

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

JONATAN CEGONI

**MONITORAMENTO INTELIGENTE DO NÍVEL DE RESÍDUOS EM LIXEIRAS
UTILIZANDO TECNOLOGIA SEM FIO LORA**

BENTO GONÇALVES

2022

JONATAN CEGONI

**MONITORAMENTO INTELIGENTE DO NÍVEL DE RESÍDUOS EM LIXEIRAS
UTILIZANDO TECNOLOGIA SEM FIO LORA**

Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Eletrônica da Universidade de Caxias do Sul apresentado à Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador Prof^ª. Dra. Marilda Machado Spindola

BENTO GONÇALVES

2022

JONATAN CEGONI

**MONITORAMENTO INTELIGENTE DO NÍVEL DE RESÍDUOS EM LIXEIRAS
UTILIZANDO TECNOLOGIA SEM FIO LORA**

Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Eletrônica da Universidade de Caxias do Sul apresentado à Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador Prof^a. Dra. Marilda Machado Spindola

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Vargas Dorneles
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Felipe Augusto Tondo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof^a. Dra. Marilda Machado Spindola
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial ao meu pai Sergio Antonio Cegoni, minha mãe Aciolina Rita Acioly de Souza e a minha namorada Taiane Zulian que me apoiaram nesta caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para continuar e concluir esta etapa da minha vida.

Agradeço a minha namorada e amiga, Taiane Zulian, pelo apoio emocional e conselhos, sem ela certamente não chegaria até aqui.

Agradeço a todos meus amigos que de alguma forma contribuíram com este trabalho, com o apoio e conselhos que me motivaram a continuar.

Agradeço também aos professores da Universidade de Caxias do Sul que de alguma forma colaboraram com meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço em especial a minha orientadora, Prof^a. Marilda Machado Spindola, pela dedicação e confiança na orientação deste trabalho.

E aos demais que, de alguma forma colaboraram com meu trabalho.

*“Só por que alguma coisa não faz o que
você planejou que ela fizesse não quer
dizer que ela seja inútil”*

Thomas Edison

RESUMO

A Internet das Coisas (IoT) vêm sendo aplicada em diversas áreas e, principalmente, nas chamadas cidades inteligentes e sustentáveis. Neste contexto, a coleta e gestão de resíduos sólidos urbanos é um serviço que pode ser melhorado através da aplicação destes conceitos e tecnologias. A coleta desses resíduos geralmente é realizada com dia, horário e rotas pré-definidas, recolhendo o material de todas as lixeiras pelo caminho sem considerar se estão cheias ou não. Para uma coleta inteligente é necessário saber o nível de resíduos dentro de cada lixeira em tempo real, assim a coleta poderá ser realizada a partir de uma rota otimizada em função desta informação, economizando recursos destinados para esse fim, como tempo, mão de obra, manutenção e combustível. Este trabalho apresenta um sistema embarcado capaz de realizar a leitura do nível de resíduos dentro de contêineres de lixo, enviando essa informação através de uma rede de comunicação LoRa e protocolo LoRaWAN, para que uma vez na nuvem esses dados possam ser utilizados por uma aplicação web. Foram realizados testes de validação funcional buscando analisar o alcance da rede, consumo de energia e demais características da aplicação. Os resultados mostraram que o dispositivo atingiu seu objetivo de mensurar o nível de resíduo e disponibilizar estas informações remotamente. O sistema se mostrou adequado para soluções de *IoT* em cidades inteligentes, principalmente quanto ao alcance da rede, baixo consumo energético e baixo custo.

Palavras-chave: resíduos sólidos; internet das coisas; cidades inteligentes; LoRa, sistemas embarcados.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) has been applied in several areas, especially in the so-called smart and sustainable cities. In this context, the collection and management of urban solid waste is a service that can be improved through the application of these concepts and technologies. The collection of this waste is usually carried out with a pre-defined day, time and routes, collecting material from all the dumps along the way without considering whether they are full or not. For an intelligent collection, it is necessary to know the level of waste inside each bin in real time, so the collection can be carried out from an optimized route based on this information, saving resources destined for this purpose such as time, labor, maintenance and fuel. This work presents an embedded system capable of reading the level of waste inside garbage containers, sending this information through a LoRa communication network and LoRaWAN protocol, so that, once in the cloud, these data can be used by a web application. Functional validation tests were carried out seeking to analyze the reach of the network, energy consumption and other characteristics of the application. The results showed that the device achieved its objective of measuring the level of residue and making this information available remotely. The system proved to be suitable for IoT solutions in smart cities, mainly regarding network reach, low energy consumption and low cost.

Keywords: solid waste; internet of things; smart cities; LoRa, embedded systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito de cidade inteligente	19
Figura 2 – Número de dispositivos conectados na internet até 2030	21
Figura 3 – Arquitetura <i>IoT</i>	22
Figura 4 – Arquitetura rede LoRaWAN.....	25
Figura 5 – Classes de dispositivos <i>LoRa</i>	25
Figura 6 – Arquitetura de um sistema embarcado.....	27
Figura 7 – Comparativo consumo e alcance entre tecnologias <i>wireless</i>	31
Figura 8 – Arquitetura proposta para o sistema	31
Figura 9 – Sensor ultrassônico HC-SR04	32
Figura 10 – Kit de desenvolvimento <i>LoRa</i> P-NUCLEO-LRWAN3	33
Figura 11 – End-Node <i>LoRa</i>	34
Figura 12 – Sensor ultrassom conectado a placa <i>End Node</i>	34
Figura 13 – <i>Gateway LoRa</i>	35
Figura 14 – Porta serial para configuração do <i>gateway LoRa</i>	36
Figura 15 – Plataforma <i>Loriot</i>	40
Figura 16 - <i>Cayenne dashboard</i>	42
Figura 17 – Configuração arquivo <i>config.h</i>	43
Figura 18 – Fluxograma do <i>firmware</i>	43
Figura 19 – Simulação de um contêiner de lixo.....	44
Figura 20 – Instalação do <i>gateway</i> na janela do prédio	45
Figura 21 – Pacotes de dados recebidos pelo servidor <i>Loriot</i>	46
Figura 22 – Informações recebidas na interface gráfica <i>Cayenne</i>	46
Figura 23 – Corrente do <i>End Node</i>	47
Figura 24 – Maior distância de conexão encontrada.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Responsabilidade pelo gerenciamento de cada tipo de resíduo	17
Tabela 2 – Exemplo de configuração dos parâmetros de <i>LoRa</i>	24
Tabela 3 – Lista de comandos AT do <i>gateway</i>	37
Tabela 4 - Banda de frequências para configurar <i>gateway</i>	38
Tabela 5 – Relação valor de distância real versus distância lida	48
Tabela 6 – Teste de alcance	49
Tabela 7 – Resultados do teste de consumo	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
IoT	Internet das Coisas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ABP	<i>Activation by Personalization</i>
OTAA	<i>Over-the-Air-Activation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVO GERAL.....	14
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4	RESTRIÇÕES DO TRABALHO.....	15
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	16
2.2	CIDADES INTELIGENTES	18
2.3	INTERNET DAS COISAS	20
2.4	LORA.....	23
2.5	LORAWAN	24
2.6	SISTEMAS EMBARCADOS	27
2.7	ANÁLISE DOS TRABALHOS RELEVANTES	28
3	METODOLOGIA PROPOSTA	30
3.1	DESCRIÇÃO GERAL	30
3.2	HARDWARE.....	32
3.2.1	Sensor ultrassônico HC-SR04	32
3.2.2	Comunicação LoRa	33
3.2.2.1	Sensor End-Node	33
3.2.2.2	Gateway	35
3.3	CONFIGURAÇÃO DA REDE LORA.....	36
3.3.1	Configuração do gateway	36
3.3.2	Configuração do sensor (<i>end-node</i>)	38

3.3.3	Configuração do servidor	39
3.3.4	Configuração da aplicação	41
3.4	DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE	42
3.5	TESTES E ENSAIOS	44
3.5.1	Funcionamento do sistema e da comunicação LoRa	44
3.5.2	Cobertura da rede LoRa implementada	45
3.5.3	Consumo de energia do <i>End-Node</i>	47
4	RESULTADOS	48
4.1	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA E DA COMUNICAÇÃO LORA.....	48
4.2	COBERTURA DA REDE LORA.....	48
4.3	CONSUMO DE ENERGIA.....	50
4.4	CUSTOS.....	50
5	CONCLUSÃO.....	51
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados pontos importantes sobre o trabalho, como sua justificativa e motivação para a pesquisa, os objetivos gerais e específicos e uma descrição geral sobre o trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil durante o ano de 2020 foi de aproximadamente 225.965 toneladas por dia, ou 82,5 milhões de toneladas no ano. Assim, cada brasileiro gerou, em média, 1,07 kg de resíduos por dia. Desta quantidade apenas 60% do resíduo gerado teve a destinação correta (ABRELPE, 2021).

A coleta e gerenciamento de RSU é um grande problema das cidades. Geralmente a coleta do lixo é uma operação ineficiente. Os caminhões responsáveis pela coleta operam com horário e rotas pré-definidas, esvaziando todas as lixeiras pelo caminho independentemente do nível de resíduos que ela contém. Esse sistema gera desperdício de recursos como tempo, mão de obra, manutenção e combustível. Nas cidades, o gerenciamento de resíduos sólidos tem significativo impacto em custos, consumindo de 20% até 50% dos recursos públicos (AL MAMUN et al., 2015). No Brasil, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), os municípios gastaram cerca de 25,25 bilhões de reais com este serviço no ano de 2020 (SNIS, 2022).

Dentre os conceitos que a Internet das Coisas (IoT) e as chamadas Cidades Inteligentes (*Smart Cities*) englobam, a gestão de resíduos sólidos tem sido um grande desafio devido ao volume de resíduos produzidos pelos centros urbanos. Através destes conceitos pode-se criar uma infraestrutura de rede que possibilite medir, analisar e otimizar os serviços públicos de uma cidade, como a coleta e gestão de resíduos. Logo, um sistema de coleta e gerenciamento de resíduos sólidos inteligente precisa de acesso as informações em tempo real sobre o volume de resíduos em cada lixeira de modo que seja possível calcular as melhores rotas e horários para a coleta (AL MAMUN et al., 2013).

Neste contexto, um sistema inteligente para o gerenciamento de resíduos sólidos nas cidades é necessário para auxiliar na coleta, tratamento e descarte, reduzindo assim os custos com a operação e minimizando o impacto ambiental. Uma lixeira inteligente é parte de um sistema capaz de fornecer informações para entendimento de como tratar e gerenciar os resíduos. Este trabalho busca apresentar um sistema embarcado capaz de mensurar o nível de resíduos em contêineres de lixo para assim auxiliar na coleta de resíduos urbanos. Com o uso de sensores para medir o volume ocupado dentro da lixeira e por meio de uma comunicação *LoRa* e protocolo *LoRaWAN*, é possível enviar estas informações em tempo real até um servidor para que então um sistema *web* possa utilizar esses dados na definição de uma rota inteligente de coleta, conforme os resíduos são gerados.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico capaz de mensurar o nível de resíduos dentro de um contêiner/lixreira e o envio dessa informação para um servidor *web* utilizando a tecnologia sem fio *LoRa* e protocolo *LoRaWAN*.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ressaltam-se os objetivos específicos, os quais são necessários para concluir o objetivo geral:

- a) projetar uma plataforma para aquisição de sinais acerca do nível de resíduos da lixeira;
- b) projetar *hardware* e *software* para comunicação *LoRa*;
- c) desenvolver uma aplicação para comunicação através de dispositivos *LoRa* com uso do protocolo *LoRaWAN*;
- d) desenvolver um *gateway LoRa* para receber as informações enviadas pelas lixeiras e disponibilizá-los na rede;
- e) realizar validações e testes de alcance da rede *LoRa* implementada;
- f) realizar validações e testes das leituras de nível de resíduo e precisão destas medidas;
- g) avaliar a viabilidade econômica do projeto.

1.4 RESTRIÇÕES DO TRABALHO

O trabalho limita-se ao desenvolvimento de um sistema embarcado para coleta da informação de nível de resíduos dentro de um contêiner de lixo e o envio desses dados via *LoRa* até um *gateway* para que sejam consumidas por uma aplicação web.

Não será desenvolvido neste trabalho a parte de aplicação web ou gerenciamento das informações enviadas, como inteligência na rota de coleta de resíduos etc.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas conforme as disciplinas Trabalho de Conclusão de Curso 1 e 2. Na primeira etapa foi desenvolvido os capítulos 1, 2 e 3 e na segunda etapa os capítulos 4 e 5, conforme a seguir:

- a) capítulo 1 - introdução: trata do tema escolhido, questões de pesquisa, objetivos, restrições e organização do trabalho;
- b) capítulo 2 - referencial teórico: trata das referências bibliográficas pertinentes aos assuntos importantes para entendimento e desenvolvimento do trabalho;
- c) capítulo 3 - metodologia: descreve as etapas e desenvolvimento do projeto proposto bem como os testes e cronograma do mesmo;
- d) capítulo 4 - resultados: apresenta os testes, análises e resultados do trabalho desenvolvido;
- e) capítulo 5 - conclusão: considerações finais e conclusão a partir dos resultados obtidos com o trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será realizada uma revisão bibliográfica de conceitos importantes para entendimento do trabalho, conforme os seguintes assuntos: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Internet das Coisas (IoT), Cidades Inteligentes (*Smart Cities*), *LoRa*, *LoRaWAN* e Sistemas Embarcados. Assim, a convergência de todos estes tópicos dará embasamento para se chegar ao objetivo final do trabalho.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A norma ABNT NBR 10004 (2004, p.1) define e classifica os resíduos sólidos como “Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”.

