5G, conexões cabeadas tipo ethernet, links de micro-ondas ou satélite, dentre outros, e

utilizando protocolo de rede baseado em *Internet Protocol* (IP) conforme visto no *Backhaul IP Stack* do GW e NS da Figura 9. O NS é responsável por armazenar e gerenciar os dados recebidos para depois serem consumidos pelos diversos *Application Servers* (AS) (Servidores de Aplicações).

O LoRaWAN oferece criptografia de ponta a ponta e integridade dos dados (Figura 9). Os *payloads* (dados úteis) das camadas superiores são criptografadas por meio de uma Chave de Sessão de Aplicação, que fornece confidencialidade para os dados da aplicação. Por outro lado, uma Chave de Sessão de Rede é usada tanto pelo NS e como pelo ED para calcular e verificar o *Message Integrity Code* (MIC) (Código de Integridade da Mensagem) de todas as mensagens de dados e, assim, garantir a integridade dos dados (Committee, 2018).



A rede LoRaWAN suporta alguns modos distintos de operação para os ED, divididos em 3 classes: classe A, classe B e classe C. Estes modos especificam como os ED se comunicam com os GW da rede. Todos os ED devem implementar a classe A. ED classe B, devem suportar classe B e, também, classe A. ED classe C, devem operar tanto na classe A quanto na C, sendo a B opcional (Committee, 2018; LoRa Alliance, 2022; SEMTECH, 2024).

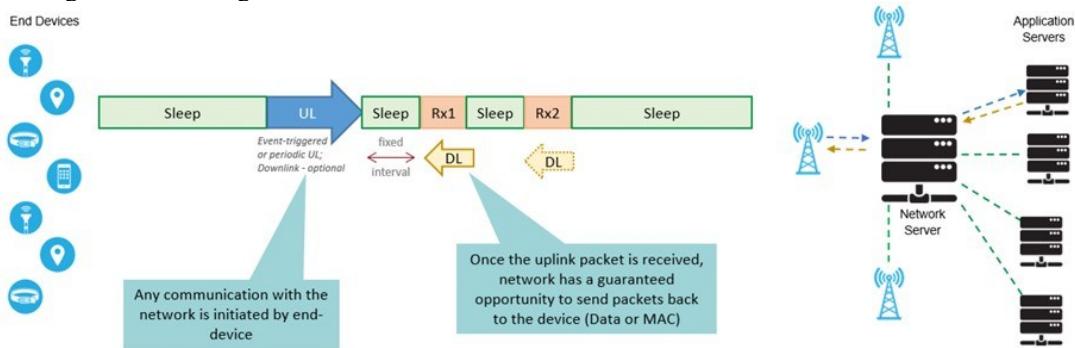
Dispositivos de classe A são ED bidirecionais onde uma transmissão de *uplink* (UL) pode ser seguida por até duas janelas de recebimento de *downlink* (DL). Qualquer transmissão *downlink* do GW deve esperar por uma transmissão *uplink*, ou seja, o ED sempre inicia comunicação (Figura 10). Esta classe de dispositivos estará a maior parte do tempo em modo de *sleep* (adormecido), ou seja, em um estado de espera no qual o funcionamento do ED consome a menor energia possível para o dispositivo, quando não estiver transmitindo ou recebendo. O ED “acorda” depois do tempo no qual foi programado ou se perceber alguma

alteração no ambiente que está monitorando e inicia uma transmissão onde os dados serão enviados para os GW. Após este envio o ED volta a dormir. Esta classe é a mais eficiente em termos de energia, projetada para ED alimentados por bateria (Committee, 2018; SEMTECH, 2024). Esse processo é um pouco mais complexo, envolvendo a definição de janelas de transmissão, alternância de canais, tempos específicos de espera, entre outros elementos, com o objetivo de permitir que um grande número de dispositivos possa fazer uso desse enlace. Esse processo é descrito a seguir.

Uma vez que o pacote de *uplink* é recebido e devidamente validado pelo GW e NS (as chaves de rede são usadas nesse processo), canais de downlink são negociados assim como tempos de espera, largura de banda e canais. O GW tem duas oportunidades para realizar o *downlink* para o ED, em janelas de tempo denominadas de *Receive Window 1* (RX1) (Janela de Recepção 1) ou *Receive Window 2* (RX2) (Janela de Recepção 2). O ED aguarda o tempo *Receive Delay 1* (RD1) (Atraso de Recebimento 1) em modo adormecido, acorda e então inicia uma escuta na janela de recepção Rx1. Se ele não receber um *downlink* durante essa janela, ele volta brevemente a dormir. Novamente, ele aguarda um tempo, porém agora *Receive Delay 2* (RD2) (Atraso de Recepção 2), acorda e abre a segunda janela de escuta Rx2 esperando uma resposta de rede. Caso também não receba nenhuma resposta, ele volta a dormir até a próxima vez para o qual foi programado. É através desse mecanismo que o AS pode fazer uso da comunicação bidirecional da rede, enviando dados para o ED.

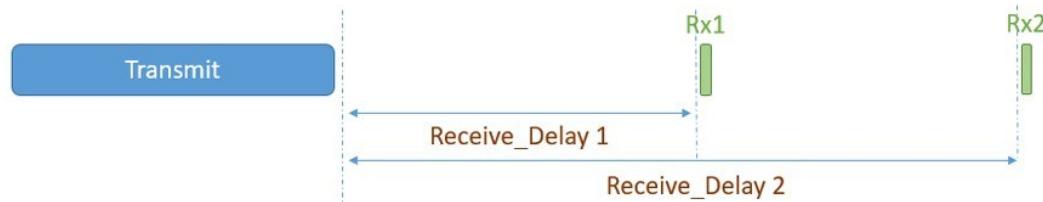
Esta situação é ilustrada na Figura 11. Se houver resposta em RX1, o ED inicia o downlink dos dados da rede durante esta janela e volta a dormir, não aguardando e nem abrindo RX2, conforme Figura 12. O caso quando ocorre a recepção na janela RX2 é mostrado na Figura 13. O ED pode continuar enviando informações em quadros posteriores, ação realizada com escolha aleatória entre os canais possíveis, evitando congestionar um canal específico. O AS também pode pedir que o ED continue abrindo janelas de recepção caso possua mais informações para entregar. Em resumo, com ED classe A, a comunicação sempre se origina do sensor, nunca parte de uma ação exclusiva das camadas superiores da rede. Uma vez iniciada, ambos os lados possuem mecanismo de transmitir mais de um frame, mesmo não sendo esse o caso padrão.

Figura 10 - Visão geral do modo de funcionamento de um ED classe A no LoRaWAN.



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2024)

Figura 11 - Visão simplificada do modo de operação de um ED classe A no LoRaWAN quando a rede (GW, NS e AS) não responde de volta.



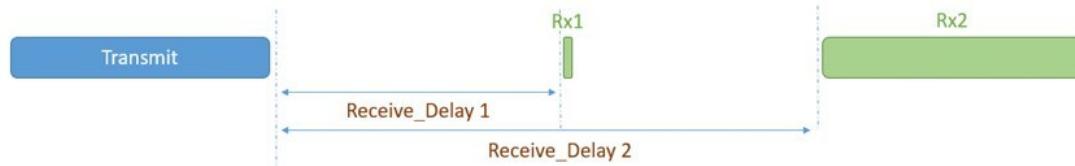
Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2024)

Figura 12 - Visão simplificada do modo de operação de um ED classe A no LoRaWAN quando a rede (GW, NS e AS) responde de volta na janela RX1.



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2024)

Figura 13 - Visão simplificada do modo de operação de um ED classe A no LoRaWAN quando a rede (GW, NS e AS) responde de volta na janela RX2.



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2024)

Dispositivos de classe B também são ED bidirecionais e podem usar mais slots de recepção em comparação com os dispositivos de classe A. Além das duas janelas Rx1 e Rx2 da classe A, os ED classe B podem abrir mais janelas de recepção em tempos programados. Para viabilizar a abertura destas janelas extras, os ED recebem sinais de sincronização de tempo da rede, denominados *beacons* que são utilizados para sincronizar o relógio interno dos ED com a rede. Com isso, dispositivos de classe B suportam *downlinks* com latência determinada em

detrimento de um aumento no consumo de energia se comparados com os ED classe A, mas ainda sim são energeticamente eficientes. Os ED classe B são baseados nos ED classe A, no entanto, aqueles oferecem janelas adicionais de recepção de *downlink* em horários pré-agendados (Casals et al., 2017; LoRa Alliance, 2022; SEMTECH, 2024). Vale observar que o ED nunca inicia em classe B, ele deve partir em classe A ou C e depois negociar a entrada na classe B, passando a fazer parte do conjuntos de sensores que serão continuamente escalonados para a comunicação.

EDs classe C estão sempre “acordados”. Eles têm as janelas de recepção quase sempre abertas, com exceção de quando estão realizando a transmissão de *uplink*. Dispositivos classe C usam mais energia e são frequentemente alimentados por rede elétrica, mas oferecem a menor latência das três classes.

3.4 TRABALHOS RELACIONADOS

A energia disponível para os dispositivos das redes de sensores sem fio é tipicamente limitada devido à pequena capacidade das baterias, que não podem ser recarregadas ou substituídas de forma economicamente viável, já que os sensores são implantados em grande escala e, às vezes, com acesso limitado. Como a unidade de comunicação por rádio tem o maior consumo de energia nesses tipos de dispositivos, reduzir a quantidade de dados trocados, principalmente transmitidos em relação aos recebidos, é crucial para economizar energia. Nesse cenário, a compressão de dados desempenha um papel importante. A eficiência da compressão de dados depende de encontrar um equilíbrio entre a energia necessária para o processamento e a energia para a transmissão dos dados, conforme discutido na literatura relacionada (Alsalaet; Ali, 2015; Ketshabetswe et al., 2021; Kolo et al., 2012; Marcelloni; Vecchio, 2009a; Saidani; Jianwen; Mansouri, 2020). Além disso, ainda devido a implantação da enorme quantidade de dispositivos neste tipo de rede, para o sistema possuir uma relação custo-benefício aceitável, são impostas muitas limitações no hardware, tais como reduzidas potência de processamento e memória. Assim, para operar eficientemente dentro destas e de outras restrições existentes, os algoritmos de compressão de dados devem exigir um esforço computacional mínimo.

Existem duas técnicas especializadas de compressão de dados para redes de sensores sem fio (Kolo et al., 2012), a compressão de dados distribuída e a local. A primeira aproveita a alta correlação espacial dos dados de dispositivos fixos em redes densas. Como os sensores próximos tendem a capturar dados semelhantes, esta técnica é empregada para reduzir a redundância antes da transmissão. Porém, esta técnica exige maior complexidade

computacional com algoritmos mais avançados para coordenar a compressão entre múltiplos sensores, necessidade de sincronização e pode introduzir maior latência na transmissão devido ao maior tempo de processamento. A segunda beneficia-se da correlação temporal existente nos dados amostrados de dispositivos sensores para realizar sua compressão localmente em cada dispositivo sensor. Com isso, necessita de menor complexidade computacional em cada ED, tem operação independente dos demais sensores e não exige coordenação entre os dispositivos como a primeira técnica. E, também, é mais adequada quando cada sensor tem um maior fluxo de dados tirando melhor aproveitamento da compactação individual de cada ED. Por estes motivos a segunda técnica será analisada e utilizada.

Um algoritmo de compressão local baseado no princípio *Lossless Entropy Compression* (LEC) (Compressão de Entropia sem Perdas) é proposto em (Marcelloni; Vecchio, 2009a), onde a ideia básica é criar um vetor com diferenças entre amostras consecutivas (deltas) dos dados coletados e codificá-los com base em um dicionário onde os símbolos com mais ocorrências são menores. Em dados típicos coletados por redes de sensores sem fio foi verificado que os deltas mais frequentes são os menores (próximos de zero) (Marcelloni; Vecchio, 2009a). Essa abordagem divide os deltas em grupos cujos tamanhos dos símbolos aumentam exponencialmente e são codificados por entropia de modo que deltas pequenos são codificados com símbolos pequenos mas os grandes podem ser codificados com símbolos maiores que o tamanho da amostra original.

O trabalho desenvolvido por MARCELLONI e VECCHIO (2009b), que faz uso de um pequeno dicionário fixo com o tamanho da resolução do *Analog to Digital Converter* (ADC) (Conversor Analógico para Digital) do dispositivo sensor, foi a inspiração para a criação de um novo algoritmo chamado de *Adaptive Lossless Data Compression* (ALDC) (Compressão de Dados sem Perdas Adaptativa), onde o dicionário é adaptativo, dependendo do fluxo de dados, mas preserva a ideia original ao custo de um código adicional para analisar os dados. Em 2021, o ALDC também foi modificado, apresentando um novo dicionário capaz de melhorar a compressão de dados do seu antecessor (KET2021). O algoritmo tem a capacidade de se adaptar às mudanças nas estatísticas dos dados de origem para maximizar o desempenho, alterando o dicionário dinamicamente. Todos os algoritmos citados têm o mesmo princípio: custo computacional relativamente baixo e adequados para uso em sensores microcontrolados.

É possível encontrar outras linhas de implementação. Em (Saidani; Jianwen; Mansouri, 2020) é apresentado um algoritmo também baseado em diferenças, mas codificado de forma diferente. No caso, é usada uma estratégia onde sequências de caracteres repetidos são agrupados e enviados juntamente com o número de ocorrências deles. Já uma abordagem no

domínio da frequência pode ser vista em (Alsalaet; Ali, 2015), utilizando uma transformada discreta de cossenos modificada. Essa abordagem é relativamente complexa para ser implementada em sensores muito restritos.

Os autores de (Kolo et al., 2012) mostraram que LEC e ALDC (com tamanho de bloco de 48) têm as seguintes taxas de compressão quando aplicados nos conjuntos de dados apresentados da Tabela 2.

Tabela 2 - Comparativo das taxas de compressão dos algoritmos LEC e ALDC.

Conjunto de dados	Taxa de compreensão	Taxa de compreensão
	LEC	ALDC
LU84 TEMP	70,81%	73,94%
FN101 TEMP	65,39%	67,48%
LG20 TEMP	53,83%	56,90%
LU84 RH	62,86%	65,54%
FN101 RH	62,95%	66,33%
LG20 RH	48,67%	52,87%
Dados sísmicos	69,72%	73,38%

Fonte: Adaptado de (Kolo et al., 2012).

De acordo com os autores, os conjuntos de dados são provenientes de monitoramentos ambientais reais em redes de sensores sem fio (WSN) armazenados no repositório *SensorScope* (http://sensorscope.epfl.ch/index.php/Main_Page). São medições de umidade relativa (RH) e temperatura (TEMP) de três grupos:

- *Le Gènèpi* abreviado como LG,
- *HES-SO FishNet* abreviado como FN e
- *LUCE* abreviado como LU.

Os sufixos numéricos são identificadores dos conjuntos dentro dos grupos.

Embora o algoritmo ALDC supere as taxas de compressão do LEC ao se adaptar melhor a vários conjuntos de dados diferentes, este último tem código mais simples, ocupa menos espaço de memória e exige menos esforços computacionais do que o primeiro, ao custo de não mais de 5% de perda nas taxas de compressão. A proposta é usar o LEC com uma funcionalidade adicional simples capaz de avaliar, sem comprimir os dados, se as amostras

comprimidas ou brutas (no caso de dados atípicos coletados por sensores) devem ser usadas para *upload* (envio) pelo dispositivo sensor.

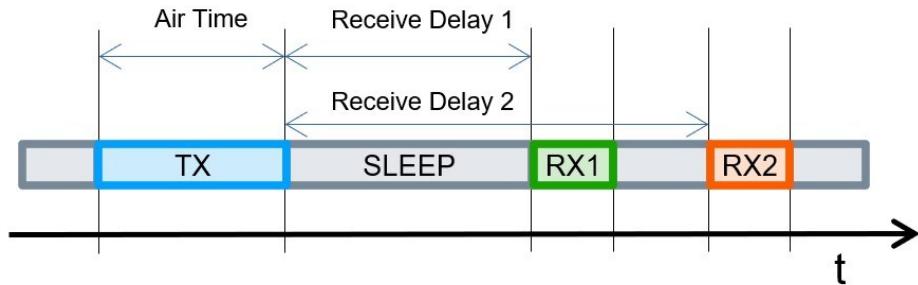
4 ESTRATÉGIAS DE SEGMENTAÇÃO DE DADOS EM LORAWAN

Redes de dados tradicionais, como Ethernet (IEEE 802.3), têm usado protocolos de segmentação, como o *Transmission Control Protocol* (TCP) (Protocolo de Controle de Transmissão), há anos (originalmente descrito em (Postel, 1981) e agora atualizado por (Wesley, 2022)). Através de sua variante do mecanismo de janelas deslizante, é possível criar um fluxo de comunicação sem perdas entre os pares comunicantes. Embora essa possa ser uma escolha adequada para redes mais rápidas e responsivas, quando aplicado à redes de baixa taxa de transferência e alta latência, a segmentação baseada em TCP apresenta alguns problemas.

Um deles se refere à baixa disponibilidade de comunicação do *gateway* (dispositivo que atua como um ponto de entrada para outra rede) para o *end-device* (dispositivo sensor). A comunicação de *downlink* (sentido do *gateway* para sensor) tem que esperar até a próxima comunicação de *uplink* (sentido do sensor para *gateway*) ocorrer. O *gateway* só pode começar a enviar dados quando o sensor acorda e transmite alguma informação ou até mesmo um quadro com um *payload* (parte do quadro com dados úteis) vazio. Após essa comunicação de *uplink Transmission* (TX) (Transmissão), é possível enviar quadros apenas durante as janelas de *downlink Reception* (RX) (Recepção) abertas pelo sensor, conhecidas como RX1 e RX2 (Committee, 2018). O tempo de uma janela de recepção deve ser pelo menos o tempo necessário para que o transceptor de rádio do dispositivo sensor detecte efetivamente um preâmbulo de *downlink*, sendo um valor variável e dependente do SF em questão, normalmente partindo de dezenas de us a até algumas dezenas de ms. O transceptor de rádio do sensor ficará em *sleep mode* (modo de suspensão) em todos os outros momentos.

Os tempos de espera *Receive Delay 1* (Atraso de Recebimento 1) e *Receive Delay 2* (Atraso de Recebimento 2) (Figura 14) para abertura das janelas de recepção, respectivamente, RX1 e RX2, utilizados neste trabalho, são 5 e 6 segundos após o fim da transmissão TX, pois foram os tempos implementados pela provedora do *gateway* utilizado para se comunicar com o sensor (Everynet, 2022). Essa baixa disponibilidade de comunicação dificulta os mecanismos de controle de segmentação presentes no TCP.

Figura 14 - Diagrama de temporização das janelas de recepção para dispositivos LoRaWAN operando em classe A. Foram utilizados os tempos de 5 e 6 segundos, respectivamente, para *Receive Delay 1* e *Receive Delay 2*.



Fonte: (EVERYNET, 2022)

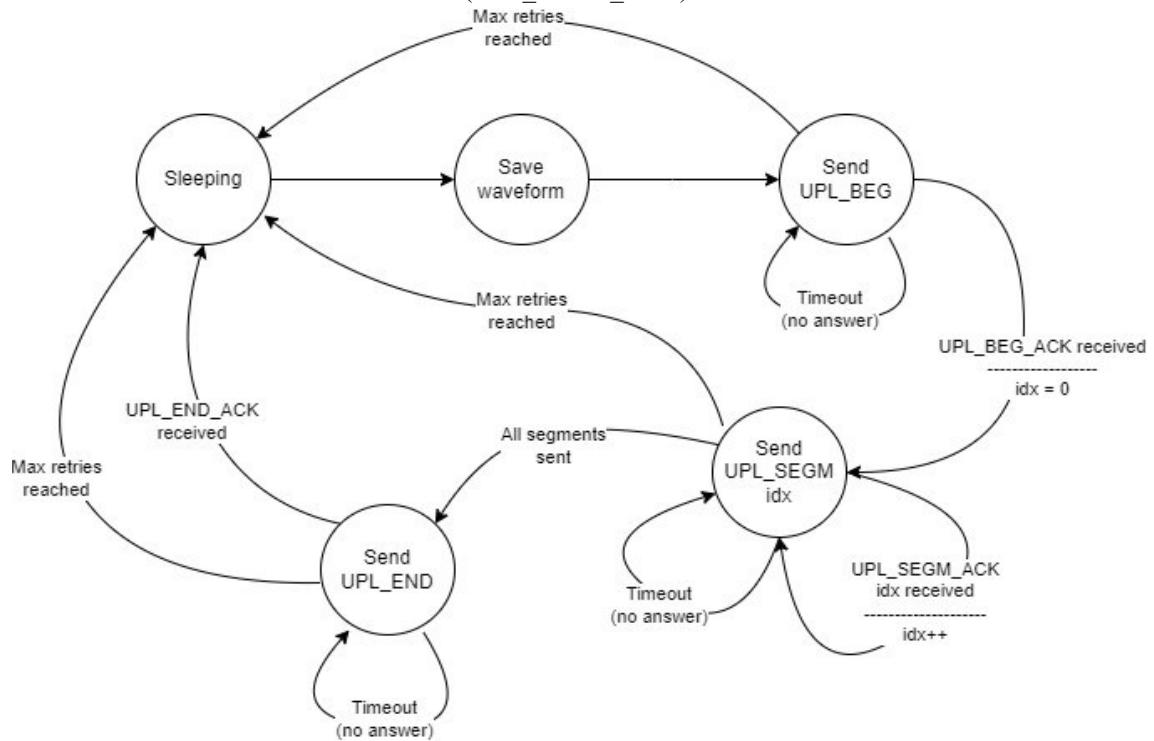
A complexidade da implementação do TCP também pode ser um desafio para sistemas embarcados microcontrolados, geralmente com recursos limitados. Uma máquina de estados mais simples é altamente desejada nesses casos, minimizando a implementação e consumo do dispositivo.

Com todas essas limitações, foi inicialmente criado um algoritmo de segmentação inicial no qual cada quadro é enviado pelo sensor e confirmado pela aplicação LoRaWAN. Somente após a confirmação do envio, a transmissão avança para o próximo quadro. Esse processo repete-se até o final, garantindo a entrega de todos os segmentos para a aplicação.

Existem apenas três tipos de quadros nesse procedimento. O primeiro é o *Upload Begin* (UPL_BEG) (Início do Upload), onde as informações sobre o upload são enviadas, como tamanho total e quantidade de segmentos. O segundo contém os dados reais *Upload Segment* (UPL_SEGM) (Segmento de Upload), com o índice do segmento e o campo de dados. Finalmente, o fim da operação é indicado pelo upload finalizado *Upload End* (UPL_END) (Fim do Upload). Cada quadro possui um campo *Acknowledgment* (ACK) (Confirmação) associado a ser enviada pela aplicação via *gateway*.

A máquina de estado para essa segmentação pode ser vista na Figura 15, mostrando o fluxo de envio dos quadros descritos acima.

Figura 15 - Diagrama da máquina de estados para segmentação de dados com confirmação quadro a quadro (UPL_SEGM_ACK).



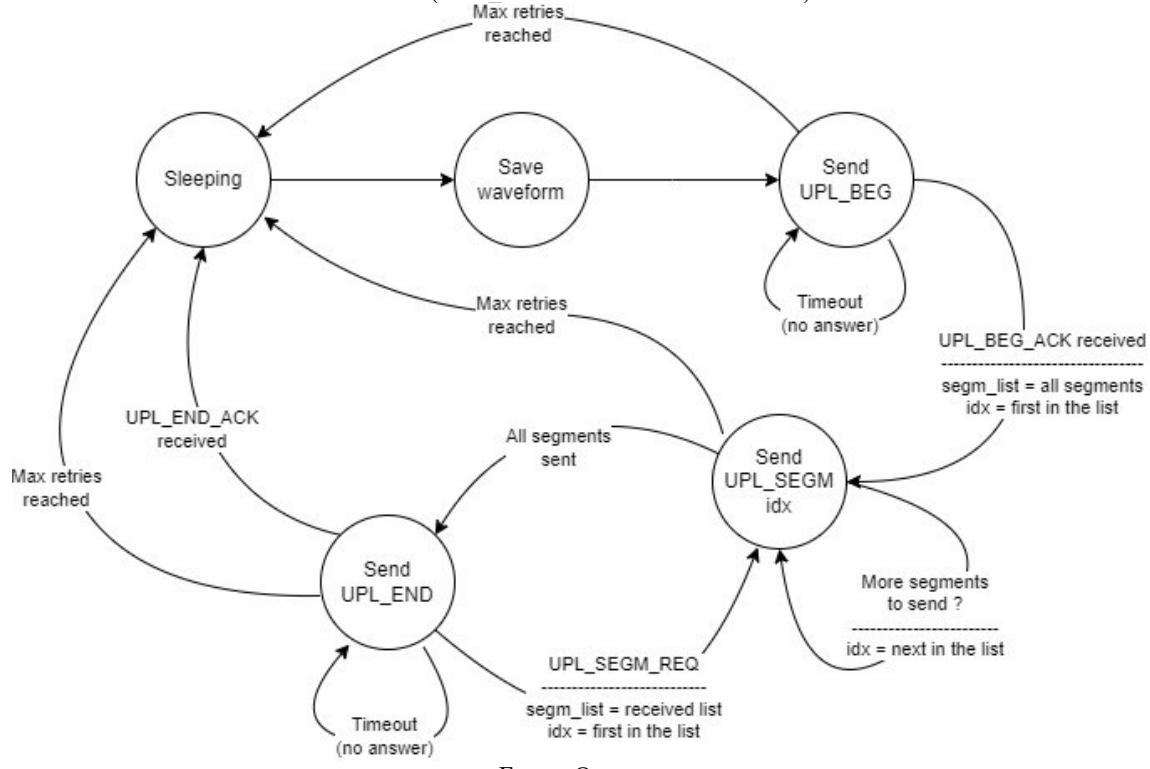
Fonte: O autor.