Conforme Monteiro (2001), a classificação de resíduos pode ser feita com base na sua origem e também conforme o risco que apresentam ao meio ambiente.

Classificações quanto ao risco:

- a) classe I ou perigosos: possui características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou seja, apresentam riscos à saúde ou meio ambiente;
- b) classe II ou não-inertes: resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando na classificação anterior;
- c) classe III ou inertes: não oferecem riscos à saúde ou ao meio ambiente.

Classificações quanto a sua origem:

- a) doméstico ou residencial: gerado nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais;
- b) comercial: gerado em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem das atividades ali desenvolvidas;
- c) público: presente nas vias públicas, em geral resultante da natureza, como folhas, galhadas, poeira, terra e areia, incluindo também os resíduos

descartados de forma irregular pela população, como entulho, papéis, restos de embalagens e alimentos;

- d) domiciliar especial: compreende entulhos de obras, pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus;
- e) de fontes especiais: resíduos que, em função de suas características peculiares, merecem cuidados especiais, como resíduos industriais, radioativos, de portos, aeroportos e terminais rodoviários, agrícola e de serviços de saúde.

O cidadão possui grande responsabilidade no processo de gestão dos resíduos, devendo separar adequadamente entre resíduo seletivo e orgânico. Além disso na Tabela 1 é possível verificar quem são os responsáveis pela coleta e descarte para cada tipo de resíduo gerado (SCHALCH et al., 2002).

Tabela 1 – Responsabilidade pelo gerenciamento de cada tipo de resíduo

Tipo de Lixo	Responsável
Doméstico ou residencial	Prefeitura
Comercial	Prefeitura
Público	Prefeitura
Industrial	Quem gera (Indústria)
Saúde	Quem gera (hospitais etc.)
Portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários	Quem gera (portos etc.)
Agrícola	Quem gera (agricultor)
Entulho	Quem gera
Radioativo	CNEN

Fonte: Schalch et al. (2002).

Conforme última pesquisa nacional de saneamento básico, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2008 e publicada em 2010, no Brasil, 50,8% dos municípios destinam resíduos sólidos em lixões e vazadouros a céu aberto e embora esse cenário tenha melhorado nos últimos anos, tal situação é grave e muito prejudicial para o meio ambiente (IBGE, 2010). Apesar de a Lei de

Crimes Ambientais proibir a prática de descarte de resíduos em lixões a céu aberto, no Brasil ainda é comum esse tipo de situação (BRASIL, 1998).

O crescimento populacional ainda deve aumentar muito nos próximos anos aliados com aumento da taxa de urbanização, o que conseqüentemente aumentará muito a geração de resíduos. Se preocupar com a correta destinação dos RSU é cada vez um problema maior para o mundo resolver. Por isso buscar soluções nesse sentido é tão importante (WILSON et al., 2015).

Normalmente as operações de coleta ocorrem em horários pré-determinados e com rotas fixas (MCLEOD et al., 2013). Esse modelo de coleta é ineficiente pois os caminhões seguem por rotas padrões coletando o material de todas as lixeiras desconsiderando o fato de estarem cheias ou não. Como a geração de resíduos ocorre de forma dinâmica esse sistema de coleta desperdiça muitos recursos como tempo, combustível, manutenção dos veículos etc. (MWARE, 2017).

Uma melhoria no processo de coleta é necessária para a otimização destes recursos e também para minimizar os impactos ambientais. Com a informação sobre o nível de resíduos dentro das lixeiras e sabendo sua localização, pode-se criar uma coleta inteligente e dinâmica, realizando a mesma apenas onde e quando for necessário, otimizando assim o tempo de coleta, transporte, custos com a operação, entre outros (AL MAMUN et al., 2013).

2.2 CIDADES INTELIGENTES

Não existe um consenso para a definição de cidade inteligente, mas a maioria das referências apresentam uma ideia de cidade que se preocupa com o bem estar das pessoas, otimização dos recursos públicos e sustentabilidade (AMORIM et al., 2016).

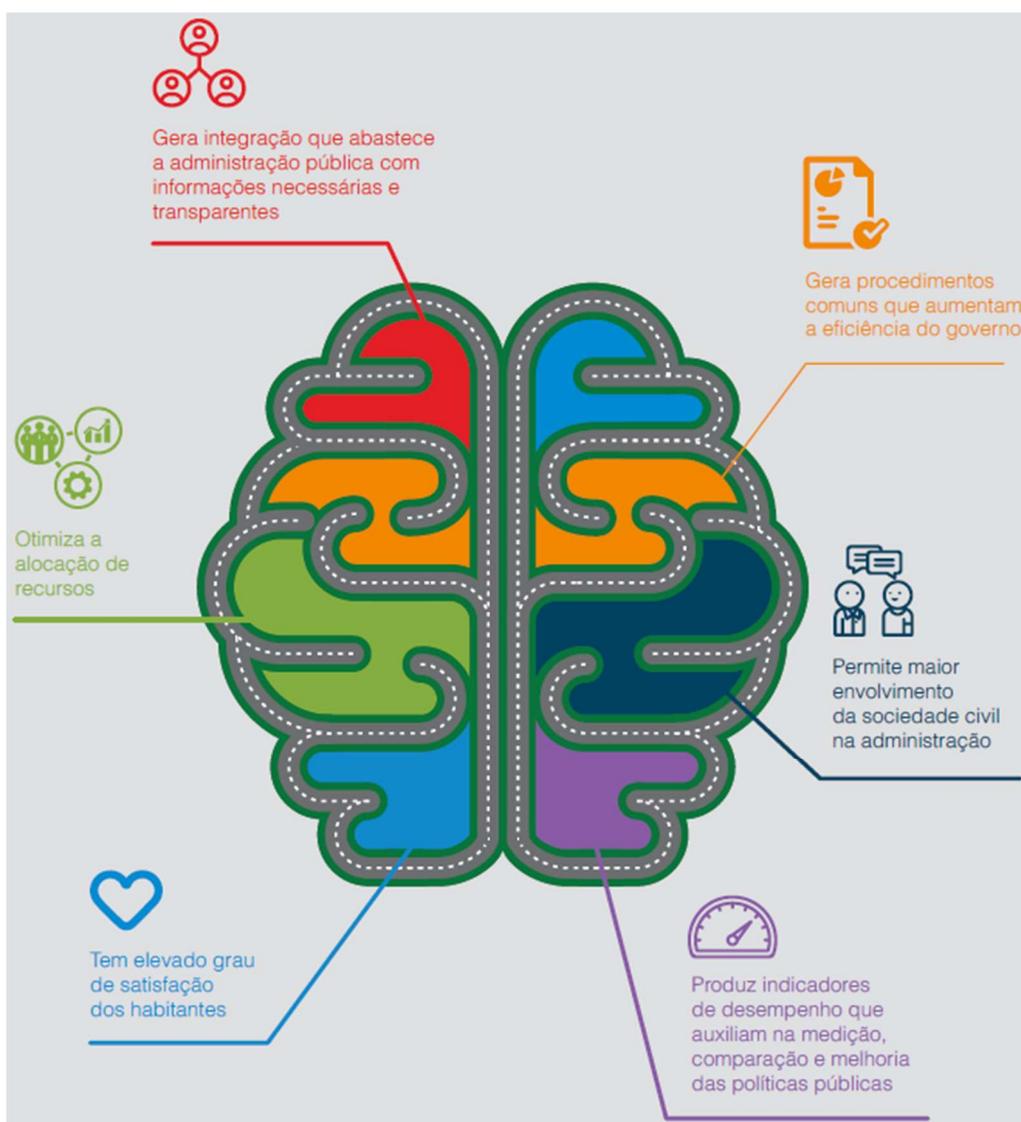
Uma cidade inteligente é aquela que supera desafios do passado pensando no futuro, utilizando da tecnologia como um meio para melhoria nos serviços urbanos e da qualidade de vida das pessoas. Uma característica distintiva para uma cidade ser inteligente é a sustentabilidade a fim de consumir menos energia, produzir menos lixo e economizar recursos (CUNHA et al., 2016).

Para Amorim (2016), o que caracteriza uma cidade inteligente é o uso da Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) para aperfeiçoamento dos serviços

prestados, visando práticas sustentáveis, como uso responsável dos recursos naturais, redução de danos ao meio ambiente, autossuficiência energética e de alimentos, proporcionando assim bem-estar e qualidade de vida aos seus cidadãos.

Mesmo que não exista uma definição direta para cidade inteligente, o conceito principal é promover melhor uso dos recursos públicos, aumentar a qualidade de vida dos cidadãos e ser sustentável. Para atingir essas características em uma cidade, a *IoT* tem papel fundamental, visto que uma estrutura de rede e monitoramento oferece informações que melhoram a gestão pública (ZANELLA et al., 2014). A Figura 1 demonstra o conceito de uma cidade inteligente.

Figura 1 – Conceito de cidade inteligente



Fonte: BOUSKELA et al., 2016.

A gestão de resíduos é um ponto relevante para aplicação em uma cidade inteligente, pois uma gestão eficiente traz impacto significativo na qualidade de vida dos cidadãos e reduz os danos ao meio ambiente.

2.3 INTERNET DAS COISAS

O termo “Internet das Coisas” do inglês *Internet of Things* (IoT) foi utilizado pela primeira vez em 1999 por Kevin Ashton para descrever um sistema em que objetos estão conectados na internet por sensores. Ashton usou essa definição ao apresentar sensores *Radio-Frequency Identification* (RFID) para rastrear e contar objetos. Atualmente o termo “Internet das Coisas” é utilizado para descrever qualquer objeto com alguma capacidade computacional e conexão com a internet (ROSE; ELDRIDGE; CHAPIN, 2015).

Whitmore, Agarwal e Da Xu (2015) definem IoT como objetos com capacidade de sensoriamento, processamento, identificação e acesso à rede para comunicação com qualquer outro dispositivo que acessa internet.

Desta forma, o conceito de internet das coisas pode ser entendido como uma extensão da internet atual, proporcionando aos objetos do dia a dia conexão e comunicação com a rede mundial de internet. A ideia é permitir que os objetos possam ser controlados remotamente bem como fornecer informações ao usuário (SANTOS et al., 2019).

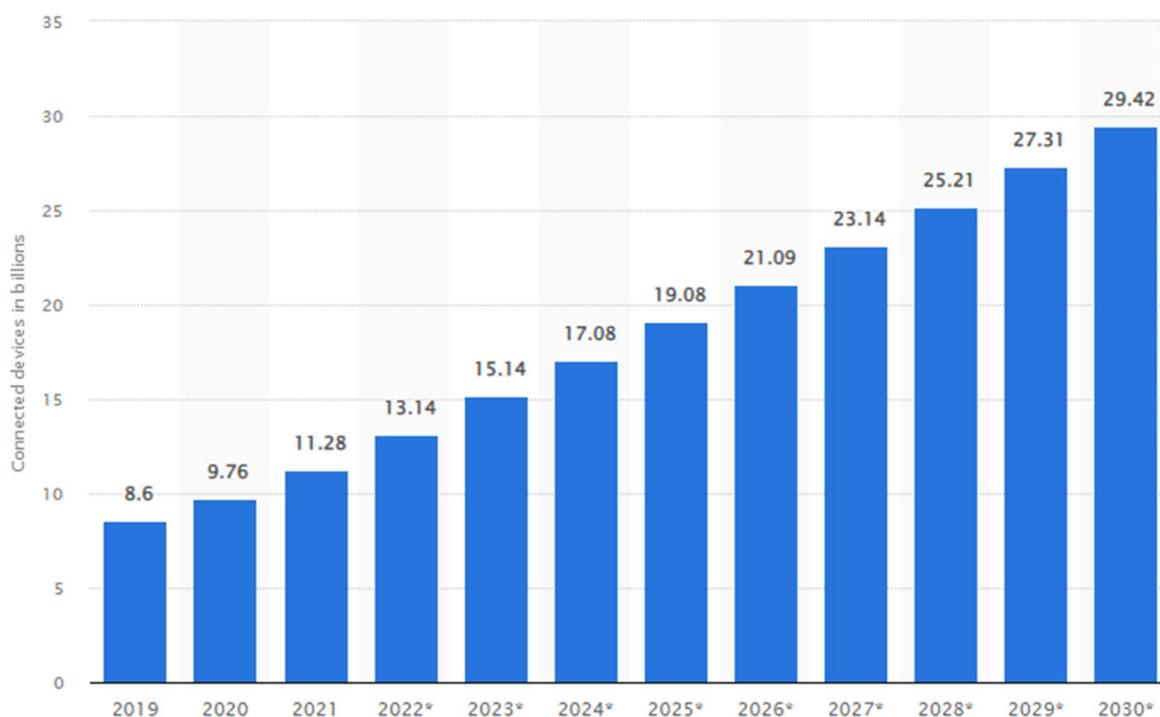
Algumas características relacionadas a funcionalidade podem ser citadas para considerar uma aplicação dentro do contexto de IoT (FACCIONI FILHO, 2016):

- a) processamento: poder computacional para cálculos e tomada de decisão;
- b) endereçamento e identificação: endereço dentro da rede para individualizar cada objeto;
- c) localização: local onde o objeto está instalado;
- d) comunicação: capacidade de trocar informações com outros dispositivos da rede;
- e) cooperação: ações em conjunto entre os dispositivos da rede conforme a aplicação;
- f) sensoriamento: capacidade de perceber variações do ambiente e transformar em informações;

g) atuação: produzir alguma ação conforme a necessidade da aplicação.