O principal problema desse algoritmo está relacionado ao tempo de resposta da aplicação. Mesmo com um tempo de espera para as janelas de recepção de 5 e 6 segundos, a resposta da aplicação pode não ser enfileirada com rapidez suficiente para ser transmitida do *gateway* para o sensor. Esses atrasos são causados pelo *gateway*, pelo provedor de dados e pela aplicação hospedada na nuvem, gerando quase o dobro de quadros transmitidos devido a retransmissões. Em situações raras, foram observadas respostas que ocorreram dentro do mesmo ciclo de transmissão. Além dessa quantidade de quadros resultante da estratégia da aplicação, existem os problemas decorrentes da própria rede LoRa, que, no SF12, pode facilmente chegar a perdas de 15 a 30% (Seye et al., 2018). Provavelmente em uma rede com infraestrutura proprietária (GW, NS e AS) se tenha uma prevalência da resposta dentro de 5 ou 6 segundos, mas em redes públicas, com serviços terceirizados de GW e NS, a retransmissão passa a ser algo frequente.

Dessa forma, um novo algoritmo de segmentação foi proposto, onde apenas o início e o fim da segmentação de upload (UPL_BEG e UPL_END) esperariam a confirmação para a transmissão prosseguir. Esse comportamento é detalhado na Figura 16, onde a máquina de estados do algoritmo pode ser vista. Os segmentos de dados, por sua vez, seriam transmitidos sequencialmente, sem confirmação, pelo quadro UPL_SEGM. Ao receber o quadro de finalização do upload UPL_END, a aplicação conta os quadros ausentes e envia um novo

quadro, chamado UPL_SEGM_REQ, com uma lista de segmentos a serem retransmitidos. Ao receber a lista, o sensor volta ao estado de transmissão de segmento e envia a lista solicitada, novamente sem esperar confirmações individualizadas.

Figura 16 - Diagrama da máquina de estados para segmentação de dados. Estratégia de reconhecimento apenas no final (UPL_SEGM sem reconhecimento).



Fonte: O autor.

O quadro de fim de upload UPL-END encerra a transmissão, dando à aplicação a chance de encerrar o upload ou solicitar novas retransmissões, repetindo o processo descrito. A lista de segmentos perdidos foi limitada a 10 por vez na aplicação atual, o que não é um problema, pois o quadro UPL_SEGM_REQ pode ser repetido quantas vezes forem necessárias ao atingir o estado UPL-END.

Essa nova estratégia reduz a quantidade de retransmissões devido aos atrasos na resposta do *gateway* e provedores, mas mantém as perdas devido as características da própria rede LoRa, que afetam igualmente ambos os algoritmos, e não devido às retransmissões relacionadas à não recepção dos quadros de confirmação durante o envio dos segmentos.

Por fim, acredita-se que para dispositivos sensores LoRaWAN classe C, em que a recepção de quadros está sempre ativa quando não está transmitindo, estratégias de segmentação tradicionais podem ser utilizadas com perdas menores relacionadas a

retransmissões, mas podem ter ainda algum impacto em tempo ao se esperar por respostas que excedam o limite de tempo das janelas.

Para potencializar os benefícios desta estratégia de segmentação para a rede de sensores sem fio de baixa latência e baixa taxa de transmissão, na próxima seção é abordada a compressão de dados para reduzir a quantidade de segmentos que precisam ser enviados em relação ao tamanho dos dados originais adquiridos pelo sensor do ED.

5 COMPACTAÇÃO DE DADOS DE SENSORES SEM FIO

Para reduzir a quantidade de pacotes enviados, uma alternativa seria realizar algum tipo de compressão nos dados transmitidos. Embora isso seja trivial em dispositivos embarcados maiores, novamente pode ser um problema devido aos recursos limitados disponíveis em sensores com baixos recursos. É necessário usar uma técnica de compressão sem perdas que tenha uma implementação de baixo custo computacional e que faça uso racional da memória.

Conforme explicado na seção 3.4 TRABALHOS RELACIONADOS, o compressor LEC possui um código de implementação simples, ocupa pouco espaço de memória, exige pouco esforço de processamento da *Microcontroller Unit* (MCU) (Unidade de Microcontrolador) do dispositivo sensor, ao custo de não mais que 5% de perda na *Compression Rate* (CR) (Taxa de Compressão) quando comparado ao ALDC.

Por estes motivos, seguindo o esquema de compressão baseado na codificação delta, decidiu-se implementar a versão original do compressor LEC. Embora alguns autores citados tenham fornecido pseudocódigos, até o momento não foi encontrada nenhuma implementação em linguagem C, muito menos uma que fosse adequada para ser executada em sistemas microcontrolados com recursos limitados. Essa versão, chamada de Delta/Huffman Compressor (DHC) (Compressor de Deltas e Huffman), está disponível em (Fagundes; Almeida, 2022) , com uma licença permissiva e *bindings* (ligações) para uso na linguagem Python, sendo uma das contribuições deste trabalho. Nesta implementação, o dicionário original apresentado também foi aumentado, de 14 bits para 16 bits, uma vez que os dados usados agora são de 16 bits. A implementação é facilmente portável, não depende de códigos auxiliares e requer apenas que haja uma área pré-alocada para armazenamento dos vetores de dados e outra para armazenamento da informação comprimida. Também foi adicionada uma função capaz de predizer se a compactação será eficiente para o caso em questão, isso é, se ela de fato irá reduzir o vetor de entrada.

Cada valor comprimido é uma sequência de bits de tamanho variável composta por duas partes (coluna “Código final” na Tabela 3) que representam um valor delta. A primeira parte (coluna “Prefixo do código”) é um valor binário que representa o número de bits (coluna “Tamanho do sufixo do código”) necessários para codificar os valores deltas na próxima parte, chamada “Sufixo do código”.

Tabela 3 - Códigos comprimidos (códigos finais) e tamanhos para cada faixa de deltas com exemplos

Faixa do delta (valor decimal)	Tamanho do sufixo do código (bits)	Prefixo do código (valor binário)	Tamanho do prefixo do código (bits)	Tamanho final do código (bits)	Exemplo de valor delta (valor decimal)	Código final prefixo sufixo exemplo (valor binário)
0	0	00	2	2	0	00
-1, +1	1	010	3	4	+1	010 1
-3, -2, +2, +3	2	011	3	5	+2	011 10
-7,...,-4, +4,...,+7	3	100	3	6	+6	100 110
-15,...,-8, +8,...,+15	4	101	3	7	+13	101 1101
-31,...,-16, +16,...,+31	5	110	3	8	+22	110 10110
-63,...,-32, +32,...,+63	6	1110	4	10	+54	1110 110110
-127,...,-64, +64,...,+127	7	11110	5	12	+100	11110 1100100
-255,...,-128, +128,...,+255	8	111110	6	14	+255	111110 11111111
-511,...,-256, +256,...,+511	9	1111110	7	16	+300	1111110 100101100
-1023,...,-512, +512,...,+1023	10	11111110	8	18	+751	11111110 1011101111
-2047,...,-1024, +1024,...,+2047	11	111111110	9	20	+1855	111111110 11100111111
-4095,...,-2048, +2048,...,+4095	12	1111111110	10	22	+3124	1111111110 110000110100
-8191,...,-4096, +4096,...,+8191	13	11111111110	11	24	+5929	11111111110 1011100101001
-16383,...,-8192, +8192,...,+16383	14	111111111110	12	26	+13432	111111111110 1101000111000
-32767,...,-16384, +16384,...,+32767	15	1111111111110	13	28	+27857	1111111111110 110110011010001
-65535,...,-32768, +32768,...,+65535	16	11111111111110	14	30	+45987	11111111111110 1011001110100011

Fonte: O autor.

Esta segunda parte codifica os deltas no grupo ao qual pertence (ou seja, a posição do índice no grupo), conforme explicado em (Marcelloni; Vecchio, 2009a). Como exemplo, considere o valor delta +100. Ele pertence ao intervalo de deltas de +64 a +127. Portanto, o código final (prefixo de código | sufixo de código) é dado por 11110 | 1100100 que ocupa um espaço de 12 bits. Ao enfileirar o dado para transmissão, o algoritmo não adiciona bits extras nele para preencher até o tamanho mínimo de uma palavra de dados, ou seja, não realiza *padding*. O dado de 12 bits realmente ocupa apenas 12 bits de espaço de armazenamento. Como contraexemplo, se o valor +100 fosse transmitido sem utilizar este mapeamento, ele precisaria utilizar os 16 bits dos dados originais.

O compressor/descompressor DHC possui apenas três funções, a seguir:

dhc_compress_evaluate(): avalia, sem comprimir, se o conjunto de dados se beneficiará da compressão ou não. Neste caso, esta função retorna um número indicando a taxa de compressão (valor percentual).

dhc_compress(): realiza a compressão dos dados. É necessário um vetor de destino para armazenamento.

dhc_decompress(): realiza a descompressão dos dados. É necessário um vetor de destino para armazenamento.

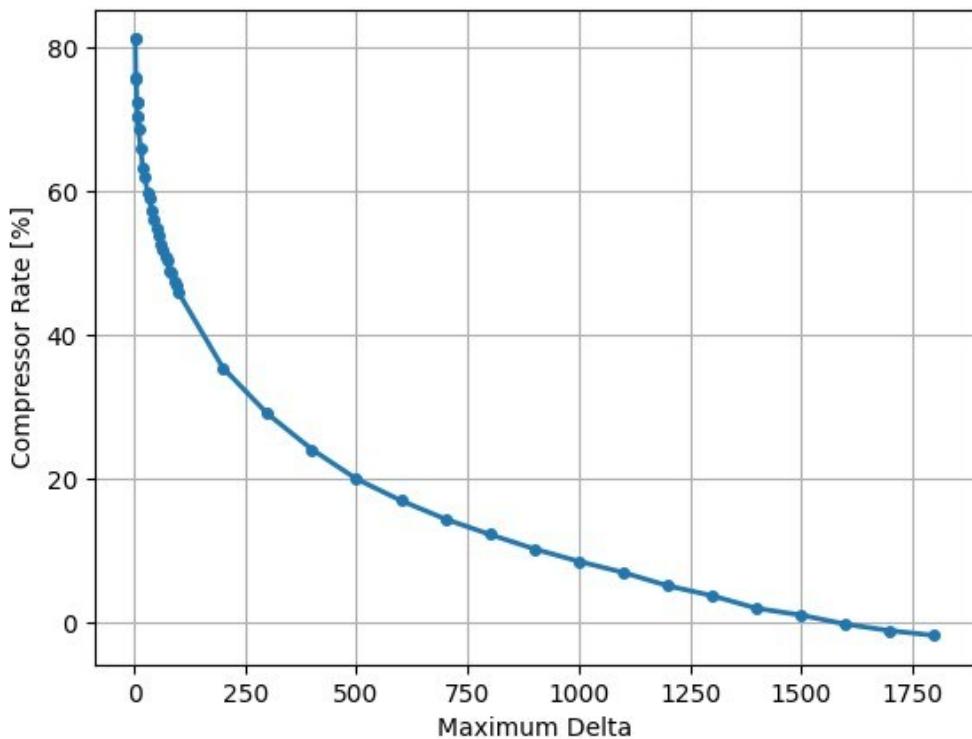
Antes de apresentar os resultados práticos é importante entender a premissa do algoritmo. Ele é projetado para comprimir dados coletados por sensores, ou seja, dispositivos que adquirem sinais contínuos no tempo, isto é, sinais cuja amplitude da diferença entre amostras sucessivas é pequena ou próxima de zero. Não são esperadas variações abruptas nos valores medidos. Portanto, as diferenças entre amostras consecutivas não devem apresentar valores de grande magnitude. Outra perspectiva para avaliar essa premissa é visualizar a diferença entre amostras consecutivas como a derivada discreta dos dados. Novamente, para a maioria dos fenômenos físicos medidos no campo, como temperatura, umidade, pressão, entre outros, essa variação estará dentro de pequenas amplitudes.

Se o tamanho do conjunto de dados comprimidos for maior do que o tamanho das amostras originais (ou seja, a taxa de compressão for menor que 0%), o algoritmo de compressão não é executado e os dados brutos são enviados em vez disso. Isso é feito pela função `dhc_compress_evaluate()`, que calcula o tamanho comprimido de todas as amostras sem comprimi-las. A Tabela 3 mostra alguns exemplos de tamanhos comprimidos (códigos finais). Com base no valor da diferença entre amostras sucessivas, o tamanho do prefixo do código é somado ao tamanho do sufixo do código, resultando no tamanho final do código (que

seria o tamanho dos dados comprimidos). Tamanhos individuais de códigos finais maiores que 16 bits (resolução do sensor utilizado) não valem a pena ser comprimidos, mas a decisão, de comprimir ou não, é feita apenas depois da soma de todos os tamanhos dos códigos finais. Este é um cálculo leve, já que o tamanho do prefixo e do sufixo do código é facilmente obtido a partir da Tabela 3.

Na Figura 17 é apresentado o resultado da taxa de compressão com dados simulados, comprimidos pelo DHC. Cada conjunto de dados é gerado aleatoriamente, escolhendo um número dentro do intervalo de $[-\delta, +\delta]$ com distribuição uniforme. Este conjunto é comprimido e, em seguida, é calculada a taxa de compressão. O eixo horizontal representa o limite de sorteio utilizado em valores absolutos, neste caso, 2δ , e o eixo vertical a taxa de compressão. Pode-se ver que o compressor deixa de ser efetivo para diferenças entre amostras quando se considera um valor aleatório fora da faixa de $[-800, +800]$.