Segundo a empresa Ericsson (2016), no ano de 2022 haveria algo em torno de 29 bilhões de dispositivos conectados na internet e segundo a Cisco (2019 apud ZIKRIA, 2021) haverá aproximadamente 500 bilhões de dispositivos conectados na internet até 2030. A Figura 2 mostra a evolução de dispositivos conectados até 2030.

Figura 2 – Número de dispositivos conectados na internet até 2030

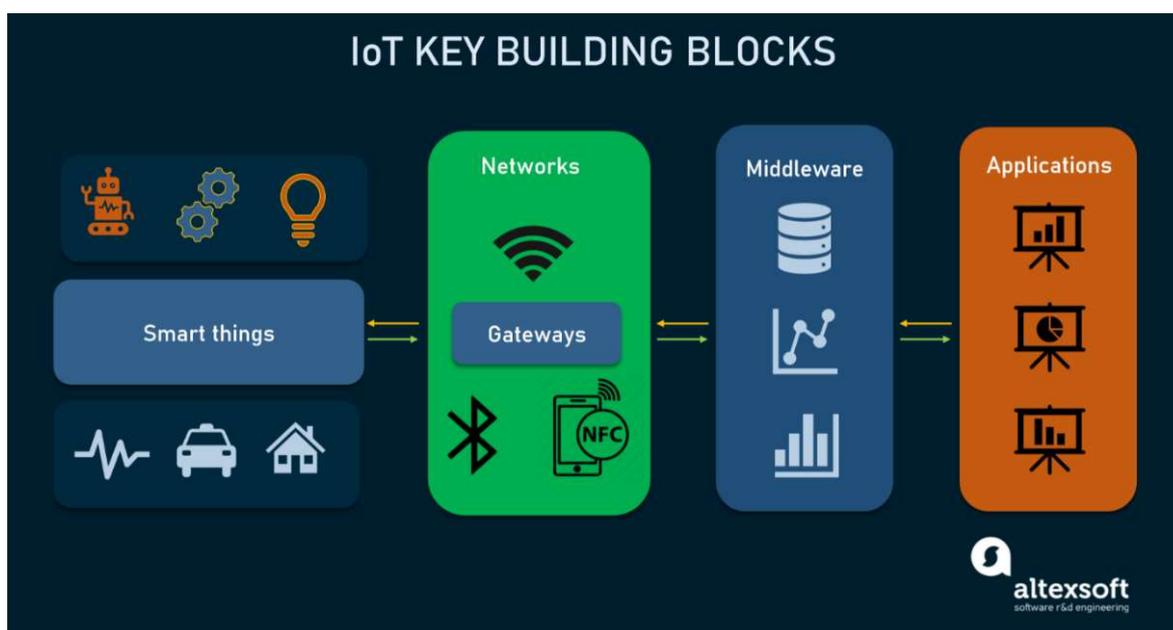


Fonte: STATISTA (2022) ¹.

IoT não é uma tecnologia única, mas sim uma integração de diferentes tecnologias de *hardware* e *software* com objetivo de atender uma determinada aplicação. É possível dividir essas tecnologias em diversas camadas, conforme exemplo de uma arquitetura com 4 *layers* demonstrado na Figura 3 (ALTEXSOFT, 2020):

¹ Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>

Figura 3 – Arquitetura IoT



Fonte: Altexsoft (2020)².

Este modelo é composto pela *Perception Layer* (ou Camada de Sensores), *Connectivity or Transport Layer* (ou Camada de Rede), *Processing Layer* (ou Camada de Processamento) e *Application Layer* (ou Camada de Aplicação). Tais camadas são explicadas brevemente abaixo (ALTEXSOFT, 2020):

- a) *perception layer*: representada na figura 2 como *smart things*. A camada de sensoriamento é o primeiro nível de uma arquitetura IoT. É onde os sensores realizam a coleta e processamento de informações do ambiente;
- b) *connectivity or transport layer*: aqui temos as tecnologias e protocolos de comunicação responsáveis pelo envio das informações tais como *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *GSM*, *GPRS*, *LPWAN*, *ZigBee*, etc;
- c) *processing layer*: responsável por filtrar, processar e armazenar as informações que ficarão disponíveis para serem consumidas pela aplicação;
- d) *application layer*: última camada da arquitetura onde temos a aplicação final com o usuário consumindo as informações coletadas pelos sensores.

Podemos citar diversos meios de comunicação para redes sem fio, como *Wi-Fi*, *GPRS*, *Bluetooth*, *3G*, *4G*, *5G*, *EDGE*, etc. Porém quando falamos de IoT um

² Disponível em: <https://www.altexsoft.com/blog/iot-architecture-layers-components/>

aspecto muito importante é o consumo de energia, logo a rede mais utilizada é a LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) e as tecnologias mais conhecidas que a implementam são LoRaWAN, SigFox, NB-IoT e LTE-M (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

2.4 LORA

LoRa (Long Range) é uma tecnologia *wireless* voltada para IoT que foi criada pela *Semtech Corporation* e atualmente é mantida em conjunto com a *LoRa Alliance*, uma comunidade de diversas empresas que possuem interesse no desenvolvimento de tecnologias para IoT (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

LoRa se caracteriza como a primeira camada do modelo de rede *Open System Interconnection* (OSI), e possui como diferencial a comunicação em longa distância com baixo consumo de energia. *LoRa* utiliza faixas de frequências não licenciadas de acordo com a *Industrial Scientific and Medical* (ISM), tipicamente 868 MHz na Europa, 915 MHz na América e 433MHz na Ásia. Possui modulação baseada na técnica de *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que faz um espalhamento do sinal em diferentes frequências, deixando o sinal mais robusto e resistente a ruídos (MEKKI et al., 2019). Segundo a *Semtech* (2019), aplicações com *LoRa* podem alcançar até 15 km em áreas abertas e sem construções (zona rural) e 5 km em zonas urbanas.

LoRa permite o envio de mensagens do dispositivo para a rede (*uplink*) ou da rede para o dispositivo (*downlink*), a mensagem possui a mesma estrutura, mas somente a de *uplink* envia o código de verificação (CRC) para garantir a integridade dos dados (SEMTECH, 2019).

Basicamente para utilizar *LoRa* é necessário configurar 3 parâmetros que são: a Largura de Banda (BW) escolhendo entre 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz; Fator de Espalhamento (*Spread Factor*, SF) que determina o número de *chirps* necessários para representar um dado, sendo valores de SF7 até SF12 (quanto maior o SF mais energia necessária e conseqüentemente maior o alcance da mensagem); e, por último, a Taxa de Codificação (*Coding Rate*, CR) que define o número de bits para recuperação da mensagem em caso de erro, quanto maior, mais proteção e integridade a mensagem possui, porém maior será o tempo de transmissão (LORA

ALLIANCE, 2017). Na Tabela 2 é possível verificar um exemplo de possíveis configurações:

Tabela 2 – Exemplo de configuração dos parâmetros de *LoRa*

Parâmetros	Maior Alcance	Maior Mensagem
<i>Date Rate</i> (DR)	0	4
<i>Spreading Factor</i> (SF)	SF10	SF8
<i>Bandwidth</i> (BW)	125 kHz	500 kHz
<i>Coding Rate</i> (CR)	4/5	4/5
<i>Bit Rate</i> (BR)	976 bps	12.500 bps
<i>Payload</i> máximo	11 bytes	242 bytes
<i>Air Time</i>	371 ms	175 ms

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017)³.

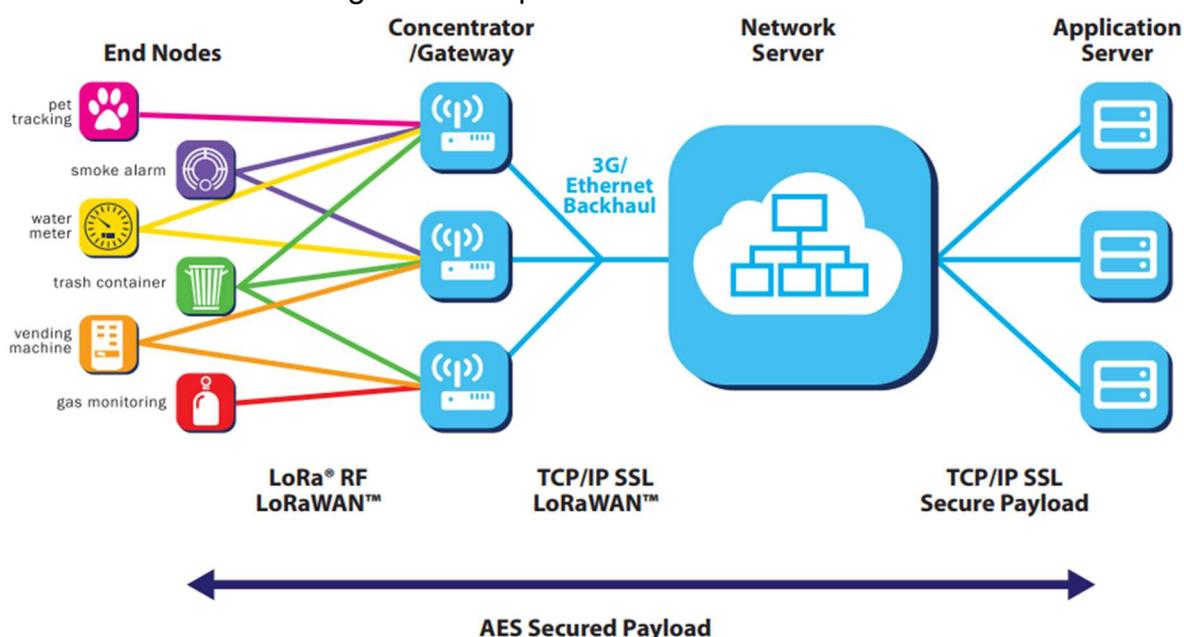
Em 2018, a ANATEL aprovou a operação da rede *LoRa*, adotando o mesmo padrão da Austrália que utiliza a frequência de 915 MHz operando na faixa de 915 MHz até 928 MHz, dividido em 72 canais para *uplink* e 8 para *downlink* (ROSSATO; SPANHOL; CAMARGO, 2020).

2.5 LORAWAN

A rede *LoRa* suporta vários protocolos, porém o mais utilizado e que foi desenvolvido pela *LoRa Alliance* é o LoRaWAN. Esse protocolo é aberto e está disponível no site oficial da *LoRa Alliance* (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017). Com o protocolo é possível padronizar redes IoT públicas ou privadas, com comunicação bidirecional e segura. A arquitetura é em estrela, com vários dispositivos (*End Nodes* ou *Endpoints*) conectados simultaneamente ao *gateway* que recebe e disponibiliza as informações na rede mundial de internet (ou nuvem) (LORA ALLIANCE, 2015). A Figura 4 apresenta a arquitetura padrão para uma rede LoRaWAN.

³ Disponível em: https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/

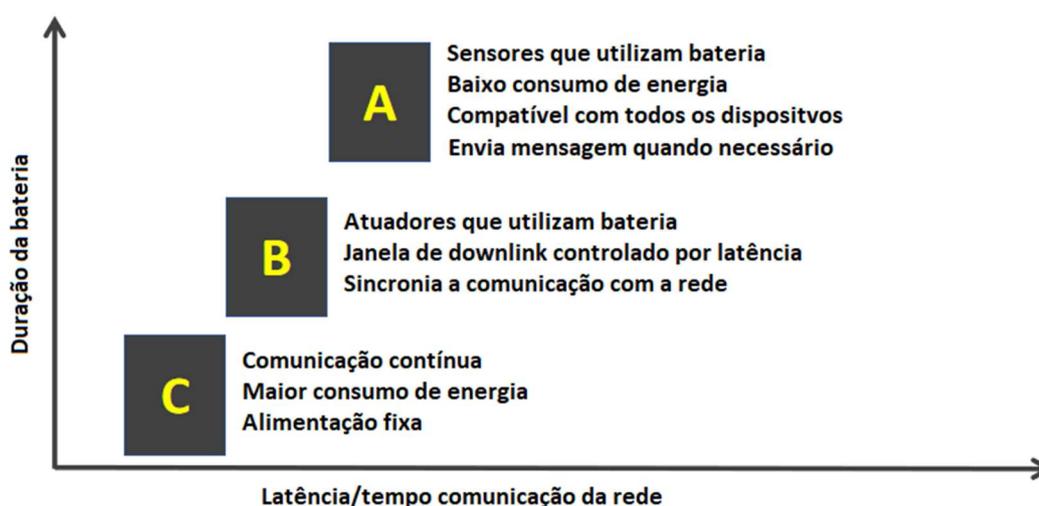
Figura 4 – Arquitetura rede LoRaWAN



Fonte: LoRa Alliance (2015)⁴.

O protocolo LoRaWAN estabelece classes de *endpoints*, observadas na Figura 5, conforme sua funcionalidade levando em consideração o consumo de energia e a taxa de comunicação (LORA ALLIANCE, 2015).

Figura 5 – Classes de dispositivos LoRa



Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2015)⁵.

⁴ Disponível em: https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/

⁵ Disponível em: https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/

As classes são A, B e C e estão especificadas a seguir (LORA ALLIANCE, 2015):

- a) classe A: prioriza baixo consumo de energia, possui comunicação bidirecional, mas com possibilidade de receber informação somente num instante logo após o envio de um pacote;
- b) classe B: similar a classe A, porém com possibilidade de receber mensagens do *gateway* em horários programados;
- c) classe C: dispositivo têm a possibilidade de enviar e também de receber mensagens a quase qualquer instante, porém exige um maior gasto de energia do dispositivo.

Uma característica importante do protocolo é permitir uso de *Media Access Control* (MAC) pelos dispositivos. Esse controle de acesso possibilita que vários dispositivos se comuniquem com um único *gateway* e também que um mesmo *endpoint* acesse diferentes *gateway*, o que permite mobilidade dos dispositivos dentro da rede *LoRa* implementada. Podemos destacar outras funcionalidades do protocolo (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017):

- a) endereçamento: cada dispositivo possui um endereço na rede;
- b) integridade: capacidade de verificar a integridade da mensagem;
- c) segurança: as mensagens são protegidas com o protocolo AES-128 (*Advanced Encryption Standard*);
- d) adaptabilidade: chamado de ADR (*Adaptative Data Rate*), permite ajustar a taxa de transmissão e potência do sinal automaticamente;
- e) categorização: classifica os dispositivos em categorias (A, B e C) conforme descrito acima visando otimização de bateria.

Outra característica da rede LoRaWAN é a possibilidade de medir a potência do sinal em dBm através do parâmetro *Received Signal Strenght Indication* (RSSI). Assim pode-se analisar a cobertura da rede implementada e também usar essa informação para geolocalização dos dispositivos conectados à rede (KWASME; EKIN, 2019).

O protocolo LoRaWAN permite duas formas de acesso a rede que são o método ABP e OTAA. ABP é a sigla do inglês para *Activation by Personalization*, este é um método de ativação simples, manual e mais rápido, porém menos seguro. Neste

método os códigos de ID de cada dispositivo são fixos e configurados manualmente na rede *LoRa* (SEMTECH, 2019).

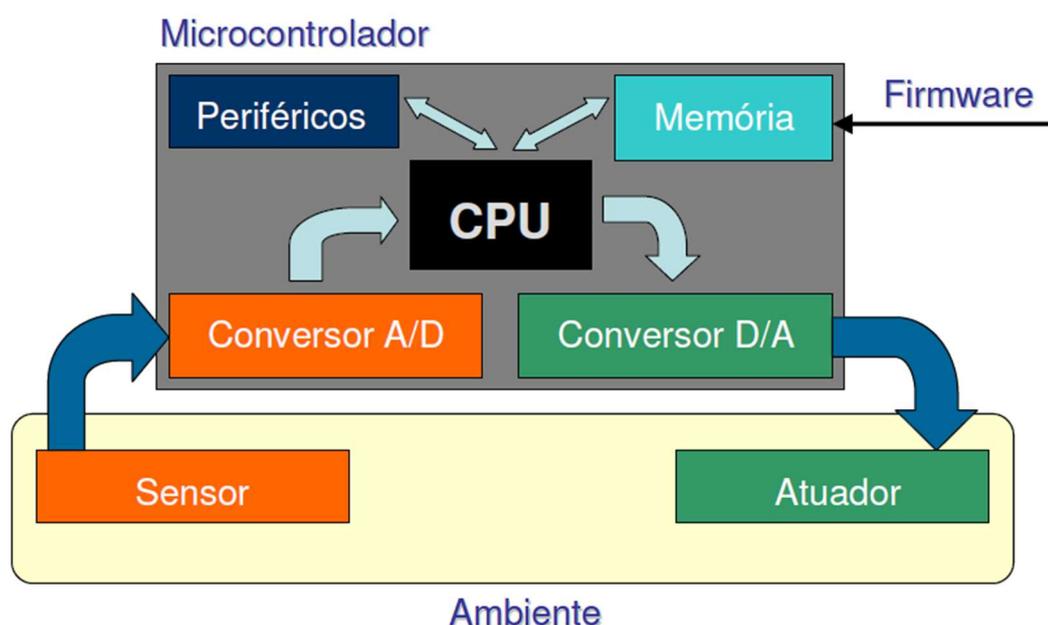
OTAA é a sigla do inglês para *Over-the-Air-Activation*, este método usa o processo de *join*, onde são gerados automaticamente as chaves de acesso à rede. O método OTAA é o mais seguro, além de ser possível armazenar múltiplas chaves de acesso que permite a troca dinâmica entre redes *LoRa* (SEMTECH, 2019).

2.6 SISTEMAS EMBARCADOS

Um sistema embarcado pode ser descrito como um dispositivo com poder computacional projetado para atender uma aplicação específica. A denominação de “embarcado” remete ao fato de que geralmente esses dispositivos possuem uma fonte de energia própria como bateria (CHASE; ALMEIDA, 2007).

Um sistema embarcado possui uma arquitetura similar à de um computador convencional, contendo uma unidade central de processamento (CPU), memória e periféricos. Esses sistemas são compostos geralmente por um microprocessador ou microcontrolador (responsável por executar os cálculos conforme programado), memória (armazenamento de instruções e dados), e periféricos de entrada e saída (I/O), interfaces diversas como teclado, display, comunicação *Bluetooth*, *Wi-Fi*, *LoRa*, etc. (KAMAL, 2011). A Figura 6 apresenta a arquitetura de um sistema embarcado.

Figura 6 – Arquitetura de um sistema embarcado.



Fonte: (CHASE;ALMEIDA, 2007).

Sistemas embarcados atualmente estão presentes em praticamente todos os lugares e atividades do dia a dia, exemplos de tais sistemas são os telefones celulares, eletrodomésticos em geral, dispositivos de controle e multimídia dos automóveis, etc. (CARRO; WAGNER, 2003)

Segundo Cunha (2007) algumas das características desejadas em um sistema embarcado são:

- a) tamanho e peso: menor possível;
- b) consumo de energia: maior autonomia de bateria possível;
- c) robustez: durabilidade e resistência a interferências externas.

2.7 ANÁLISE DOS TRABALHOS RELEVANTES

Devido à importância da gestão de resíduos, vários trabalhos foram feitos acerca do monitoramento inteligente de resíduos. Kang et al. (2020) abordam um estudo de lixeira inteligente na Malásia com uso de Arduino, comunicação *Wi-Fi* e sensor ultrassônico. O sistema mensura o nível de resíduos e posteriormente envia as informações via *Wi-Fi* para a rede que podem ser consultadas pelo usuário via aplicativo.

Já o trabalho de Atayero et al. (2019) é muito similar ao de Kang et al. (2020) que procurou desenvolver uma lixeira com sensor para indicar o nível de resíduo e alertar sobre a necessidade de coleta ou não. O trabalho utiliza sensor ultrassônico para mensurar o nível de resíduo, um módulo Arduino para tratar os dados e um módulo *Wi-Fi* para envio das informações.

Em Baby et al. (2017) é apresentado um sistema capaz de monitorar a geração de lixo com uso de uma placa *RaspberryPi* e Arduino. Através de sensor infravermelho a lixeira mensura o nível de preenchimento e envia essas informações via rede Ethernet. Esse sistema emite alertas via SMS e e-mail para os usuários sobre o nível de resíduos nas lixeiras.

O trabalho de Monishan, Pankajavalli e Karthick (2019) é similar ao de Baby et al. (2017) e também utiliza sensores infravermelhos para mensurar o nível de resíduos presentes na lixeira. Através de comunicação *Bluetooth* e *Wi-Fi* fornece os dados para uma central. Além disso este trabalho mostra uma proposta de algoritmo para calcular a melhor rota de coleta dos resíduos.

Em Mware (2017) além do sensor ultrassônico para medir o volume ocupado da lixeira também foi implementado sensor de peso e concentração de gás, sendo assim o protótipo também consegue identificar o tipo de resíduo (orgânico ou não) a partir dos gases emitidos dentro da caixa de lixo. Os dados também são enviados via rede *Wi-Fi* para a nuvem, e uma aplicação web disponibiliza as informações em tempo real para o usuário.

É importante ressaltar que a maioria dos trabalhos encontrados utilizam comunicação *Wi-Fi* ou *Bluetooth* para envio das informações sobre o nível de resíduo da lixeira. Essas tecnologias além de pouco alcance de comunicação, em geral demandam bastante consumo de energia o que dificulta o uso de bateria. O trabalho aqui proposto utiliza *LoRa* (LPWAN) que visa otimizar o uso de energia do sistema.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta os materiais e métodos para o desenvolvimento de um protótipo de uma lixeira inteligente, que através de sensores coleta informações sobre o nível de resíduos e os envia para um servidor utilizando comunicação *LoRa*. O intuito é que este dispositivo possa ser utilizado para auxiliar na otimização das coletas de resíduos.

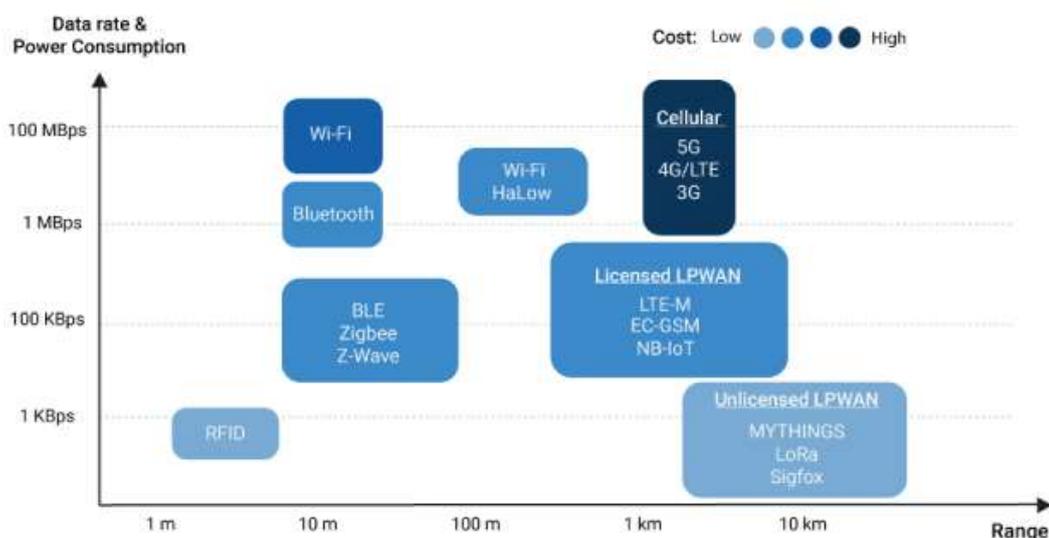
3.1 DESCRIÇÃO GERAL

Para que o sistema de coleta de lixo seja “inteligente” e mais eficiente é necessário monitorar o nível de lixo dentro de cada lixeira/contêiner da cidade e sabendo da sua localização, possibilitar uma otimização da rota de coleta, fazendo com que os caminhões percorram o caminho de menor distância economizando tempo e recursos para este fim.

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado para medir o nível de resíduos dentro de um contêiner de lixo. Para a leitura do nível de resíduos utilizou-se um sensor ultrassônico e para o envio e recebimento das informações um módulo de comunicação *LoRa*.

Como a aplicação do sistema é em contêineres de lixo, é necessário que a alimentação seja através de bateria, logo o baixo consumo energético é essencial para que o dispositivo possa operar por longo tempo sem a necessidade de manutenção. Considerando essa principal restrição, realizou-se um estudo das principais redes de comunicação *IoT* relacionando consumo energético, taxa de transferência de dados e distância de cobertura, onde foi escolhido utilizar a comunicação *LoRa* que foi desenvolvida especificamente para aplicações *IoT LPWAN (Low Power Wide Area Network)* que visam o longo alcance de comunicação e o baixo consumo de energia. A Figura 7 mostra um comparativo de consumo e alcance entre tecnologias *wireless*.