Figura 17 - Comportamento do compressor em função da máxima amplitude das variações de diferenças.



Fonte: O autor.

Para viabilizar os testes práticos dos algoritmos das estratégias propostas, foi desenvolvido e montado um circuito eletrônico de um *end device* (ED) LoRaWAN, que é apresentado na próxima seção, para executar o *firmware* implementado em linguagem C.

6 DISPOSITIVO ED LORAWAN

Nesta seção é descrito o projeto de *hardware* (dispositivo eletrônico) desenvolvido e construído para cumprir a função de um *end device* (ED) classe A do tipo sensor para uma rede LoRa. Conforme definido na seção 3.3, LORAWAN, um ED deste tipo é responsável por obter dados do ambiente no qual está inserido e transmitir, utilizando a rede de sensores sem fio, para o GW, NS e AS seguindo as especificações dos padrões LoRa e LoRaWAN.

Neste projeto de *hardware* foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Pesquisa e seleção de tecnologias e componentes eletrônicos adequados;
- b) Projeto do diagrama do circuito eletrônico para o desenvolvimento do ED;
- c) Projeto de *layout* da placa de circuito impresso do ED;
- d) Geração de lista de componentes eletrônicos necessários;
- e) Compra dos componentes;
- f) Geração de arquivos *gerbers* para confecção da placa de circuito impresso;
- g) Fabricação da placa de circuito impresso;
- h) Fabricação (montagem) do ED;
- i) Inspeção visual, testes elétricos, testes funcionais básicos (alfa);
- j) Casamento de impedância do circuito de rádio frequência.

Na época em que foi desenvolvido este projeto, o mercado de compra e venda de componentes eletrônicos passava por um momento muito atípico com atrasos na fabricação e entrega. Isto era devido a paralização (*lockdown*) e lentidão das fábricas e centros de distribuição durante e após a pandemia. Nesta situação, os componentes eletrônicos apresentavam preços muito elevados e prazos de entrega de mais de 54 semanas. Para amenizar este problema, foi investido tempo reprojetando os dispositivos eletrônicos para homologar outros componentes críticos, na medida do possível, que possuíam menor prazo de entrega e menor preço, mas ainda assim longos e caros comparados às épocas normais. Esta situação forçou mais ainda o requisito do ED possuir baixo custo, mas limitou muito a escolha dos componentes para aqueles que seriam possíveis de comprar em termos de prazo de entrega também. No entanto, os melhores esforços foram empreendidos para desenvolver um dispositivo que desse flexibilidade para alterar os parâmetros de comunicação sem fio, na camada MAC, para poder aplicar e testar as propostas de segmentação com retransmissão tardia e, também, uma mínima capacidade de processamento e memória para executar o algoritmo de compactação dos dados conforme foram descritos nas sessões 4, ESTRATÉGIAS DE

SEGMENTAÇÃO DE DADOS EM LORAWAN, e 5, COMPACTAÇÃO DE DADOS DE SENsoRES SEM FIO.

Portanto, de maneira geral, este dispositivo deve atender os seguintes requisitos:

- a) Ler e digitalizar a variável física do ambiente, no caso vibração (aceleração);
- b) Poder realizar processamento dos dados;
- c) Permitir alterar parâmetros no protocolo de transmissão e recepção com os dados encapsulados em pacotes, quadros ou mensagens na camada MAC;
- d) Realizar comunicação bidirecional LoRa com GW e suportar uma aplicação LoRaWAN;
- e) Ser alimentado com bateria;
- f) Consumir pouca energia.

Durante pesquisa e seleção de tecnologias e componentes eletrônicos, foram identificadas as funcionalidades de *hardware* necessárias para atender os requisitos deste projeto. Com isso, para melhor organização e modularidade, elas foram agrupadas em conjuntos conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Conjuntos de funcionalidades de *hardware* do ED LoRaWAN



Fonte: o autor

As funções dos elementos presentes na Figura 18 são as seguintes:

Processamento digital e memória: O núcleo do sistema onde ocorre o processamento de dados e armazenamento de informações, além de operacionalizar a comunicação e controle dos outros elementos do sistema;

Alimentação: Fornece energia elétrica, obtida da bateria, de forma regulada, estável e no nível de tensão adequado para todos os componentes do sistema e, também, limita a corrente drenada da bateria.

Oscilador: Gera sinais de *clock* com precisão e estabilidade que sincronizam as operações do sistema;

Relógio e Temporização: Mantém uma base de tempo precisa e operacionaliza temporizadores e calendários. Consume pouquíssima energia enquanto o restante do ED dorme. Isto permite o controle e sequência das operações no sistema, sendo fundamental para a estratégia de redução do consumo de energia aos menores níveis possíveis em estado adormecido do dispositivo. O ED é acordado em tempos programados através desta funcionalidade.

Antena: Emite e recebe sinais de RF na faixa de frequência do canal LoRa da região AU915;

Transceptor RF: Transmite e recebe sinais de RF, contendo amplificador de potência para a transmissão e amplificador de baixo ruído e alto ganho para a recepção RF;

Modem RF: Transmite os dados digitais do processador e os utiliza para modular os sinais de RF utilizando tecnologia LoRa através do CSS. Realiza, também, o caminho inverso, demodulando os sinais RF recebidos em dados digitais para o processador;

Transdutor: Como transdutor, é utilizado um sensor, que é um tipo específico de transdutor que converte os sinais físicos em sinais elétricos. Para este projeto é convertida a aceleração em sinais elétricos equivalentes;

Condicionamento de sinal: Ajusta e prepara os sinais para processamento, incluindo amplificação e filtragem;

Digitalização do sinal: Converte sinais analógicos em digitais para processamento;

Referência de tensão: Fornece uma tensão de referência estável e precisa em relação ao tempo e as variações de temperatura ambiente para o funcionamento correto das conversões do domínio analógico para digital, tais como a leitura do transdutor e da tensão da bateria;

Com estas funcionalidades identificadas, foram pesquisados e analisados os componentes eletrônicos para atendê-las. O que se segue são os componentes principais que foram selecionados. Alguns deles acumulam mais de uma funcionalidade, como o microcontrolador, que é o núcleo do sistema e realiza o processamento digital, a temporização e o controle de todos os outros elementos do sistema. Outro exemplo é o módulo LoRa que contém o transceptor RF e o modem RF. A seguir, são descritos os principais componentes do ED LoRaWAN desenvolvido.

6.1 MÓDULO LORA

Para este projeto, foi escolhido o módulo LoRa1276-915, que utiliza o chip SX1276 da Semtech para realizar a comunicação sem fio do ED com o GW, por incluir muitas das funcionalidades demandadas de forma integrada e pelo fato da tecnologia LoRa ser patenteada pela Semtech para uso comercial. Este módulo adota a técnica de modulação de frequência CSS LoRa e opera no canal de frequência central de 915 MHz, na faixa entre 900 e 940 MHz, indicado para o Brasil. Ele possui um transceptor RF e um modem RF que suporta a tecnologia LoRa. O módulo possui um amplificador para a transmissão até 20 dBm de potência e um amplificador de baixo ruído e alto ganho para a recepção RF com sensibilidade de até -139 dBm. Possui uma taxa de transferência ajustável entre 0,018 e 37,5 Kbps em modo LoRa. O módulo é controlado por uma interface SPI e possui um modo de baixo consumo de energia adormecido máximo garantida de 1,5 uA. O módulo pode ser alimentado na faixa entre 1,8 e 3,7 V que é adequado para funcionamento a partir de baterias e, tipicamente, consome até 100 mA em modo de transmissão com 20 dBm de potência e 10 mA em modo de recepção, aproximadamente.

6.2 SENSOR INERCIAL

Como elemento sensor para converter a grandeza física, aceleração, foi utilizado o ICM-20689 da TDK InvenSense. Este circuito integrado é um sensor inercial que utiliza a tecnologia *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) (Sistemas Micro-Eletro-Mecânicos) e contém um acelerômetro e giroscópio de 6 eixos com interface I2C e SPI. Ele possui um acelerômetro de 3 eixos com faixa de medição de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g e ± 16 g e um giroscópio de 3 eixos com faixa de medição de ± 250 , ± 500 , ± 1000 e ± 2000 graus por segundo. O sensor possui um conversor analógico digital de 16 bits e um filtro digital programável. Pode operar em um modo de baixo consumo de energia em *sleep* de até 6,4 uA, 20 uA em modo ativo e ser alimentado com uma tensão de 1,71 a 3,45 V. Ele possui um modo de interrupção que pode ser configurado para acordar o microcontrolador quando uma determinada condição de aceleração é atingida. Desta forma este componente integra, em um único encapsulamento, as funcionalidades de transdutor (sensor), condicionamento de sinal e digitalização.

6.3 MICROCONTROLADOR

O *Microcontroller Unit* (MCU) (Unidade de Microcontrolador) é o núcleo do sistema e realiza o processamento digital, a temporização e o controle de todos os outros elementos do ED. Para este projeto, foi escolhido o microcontrolador STM32L433 da STMicroelectronics. Este microcontrolador é baseado no núcleo ARM Cortex-M4 de 32 bits e possui ultrabaixo consumo de energia em modo ativo, bem como nos outros modos e, principalmente, em modos adormecidos, o que é crítico para aplicações em WSN. Ele possui 256 KB de memória flash, 64 KB de RAM e 4 KB de EEPROM suficientes para o *firmware* e armazenamento das formas de onda do sensor inercial. Além disso, ele possui um *Real Time Clock* (RTC) (Relógio de Tempo Real) com calendário em *hardware* que permite que o microcontrolador entre em modo de baixo consumo de energia mantendo a operação de uma base de tempo, temporizadores e um calendário, para que acorde, conforme alarmes programados, ele mesmo e todos os outros componentes do sistema de maneira coordenada. Ele possui 3 interfaces SPI. Os periféricos SPI são necessários para comunicação com o módulo LoRa e o sensor inercial. Este MCU pode ser alimentado com uma tensão de 1,71 a 3,6 V, adequado para baterias.

Em destaque cabe mencionar os seguintes consumos de energia e seus respectivos modos de operação:

- a) 200 nA no modo VBAT. Neste modo, o MCU alimenta, através do pino VBAT, apenas o RTC e registros de backup de 32x32 bits, enquanto os demais periféricos estão em modo adormecidos ou desligados. Este é o modo de menor consumo de energia possível para o MCU mantendo o RTC em execução, permitindo longa duração da bateria para o ED;
- b) 8 nA no modo de desligamento (shutdown);
- c) 28 nA no modo de espera (standby);
- d) 280 nA no modo de espera com RTC;
- e) 1,0 μ A no modo Stop 2, 1,28 μ A com RTC;
- f) 84 μ A/MHz no modo de execução (modo ativo).

Apesar deste MCU já possuir osciladores internos e circuitos de multiplicação e divisão de *clock*, foram providos a ele, dois osciladores externos de boa precisão e estabilidade temporal e térmica. Um, de alta frequência (32 MHz), permitirá uma taxa de aquisição precisa ao acionar o sensor inercial através do protocolo SPI. O outro, de baixa frequência (32,768 KHz) e baixo consumo de energia, acionará o circuito de RTC interno do MCU para não ocorrerem desvios temporais significativos nos alarmes programados para acordar o sistema.

6.4 ALIMENTAÇÃO

Este circuito consiste basicamente na bateria e no regulador de tensão elétrica chaveado de corrente contínua de alta performance.

Dentre os tipos e tecnologias de baterias primárias disponíveis, foi escolhido o tipo Lithium Thionyl Chloride (LI/SOCl₂) (Cloreto de Tionila de Lítio). Devido a sua baixa taxa de autodescarga e alta densidade de energia, ela é comumente usada em aplicações que requerem uma longa vida útil, tais como WSN. Opera em uma ampla faixa de temperaturas e fornece uma tensão nominal inicial de 3,6 V.