Figura 7 – Comparativo consumo e alcance entre tecnologias *wireless*

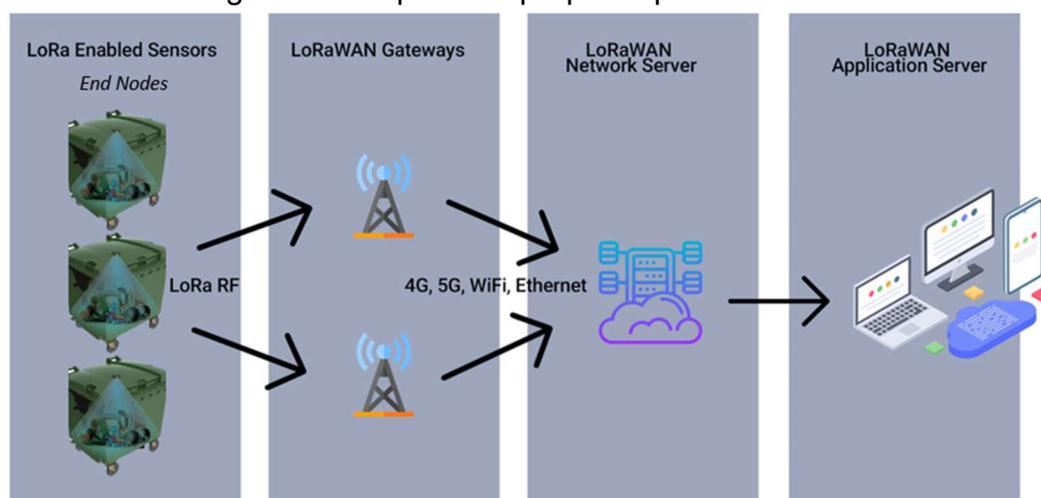


Fonte: BehrTech (2022)⁶.

Como geralmente o preenchimento do contêiner de lixo demora alguns dias e por não ser uma informação que necessite de atualização constante, será estimada uma frequência para leitura e atualização do nível de resíduo. O sistema embarcado fará a leitura em períodos pré-determinados, ficando o restante do tempo em modo *sleep*, visando também a otimização do consumo de energia.

A arquitetura proposta é baseada no protocolo LoRaWAN, demonstrada na Figura 8.

Figura 8 – Arquitetura proposta para o sistema



Fonte: Adaptado de Manditereza (2022)⁷.

⁶ Disponível em: <https://behrtech.com/blog/6-leading-types-of-iot-wireless-tech-and-their-best-use-cases/>

⁷ Disponível em: <https://www.hivemq.com/blog/lorawan-and-mqtt-integrations-for-iot-applications-design/>

A arquitetura acima consiste em contêineres de lixo equipados com o sistema embarcado capaz de mensurar o nível de resíduo, *gateways LoRa* para recebimento dos dados da rede, servidor em nuvem para armazenamento dos dados e a aplicação *web* que consome e apresenta as informações

3.2 HARDWARE

Abaixo será apresentado os principais componentes utilizados no desenvolvimento do projeto conforme arquitetura da Figura 7.

3.2.1 Sensor ultrassônico HC-SR04

Devido ao baixo custo, facilidade de uso e disponibilidade no mercado, foi utilizado um sensor ultrassônico para mensurar o nível de resíduos presente dentro de um contêiner de lixo. O sensor HC-SR04 tem capacidade de medir distâncias na faixa de 2 – 400 cm e precisão de 3mm. O seu funcionamento se dá através de um transmissor que emite pulsos de 40 kHz e um receptor que recebe o eco do sinal sonoro. Com base no tempo entre envio do sinal e recebimento do eco, através da velocidade do som (343 m/s) podemos calcular a distância do objeto. O sensor será instalado na tampa do contêiner para medir o preenchimento da lixeira conforme a mesma for recebendo resíduos. Quanto mais resíduos tiver o contêiner, menor será a distância lida do sensor estimando assim o nível de preenchimento da mesma. O sensor mencionado é demonstrado na Figura 9.

Figura 9 – Sensor ultrassônico HC-SR04



Fonte: Filipeflop (2022)⁸.

A alimentação do sensor é de 5V e para realizar a leitura de distância é necessário gerar um pulso de 10 us no pino *Trigger* que faz com seja emitido a onda

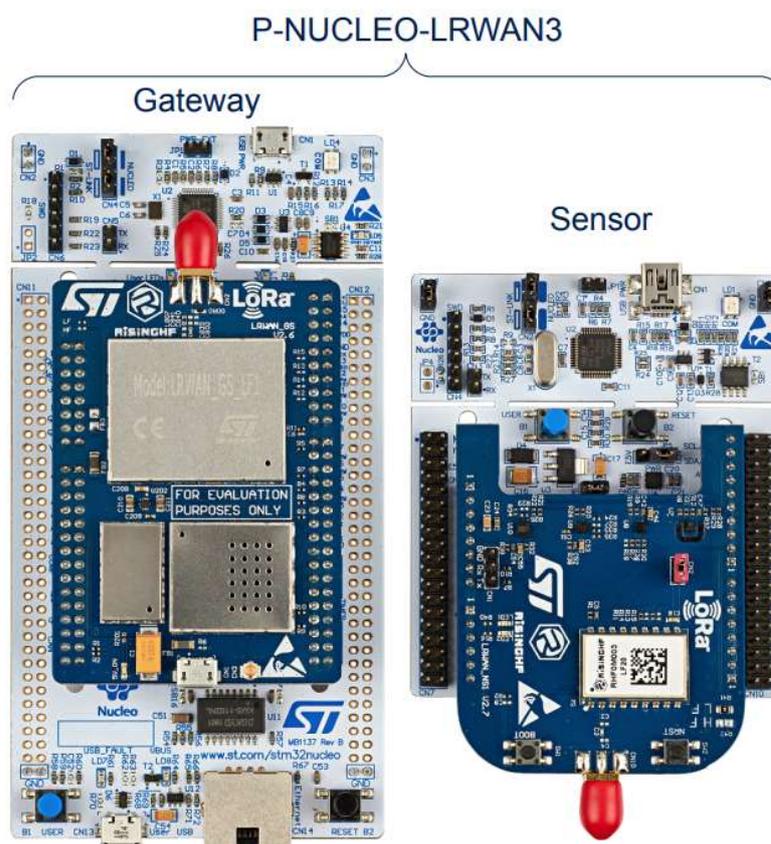
⁸ Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-distancia-ultrassonico-hc-sr04/>

sonora. A distância é então informada pelo tempo em que o pino *Echo* permanece em nível lógico alto.

3.2.2 Comunicação LoRa

Para a rede de comunicação *LoRa* foi utilizado o kit de desenvolvimento P-NUCLEO-LRWAN3 da empresa *STMicroelectronics*. Conforme observado na Figura 10, este kit é composto pelo *end-node* responsável pelo sensoriamento e pelo *gateway* responsável por receber as informações. O microcontrolador utilizado em ambos é o ARM 32 bits da ST, integrado ao rádio *LoRa* que opera em frequências de 433 e 470 MHz.

Figura 10 – Kit de desenvolvimento *LoRa* P-NUCLEO-LRWAN3



Fonte: STMicroelectronics (2022)⁹.

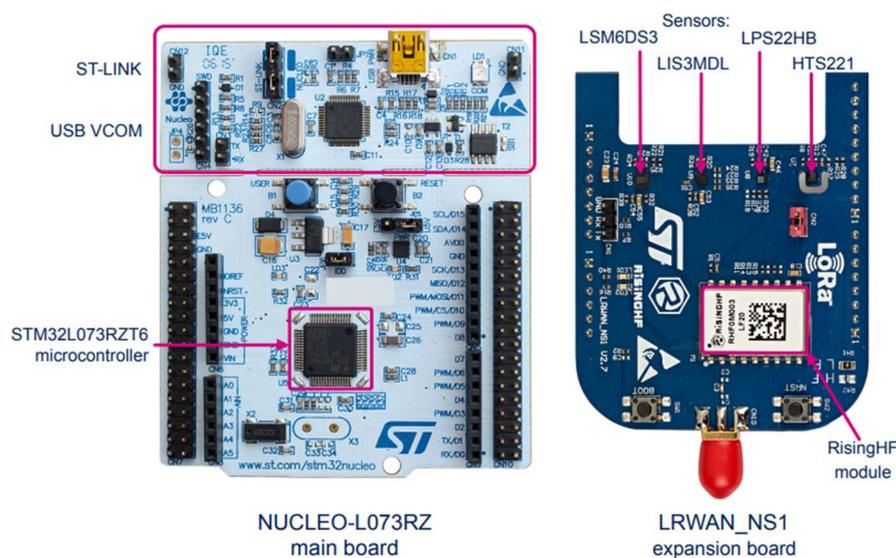
3.2.2.1 Sensor End-Node

O sensor que envia os dados *LoRa* para o *gateway* é composto pela placa NUCLEO-L073RZ que contém o microcontrolador STM32L073RZT6 conectado ao

⁹ Disponível em: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/p-nucleo-lrwan3.html>

módulo *LoRa* LRWAN_NS1 LF band (433/470 MHz) que usa o rádio SX1276 da Semtech. Este kit contém alguns sensores de temperatura e umidade (HTS221), pressão (LPS22HB), acelerômetro e giroscópio (LSM6DS3) e magnetômetro (LIS3MDL). A Figura 11 apresenta o conjunto.

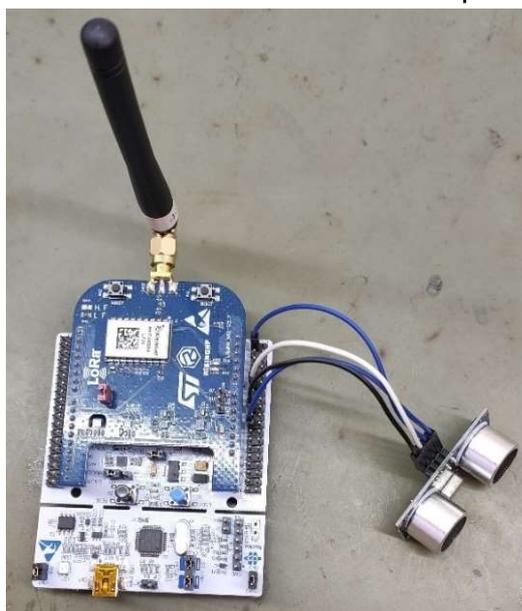
Figura 11 – End-Node *LoRa*



Fonte: STMicroelectronics (2022)¹⁰.

A conexão entre o *End Node* e o sensor ultrassom é ilustrada na Figura 12.

Figura 12 – Sensor ultrassom conectado a placa *End Node*



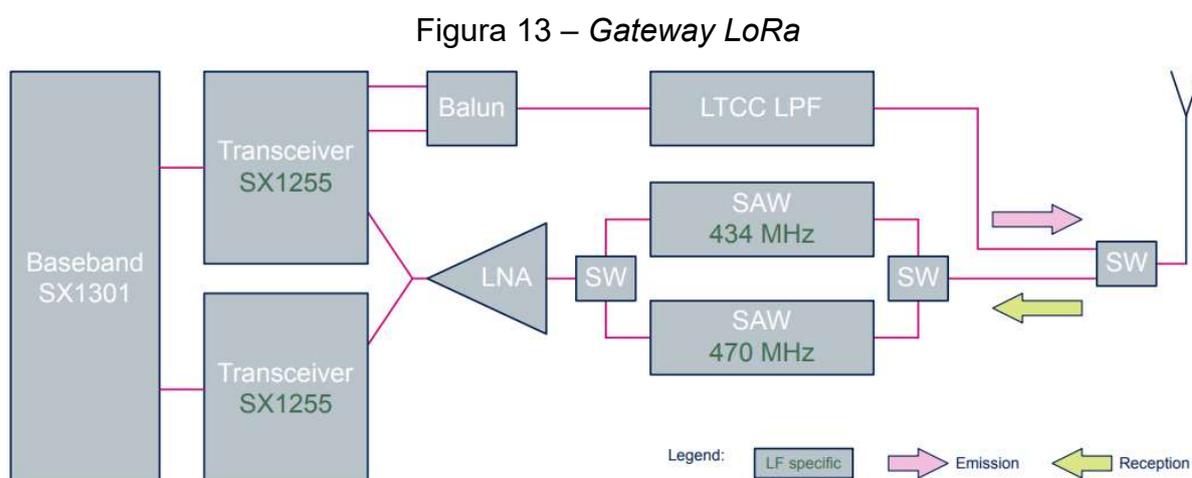
Fonte: O Autor (2022).

¹⁰ Disponível em: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/p-nucleo-lrwan3.html>

Esta conexão foi realizada utilizando um pino como saída para gerar o *trigger* (pulso de 10us) que faz com que seja emitido a onda sonora e um pino em configuração de entrada no modo *input capture* que mede o período em que o mesmo permanece em nível lógico alto. O tempo medido pela entrada *input capture* representa o tempo que a onda sonora percorreu no ar até o obstáculo.