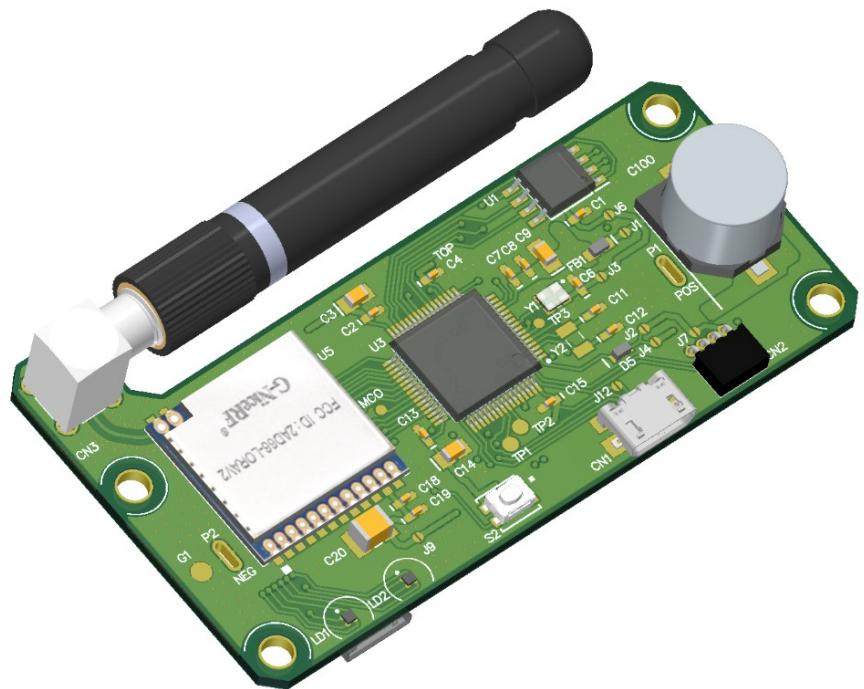
Para regular a tensão elétrica da bateria em 3,3 V nominais para alimentar os componentes do circuito do ED, foi utilizado o conversor de energia chaveado aumentador e abaixador (*buck-boost*), TPS63900 da Texas Instruments. Este componente é um regulador de tensão chaveado de alta eficiência (entre 75% e 95% de rendimento) e baixo consumo de energia que pode operar com tensões de entrada entre 1,8 e 5,5 V e fornecer uma tensão de saída ajustável entre 1,8 e 5 V. Ele consome uma corrente quiescente de apenas 75 nA e em modo de desligamento de 60 nA, tipicamente. Ele possui um limitador de corrente de entrada ajustável, útil para limitar a corrente da bateria e aumentar a vida útil dela. Ele pode fornecer uma corrente de saída de até 1,45 A adequado para suportar a maior demanda de corrente elétrica que ocorre durante a transmissão dos dados. Este componente é adequado para aplicações de baixo consumo de energia e alimentadas por bateria.

6.5 PCI E DIAGRAMA

A montagem (soldagem) dos componentes foi realizada em uma placa de circuito impresso (PCI) confeccionada a partir do projeto de layout com quatro camadas no qual a espessura, espaçamento e roteamento das trilhas de RF seguiram especificações calculadas para atender o casamento de impedância necessário no caminho entre a saída de RF do módulo LoRa e o conector da antena na PCI. Ainda nesta PCI, foram selecionadas a espessura e tipo de dielétrico entre as camadas condutoras de cobre para atender o cálculo do casamento de impedância.

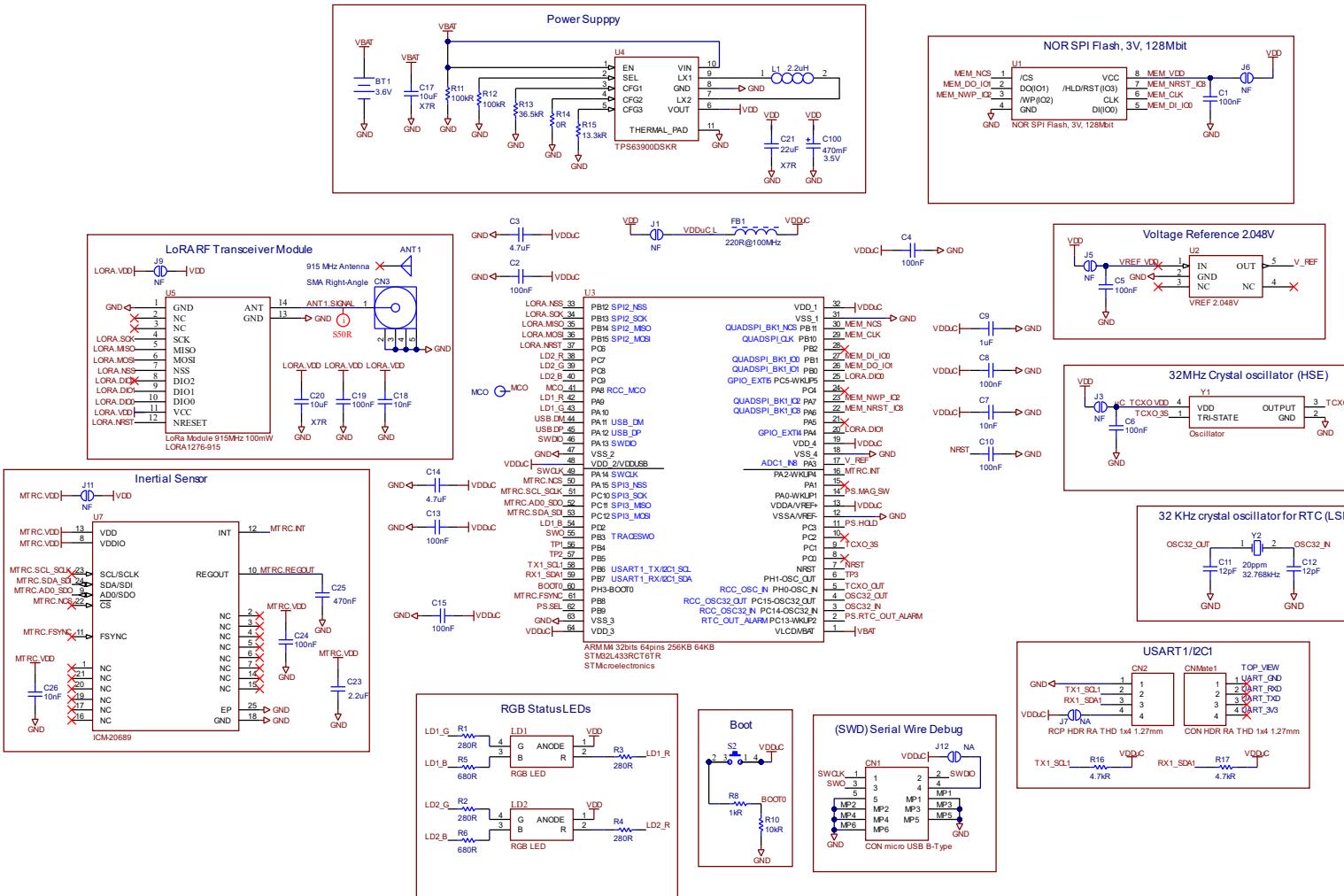
O resultado da PCI com os componentes eletrônicos pode ser visto na representação tridimensional da Figura 19 e o diagrama do circuito eletrônico na Figura 20.

Figura 19 - Representação tridimensional da PCI com componentes eletrônicos do ED LoRaWAN desenvolvido



Fonte: O autor

Figura 20 - Diagrama do circuito eletrônico do ED LoRaWAN



7 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica do uso de redes de sensores sem fio de baixa latência e baixa transmissão de dados em aplicações que requerem a transmissão de uma maior quantidade de dados ao qual estes tipos de redes forma inicialmente propostos utilizando técnicas de segmentação e compressão de dados.

Com o intuído de verificar esta viabilidade, foi implementado um *firmware* e desenvolvido um *hardware* de um dispositivo sensor sem fio para se comunicar com um *gateway* em uma rede. Foi desenvolvido também um programa de computador capaz de receber os dados pelo *gateway* e assim gerar um fluxo de comunicação dos dados coletados do sensor. Depois de toda verificação do sistema de testes, através uma metodologia experimental realizou-se uma análise descritiva quantitativa das variáveis envolvidas.

Nesta seção, as etapas do procedimento experimental são explicadas de forma clara, de maneira a permitir a replicação dos testes de forma precisa, incluindo a configuração do ambiente de testes e detalhando a forma como os dados são coletados sistematicamente utilizando instrumentos adequados.

Com os dados coletados, a próxima etapa consiste na análise deles. Eles são investigados através de uma análise descritiva e por meio de gráficos e tabelas.

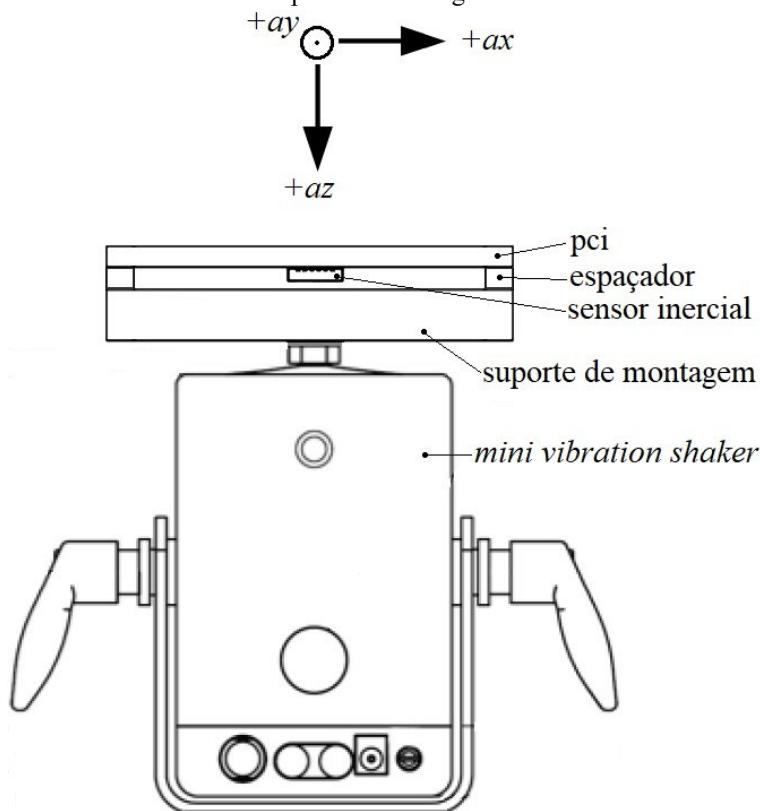
Na sequência, são apresentados materiais eletrônicos e mecânicos utilizados para a montagem do dispositivo de testes. Além disso, são definidos os instrumentos de medidas para realização dos testes e coleta dos dados, listando as marcas, modelos e breve descrição deles.

Finalmente, são apresentados os recursos computacionais, tais como programas e ferramentas, aplicados durante o desenvolvimento e análise deste trabalho.

7.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ED, contendo o sensor inercial, foi fixado com o lado *top* (lado de cima) virado para cima em um *mini vibration shaker* (Figura 21), recebendo uma forma de onda senoidal com frequência fixa de 10 Hz, e posicionado de maneira que a vibração fosse aplicada no eixo *az*. Porém, como o sensor inercial foi montado no lado *bottom* (lado de baixo) da PCI, a direção do eixo *az* era a mesma da aceleração da gravidade, porém no sentido invertido. Apesar da forma de onda ter sido mantida constante durante este teste, os sinais adquiridos pelo sensor apresentaram, naturalmente, pequenas variações devido aos erros provenientes das tolerâncias elétricas dos equipamentos, componentes eletrônicos e do próprio sensor. Além disso, a imprecisão na montagem e a presença de ruídos físicos provenientes de vibrações mecânicas do ambiente, também, contribuíram para as pequenas oscilações.

Figura 21 - Orientação do sensor inercial do ED fixado no *mini vibration shaker* através da PCI do ED e o suporte de montagem.



Fonte: autor.

Os dados eram provenientes do sensor inercial MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) com três eixos de acelerômetro sendo amostrados durante 1 segundo com uma taxa de 250 amostras por segundo. Como a amostra de cada eixo (*ax*, *ay* e *az*) era de 16 bits, isso

gerou um volume de 1500 bytes de dados, para uma aquisição de 1 segundo, para ser enviado via rede LoRaWAN para cada ciclo de aquisição. Esses dados foram comprimidos, segmentados e enviados em pacotes de 50 bytes, utilizando a estratégia de confirmação apenas no final (retransmissão tardia).

Para gerar mudanças significativas nas diferenças entre amostras sucessivas e comparar com a performance do algoritmo de compressão, decidiu-se alterar as escalas do sensor, ao invés de alterar a amplitude do sinal de vibração, devido às limitações de oscilação do *mini vibration shaker*. Para um mesmo sinal de entrada, ao se aumentar a escala, a sensibilidade é reduzida e, consequentemente, a diferença máxima entre as amostras sucessivas é menor. No caso do acelerômetro foram usadas ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g e ± 16 g. Para cada escala foram repetidos 10 vezes cada ciclo de aquisição antes de prosseguir para a próxima. Assim, cada escala ficou com 2500 amostras.

7.3 COLETA DE DADOS

Como mencionado anteriormente, a coleta de dados foi realizada por um *software* desenvolvido para computador. O computador, conectado através de uma rede cabeada ethernet a um *gateway*, cumpria o papel de um cliente MQTT e um servidor de aplicação (AS) ao mesmo tempo, ambos de forma bem simplificada, apenas para permitir receber os segmentos enviados pelo ED ao *gateway*. Assim, depois que todos os segmentos eram recebidos corretamente, eles eram montados na ordem certa, descompactados, tinham analisadas as taxas de compressão e, por fim, salvos em arquivos no computador.

Portanto, este software tem a função de um coordenador de rede para permitir a execução da estratégia de retransmissão tardia dos pacotes, ou seja, a mensagem de reconhecimento era enviada ao ED pelo *gateway* apenas no final de cada conjunto de transmissões (*upload*) informando quais segmentos precisam ser retransmitidos novamente. Este processo poderia ser repetido, caso necessário, até todos os segmentos serem transmitidos.

7.4 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados recebidos e descompactados correspondiam as amplitudes dos 3 eixos de aceleração do sensor inercial do ED acoplado no *mini vibration shaker*. Como o algoritmo de compressão utilizado não gera perdas de dados e, também, as mensagens no protocolo possuíam

mecanismos de checagem de erros nos segmentos, não havia necessidade de realizar nenhum tratamento dos dados na camada de aplicação para realizar algum tipo de recuperação.

Portanto, foi realizada uma análise descritiva nos dados brutos recebidos com o cálculo da medida de tendência central (média), máximos, mínimos e medida de dispersão (desvio padrão). O mesmo foi feito com as diferenças entre amostras sucessivas a partir dos dados brutos recebidos, para ambos poderem ser comparados com as taxas de compressão atingidas.

7.5 MATERIAIS E AMBIENTE

7.5.1 Dispositivo Sensor LoRaWAN

Este dispositivo é o ED desenvolvido que foi descrito na seção 6, DISPOSITIVO ED LORAWAN.

7.5.2 Osciloscópio

Foi utilizado um osciloscópio digital, Agilent InfiniiVision DSO7034A, para verificar a amplitude e frequência do sinal de onda senoidal enviado a partir do gerador de forma de onda para acionar o *mini vibration shaker* e evitar de danificá-lo e para garantir os parâmetros da onda do teste.

7.5.3 Gerador de forma de ondas

Um modulo gerador de sinal NI 9269 da National Instruments foi conectado em um rack NI cDAQ-9174 (NI CompactDAQ), onde este último, através da porta USB do computador, foi configurado para gerar o sinal utilizado para acionar o *mini vibration shaker*.

7.5.4 Mini Vibration Shaker

O modelo K2007E01 da empresa TMS The ModalShop, INC foi utilizado para oscilar mecanicamente, de forma controlada, o ED LoRaWAN desenvolvido e, consequentemente, o sensor inercial contido nele.

7.5.5 Computador

Foi utilizado um computador desktop com sistema operacional Windows 10 para executar os softwares de configuração do gerador de forma de onda, bem como o programa servidor para se comunicar com servidor de rede do gateway. Este computador estava conectado via cabo USB ao gerador de sinal e via rede cabeadas Ethernet ao *gateway*.

7.5.6 Gateway LoRaWAN

Para os testes foi utilizado o RAK7268 WisGate Edge Lite 2. Ele possui Ethernet integrada para uma configuração e comunicação simples, além de suportar o modo de *Bridge MQTT* (Ponte MQTT). Ele possui um reenviador de pacotes LoRa integrado e uma interface gráfica de usuário, permitindo uma configuração rápida ou totalmente personalizada. Contém um servidor de rede integrado para fácil implantação de aplicações e integração de *gateways*.

7.5.7 Montagem do sistema

A Figura 22 mostra a esquerda e a frente o ED LoRaWAN e bateria fixados, através de um dispositivo de plástico na cor preta, ao *mini vibration shaker*/

Figura 22 - Foto do sistema de testes do ED LoRaWAN



Fonte: o autor.

7.6 PROGRAMAS E FERRAMENTAS

7.6.1 Python

Utilizada a linguagem Python versão 3.8.8 para desenvolver o software, descrito no computador com sistema operacional Windows 10.

7.6.2 VS CODE

Executado o software desenvolvido no Windows Subsystem for Linux (WSL) (Subsistema do Windows para Linux) distribuição Ubuntu 20.04 através do Visual Studio Code.

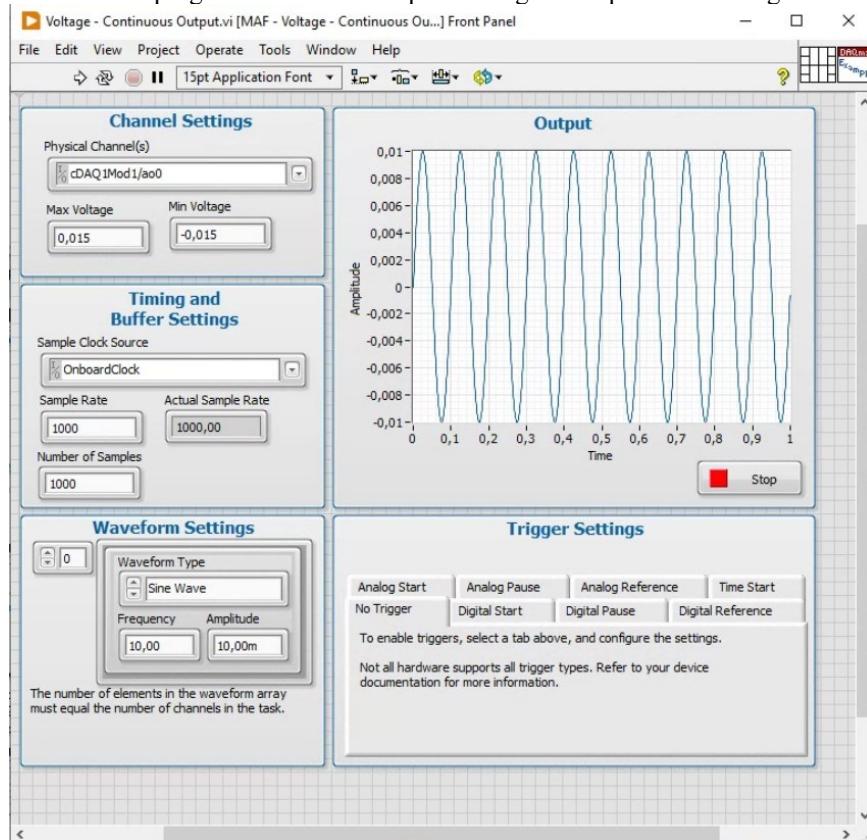
7.6.3 STM32CubeIDE

Utilizado para desenvolver o código fonte do *firmware* do MCU, bem como depurar e gravar na memória dele.

7.6.4 NI LabView

Para gerar o sinal de acionamento do *mini vibration shaker* foi utilizado o software LabView para configurar o gerador de sinal NI 9269 conforme os parâmetros mostrados na Figura 23.

Figura 23 - Painel frontal do programa em LabView para configurar os parâmetros do gerador de sinal NI 9269.



Fonte: (NI, 2021)

7.6.5 Firmware do ED LoRaWAN

- a) Configuração para aquisição dos sinais do sensor inercial:
 - Quantidade e tipos de eixos: 3 eixos de aceleração (ax , ay , az)
 - Taxa de aquisição: 250 amostras por segundo (intervalo entre amostras de $1 / 250 = 0,004$ segundos).
 - Tempo de aquisição: 1 segundo
 - Resolução da conversão: 16 bits para cada amostra por eixo
 - Tamanho de cada aquisição: $3 * 250 * 1 * 16 = 12.000$ bits ou 1.500 bytes
- b) Configuração do algoritmo de compactação:
 - Dicionário utilizado: fixo
- c) Configuração do algoritmo de segmentação:
 - Tamanho do seguimento: 50 bytes (base 64)
 - Número de seguimentos: 30 seguimentos
- d) Configuração do RTC
 - Tempo adormecido ou alarme: 20 minutos

7.6.6 Programa servidor no computador

O programa desenvolvido pode ser separado em 3 partes principais:

MQTT

Esta parte trata-se de um cliente MQTT implementando como um processo que utiliza a biblioteca paho.mqtt.client do Python para se conectar ao broker MQTT no *gateway*, assinar tópicos e publicar mensagens. Ele também integra a biblioteca zmq para comunicação entre processos. A configuração inicial do cliente MQTT define o servidor MQTT, a porta, o aplicativo e o dispositivo no qual se deve conectar, além dos tópicos de assinatura e publicação. É a interface entre o *gateway* e o servidor de aplicação, sendo este último implementado na parte CMD definida logo abaixo.

CMD

Esta parte implementa um servidor para processar comandos recebidos via sockets ZeroMQ (zmq) do processo Cliente MQTT. Ela define várias funções para codificar e decodificar diferentes tipos de comandos, além de funções auxiliares para manipulação de dados e simulação de respostas do servidor, inclusive simular perda de pacotes de upload para fins de testes, respostas em tempos aleatórios dentre outras, caso seja necessário. Ela também, reorganiza os pacotes recebidos, descomprime e salva, em arquivos no formato texto, no computador contendo os dados coletados dos eixos do sensor inercial. Estes arquivos contém os dados brutos que são analisados neste trabalho.

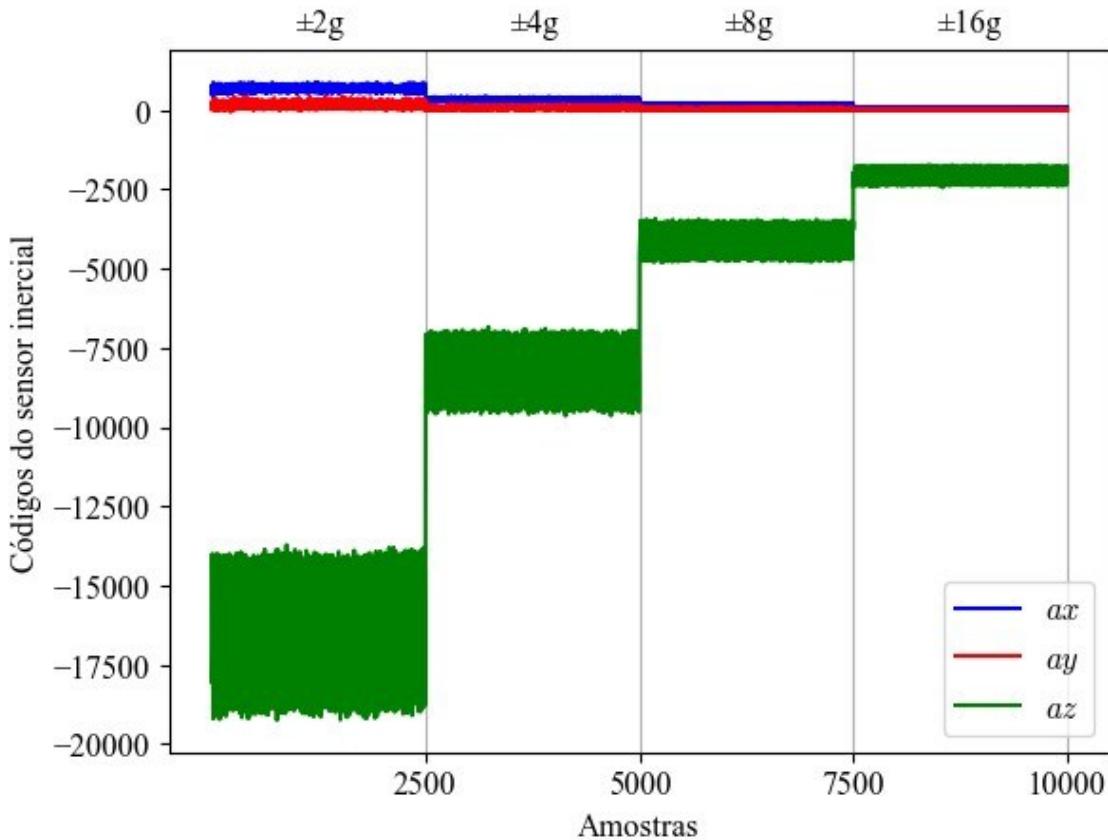
DHC

A parte DHC utiliza a biblioteca ctypes para permitir que o Python chame funções escritas na linguagem C, do mesmo código fonte utilizado no firmware do MCU do ED, diretamente a partir do código Python no computador. Ao carregar a biblioteca compartilhada com CDLL, o código Python pode acessar e utilizar as funções definidas nessa biblioteca, que no caso é a biblioteca escrita em C para descompactar os dados provenientes do ED LoRaWAN.

8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

O gráfico da Figura 24 mostra a união de todas as amostras adquiridas dos eixos ax , ay e az agrupadas em 4 segmentos e, da Figura 25, o delta entre amostras sucessivas dax , day e daz . O primeiro segmento contém as amostras adquiridas com o acelerômetro configurado para a escala de $\pm 2g$, o segundo para $\pm 4g$, o terceiro para $\pm 8g$ e o quarto para $\pm 16g$. O sinal foi gerado pelo *mini vibration shaker*, como descrito anteriormente. Como pode-se notar, os códigos decimais do sensor inercial, representando as amplitudes do sinal e as diferenças sucessivas em cada seguimento, foram diminuindo à medida que as escalas foram aumentando.

Figura 24 - União das amostras dos sinais de aceleração capturadas pelo sensor inercial em diferentes escalas.
Estão agrupadas em 4 segmentos, um para cada escala: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$.