3.2.2.2 Gateway

O *gateway* responsável pelo recebimento das informações *LoRa* e posteriormente envio dos dados ao servidor aplicação/*web* através da internet é composto pela placa NUCLEO-F746ZG que contém o microcontrolador STM32F746ZGT6 conectado ao módulo *LoRa* LRWAN_GS_LF1 LF band (433/470 MHz) que usa os rádios SX1301/SX1255 da *Semtech*. Este conjunto suporta o protocolo LoRaWAN para classe A e C com *Spreading Factor* (SF) de SF12 até SF7 e 8 canais. A Figura 13 apresenta a arquitetura de *hardware* do *gateway*.



Fonte: STMicroelectronics (2022)¹¹.

A arquitetura básica do gateway contém um controlador SX1301 que gerencia simultaneamente dois rádios LoRa SX1255 e um filtro SAW que sintoniza a frequência de operação com a antena.

¹¹ Disponível em: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/p-nucleo-lrwan3.html>

3.3 CONFIGURAÇÃO DA REDE LORA

Abaixo serão detalhados os procedimentos e passo a passo para configuração da rede *LoRa* e aplicação *web*.

3.3.1 Configuração do gateway

A programação e configuração do *gateway LoRa* do kit P-NUCLEO-LRWAN3 é realizada através de comandos AT via porta COM através da USB, conforme pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Porta serial para configuração do *gateway LoRa*

```

COM6 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
-----
VERSION: 2.1.7, Nov 6 2018
LOG: ON
AT ECHO: ON
BAUDRATE: 115200bps
MACADDR: 00:80:E1:01:59:85
ETHERNET: DHCP
DNS1: 114.114.114.114
DNS2: 8.8.8.8
NTP SERVER: 1.ubuntu.pool.ntp.org
EUI PADDING: {3, FF}, {4, FF}
GATEWAY ID: 0080E1FFFF015985
LORAWAN: Public
LORAWAN SERVER: sa1.loriot.io
UPLINK UDP PORT: 1780
DOWNLINK UDP PORT: 1780
CHANNEL0: 471500000, A, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL1: 471700000, A, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL2: 471900000, A, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL3: 472100000, A, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL4: 472300000, B, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL5: 472500000, B, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL6: 472700000, B, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL7: 472900000, B, SF7/SF12, 84125KHz (LORA_MULTI_SF)
CHANNEL8: OFF (LORA_STANDARD)
CHANNEL9: OFF (FSK)
-----
AT
+AT: OK
+AT+HELP
+HELP: OK

AT -- AT Ping

HELP -- Print command list
-> AT+HELP

FDEFAULT -- Restore factory default
-> AT+FDEFAULT

RESET -- Reset gateway
-> AT+RESET

SYS -- Check device configuration
-> AT+SYS

VER -- Version
-> AT+VER

LOG -- Logging
-> AT+LOG
-> AT+LOG=ON
-> AT+LOG=OFF

ECHO -- AT echo on/ff

```

Fonte: O Autor (2022).

A configuração da porta serial deve ser:

- a) *Baud Rate*: 115200;
- b) tamanho dados 8 bits;
- c) sem paridade;
- d) 1 stop bit.

Todos os comandos disponíveis estão listados na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Lista de comandos AT do *gateway*

Comando	Descrição
AT	Retorna +OK
HELP	Mostra menu ajuda
FDEFAULT	Volta para as configurações de fábrica
RESET	Reset do <i>gateway</i>
SYS	Mostra todas as configurações
VER	Solicita versão
LOG	Habilita log
ECHO	Ativa/Desativa echo
MAC	Configura endereço MAC
IP	Configura endereço IP
DNS	Configura endereço DNS
NTP	Configura endereço NTP
EUI	Configura endereço EUI
LORAWAN	Configura rede pública ou privada
PKTFWD	Configura endereço e porta do servidor
CH	Configura frequência de operação
BAUDRATE	Configura endereço <i>Baudrate</i>

Fonte: O Autor (2022).

As principais configurações para funcionamento do *gateway* são: frequência de operação, endereço do servidor/aplicação *web*, endereço MAC e o ID do *gateway* (EUI). Abaixo segue exemplos de comandos que foram utilizados para estas configurações:

- a) comando AT+CH=band: seta a frequência principal de operação do *gateway* e também de cada canal, onde o campo “band” deve conter o valor da frequência principal de operação conforme apresenta a Tabela 4. Comando que foi utilizado nesta configuração: AT+CH=CN470PREQUEL;

Tabela 4 - Banda de frequências para configurar *gateway*

CH	EU868	US915	EU433	CN780	AU915	AS923	KR920	CN470	CN470 Prequel	IN865
0	867.1	902.3	433.175	779.5	915.2	923.2	922.1	470.3	471.5	865.0625
1	867.3	902.5	433.375	779.7	915.4	923.4	922.3	470.5	471.7	865.2625
2	867.5	902.7	433.575	779.9	915.6	923.6	922.5	470.7	471.9	865.4625
3	867.7	902.9	433.775	780.1	915.8	923.8	922.7	470.9	472.1	865.6625
4	867.9	903.1	433.975	780.3	916.0	924.0	922.9	471.1	472.3	865.985
5	868.1	903.3	434.175	780.5	916.2	924.2	923.1	471.3	472.5	866.185
6	868.3	903.5	434.375	780.7	916.4	924.4	923.3	471.5	472.7	866.385
7	868.5	903.7	434.575	780.9	916.6	924.6	923.5	471.7	472.9	866.585
8	868.3 BW250 SF7	903.0 BW500 SF8	OFF	OFF	915.9 BW500 SF8	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
9	868.8 FSK 50 Kbps	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

Fonte: STMicroelectronics (2022)¹².

- b) AT+PKTFWD=address,port_up,[port_down]: configura o endereço do servidor para que assim seja possível acessar as informações enviadas pela rede *LoRa* e apresentar ao usuário através de uma interface gráfica. O *gateway* foi registrado no servidor da *Loriot*, uma plataforma de serviço para *IoT* disponível na internet e aberta a comunidade. Como o servidor no Brasil da *Loriot* possui endereço em São Paulo o comando utilizado nesta configuração foi: AT+PKTFWD=sa1.loriot.io,1780,1780;
- c) AT+MAC=mac_address: configura o endereço MAC do *gateway*. Este endereço será utilizado na configuração do servidor. O comando utilizado nesta configuração foi: AT+MAC=001122334455;
- d) AT+EUI=pos0,val0_hex,pos1,val1_hex: configura o ID do *gateway*, onde recomenda-se usar o MAC concatenado com dois valores hexadecimal. O comando utilizado foi: AT+EUI=3,FF,4,FF. Desta forma o ID do *gateway* será 001122FFFF334455.

3.3.2 Configuração do sensor (*end-node*)

Como será utilizado o protocolo LoRaWAN para conexão do *end-node* na rede *LoRa*, o método de ativação/acesso a rede utilizado foi o *OTAA*. Para adicionar o

¹² Disponível em: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/p-nucleo-lrwan3.html>

sensor na rede *LoRa* é necessário conhecer os parâmetros de *DevEUI*, *AppEUI* e *AppKey* do módulo utilizado. Através de uma comunicação serial (porta UART) é possível extrair essas informações do módulo *LoRa*. Conectando o módulo em um conversor USB Serial e através de uma porta COM, foi enviado os seguintes comandos:

- a) AT+EUI;
- b) AT+APPEUI;
- c) AT+AK.

A configuração da porta serial deve ser:

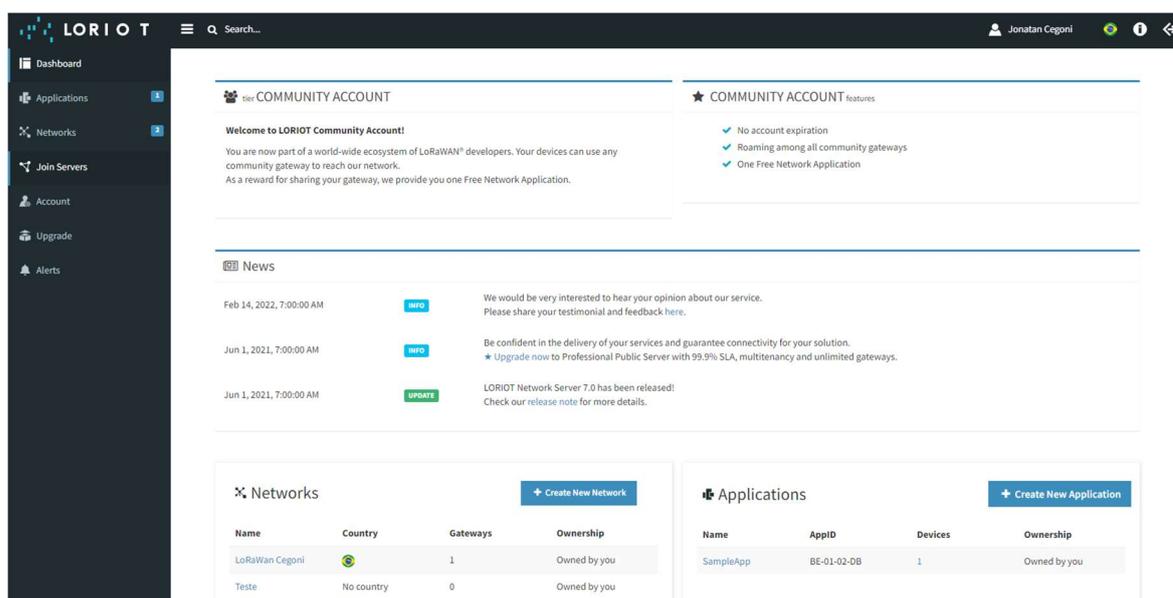
- a) *Baud Rate*: 9600;
- b) tamanho dados 8 bits;
- c) sem paridade;
- d) 1 stop bit.

O *firmware* utilizado para leitura dos sensores e gerenciamento da rede LoRaWAN têm como base a biblioteca e I-CUBE-LRWAN¹³ disponibilizado pela própria *STMicroelectronics*. Esta biblioteca possui a configuração e protocolo de uma rede LoRaWAN para a família de microcontroladores STM32 da empresa. Na seção 3.4 será detalhado sobre o *firmware* utilizado.

3.3.3 Configuração do servidor

O *Network Server* realiza o pré-processamento dos dados de uma rede *IoT*, e também faz o roteamento de mensagens entre dispositivos e aplicações. Dentre as opções disponíveis, foi escolhido a plataforma *Loriot*, que oferece uma série de ferramentas que facilitam a implementação e configuração dos *End Nodes* e *gateways*. Para iniciar a aplicação é necessário entrar no site <https://www.loriot.io/> e criar uma conta no servidor da região desejada, que para este trabalho foi São Paulo, Brasil. A versão gratuita permite o registro de um número limitado de dispositivos. A Figura 15 apresenta a tela inicial da plataforma *Loriot*.

¹³ Disponível em: <https://www.st.com/en/embedded-software/i-cube-lrwan.html?rt=um&id=UM2587>.

Figura 15 – Plataforma *Loriot*

Fonte: O Autor (2022).

Após login na plataforma *web* é possível criar uma rede e cadastrar os dispositivos da rede. Para o *gateway*, foram realizados os passos abaixo:

- a) clicar em [+ *Create New Network*] para criar uma nova rede *LoRa*, onde é necessário inserir as informações de localização e nome da rede. Finalizar a rede clicando em [*Create LoRaWAN® new network*];
- b) cadastrar o *gateway*, clicando em [+ *Add Gateway*] inserindo as configurações de MAC, ID, localização e frequência do mesmo. Para finalizar o cadastro clicar em [*Register Packet Forwarder STM gateway*].

Abaixo são descritos os passos para cadastro do *End-Node* que enviará as informações *LoRa*:

- a) na tela [*Loriot Dashboard*], clicar em [*Application*] -> [*SampleApp*] -> [*Enroll Device*];
- b) selecionar método de ativação na rede que é OTAA;
- c) cadastrar as informações do dispositivo que são: DevEUI, AppEUI and AppKey;
- d) clicar em [*Enroll*];
- e) o sensor *End-Node* fica visível em [*Devices*]. Resetando o dispositivo é possível visualizar a conexão.

3.3.4 Configuração da aplicação

Na plataforma *Cayenne* é possível configurar a interface gráfica que será utilizada pelo usuário, ficando assim mais intuitivo a interpretação das informações que chegam até o servidor da rede *LoRa*.

O padrão *Cayenne Low Power Payload* (LPP) é um formato de dados desenvolvido para LPWAN, visando facilitar a identificação de cada tipo de dado/sensor pela aplicação. Para a configuração e uso da plataforma foi criado uma *Websocket* no servidor que gera um pacote de saída no padrão LPP que será utilizado pela interface gráfica *Cayenne* seguindo os passos abaixo.