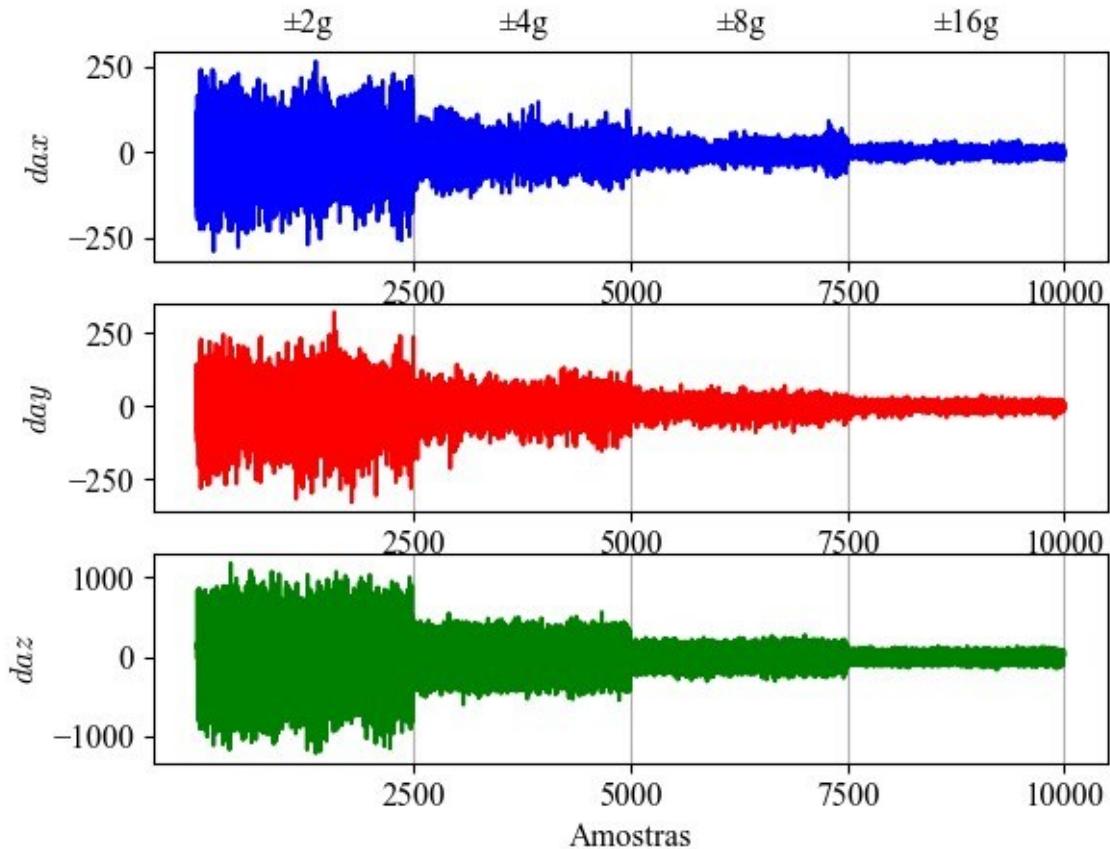


Fonte: O autor.

Como foi mencionado anteriormente, a direção do eixo az é a mesma da aceleração gravitacional, porém em sentido invertido. Assim, o eixo az mede a aceleração da gravidade constante combinada com a oscilação do *mini vibration shaker*. Por isso, os valores do eixo az estão negativos e oscilando em torno do código decimal equivalente a $-1g$ conforme pode ser observado no sinal az da Figura 24 e verificado na linha de aceleração igual a $-1,0g$ da Tabela

4 para cada uma das escalas que podem ser configuradas no acelerômetro. Assim, como exemplo, para a escala de $\pm 2g$, o sinal az oscilou em torno de -16384.

Figura 25 - União das diferenças entre amostras sucessivas dos sinais de aceleração por eixo capturadas pelo sensor inercial em diferentes escalas. Estão agrupadas em 4 segmentos, um para cada escala: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$. O primeiro delta de cada seguimento é o valor central do sensor, neste caso, zero.



Fonte: O autor.

Tabela 4 - Códigos decimais do sensor inercial ACCEL representando alguns valores do sinal de aceleração para cada faixa.

FAIXA	$\pm 2g$	$\pm 4g$	$\pm 8g$	$\pm 16g$
+16,0g			32767	
+8,0g		32767	16383	
+4,0g	32767	16383	8191	
+2,0g	32767	16383	8191	4095
+1,0g	16383	8191	4095	2047
+0,5g	8191	4095	2047	1023
ACCEL	+0,0g	0	0	0

-0,5g	-8192	-4096	-2048	-1024
-1,0g	-16384	-8192	-4096	-2048
-2,0g	-32768	-16384	-8192	-4096
-4,0g		-32768	-16384	-8192
-8,0g			-32768	-16384
-16,0g				-32768

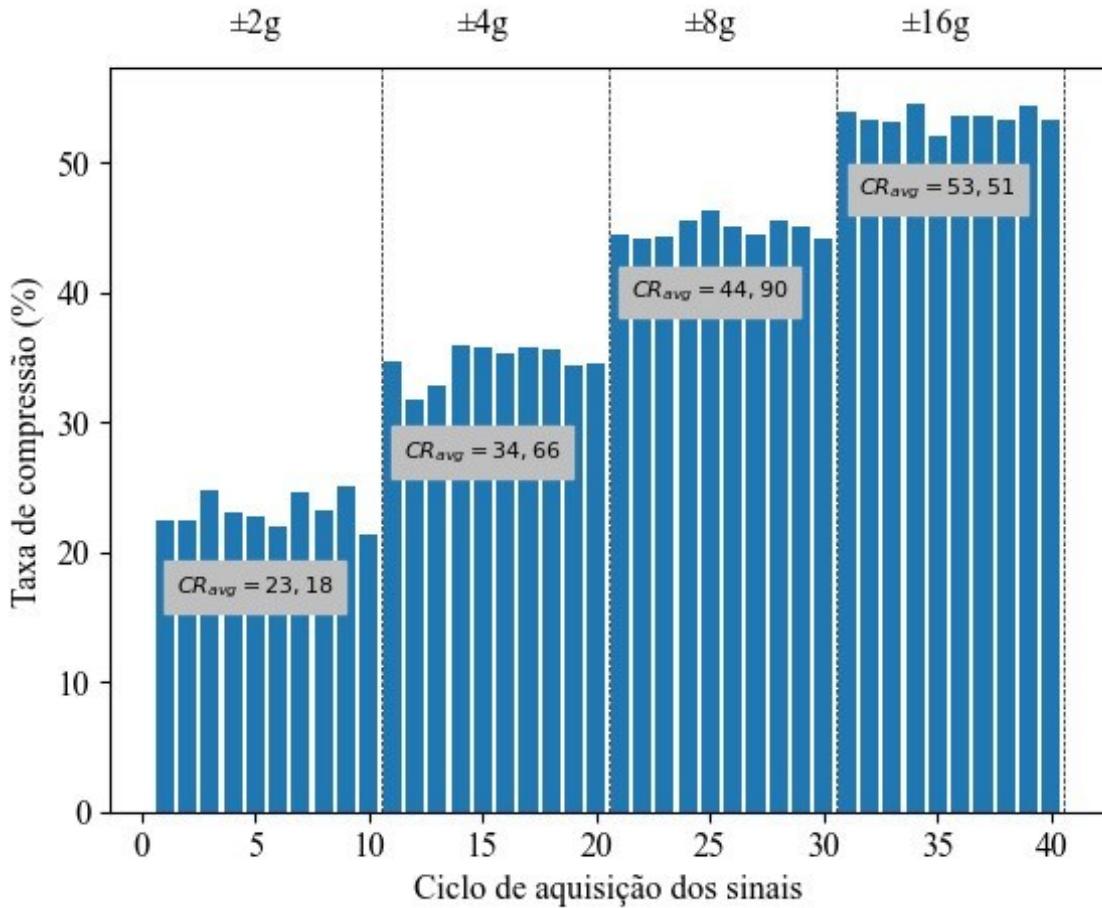
Fonte: O autor.

Para cada ciclo de aquisição, os sinais dos 3 eixos do sensor inercial foram adquiridos, comprimidos, segmentados, transmitidos através da LoRaWAN, recebidos, montados e descomprimidos. Após isto, o *Compressed Size* (*comp_size*) (Tamanho Comprimido) dos dados foi comparado com o dos dados originais *Original Size* (*orig_size*) (Tamanho Original) para calcular a taxa de compressão *CR* conforme (1). Como os parâmetros de aquisição dos sinais coletados pelo sensor eram sempre iguais, com exceção da escala, o tamanho dos dados originais *orig_size* antes da compressão também era fixo e igual a 1500 bytes para cada ciclo (equivalente a 250 amostras de 16 bits por segundo por eixo, durante 1 segundo, para os 3 eixos).

$$CR = 100\% \left(1 - \frac{comp_size}{orig_size} \right) \quad (1)$$

Os resultados obtidos são mostrados no gráfico da Figura 26. Para cada escala do sensor, foram repetidos 10 ciclos de aquisição do sinal, dando um total de 40. As 10 taxas de compressão dentro da mesma escala não eram iguais. Isto era esperado, pois os sinais adquiridos pelo sensor entre cada ciclo apresentam pequenas variações devido as causas mencionadas anteriormente. Como cada ciclo coleta 250 amostras (1500 bytes), para cada escala foram coletadas 2500 amostras (15000 bytes) e no total 10000 (60000 bytes). Como pode-se observar, o valor médio da taxa de compressão *CR_{avg}* subiu com o aumento da escala configurada, ou seja, o algoritmo de compressão obteve performance melhor com a menor sensibilidade do acelerômetro na qual as amplitudes das diferenças entre amostras sucessivas eram menores, conforme era esperado e foi mostrado no gráfico da Figura 17.

Figura 26 - Taxas de compressão CR obtidas para cada escala do sensor.



Fonte: O autor.

Com os valores obtidos de CR, foram calculados os parâmetros estatísticos, mostrados na Tabela 5, sendo eles a média *avg*, desvio padrão *std*, valor máximo *max* e valor mínimo *min* para cada escala. Eles mostram que as variações de taxa de compressão dentro da mesma escala, provocadas por erros, não são tão significativas quanto as devido a mudança de escalas.

Além disso, com o objetivo melhor entender a relação entre a performance de CR e o comportamento dos dados originais das Figura 24 e Figura 25, foram calculados os parâmetros estatísticos apresentados, respectivamente nas Tabela 6 e Tabela 7. Como a vibração imposta pelo *mini vibration shaker* estava aplicada quase totalmente no eixo z, os parâmetros estatísticos *az* e *daz* são dominantes em todas as escalas. Os demais sinais *ax*, *ay*, *dax* e *day* apresentam variações não intencionais para este teste.

De qualquer forma, em todos os eixos na Tabela 7, o desvio padrão das diferenças das amplitudes diminuem ao se configurar escalas maiores no acelerômetro, ou seja, quanto menos dispersos, símbolos menores do dicionário são utilizados e melhor é performance do algoritmo de compressão.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos da taxa de compressão CR para cada faixa do sensor.

	FAIXA	$\pm 2g$	$\pm 4g$	$\pm 8g$	$\pm 16g$
<i>CR(%)</i>	avg	23,18	34,66	44,90	53,51
	std	1,25	1,38	0,72	0,72
	max	25,12	35,94	46,32	54,58
	min	21,43	31,80	44,16	52,03

Fonte: O autor.

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos dos dados originais de cada eixo do acelerômetro para cada escala.

	FAIXA	$\pm 2g$	$\pm 4g$	$\pm 8g$	$\pm 16g$
<i>ax</i>	avg	688,63	343,12	172,61	85,76
	std	70,43	32,81	16,33	8,27
	max	892,00	446,00	236,00	111,00
	min	472,00	232,00	122,00	60,00
<i>ay</i>	avg	152,08	75,06	37,93	18,59
	std	73,90	37,31	19,17	9,21
	max	452,00	212,00	108,00	54,00
	min	-56,00	-26,00	-15,00	-9,00
<i>az</i>	avg	-16494,50	-8249,10	-4122,76	-2062,04
	std	1484,53	739,94	369,69	184,82
	max	-13720,00	-6834,00	-3417,00	-1721,00
	min	-19256,00	-9646,00	-4804,00	-2439,00

Fonte: O autor.

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos das diferenças de amostras sucessivas dos dados de cada eixo do acelerômetro para cada escala.

	FAIXA	$\pm 2g$	$\pm 4g$	$\pm 8g$	$\pm 16g$
<i>dax</i>	avg	-0,01	0,08	-0,08	0,00
	std	96,37	44,30	22,03	11,10
	max	264,00	146,00	91,00	35,00
	min	-288,00	-132,00	-74,00	-33,00
<i>day</i>	avg	0,02	-0,00	0,01	0,01

	std	90,01	45,97	23,90	11,50
	max	320,00	142,00	73,00	38,00
	min	-328,00	-212,00	-90,00	-45,00
<i>daz</i>	avg	0,04	0,46	-0,22	0,03
	std	480,37	237,64	119,49	59,96
	max	1176,00	564,00	279,00	138,00
	min	-1208,00	-598,00	-306,00	-163,00

Fonte: O autor.

Esse comportamento ocorre porque o algoritmo de compressão aproveita as características dos dados adquiridos em redes de sensores sem fio, onde as variações entre amostras sucessivas são suaves, ou seja, têm pequenos valores de delta próximos à média zero. Dessa forma, ele realiza o mapeamento dos valores delta começando com alguns bits para deltas próximos a zero e aumenta exponencialmente o número de bits para valores maiores, conforme mostrado na Tabela 3.