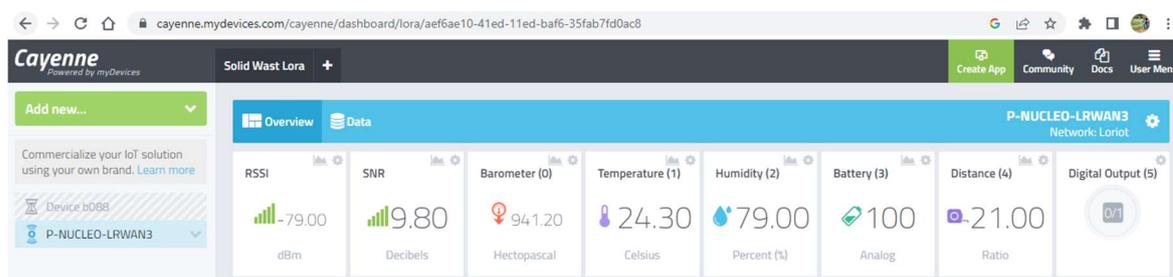
- a) na tela inicial, clicar em [*Loriot Dashboard*] -> [*Application*] -> [*SampleApp*] -> [*Output*];
- b) clicar em [*myDevices Cayenne*] e em [*Add new output*].

E por fim deve-se criar a aplicação usando a plataforma *Cayenne* conforme os passos abaixo:

- a) acessando o site <https://mydevices.com/> e criar uma conta;
- b) adicionar rede *LoRa* dentre as opções de *IoT* da plataforma;
- c) dentro da categoria *LoRa*, escolher o *network server Loriot*.
- d) configurar a rede com as seguintes informações:
 - nome;
 - DevEUI;
 - *Loriot* server (sa1.loriot.io,1780,1780);
 - *Loriot* AppID (acessando [*Loriot Dashboard*] -> [*Application*] -> [*SampleApp*]: *Application ID*);
 - *Loriot security token* (acessando [*Loriot Dashboard*] -> [*Application*] -> [*SampleApp*] -> [*Access Token*]: *Authentication Tokens*);
 - configurar se o dispositivo é móvel (usa GPS) ou não;

Na Figura 16 é demonstrado um exemplo de aplicação da interface *Cayenne*.

Figura 16 - Cayenne dashboard



Fonte: O Autor (2022).

Na tela cima pode-se identificar algumas informações que foram enviadas pelo *End Node*, como por exemplo, pressão, umidade, temperatura e distância. Estes dados foram mensurados pelos sensores implementados na placa. Estas informações estão detalhadas nos próximos tópicos deste trabalho.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

O *firmware* utilizado no *gateway* não é possível de ser alterado, apenas pode ser atualizado via conexão USB com o computador. Este pode ser baixado na sua última versão compilada no site da *STMicroelectronics*. Sua configuração é feita via comunicação serial apresentada na seção 3.3.1.

O *firmware* do *End Node* tem como base a biblioteca e I-CUBE-LRWAN¹⁴ disponibilizado pela própria *STMicroelectronics*. Esta biblioteca possui as principais configurações da rede LoRaWAN. É possível configurar o método de conexão na rede (OTAA ou ABP), frequência de operação, frequência de envio dos pacotes de dados, modo de ativação de baixo consumo, entre outras configurações. A Figura 17 mostra um exemplo de definições do código. A partir deste código base, implementou-se novas funcionalidades como a leitura do sensor ultrassom.

¹⁴ Disponível em: <https://www.st.com/en/embedded-software/i-cube-lrwan.html?rt=um&id=UM2587>.

Figura 17 – Configuração arquivo config.h

```

#ifndef CAYENNE_LPP
#define LORAWAN_APP_PORT 99; /*LoRaWAN application port*/
#else
#define LORAWAN_APP_PORT 2; /*LoRaWAN application port*/
#endif

#define LORAWAN_CONFIRMED_MSG ENABLE /*LoRaWAN confirmed messages*/

#define SENSORS_MEASURE_CYCLE 10000 /*Periode to do sensors measurement*/

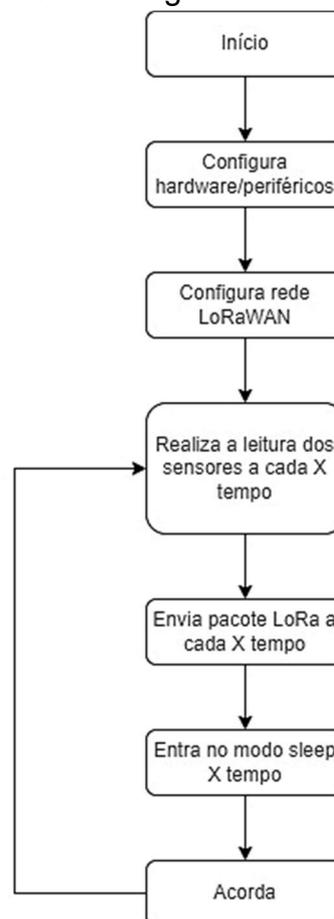
#define JOIN_MODE OTAA_JOIN_MODE /*ABP_JOIN_MODE */ /*LoRaWan join methode*/

#ifndef USE_LRWAN_NS1
#define FREQ_BAND /*EU868*/ CN470PREQUEL
#endif

```

Fonte: O Autor (2022).

Quanto ao *firmware* de uma maneira geral foi desenvolvido um algoritmo que busca otimizar o consumo de energia, realizando a leitura do nível de resíduo através do sensor de ultrassom em períodos específicos, como por exemplo a cada uma hora. No restante do tempo o dispositivo permanecerá em modo *sleep*. O fluxograma básico do *firmware* pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do *firmware*

Fonte: O Autor (2022).

3.5 TESTES E ENSAIOS

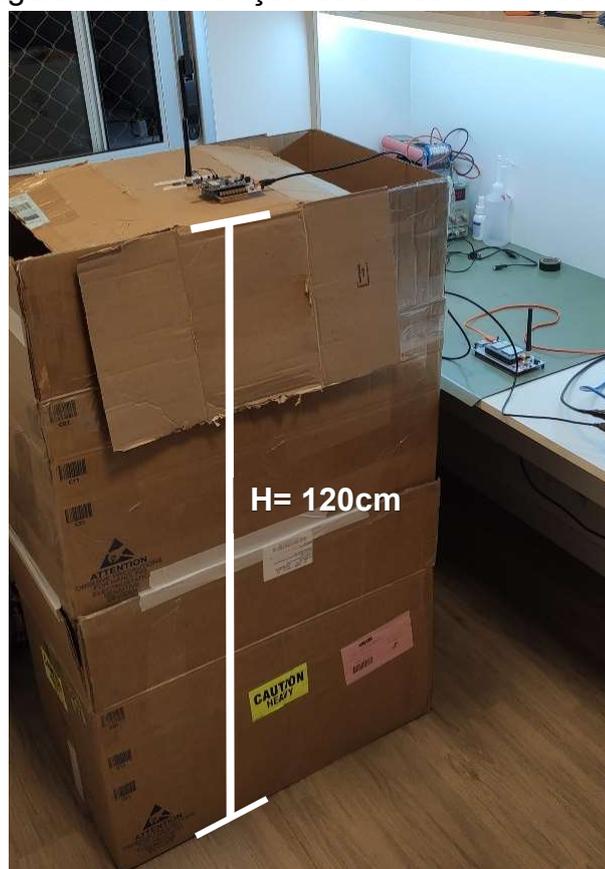
Foram realizados diversos testes e ensaios, visando avaliar as principais questões de análise do sistema proposto, que são:

- a) funcionamento do sistema e da comunicação *LoRa*;
- b) cobertura da rede *LoRa* implementada;
- c) consumo de energia do *End-Node* (sensor);

3.5.1 Funcionamento do sistema e da comunicação LoRa

Para o teste da aplicação e conceito proposto, foi utilizado caixa de papelão para montar uma estrutura semelhante a um container de lixo, conforme ilustrado na Figura 19. O conjunto do sensor com a placa *End Node* foi posicionado no topo da caixa de papelão, simulando estar fixo na tampa da lixeira. Para simular a variação do preenchimento da lixeira, através de uma abertura lateral foi possível mudar a distância do fundo da caixa até o dispositivo variando diferentes alturas dentro da caixa, simulando assim diferentes volumes de resíduos medido pelo sensor ultrassom.

Figura 19 – Simulação de um contêiner de lixo



Fonte: O Autor (2022).

Este ensaio inicial foi realizado exclusivamente em bancada, com o objetivo de avaliar o funcionamento do sistema, desde as coletas de medidas simulando a variação do preenchimento da lixeira, até o envio de dados ao servidor.

3.5.2 Cobertura da rede LoRa implementada

Para simular a rota realizada pelo veículo de coleta de lixo, e o envio e recebimento de dados, bem como a análise do alcance de comunicação entre o *End Node* e o *gateway* foi realizado um teste da seguinte maneira:

- a) o *gateway* foi instalado na janela do décimo andar de um prédio no bairro Panazzolo em Caxias do Sul – RS, conforme ilustra a Figura 20;
- b) o hardware do *End Node* foi alimentado através de um carregador automotivo conectado a uma porta 12V do carro que percorreu alguns pontos da cidade;
- c) em cada ponto foram armazenadas as informações enviadas ao servidor *Loriot*, as apresentadas na *web* via plataforma da *Cayenne*, conforme visualizado nas Figuras 21 e 22 respectivamente, para posteriormente realizar a análise dos resultados obtidos.

Figura 20 – Instalação do *gateway* na janela do prédio



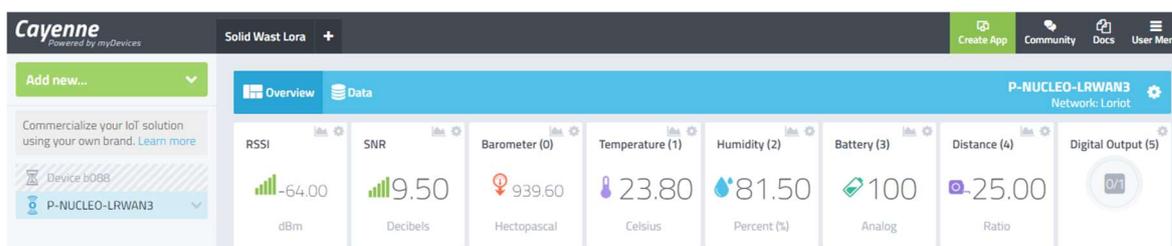
Fonte: O Autor (2022).

Figura 21 – Pacotes de dados recebidos pelo servidor *Loriot*

Command	DevAddr	MIC	FCNT	Len	Time	SF	Freq(MHz)	RSSI(dBm)	SNR(dB)	BW(kHz)	TOA(ms)	FCTRL	Port	Encoded Packet
data	308CD2C9	4269421C	60	30	2022-12-07T01:24:59.598Z	9	472.300	-72	11.3	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAAAPAI5kInyIMZ
data	308CD2C9	2B9E8375	59	30	2022-12-07T01:24:54.629Z	9	472.100	-73	11	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAAOwAICguLq5IXZ9
data	308CD2C9	6E36BAB0	58	30	2022-12-07T01:24:49.658Z	9	472.700	-72	12.3	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAAOgAIKevel4f4+X3
data	308CD2C9	4B221D6A	57	30	2022-12-07T01:24:44.696Z	9	472.300	-70	9.5	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAAOQAIZasGx4j+Z+
data	308CD2C9	0CBDEE5F	56	30	2022-12-07T01:24:39.736Z	9	472.900	-77	10	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAAOgAIGfKtcg0anGi
data	308CD2C9	C4FE0571	55	30	2022-12-07T01:24:34.798Z	9	472.900	-72	10.8	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAANwAlwLL21uXeFr
data	308CD2C9	E5C62C20	54	30	2022-12-07T01:24:29.828Z	9	471.900	-73	12.3	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAANgAI4I6d/zfNBdf
data	308CD2C9	C1ABC5E4	53	30	2022-12-07T01:24:24.858Z	9	471.700	-71	12.3	125	226.3	0x0	8	QMnSjDAANQAINpR3NwCAV

Fonte: O Autor (2022).

Figura 22 – Informações recebidas na interface gráfica Cayenne



Fonte: O Autor (2022).

As informações apresentadas na *web* via plataforma da *Cayenne* são:

- RSSI: intensidade do sinal recebido. Implementado pelo protocolo LoRaWAN;
- SNR: relação sinal-ruído. Implementado pelo protocolo LoRaWAN;
- pressão: valor lido pelo sensor LPS22HB do *End Node*;
- temperatura: valor lido pelo sensor HTS221 do *End Node*;
- umidade: valor lido pelo sensor HTS221 do *End Node*;
- bateria: é um dado que foi previsto no protocolo, porém não foi implementado fisicamente. É enviado o valor fixo de 100%;
- distância: é o valor lido pelo sensor ultrassom HC-SR04.

3.5.3 Consumo de energia do *End-Node*

Na aplicação real em contêiner de lixo será necessário o uso de bateria para alimentação do *End Node*, por isso é importante avaliar o consumo do mesmo. Para esta análise alimentou-se o dispositivo e com um amperímetro em série e foi verificado o consumo em modo de operação/envio de dados e também no modo de baixo consumo (*sleep*) como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Corrente do *End Node*



Fonte: O Autor (2022).