9 CONCLUSÃO

Este trabalho destacou a diversidade de aplicações e a relevância mercadológica das tecnologias de IoT. Mostrou as vantagens e desvantagens delas frente aos variados requisitos demandados. Analisou o uso de redes LoRaWAN para aplicações de baixa taxa de transmissão e alta latência, como o monitoramento de sensores. Discutiu como ampliar o uso dessas redes em aplicações que demandam o envio de maiores volumes de dados, como formas de onda. Contextualizou a importância da segmentação e compressão de dados em redes de sensores sem fio, apresentando uma revisão bibliográfica sobre o tema e destacando a relevância da compactação de dados em redes LoRaWAN. A partir disso, foi proposta e desenvolvida uma estratégia de segmentação e compactação facilmente portável para sensores microcontrolados em redes LoRaWAN, com foco em dispositivos classe A e operando com SF12. O hardware e o firmware de um dispositivo ED LoRaWAN completo foi desenvolvido e montado para poder analisar a viabilidade das propostas através de testes em um cenário prático com dados reais adquiridos de um sensor inercial.

Os resultados mostraram que a compactação de dados, quando aplicada as formas de onda dos sinais gerados pelos 3 eixos de aceleração (ax , ay e az) do sensor inercial do ED apresentou taxas de compressão variadas, que melhorou com a redução das amplitudes das diferenças entre amostras sucessivas que foi gerada à medida que a sensibilidade do acelerômetro diminuiu pela mudança nas escalas do sensor inercial. Os parâmetros estatísticos calculados reforçaram que as variações de taxa de compressão dentro da mesma escala são muito menores quanto as mudanças de escala. Isso indica que a estratégia de compactação utilizando o compressor LEC é eficiente, pois apresentou compactação em todos os casos analisados (CR sempre positivo), especialmente para dados com pequenas variações entre amostras sucessivas, característica comum em redes de sensores sem fio. As estratégias mostraram-se eficientes não apenas em cenários teóricos, mas também em testes práticos com dados reais adquiridos de sensores iniciais, confirmando a viabilidade e a eficácia das técnicas propostas para o uso em redes LoRaWAN.

9.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a flexibilidade de configuração disponível no ED LoRaWAN desenvolvido, seria interessante experimentar e analisar o desempenho da taxa de compressão variando a quantidade e tamanho de seguimentos transmitidos, bem como utilizando outros

valores para os parâmetros SF e BW da modulação LoRA. Também seria muito útil, avaliar as vantagens e desvantagens para a WSN, ao se implementar um algoritmo com dicionário dinâmico, que se adapta em tempo real aos dados adquiridos, considerando as taxas de compressão atingidas, o envio do dicionário juntamente com os dados para o receptor conseguir descomprimir, e, também, os consumos de energias necessários devido a este acréscimo no processamento.

Outra vertente com potencial, seria avaliar a utilização de técnicas de pré-processamento digital dos dados dos sensores com o objetivo de aproveitarem melhor as características do algoritmo de compressão sem trazer prejuízos a ponto de tornar inviável sua utilização para WSN.

O dispositivo ED LoRAWAN desenvolvido está limitado para operar na faixa de 915 MHz. Outra proposta seria testar em uma rede LoRa na banda de 2.4 GHz, sendo necessário, neste caso, trocar o módulo LoRA para a frequência adequada além de outras adaptações.

Outra abordagem a ser desenvolvida, com o intuito de reduzir os tempos de resposta envolvidos no protocolo de comunicação, seria transferir parte do processamento lógico dos Servidores de Aplicação (AS) e Servidores de Rede (NS) para os *Gateways* (GW). Sendo mais específico, consistiria em implementar nos GWs a parte responsável pelas respostas de quadros de reconhecimento (*acknowledge*).

REFERÊNCIAS

3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT) (Release 13). [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.3gpp.org>>.

802.15 WG. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4g/5053/>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

ABI RESEARCH. More Than 30 Billion Devices Will Wirelessly Connect to the Internet of Everything in 2020. Disponível em: <<https://www.abiresearch.com/press/more-than-30-billion-devices-will-wirelessly-conne/>>. Acesso em: 26 out. 2024.

AKRAM, P. Saleem; LAKSHMANA, M. Coverage of LoRaWAN in Vijayawada. In: **Intelligent Analytics for Industry 4.0 Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2023. p. 175–184. <https://doi.org/10.1201/9781003321149-12>

AL-FUQAHÀ, Ala *et al.* Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 1 out. 2015. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>

ALSALAET, Jaafar K.; ALI, Abduladhem A. Data compression in wireless sensors network using MDCT and embedded harmonic coding. **ISA Transactions**, v. 56, p. 261–267, maio 2015. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.11.023>

ANEDDA, Matteo *et al.* An Energy-efficient Solution for Multi-Hop Communications in Low Power Wide Area Networks. In: IEEE, jun. 2018. <https://doi.org/10.1109/BMSB.2018.8436722>

ASKHEDKAR, Anjali; CHAUDHARI, Bharat; ZENNARO, Marco. Hardware and software platforms for low-power wide-area networks. In: **LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications**. [S.l.]: Elsevier, 2020a. p. 397–407. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818880-4.00019-3>

ASKHEDKAR, Anjali; CHAUDHARI, Bharat; ZENNARO, Marco. Hardware and software platforms for low-power wide-area networks. In: **LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications**. [S.l.]: Elsevier, 2020b. p. 397–407. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818880-4.00019-3>

ASTUDILLO LEÓN, Juan Pablo *et al.* Exploring the potential, limitations, and future directions of wireless technologies in smart grid networks: A comparative analysis. **Computer Networks**, v. 235, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109956>

CASALS, Lluís *et al.* Modeling the energy performance of LoRaWAN. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 10, 16 out. 2017. <https://doi.org/10.3390/s17102364>

COMMITTEE, LoRa Alliance Technical. **LoRaWAN Specification v1.0.3** (LoRa Alliance, Org.). [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-3/>.

COMMITTEE, LoRa Alliance Technical. **RP002-1.0.3 LoRaWAN Regional Parameters** (LoRa Alliance, Org.). [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/>.

EVERYNET. **Everynet Documentation**. Disponível em: <https://ns.docs.everynet.io/channel_plans/LA915A.html>.

FAGUNDES, Marden Ambrósio; ALMEIDA, Marcelo Barros. **Delta/Huffman Compressor/Decompressor (DHC)**. (Github, Org.), nov. 2022. Disponível em: <<https://github.com/marcelobarrosalmeida/dhc>>

FLORE, Dino. **3GPP Standards for the Internet-of-Things**. Disponível em: <https://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP_Standards_for_IoT.pdf>. Acesso em: 1 set. 2024.

GADA, Prerak; SAYED, Kulsum. Fundamentals of Internet of Things (IoT): Applications, Challenges, Future Trends. **International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology**, p. 381–389, 27 dez. 2021.
<https://doi.org/10.48175/ijarsct-2201>

GUPTA, R.; MADAN, S. **Fundamentals of IoT: Get familiar with the building blocks of IoT (English Edition)**. [S.l.]: BPB Publications, 2023.

GUPTA, Srishti; TANWAR, Sarvesh; GUPTA, Neelam. A Systematic Review on Internet of Things (IoT): Applications & Challenges. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. <https://doi.org/10.1109/ICRITO56286.2022.9964892>

HARDESTY, George. **LPWAN Technologies: LoRaWAN and Sigfox Compared**. Disponível em: <<https://www.data-alliance.net/blog/lpwan-technologies-lorawan-and-sigfox-compared>>. Acesso em: 1 nov. 2024.

ISMAIL, Noor Laili *et al.* A review of low power wide area technology in licensed and unlicensed spectrum for IoT use cases. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, v. 7, n. 2, p. 183–190, 1 jun. 2018. <https://doi.org/10.11591/eei.v7i2.1174>

JANSSEN, Thomas *et al.* Lora 2.4 ghz communication link and range. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 16, p. 1–12, 2 ago. 2020. <https://doi.org/10.3390/s20164366>

KETSHABETSWE, Keleadile Lucia *et al.* Data Compression Algorithms for Wireless Sensor Networks: A Review and Comparison. **IEEE Access**, v. 9, p. 136872–136891, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116311>

KETSHABETSWE, Lucia Keleadile *et al.* Communication protocols for wireless sensor networks: A survey and comparison. **Heliyon**, v. 5, n. 5, p. e01591, 1 maio 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01591>

KHAN, Jamil Y.; YUCE, Mehmet R. **Internet of Things (IoT)**. 1st. ed. [S.l.]: Jenny Stanford Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429399084>

KOLO, Jonathan Gana *et al.* An Adaptive Lossless Data Compression Scheme for Wireless Sensor Networks. **Journal of Sensors**, v. 2012, p. 1–20, 2012.
<https://doi.org/10.1155/2012/539638>

KOLO, Jonathan Gana *et al.* Fast and efficient lossless adaptive compression scheme for wireless sensor networks. **Computers and Electrical Engineering**, v. 41, n. C, p. 275–287, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2014.06.008>

LORA ALLIANCE. **About LoRa Alliance**. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>>. Acesso em: 1 nov. 2024.

MARCELLONI, F.; VECCHIO, M. An Efficient Lossless Compression Algorithm for Tiny Nodes of Monitoring Wireless Sensor Networks. **The Computer Journal**, v. 52, n. 8, p. 969–987, 1 nov. 2009a. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxp035>

MARCELLONI, Francesco; VECCHIO, Massimo. An Efficient Lossless Compression Algorithm for Tiny Nodes of Monitoring Wireless Sensor Networks. **The Computer Journal**, v. 52, n. 8, p. 969–987, 2009b. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxp035>

MORIN, Elodie *et al.* Comparison of the Device Lifetime in Wireless Networks for the Internet of Things. **IEEE Access**, v. 5, p. 7097–7114, 2017.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2688279>

NI. **NI LabView**. , 2021. Disponível em:
 <<https://www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.labview.html#544096>>. Acesso em: 30 abr. 2021

OBAIDAT, Mohammad S.; MISRA, Sudip. **Principles of wireless sensor networks**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014.

PAHLAVAN, K.; LEVESQUE, A. Overview of Wireless Networks. In: **Wireless Information Networks**. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley, 2005. p. 3–22.
<https://doi.org/10.1002/0471738646.ch1>

PAPADIMITRIOU, Georgios I. *et al.* Introduction to Wireless Networks. In: **Wireless Networks**. [S.l.]: Wiley, 2002. p. 1–24. <https://doi.org/10.1002/047085801X.ch1>

PATTAR, Santosh *et al.* Searching for the IoT resources: Fundamentals, requirements, comprehensive review, and future directions. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 2101–2132, 1 jul. 2018.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2825231>

POSTEL, J. **Transmission Control Protocol** (Oasis, Org.). [S.l.: S.n.]. Disponível em:
 <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc0793>>. Acesso em: 30 out. 2024.

RANA, Bharti; SINGH, Yashwant; SINGH, Pradeep Kumar. A systematic survey on internet of things: Energy efficiency and interoperability perspective. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, v. 32, n. 8, 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1002/ett.4166>

RAULT, Tifenn; BOUABDALLAH, Abdelmadjid; CHALLAL, Yacine. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. **Computer Networks**, v. 67, p. 104–122, 4 jul. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.03.027>

ROHDE AND SCHWARZ GMBH. **Narrowband Internet of Things - whitepaper**. Disponível em: <https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/narrowband-internet-of-things-white-paper_230854-314242.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

SAIDANI, Abdeldjalil; JIANWEN, Xiang; MANSOURI, Deloula. A Lossless Compression Approach Based on Delta Encoding and T-RLE in WSNs. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 2020, p. 1–10, 21 set. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8824954>

SECGIN, Suat. **Evolution of Wireless Communication Ecosystems**. 1st. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2023.

SEMTECH. **LoRa and LoRaWAN**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2024.

SEYE, Madoune R. *et al.* A Study of LoRa Coverage: Range Evaluation and Channel Attenuation Model. In: IEEE, jul. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8584548/>> <https://doi.org/10.1109/SCCIC.2018.8584548>

SIGFOX. **The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT)**. Disponível em: <<https://www.sigfox.com/en>>. Acesso em: 31 jul. 2024.

SINHA, Satyajit. **State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally**. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/#wpcf7-f157488-o1>>. Acesso em: 26 out. 2024.

TULKA, Tomas. **LoRa Spreading Factor Explained**. Disponível em: <<https://blog.ttulka.com/lora-spreading-factor-explained/>>. Acesso em: 13 set. 2024.

TYAGI, Amit Kumar. **Internet of Things Theory and Practice: Build Smarter Projects to Explore the IoT Architecture and Applications (English Edition)**. [S.l.]: BPB Publications, 2022.

VAN DEN ABEELE, Floris *et al.* Scalability Analysis of Large-Scale LoRaWAN Networks in ns-3. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4, n. 6, p. 2186–2198, 1 dez. 2017. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2768498>

WANG, Jianxin *et al.* The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years. **Computers and Industrial Engineering**, v. 155, 1 maio 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107174>

WESLEY, Eddy. **Transmission Control Protocol (TCP)** (W. Eddy, Org.). [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc9293>>.

WIN-SUN ALLIANCE. **Win-SUN Alliance Home Page**. Disponível em: <<https://winsun.org/>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

YUKSEL, Mehmet Erkan; FIDAN, Huseyin. Energy-aware system design for batteryless LPWAN devices in IoT applications. **Ad Hoc Networks**, v. 122, 1 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102625>

ZIJIE, Fu *et al.* Wireless sensor networks in the internet of things: review, techniques, challenges, and future directions. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 31, n. 2, p. 1190–1200, 1 ago. 2023. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v31.i2.pp1190-1200>