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através dos ensaios realizados com o protótipo desenvolvido.

4.1 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA E DA COMUNICAÇÃO LORA

Realizando os testes citados no item 3.5.1 foram obtidos dados de leitura das variações de distâncias do sensor até o conteúdo da lixeira simulada. Para validar a confiabilidade das medições de distância realizadas pelo sensor, foi realizado uma comparação entre os valores de distância real e o valor medido pelo sensor de ultrassom. A comparação entre os dois valores é demonstrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação valor de distância real versus distância lida

Distância real (m)	Distância lida (m)	Erro
1,2	1,24	3,33%
1,0	1,06	6,00%
0,8	0,87	8,75%
0,6	0,62	3,33%
0,4	0,49	22,50%
0,2	0,28	40,00%

Fonte: O Autor (2022).

Nota-se que quanto menor a distância, maior é o erro na medição, situação que é esperada, pois sabe-se que para uma maior precisão em baixas distâncias seria necessário um sensor de maior frequência. Como a aplicação não exige precisão para distâncias menores que 30 cm, este sensor atende o requisito da proposta de trabalho. Desta forma, com relação ao teste de funcionamento em bancada o sistema se mostrou eficiente e preciso em medir as diversas variações de altura do conteúdo da lixeira.

4.2 COBERTURA DA REDE LORA

Realizando os testes e ensaios de cobertura citados no item 3.5.2, em cada ponto de parada foram armazenados os pacotes de dados demonstrados através do servidor *Loriot e da plataforma web Cayenne*, cujos dados de distância até o gateway e intensidade do sinal (RSSI) estão demonstrados na Tabela 6. Para melhor análise dos resultados, o sensor foi programado para enviar as informações até o *gateway* de 30 em 30 segundos.

Tabela 6 – Teste de alcance

Localização	Distância do Gateway (Km)	RSSI (dBm)
Ponto 1	0,10	-64
Ponto 2	0,60	-79
Ponto 3	1,10	-81
Ponto 4	1,78	-91
Ponto 5	2,00	-101

Fonte: O Autor (2022).

Com base nos testes, notou-se que a partir do ponto 5 a intensidade do sinal caiu bastante e a comunicação começou a ficar intermitente, por isso, podemos assumir que a maior distância alcançada pelo sistema foi de aproximadamente 2 Km (Ponto 5) conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Maior distância de conexão encontrada



Fonte: O Autor (2022).

Podemos observar que esta distância foi alcançada devido a geografia do local dos testes, onde temos uma área verde (sem grandes construções) entre o ponto do *gateway* até o *end node*. Em locais onde existem prédios entre o *gateway* e o *end node* nota-se uma significativa redução do alcance da comunicação.

4.3 CONSUMO DE ENERGIA

Realizando os testes e ensaios de consumo descritos no item 3.5.3 deste trabalho, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do teste de consumo

Operação	Consumo
Normal	~50mA
Envio de dados	~87mA
<i>Sleep</i>	~10mA

Fonte: O Autor (2022).

Nota-se que o consumo de corrente reduziu cerca de 5 vezes em modo *sleep*. Para utilização de uma bateria, considerando um consumo médio de 20mA um *power bank* com capacidade de 3000 mAh, o dispositivo teria autonomia para aproximadamente 1 semana (3000 mAh / 20 mA = 150h). Para que seja viável a aplicação deste sistema em uma situação real, seria necessário buscar uma solução para reduzir o consumo do *hardware*.

4.4 CUSTOS

O kit P-NUCLEO-LRWAN3 utilizado neste projeto foi adquirido pelo valor de \$99, que com impostos de importação ficou em aproximadamente R\$1500,00. Visto que este kit já contempla um *gateway* LoRaWAN de 8 canais com configuração automática de *Spreading Factor* (SF12 até SF7), antena e alta sensibilidade, ou seja, pode ser utilizado em uma instalação comercial real, o custo é relativamente baixo.

5 CONCLUSÃO

Através do estudo de caso e de uma série de conceitos como gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Cidades Inteligentes (*Smart Cities*) e Eletrônica Embarcada, este trabalho apresentou um protótipo de um sistema inteligente de monitoramento de resíduos em contêiners de lixo.

Esse sistema contempla um hardware chamado de sensor responsável por fazer a captação dos dados e envio das informações via *LoRa*, um *gateway* responsável por receber os dados e enviar para um servidor que é responsável por armazenar os dados, e, por fim, uma aplicação responsável por exibir informações das lixeiras em tempo real.

O trabalho atingiu seu objetivo em desenvolver um protótipo para mensurar o nível de resíduos dentro de um contêiner de lixo e enviar essas informações através de uma rede *LoRa*. O dispositivo conseguiu ler e enviar os dados para o servidor, onde os mesmos foram formatados e direcionados para uma interface na web ficando disponíveis remotamente. A tecnologia *LoRa* se apresenta como uma ótima alternativa frente a outros meios de comunicação como o GSM/GPRS, por exemplo, pois é mais barata e não necessita de um plano de dados, apenas uma conexão com a internet para o *gateway*.

O sistema desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado na otimização da coleta de resíduos de uma determinada cidade. A prefeitura e empresas responsáveis pela coleta e gerenciamento de lixo podem usar os dados gerados para aprimorar as rotas e a logística na coleta, reduzindo assim o custo operacional da atividade.

Dessa maneira conclui-se que a tecnologia LoRaWAN traz benefícios para soluções de *IoT* principalmente quanto ao alcance da rede, baixo consumo energético, baixo custo e pouca necessidade de manutenção. Os resultados apresentados aqui podem servir de referência para demais estudos e desenvolvimento de soluções e aplicações *IoT* em *Smart Cities* (cidades inteligentes). Realizando alguns ajustes no projeto e utilizando outros sensores, pode-se pensar em monitorar outros insumos, matérias e substâncias, tais como água, óleo, gás, etc.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, visando agregar mais funcionalidades e valor ao sistema, a seguir será elencado alguns aspectos relevantes que podem servir como base para continuidade e melhoria do projeto.

Para maior precisão e confiabilidade da leitura do volume de resíduo presente dentro da lixeira, pode-se utilizar mais sensores ultrassom instalados em diferentes posições ou até mesmo combinar outros tipos de sensor como, por exemplo, uma célula de carga para mensurar o peso do resíduo dentro da lixeira.

Através do histórico e das informações que chegam em tempo real no servidor, seria possível desenvolver um algoritmo com técnica de inteligência artificial que automaticamente prevê os melhores horários e rotas para se realizar a coleta de resíduos. Essa funcionalidade traria mais agilidade e eficiência para o gerenciamento da coleta.

Uma aplicação real exige que diversos dispositivos estejam conectados simultaneamente, por isso, é interessante desenvolver e testar uma infraestrutura com diversos *End Nodes* conectados ao mesmo tempo, avaliando o alcance, segurança, taxa de comunicação e demais características. Para simular e analisar o desempenho da rede pode-se utilizar o software *LoRaSim*, por exemplo, que auxilia na simulação de múltiplas conexões. Além disso pode-se pensar em aumentar a cobertura de comunicação utilizando mais *gateways* em diferentes pontos.

Para otimização da autonomia da bateria, pode-se desenvolver um sistema embarcado com hardware e software específico para a aplicação e com isso avaliar uso de energia solar para a carga do sistema.

Quando utilizado o protocolo LoRaWAN, todas as mensagens recebidas pelos *gateways* são enviadas para um servidor na nuvem ficando disponíveis na internet. Apesar da rede já contemplar alguns mecanismos de segurança da informação no próprio protocolo, pode-se desenvolver um sistema de criptografia das mensagens *LoRa*, aumentando assim a segurança dos dados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004:** Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso em: 05 mai. 2022.

MAMUN, Md. Abdulla Al; HANNAN, Mahammad A.; HUSSAIN, Aini; BASRI, Hassan. **Integrated Sensing Systems and Algorithms for Solid Waste Bin State Management Automation**. v. 15, n. 1, p. 561-567, jan. 2015. IEEE Sensors Journal. doi: 10.1109/JSEN.2014.2351452.

AMORIM, Arivaldo de et al. **Cidades Inteligentes e City Information Modeling [Smart Cities and City Information Modeling]**. 2016.

AMORIM, Arivaldo Leão de. **Cidades Inteligentes e City Information Modeling. Blucher Design Proceedings**, v. 3, n. 1, p. 481-488, 2016.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre os Crimes Ambientais.

CARRO, Luigi; WAGNER, Flávio Rech. **Sistemas computacionais embarcados**. Jornadas de atualização em informática. Campinas: UNICAMP, 2003.

CUNHA, Alessandro F. **O que são sistemas embarcados**. Saber Eletrônica, v. 43, n. 414, p. 1-6, 2007.

CUNHA, Maria Alexandra et al. **Smart cities: transformação digital de cidades**. 2016.

CHASE, Otavio; ALMEIDA, F. **Sistemas embarcados**. Mídia Eletrônica. Página na internet:< www.sabajovem.org/chase>, v. 10, n. 11, p. 13, 2007.

ERICSSON. **Internet of Things forecast**. 2016. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/mobility-report/internet-of-things-forecast>>.

FACCIONI FILHO, Mauro. **Internet das coisas**. Unisul Virtual, 2016.

GARCIA, P. S. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. **Tecnologias emergentes de conectividade na IoT: Estudo de redes lpwan**. XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS-SBrT2017, p. 1009–1013, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. IBGE: Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>>. Acesso em: 7 maio 2022.

KAMAL, Raj. **Embedded systems: architecture, programming and design**. Tata McGraw-Hill Education, 2011.

KWASME, H.; EKIN, S. **Rssi-based localization using lorawan technology**. IEEE Access, IEEE, v. 7, p. 99856–99866, 2019.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN 1.1 Specification**. LoRa Alliance. 2017, p. 101. URL: https://loraalliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_v1.1.pdf. Acesso em: 23 abril 2022.

LORA ALLIANCE. **A technical overview of LoRa® and LoRaWAN** LORA ALLIANCE, 2015. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/>. Acesso em: 15 abril 2022.

MCLEOD, Fraser et al. **Dynamic collection scheduling using remote asset monitoring: Case study in the UK charity sector**. Transportation research record, v. 2378, n. 1, p. 65-72, 2013.

MEKKI, Kais et al. **A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment**. ICT express, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2019.

MONTEIRO, José Henrique Penido. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. 2001.

MWARE, Eric M. **A Smart-bin prototype for in-house waste management**. 2017. Tese de Doutorado. Strathmore University.

ROSE, Karen; ELDRIDGE, Scott; CHAPIN, Lyman. **The internet of things: An overview**. The internet society (ISOC), v. 80, p. 1-50, 2015.

SANTOS, Bruno P. et al. **Internet das coisas: da teoria à prática**. 2016.

SCHALCH, Valdir et al. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. São Carlos, 2002.

SEMTECH. **LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview**. 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: 06 maio 2022.

TEIXEIRA; ALMEIDA. **Rede LoRa e Protocolo LoraWan Aplicados na Agricultura de Precisão no Brasil**. UTFPR, 2017. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8436/1/PG_COELE_2017_2_01.pdf>. Acesso em: 05 abril 2022.

ZANELLA, Andrea et al. **Internet of things for smart cities**. IEEE Internet of Things journal, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2014.

ZIKRIA, Yousaf Bin et al. **Next-generation internet of things (IoT): Opportunities, challenges, and solutions**. Sensors, v. 21, n. 4, p. 1174, 2021.

WILSON, David Curran et al. **Global waste management outlook**. UNEP, 2015.

WHITMORE, Andrew; AGARWAL, Anurag; DA XU, Li. **The Internet of Things—A survey of topics and trends**. Information systems frontiers, v. 17, n. 2, p. 261-274, 2015.

ROSSATO, Jonas; SPANHOL, Fabio Alexandre; DE CAMARGO, Edson Tavares. **Implantação e avaliação de uma rede sem-fio de longo alcance e baixa potência para cidades inteligentes**. Anais do IV Workshop de Computação Urbana. SBC, 2020. p. 192-205.

KANG, Kai Dean et al. **Electronic waste collection systems using Internet of Things (IoT): Household electronic waste management in Malaysia**. Journal of cleaner production, v. 252, p. 119801, 2020.

ATAYERO, Aderemi A. et al. **Cloud based IoT-enabled solid waste monitoring system for smart and connected communities**. International Journal of Civil Engineering and Technology, v. 10, n. 2, p. 2308-2315, 2019.

BABY, Cyril Joe et al. **Smart bin: An intelligent waste alert and prediction system using machine learning approach**. In: 2017 international conference on wireless communications, signal processing and networking (WiSPNET). IEEE, 2017. p. 771-774.

MONISHAN, M. Vishnu; PANKAJAVALLI, P. B.; KARTHICK, G. S. **Implementation of novel optimal scheduling and routing algorithm on IoT-based garbage disposal system**. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, v. 8, n. 7, p. 768-772, 2019.

MWARE, Eric M. **A Smart-bin prototype for in-house waste management**. 2017. Tese de Doutorado. Strathmore University.